14°

Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

Η Γεωργική Μηχανική στην εποχή της τεχνητής νοημοσύνης και των drone

Βόλος, 2025

Τόμος Πρακτικών

ΕΓΜΕ
HelAgEng

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ
HELLENIC SOCIETY of AGRICULTURAL ENGINEERS

14^{Ο} Πανελλήνιο Συνέδριο

Η Γεωργική Μηχανική στην εποχή της τεχνητής νοημοσύνης και των drone

Υπο την αιγίδα του:

Τμήματος Γεωπονίας,
Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος
του Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Αγριά Βόλου, 21-22 Οκτωβρίου 2025

Εκδότης: Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος ΕΓΜΕ

Επιμέλεια έκδοσης: Χρήστος Καβαλάρης
Σοφία Κούκου

Επιμέλεια εξωφυλου: Χρήστος Καβαλάρης

1η Έκδοση
Βόλος 2025

ISBN : 978-618-82194-2-7

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η σύγχρονη γεωργία, σε διεθνές αλλά και εθνικό επίπεδο, αντιμετωπίζει ένα σύνολο πολυσύνθετων προκλήσεων που επηρεάζουν άμεσα τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητά της. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, η περιορισμένη διαθεσιμότητα εδαφικών και υδατικών πόρων, η ενεργειακή κρίση και η αύξηση του κόστους των εισροών καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για βελτιστοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών. Παράλληλα, η μείωση του αγροτικού εργατικού δυναμικού, οι αυξανόμενες απαιτήσεις για ποιοτικά και ασφαλή αγροτικά προϊόντα και η πίεση για μετάβαση σε πιο αειφορικά και ανθεκτικά παραγωγικά συστήματα δημιουργούν ένα νέο πλαίσιο προκλήσεων για τον αγροτικό τομέα και, κατ' επέκταση, για τη γεωργική μηχανική ως επιστημονικό πεδίο.

Το 14ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΓΜΕ με θέμα «Η Γεωργική Μηχανική στην εποχή της τεχνητής νοημοσύνης και των drone» φιλοδοξεί να αναδείξει τους τρόπους με τους οποίους τεχνολογίες αιχμής, όπως η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη, η ανάλυση μεγάλων δεδομένων, τα ψηφιακά και τα ρομποτικά συστήματα, η τηλεπισκόπιση, τα drones κλπ εξελίσσουν μια σειρά από κλασικά αντικείμενα της γεωργικής μηχανικής όπως τα γεωργικά μηχανήματα και οι γεωργικές κατασκευές, η εκμηχάνιση της γεωργίας, η αειφόρος διαχείριση και αξιοποίηση των εδαφικών και υδατικών πόρων και της ενέργειας, η αποθήκευση, η διακίνηση και επεξεργασία των αγροτικών προϊόντων και πολλά άλλα, ώστε αυτά να ανταποκριθούν και να προσαρμοσθούν στις σύγχρονες απαιτήσεις για επαρκή, ασφαλή και υγιή τρόφιμα και αγαθά, διατήρηση των φυσικών πόρων, προστασία του περιβάλλοντος και ανθεκτικότητα στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες.

Παράλληλα, το Συνέδριο φιλοδοξεί να κινητοποιήσει και να συνενώσει ανθρώπους από διαφορετικούς χώρους: ακαδημαϊκούς, ερευνητές, επαγγελματίες του πρωτογενούς τομέα, εκπροσώπους της βιομηχανίας και του εμπορίου, καθώς και στελέχη που εμπλέκονται στη χάραξη και υλοποίηση πολιτικής. Στόχος αυτής της σύμπραξης είναι η πρακτική αξιοποίηση των πορισμάτων του Συνεδρίου μέσω συνεργασιών και διεπιστημονικών προσεγγίσεων.

Στο παρόν τεύχος περιλαμβάνονται 76 περιλήψεις εργασιών, οι οποίες καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα κλασικών και σύγχρονων θεματικών πεδίων που άπτονται του ευρύτερου τομέα της Γεωργικής Μηχανικής.

Βόλος, Οκτώβριος 2025
Χρ. Καβαλάρης
Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής του Συνεδρίου

Οργανωτική επιτροπή

Χ. Καβαλάρης – Μέλος ΕΔΙΠ ΠΘ, Ταμίας ΕΓΜΕ & Πρόεδρος Ο.Ε. Συνεδρίου
Ν. Κατσούλας – Καθηγητής ΠΘ, Πρόεδρος ΕΓΜΕ
Χ. Παπαϊωάννου – Καθηγήτρια ΠΘ, Αντιπρόεδρος ΕΓΜΕ
Β. Φράγκος – Καθηγητής ΑΠΘ, Μέλος ΔΣ ΕΓΜΕ
Θ. Κωτσόπουλος – Καθηγητής ΑΠΘ, Μέλος ΔΣ ΕΓΜΕ
Θ. Μπαρτζάνας – Καθηγητής ΓΠΑ, Μέλος ΔΣ ΕΓΜΕ
Δ. Κατέρης – Ερευνητής Β, ΕΚΕΤΑ, Γραμματέας ΕΓΜΕ
Α. Ταγαράκης – Ερευνητής Β. ΕΚΕΤΑ
Ε. Γκόλια – Καθηγήτρια ΑΠΘ
Ξ.Ε. Πανταζή – Αν. Καθηγήτρια ΑΠΘ
Α. Αγγελάκη – Επ. Καθηγήτρια ΠΘ (υπο διορισμό)
Β. Αντωνιάδης – Καθηγητής Π.Θ.
Ι. Γράβαλος – Καθηγητής ΠΘ.
Β. Λιάκος – Αν. Καθηγητής ΠΘ
Χ. Καραμούτης – Μέλος ΕΤΕΠ ΠΘ
Σ. Κούκου – Γεωπόνος, Επιστημονική συνεργάτης ΠΘ

Επιστημονική επιτροπή

Αγγελάκη Αναστασία - Επ. Καθ Π.Θ. (υπο διορισμό)
Αναστασίου Ευάγγελος - Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.
Αντωνιάδης Βασίλειος - Καθηγητής Π.Θ.
Αρβανίτης Κωνσταντίνος - Καθηγητής Γ.Π.Α.
Βατσανίδου Άννα - Επ. Καθηγήτρια Ε.Κ.Π.Α.
Βύρλας Παναγιώτης - Αν. Καθηγητής Π.Θ.
Γεωργίου Πανταζής - Καθηγητής Α.Π.Θ.
Γκόλια Ευαγγελία - Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Γράβαλος Ιωάννης - Καθηγητής Π.Θ.
Δημητριάδης Χρήστος - Αν. Καθηγητής ΔΙ.ΠΑ.Ε.
Θεοφάνης Γέμτος -Ομ, Καθηγητής Π.Θ.
Καβαλάρης Χρήστος - Μέλος ΕΔΙΠ Π.Θ.
Κάργας Γεώργιος - Καθηγητής Γ.Π.Α.
Κατέρης Δημήτριος - Ερευνητής Β, ΙΒΟ ΕΚΕΤΑ
Κατσούλας Νικόλαος - Καθηγητής Π.Θ.
Καυγά Αγγελική - Αν. Καθηγήτρια, Παν. Πατρών
Κίττας Κωνσταντίνος - Ομ, Καθηγητής Π.Θ.
Κυπαρίσσης Αρης - Καθηγητής Π.Θ.
Κωτσόπουλος Θωμάς - Καθηγητής Α.Π.Θ.
Λιάκος Βασίλειος - Αν. Καθηγητής Π.Θ.
Μανολάκος Δημήτριος - Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μπαλαφούτης Αθανάσιος - Ερευνητής Β, ΙΒΟ ΕΚΕΤΑ
Μπαρτζάνας Θωμάς - Καθηγητής Γ.Π.Α.
Μπόχτης Διονύσιος - Διευθυντής ΙΒΟ ΕΚΕΤΑ
Ντίνας Γεώργιος - Ερευνητής ΕΛΓΟ Δήμητρα
Πανταζή Ειρήνη-Ξανθούλα - Αν. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
Παπαδάκης Γεώργιος - Καθηγητής Γ.Π.Α.
Παπαϊωάννου Χρυσούλα - Καθηγήτρια Π.Θ.
Παπαναστασίου Δημήτρης - Αν. Καθηγητής ΠΘ
Ταγαράκης Αριστοτέλης - Ερευνητής Β, ΙΒΟ ΕΚΕΤΑ
Τσιρογιάννης Ιωάννης - Καθηγητής, Παν. Ιωαννίνων
Φουντάς Σπύρος - Καθηγητής Γ.Π.Α.
Φράγκος Βασίλειος. - Καθηγητής Α.Π.Θ.

Ευχαριστίες

Το Διοικητικό Συμβούλιο της Εταιρείας Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος (ΕΓΜΕ) εκφράζει τις θερμές του ευχαριστίες προς όλους τους συγγραφείς των εργασιών, καθώς και προς τα μέλη της Οργανωτικής και της Επιστημονικής Επιτροπής, που αφιέρωσαν τον πολύτιμο χρόνο και την επιστημονική τους γνώση για τη συμμετοχή και την υποστήριξή τους στο Συνέδριο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνονται στους αξιότιμους χορηγούς οικονομικής υποστήριξης και επικοινωνίας, των οποίων η συμβολή συνέβαλε ουσιαστικά στην επιτυχή υλοποίηση και διάδοση του Συνεδρίου.

Θερμές ευχαριστίες τέλος εκφράζονται προς το Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την αρωγή και την έμπρακτη υποστήριξη της διοργάνωσης.

Χρυσοί χορηγοί

ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.

SCIENTACT

Αργυροί χορηγοί

ΕΚΑΓΕΜ

AGROMET
ADVANCED AGRONOMIC SERVICES

ZAMIDIS
FIELDTECH

TRACTOR GPS
Ολοκληρωμένες Λύσεις Έξυπνης Γεωργίας

Χορηγοί επικοινωνίας

Γεωργία ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΑ

Υπαιθρος ΧΩΡΑ

agrotypos.gr

ypaithros.gr

ΑΓΡΟΤΥΠΟΣ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΣΗΓΗΤΩΝ

1 Αγγελάκη Α. — 33
2 Αδαμαντίδου Χ. — 42
3 Αδαμοπούλου Ε. — 67, 68
4 Αθανασίου Χ. — 40
5 Αλεξάνδρου Φ. Σ. Α. — 48, 49
6 Αλεξιάδης Δ. — 42
7 Αλιφράγκη Μ. — 47
8 Αναστασίου Ε. — 1, 20
9 Ανέστης Β. — 8, 10, 55, 56, 71
10 Αντωνιάδης Β. — 40, 45
11 Αντωνίου Π. — 43
12 Αραποστάθης Β. — 13, 76
13 Αρβανίτης Κ. — 63, 76
14 Αργυριάδου Α. — 57
15 Αρσένος Α. — 8, 10, 55
16 Αρσένος Γ. — 8, 55, 57
17 Ασλανίδου Μ. — 24, 73
18 Αυγουστάκη Δ. — 23
19 Βατίστας Χ. — 23
20 Βατσανίδου Α. — 11, 50
21 Βλόντζος Γ. — 22
22 Βόγια Ρ. — 42, 43
23 Βογιατζής Α. — 33
24 Βόκας Α. — 42
25 Βολουδάκης Δ. — 53
26 Βουράκη Σ. — 8, 10, 55
27 Βύρλας Π. — 32, 51
28 Γαβριήλ Α. — 20
29 Γανόπουλος Ι. — 66
30 Γελασάκης Α. — 58
31 Γεωργιάδης Α. — 2
32 Γεωργίου Π. — 31, 34, 35
33 Γεωργίου Σ. — 55, 71
34 Γιαννακόπουλος Ε. — 19, 41
35 Γιάννογλου Α. — 42
36 Γιουβάνης Β. — 22
37 Γκόλια Ε. Ε. — 42, 43, 44, 46
38 Γράβαλος Ι. — 2, 15, 16, 17, 18, 51
39 Γραμμένου Α. — 40
40 Γρηγοριάδης Ι. — 16
41 Δάρρας Α. — 21
42 Δασκαλάκης Μ. — 12
43 Δεληγιάννης Ε. — 48, 49
44 Δεμέστιχας Κ. — 5, 9
45 Δενιζοπούλου Α. — 28, 29
46 Δημητριάδης Χ. — 21
47 Δημητρίου Ε. — 63
48 Δολάπτσης Κ. — 59
49 Δόρδας Χ. — 48, 49
50 Δουβης Κ. — 53, 58
51 Δούπης Γ. — 19
52 Ελβανίδη Α. — 26, 53
53 Ευστρατιάδης Α. — 37
54 Ζαμίδης Α. — 52
55 Ζέμου Α. — 57
56 Ζέρβας Π. — 13
57 Ζίκα Α. — 41
58 Θαλασσινός Γ. — 40
59 Θεοτοκατος Ν. — 37
60 Θέρμος Ι. — 60, 69, 70, 74
61 Θωμλούδη Ε. Ε. — 70
62 Ιατροπούλου Σ. — 14
63 Ιωάννης Γ. — 2
64 Ιωάννου Β. — 68
65 Καβαλάρης Χ. — 22, 52
66 Καβασίδης Ι. — 18
67 Καλαβρουζιώτης Ι. — 75
68 Καλύβας Α. — 66
69 Καλφούντζος Δ. — 3
70 Κανακάρη Ε. — 1
71 Κάντζου Ο. Δ. — 44
72 Καπσομενάκης Ι. — 53, 58
73 Καραγιοβανίδης Μ. — 28, 31, 38, 66
74 Καραμανλής Κ. — 65
75 Καραμανώλη Α. — 43
76 Καραμούτης Χ. — 22, 52
77 Καράμπελας Γ. — 61
78 Καραμπούλα Α. — 3, 17, 51
79 Καρανίκας Ν. — 15
80 Κάργας Γ. — 39

81 Καρνούτσος Π. — 31, 38, 66
82 Καρπούζος Δ. — 34, 35
83 Κατέρης Δ. — 12, 13, 22, 59
84 Κατράνας Γ. — 16
85 Κατσούλας Ν. — 24, 25, 26, 27, 53, 58, 62, 73,75
86 Κέππας Σ. — 53, 58
87 Κεφαλίδης Α. — 47
88 Κικής Χ. — 45
89 Κίττα Ε. — 75
90 Κίττας Κ. — 75
91 Κόκκινος Π. — 75
92 Κοντραφούρης Δ. — 19
93 Κοσμάς Ν. — 33
94 Κοτζαμπασάκη Μ. — 9
95 Κουκοβίνος Ν. — 31, 66
96 Κούκου Σ. — 22
97 Κουκουνάρας Α. — 38
98 Κούτρας Μ. — 32
99 Κριαρίδου Ε. — 33
100 Κυπαρίσσης Α. — 4, 52
101 Κυριάκος Λ. — 22
102 Κυρίτσης Θ. — 3
103 Κωνσταντινίδη Σ. — 50
104 Κωστή Μ. — 52, 72
105 Κωτσόπουλος Θ. — 38
106 Κωτσοπούλου Μ. Ε. — 33
107 Λαζαρέλη Φ. — 73
108 Λαμπρόπουλος Χ. — 52
109 Λασκος Β. — 28, 29
110 Λεβίζου Ε. — 40
111 Λιάβα Β. — 42, 43
112 Λιάκος Β. — 3, 16, 32, 51
113 Λιανοστάθη Γ. — 34
114 Λοντρα Π. — 37
115 Λουκάτος Δ. — 63, 76
116 Μακρής Α. — 15, 16, 17, 18
117 Μαλέτσικα Π. — 53
118 Μαλλής Ε. — 31, 67
119 Μανωλάκος Δ. — 65
120 Μαρτζοπούλου Α. — 54
121 Μάστορας Π. — 57
122 Ματσή Θ. — 31
123 Μελάς D. — 53, 58
124 Μέμλικα Α. — 13
125 Μήνος Τ. — 46
126 Μητρόγιαννης Δ. — 36
127 Μιχαηλίδης Α. — 6
128 Μιχαλίτσης Α. — 48, 49
129 Μίχας Δ. — 60, 61, 69, 70, 74
130 Μορέλλος Α. — 7
131 Μπακίρα Ν. — 73
132 Μπαλαφούτης Α. — 12, 13, 52, 69, 70, 72, 74
133 Μπαξεβάνου Α. — 24, 25, 27, 62
134 Μπαρτζάνας Θ. — 8, 23, 55, 56, 71,76
135 Μπασδαγιάννη Ζ. — 49
136 Μπατίκας Γ. — 57
137 Μπεθάνης Ι. — 42, 43
138 Μπεκιάρη Β. — 41
139 Μπελιά Σ. — 19
140 Μπέμπη Μ. — 4
141 Μπινιάρη Κ. — 12
142 Μπιτάκου Ε. — 9
143 Μπονόβα Ε. — 57
144 Μπόσης Ι. — 49
145 Μπότα Β. — 33
146 Μπουρλίβα Α. — 44
147 Μπόχτης Δ. — 12, 13, 22, 59
148 Μυγδάκος Γ. — 1
149 Μωραΐτης Μ. — 52, 70
150 Ναουνούλης Ι. — 24, 26, 27, 73
151 Νησιώτη Κ. Χ. — 33
152 Ντάκος Γ. — 1
153 Νταλαμάγκα Μ. — 39
154 Ντάτση Γ. — 75
155 Ντίνας Γ. — 56
156 Ντότας Β. — 54
157 Νυχάς Κ. — 9
158 Ξανθοπούλου Μ. — 30
159 Παλαιοκώστας Δ. — 12
160 Πανταζή Ξ. Ε. — 6, 7, 28, 65, 66

161 Πανώρας Ι. — 42
162 Παπαγεωργίου Κ. — 43
163 Παπαγρηγορίου Μ. — 29
164 Παπαδάκη Μ. — 19, 41
165 Παπαδάκης Γ. — 13, 63, 76
166 Παπαδάκης Χ. — 11
167 Παπαδημητρίου Ν. — 40
168 Παπαδήμου Σ. — 42, 44
169 Παπαδόπουλος Γ. — 53, 58
170 Παπαδόπουλος Ι. — 44
171 Παπαϊωάννου Χ. — 24, 25, 26, 27, 62
172 Παπακαλούδης Π. — 48, 49
173 Παπαναστασίου Δ. — 53, 58
174 Παπαντωνάτου Μ. Ζ. — 20
175 Παπουτσάκη Μ. — 68
176 Πετσετίδη Π.Α — 39
177 Πίκουλας Γ. — 39
178 Πλιατσίδης Κ. — 6, 29
179 Πούλιος Δ. — 30
180 Πούπκου Α. — 53, 58
181 Πρόγκιου Α. — 58
182 Ράπτης Ι. — 17
183 Ροδιάς Ε. — 11
184 Ρούμπος Χ. — 40
185 Ρούστα Β. — 33
186 Σάββας Δ. — 75
187 Σαλάχας Γ. — 19
188 Σαπούνας Α. — 24, 27
189 Σάρρου Ε. — 67
190 Σιμοπούλου S. — 1
191 Σκάντζου Ε. — 24
192 Σκαρλάτος Α. — 70
193 Σκιαδόπουλος Α. — 65
194 Σταματάκης Α. — 46
195 Στεργίου Ι. — 53, 58
196 Σωτηρίου Β. — 19, 41
197 Ταγαράκης Α.Χ — 12
198 Ταουκίδου Ν. — 35
199 Τάτση Ε. — 42
200 Τζιότζιος Γ. — 59
201 Τζιούρρου Π. — 42, 43
202 Τουπαλής Μ. — 13
203 Τσαλίκη Ε. — 42, 66
204 Τσάμπρα Δ. — 39
205 Τσιρόπουλος Ζ. — 18
206 Τύρης Δ. — 65
207 Φαλιάγκα Σ. — 24, 26, 27, 73
208 Φαρασλής Ι. — 53, 58
209 Φείδαρος Δ. — 24, 25, 27, 62
210 Φιλιππίδης Π. — 39
211 Φούντα Γ. — 41
212 Φουντάς Σ. — 1, 20, 76
213 Φράγκος Β. — 6, 28, 29, 31, 54, 66
214 Φωτιάδου Β. — 57
215 Ψηρούκης Β. — 9
216 Benka P. — 5
217 Ćirić V. — 5
218 Ćupina B. — 5
219 Gabriel A. — 20
220 Jarosch K. A. — 45
221 Kantelhardt J. — 20
222 Koči V. — 5
223 Lalić B. — 5
224 Magazin N. — 5
225 Meyer-Aurich A. — 20
226 Micocci M.F. — 30
227 Niedermayr A. — 20
228 Niemi J. — 55
229 Paris B. — 60, 61, 69, 70, 72, 74
230 Reimand K. — 20
231 Sarmiento B.B — 72
232 Schwierz F. — 20
233 Sedlar AleksandA — 5
234 Vujić S. — 5
235 Wiggenhauser M. — 45

Περιεχόμενα

Ευφυή συστήματα γεωργικής παραγωγής, Γεωργία ακριβείας, Κτηνοτροφία ακριβείας

1. USER NEEDS AND STAKEHOLDER INSIGHTS FOR AI-DRIVEN ROBOTIC WEED MANAGEMENT: EVIDENCE FROM THE AGRIBOT PILOT IN GREECE

Georgios Ntakos, Eirini Kanakari, Evangelos Anastasiou, Soussana Simopoulou, Gregory Mygdakos, Spyros Fountas 2

2. ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ VERBASCUM SPP. ΣΕ ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Α. Γεωργιάδης, Ι. Γράβαλος, Ε. Βογιατζή 12

3. ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΟΣ

Αναστασία Καραμπούλα, Θωμάς Κυρίτσης Βασίλειος Λιάκος & Δημήτριος Καλφούντζος 21

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΚΛΗΡΟΥ ΣΙΤΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL-2

Μ. Μπέμπη, Α. Κυπαρίσσης.....30

5. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΙΤΑΡΙΟΥ

N. Magazin, B. Lalić, P. Benka, V. Ćirić, A. Sedlar, S. Vujić, V. Koči, B. Ćupina, Ε. Μπιτάκου, Μ. Κοτζαμπασάκη, Κ. Δεμέστιχας & Θ. Μπαρτζάνας 39

6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΣΙΤΗΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ MONTE CARLO

Κ. Πλιατσίδης, Ξ.Ε. Πανταζή, Β. Φράγκος & Α. Μιχαηλίδης.....44

7. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΤΕΧΝΗΝΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΥΜΠΤΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΑΠΟ ΩΙΔΙΟ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ

Ξ.Ε. Πανταζή & Α. Μορέλλος.....53

8. INVENTORY OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND DATA-DRIVEN SOLUTIONS FOR LIVESTOCK TRACKING

S. Vouraki, V. Anestis, A. Arsenos, G. Arsenos & T. Bartzanas 63

9. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΡΑΟΥΛΑΣ

Ε. Μπιτάκου, Μ. Κοτζαμπασάκη, Κ. Νυχάς, Β. Ψηρούκης, Κ. Δεμέστιχας & Θ. Μπαρτζάνας.....67

10. DEVELOPMENT OF A COMMON FRAMEWORK AND METHODOLOGY FOR EVALUATING DIGITAL LIVESTOCK INNOVATIONS

A. Arsenos, V. Anestis, S. Vouraki, G. Arsenos & T. Bartzanas 71

11. ΔΙΑΧΕΙΜΑΣΗ ΜΕΛΙΣΣΟΣΜΗΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΑΣ

Χαράλαμπος Παπαδάκης , Άννα Βατσανίδου & Ευθύμιος Ροδιάς.....75

12. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΛΛΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ

Α. Χ. Ταγαράκης, Κ. Μπινιάρη , Ι. Δασκαλάκης, Μ. Σταυρακάκη , Δ. Παλιοκώστας , Δ. Κατέρης, Α. Μπαλαφούτης & Δ. Μπόχτης.....84

13. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΓΡΟΣΥΣ ΣΕ ΠΙΛΟΤΙΚΟ ΑΜΠΕΛΩΝΑ

Α. Μπαλαφούτης, Δ. Κατέρης, Γ. Παπαδάκης, Β. Αραποστάθης, Μ. Μωραϊτης, Μ. Κατσιβελάκης, Π. Ζέρβας, Μ. Τουπαλής, Α. Μέμλικα και Δ. Μπόχτης.....91

14. COMPARATIVE REFLECTANCE ANALYSIS OF VALERIANELLA LOCUSTA PLANTS IN VERTICAL FARMING AND GREENHOUSE SYSTEMS FOR EARLY WATER DEFICIENCY DETECTION

D. D. Avgoustaki, S. Iatropoulou & T. Bartzanas.....99

Γεωργικός εξοπλισμός, ρομποτικά συστήματα, αισθητήρες και αυτοματισμοί στη γεωργία

15. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΡΟΠΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΡΟΜΠΟΤ

Ν. Καρανίκας, Α. Μακρής , Ι. Γράβαλος 111

16. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΠΙΒΛΑΒΩΝ ΕΝΤΟΜΩΝ

Γ. Κατρανάς, Ι. Γράβαλος, Β. Λιάκος, Α. Μακρής, Ι. Γρηγοριάδης 121

17. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΑΡΠΑΓΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΞΥΛΙΝΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΝΑΡΡΙΧΩΜΕΝΕΣ ΠΟΙΚΙΛΙΕΣ ΚΗΠΕΥΤΙΚΩΝ

Δ. Καραμπούλα, Α. Μακρής, Ι. Ράπτης, & Ι. Γράβαλος 131

18. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΕΝΕΡΓΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (PAR) ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΕΤΑΙ ΑΠΟ ΚΙΝΗΤΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

Α. Μακρής, Ι. Γράβαλος, Ι. Καβασίδης & Ζ. Τσιρόπουλος 141

19. IN SITU ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΡΙΖΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΜΠΕΛΟΥ ΜΕ MINIRHIZOTRON & ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ROOTFLY: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ & ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Βασίλειος Σωτηρίου, Δημήτριος Κοντραφούρης, Γεώργιος Δούπης, Σοφία Μπελιά, Μαρία Παπαδάκη, Γεώργιος Σαλάχας & Ευάγγελος Γιαννακόπουλος . 151

20. SPRAYING DRONES FOR VINEYARDS FROM THE PERSPECTIVE OF AGROECOLOGY: RESULTS FROM THE D4AGECOL WORKSHOP IN GREECE

E. Anastasiou, M.-Z.Papantonatou, K. Reimand, A. Niedermayr, J. Kantelhardt, A. Gabriel, F. Schwierz, A. Meyer-Aurich & S. Fountas 156

21. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΘΟΥΣ ΤΟΥ ΚΡΟΚΟΥ

Χρήστος Ι. Δημητριάδης, Αναστάσιος Ι. Δάρρας 165

22. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΟΡΗΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΨΕΚΑΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ

Σ. Κούκου, Χ. Καραμούτης, Β. Γιουβάνης, Γ. Βλόντζος, Λ.Σ. Κυργιάκος, Δ. Μπόχτης, Δ. Κατέρης & Χ. Καβαλάρης 177

Αγροτικές κατασκευές – θερμοκήπια

23. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΟΜΗΣ ΣΕ ΚΑΘΕΤΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Χρήστος Βατίστας , Δάφνη Δέσποινα Αυγουστάκη & Θωμάς Μπαρτζάνας 189

24. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΑΝΕΛ ΟΡΟΦΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΓΓΟΥΡΙΟΥ

Ι. Ναουνούλης, Χ. Παπαϊωάννου, Σ. Φαλιάγκα, Ε. Σκαντζού, Μ. Ασλανίδου, Α. Σαπουνάς, Δ. Φείδαρος, Α. Μπαξεβάνου, Ν. Κατσούλας..... 197

25. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΒ ΕΝΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Δημήτριος Φείδαρος , Αικατερίνη Μπαξεβάνου , Χρυσούλα Παπαιωάννου & Νικόλαος Κατσούλας 205

26. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΓΡΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΥΔΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Ελβανίδη, Χ. Παπαϊωάννου , Ι. Ναουνούλης , Σ. Φαλιάγκα, Ν. Κατσούλας 216

27. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΟΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΕΝΟΣ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Ν. Κατσούλας, Χ. Παπαϊωάννου, Σ. Φαλιάγκα, Ι. Ναουνούλης, Α. Σαπουνάς, Δ. Φείδαρος, Α. Μπαξεβάνου 224

28. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Β. Λάσκος, Ξ-Ε. Πανταζή, Β. Φράγκος, Μ. Καραγιοβανίδης, Α. Δενιζοπούλου . 233

29. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΟΦΗΣ ΣΤΗ ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Μ. Παπαγρηγορίου, Β. Λάσκος, Κ. Πλιατσίδης, Α. Δενιζοπούλου & Β. Φράγκος 237

30. AGRITHES Η ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑ ΤΗΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΚΑΙ Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΓΡΟΤΡΟΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΚΟΥ ΚΑΜΠΟΥ

F. Micocci, Δ. Πούλιος, Μ. Ξανθοπούλου & Μ. Σταματέλλου 240

Υδατικοί πόροι

31. ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΡΙΖΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Νικόλαος Κουκοβίνος, Παναγιώτης Καρνούτσος, Ευστράτιος Μαλλής, Μάριος Καραγιοβανίδης, Θεοδώρα Ματσή, Πανταζής Γεωργίου, Βασίλειος Φράγκος 245

32. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΧΛΟΟΤΑΠΗΤΑ

Μ. Κούτρας, Β. Λιάκος & Π. Βύρλας 256

33. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΦΥΤΟΥ ΣΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Αναστασία Αγγελάκη, Αθανάσιος Βογιατζής, Βασιλική Ρούστα, Μαρία Ελένη Κωτσοπούλου, Ευγενία Κριαρίδου, Νικόλαος Κοσμάς, Καλλιόπη Χρυσούλα Νησιώτη & Βασιλική Μπότα..... 263

34. ΒΙΩΣΙΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΔΙΑΔΑ ΤΩΝ ΣΕΡΡΩΝ

Γ. Λιανοστάθη, Π. Γεωργίου & Δ. Καρπούζος 273

35. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΖΩΝΩΝ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΛΟΓΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Ν. Ταουκίδου, Δ. Καρπούζος & Π. Γεωργίου 284

36. ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΚΡΑΤΕΙΑ

Δ. Μητρόγιαννης 294

37. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Θεοτοκάτος Νικόλαος, Λόντρα Παρασκευή, Ευστρατιάδης Ανδρέας 303

38. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΑΕΡΟΠΟΝΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΕΣΩ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΠΟΡΩΝ

Παναγιώτης Καρνούτσος, Μάριος Καραγιοβανίδης , Δημήτριος Κατσαντώνης , Άννα Γκοτζαμάνη , Αθανάσιος Κουκουνάρας , Θωμάς Κωτσόπουλος , Βασίλειος Φράγκος 313

Εδαφικοί πόροι & Περιβάλλον

39. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ 1:5 (EC1:5)

Π.Α. Πετσετίδη, Μ. Νταλαμάγκα, Γ. Πίκουλας, Δ. Τσάμπρα, Π. Φιλιππίδης, Γ. Κάργας 322

40. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ (INSECT FRASS ΚΑΙ ΚΟΠΡΙΑ ΠΟΥΛΕΡΙΚΩΝ) ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΜΑΚΡΟ- ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΤΥΠΟΥΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΕΛΙΤΖΑΝΑΣ (SOLANUM MELONGENA L.)

Ασπασία Γραμμένου, Νίκος Παπαδημητρίου, Χρίστος Ι. Ρούμπος, Χρήστος Γ. Αθανασίου, Γεώργιος Θαλασσινός, Έφη Λεβίζου & Βασίλειος Αντωνιάδης..... 329

41. ΤΥΧΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ VADOSE ZONE: Ο ΧΑΛΚΟΣ ΣΕ ΕΛΑΙΩΝΑ ΩΣ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Ασνιέντα Ζίκα, Βασίλειος Σωτηρίου, Γεωργία Φούντα, Μαρία Παπαδάκη, Βλασούλα Μπεκιάρη & Ευάγγελος Γιαννακόπουλος 333

42. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΧΑΛΚΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΝΝΑΒΗ (CANNABIS SATIVA L.)

Δ. Αλεξιάδης, Ι. Μπεθάνης , Ρ. Βόγια, Α. Γιάννογλου, Χ. Αδαμαντίδου, Α. Βόκας, Ε. Τάτση, Π. Τζιούρρου, Β. Λιάβα, Σ. Παπαδήμου, Ι. Πανώρας, Ε. Τσαλίκη & Ε. Ε. Γκόλια 338

43. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ (PE, PET,PP) ΣΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ Cu ΣΕ ΦΥΤΑ ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ

Π. Αντωνίου, Ρ. Βόγια, Κ. Παπαγεωργίου, Ι. Μπεθάνης, Π. Τζιούρρου, Β. Λιάβα , Α. Καραμανώλη & Ε. Ε. Γκόλια..... 343

44. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΤΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΣΕ ΧΩΡΟΥΣ ΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Ι. Παπαδόπουλος, Ε. Ε. Γκόλια, Ο. Δ. Κάντζου, Σ. Γ. Παπαδήμου & Α. Μπουρλίβα 348

45. ΑΠΟ ΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ: Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΑΤΡΑΚΤΥΛΙΔΑΣ ΣΕ ΑΚΡΑΙΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΜΟΛΥΣΝΗΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΥΣ

C. Kikis, K. A. Jarosch, M. Wiggenhauser, V. Antoniadis 354

46. ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΚΑΙ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ ΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τ. Μήνος, Α. Σταματάκης, Ε. Γκόλια 358

47. ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ Fe ΚΑΙ Mn ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΛΟΥΣΙΟ ΣΕ ΟΞΕΙΔΙΑ Mn

Μ. Αληφραγκή, Α. Κεφαλίδης & Μ. Ορφανουδάκης 363

Συστήματα αειφόρου γεωργικής παραγωγής

48. ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΩΣ ΚΡΙΣΙΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Α. Μιχαλίτσης, Π. Παπακαλούδης, Ε. Δεληγιάννης, Φ. Σ. Α. Αλεξάνδρου, Χ. Δόρδας..... 374

49. ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΑΓΡΟΟΙΚΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΙΤΑΡΙΟΥ

Π. Παπακαλούδης, Α. Μιχαλίτσης, Ε. Δεληγιάννης, Φ. Σ. Α. Αλεξάνδρου, Χ. Δόρδας, Γ. Μάνεσης, Ζ. Μπασδαγιάννη, Ι. Μπόσης, Χ. Δόρδας 379

50. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΙΝΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΚΖ

Σ. Κωνσταντινίδη & Α. Βατσανίδου 386

51. ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Α. Καραμπούλα, Β. Λιάκος, Ι. Γκίζα, Π. Βύρλας & Ι. Γράβαλος 394

52. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΙΤΗΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Μ. Κωστή, Μ. Μωραΐτης, Χ. Καραμούτης, Α. Κυπαρίσσης, Χ. Καβαλάρης, Α. Ζαμίδης, Χ. Λαμπρόπουλος & Α. Μπαλαφούτης 403

53. IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WINTER WHEAT WATER STRESS IN THE REGION OF THESSALY, GREECE

Angeliki Elvanidi, Nikolaos Katsoulas, Georgios Papadopoulos, Dimitrios Melas, Konstantinos Douvis, Ioannis Faraslis, Stavros Keppas, Ioannis Stergiou, Anastasia Poupkou, Dimitrios Voloudakis, Ioannis Kapsomenakis, Persefoni Maletsika, Dimitris K. Papanastasiou 413

54. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΥΘΜΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΜΙΑΣ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΜΕΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Αναστασία Δενιζοπούλου, Αναστασία Μαρτζοπούλου, Βασίλειος Ντότας, Βασίλειος Φράγκος 421

55. ADVANCING DIGITAL SUSTAINABILITY IN LIVESTOCK FARMING: GREEK PARTNERSHIP TO DIGI4LIVE PROJECT

V. Anestis, S. Vouraki, A. Arsenos, S. Georgiou, G. Arsenos, T. Bartzanas & J. Niemi 426

56. REAL-TIME MEASUREMENT OF GREENHOUSE AND AMMONIA GAS EMISSIONS FROM POULTRY HOUSES

A. Maragou, V. Anestis & T. Bartzanas 430

57. ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΑΛΥΣΙΔΑ ΑΞΙΑΣ ΤΟΥ ΜΑΛΛΙΟΥ ΤΩΝ ΠΡΟΒΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Α. Αργυριάδου, Π. Μάστορας, Γ. Μπατίκας, Α. Ζέμου, Ε. Μπονόβα, Β. Φωτιάδου & Γ. Αρσένος 437

58. ASSESSMENT OF SHEEP THERMAL STRESS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

D. K. Papanastasiou, A. I. Gelasakis, G. Papadopoulos, D. Melas, K. Douvis, I. Faraslis, S. Keppas, I. Stergiou, A. Poupkou, A. Progiou, J. Kapsomenakis & N. Katsoulas 446

59. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΗΣ ΧΩΛΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΡΟΒΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ IMU ΚΑΙ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ

Κ. Δολαπτσής, Γ. Τζιότζιος, Δ. Μπόχτης & Δ. Κατέρης..... 449

60. C-FARMING: CARBON FARMING ALLIANCE

Dimitrios Michas, Bas Paris, Ioannis Thermos & Athanasios Balafoutis 457

61. PRIMARY - New business for farmers and cooperatives in rural areas by local upcycling solutions using underutilized agricultural feedstocks

Bas Paris, Dimitris Michas, Giorgos Karampelas, Athanasios Balafoutis..... 459

Ενέργεια και βιοενέργεια στη γεωργία

62. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΜΕ ΦΒ

Αικατερίνη Μπαξεβάνου, Δημήτριος Φείδαρος, Χρυσούλα Παπαιωάννου & Νικόλαος Κατσούλας 462

63. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΜΕ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΧΩΡΙΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Ε. Δημητρίου, Δ. Λουκάτος, Κ.Γ. Αρβανίτης & Γ. Παπαδάκης..... 473

64. RES4LIVE: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ

Δ. Τύρης, Β. Ανέστης, Α. Σκιαδόπουλος, Θ. Μπαρτζάνας & Δ. Μανωλάκος..... 484

Μετασυλλεκτικοί χειρισμοί γεωργικών προϊόντων

65. ΕΥΦΥΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΡΠΩΝ ΚΕΛΥΦΩΤΟΥ ΦΙΣΤΙΚΙΟΥ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΑΘΙΑΣ ΜΑΘΗΣΗΣ

Κ. Καραμανλής & Ξ.Ε. Πανταζή 490

66. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΣΤΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΝΝΑΒΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ >0.2% THC

Νικόλαος Κουκοβίνος, Ευστράτιος Μαλλής, Ειρήνη Σάρρου, Απόστολος Καλύβας, Ιωάννης Γανόπουλος, Ελένη Τσαλίκη, Παναγιώτης Καρνούτσος, Μάριος Καραγιοβανίδης, Ξανθούλα Ειρήνη Πανταζή, Βασίλειος Φράγκος 499

67. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ BLOCKCHAIN ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΖΥΘΟΠΟΙΙΑ: ΠΡΟΣ ΜΙΑ ΔΙΑΦΑΝΗ ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΟ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ

Β. Ιωάννου & Ε. Αδαμοπούλου 509

68. ΙΧΝΗΛΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗ ΠΑΤΑΤΑΣ ΜΕΣΩ BLOCKCHAIN: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΤΑΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Μ. Παπουτσάκη & Ε. Αδαμοπούλου 514

Εφαρμογές κυκλικής οικονομίας

69. POLICY RECOMMENDATIONS FOR ACCELERATING AND INTEGRATING A CIRCULAR RURAL BIOECONOMY IN THE EU

B. Paris, D. Michas, I. Thermos and A. Balafoutis 520

70. P2GREEN: ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΡΟΩΝ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΒΙΟΛΙΠΑΣΜΑΤΩΝ

Bas Paris, Δημήτρης Μίχας, Μιχάλης Μωραίτης, Ιωάννης Θερμός, Αθανάσιος Μπαλαφούτης, Ειρήνη-Ευαγγελία Θωμλούδη & Απόστολος Σκαρλάτος..... 534

71. ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΛΥΣΙΔΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΧΟΙΡΩΝ ΚΑΙ ΟΡΝΙΘΙΩΝ ΚΡΕΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Σ. Γεωργίου, Β. Ανέστης & Θ. Μπαρτζάνας..... 543

72. ARGONAUT: AN AI-BASED TOOL FOR ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT AND DIGITAL PRODUCT PASSPORTS IN THE BIOECONOMY

Athanasios Balafoutis, Bruno Barrionuevo Sarmiento, M. Kosti, and B. Paris 550

73. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΕ ΕΝΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΑΛΛΗΛΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Σ. Φαλιάγκα, Ι. Ναουνούλης, Μ. Ασλανίδου, Φ. Λαζαρέλη, Ν. Μπακίρα, & Ν. Κατσούλας..... 553

Εκπαίδευση και κατάρτιση στη γεωργική μηχανική και τη μηχανική βιο-συστημάτων

74. ΕΝΙΣΧΥΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΣΤΙΣ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ: ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ RELIEF ERASMOUS +

Δ. Μίχας, Β.Paris, Α. Μπαλαφούτης & Ι. Θέρμος 562

75. ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΥΠΟ ΚΑΛΥΨΗ- ΥΔΡΟΠΟΝΙΑ. ΜΙΑ ΝΕΑ ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΞ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΑΙ ΤΟ ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Π. Κόκκινος, Κ. Κίττας, Δ. Σάββας, Γ. Ντάτση, Ν. Κατσούλας, Ε. Κίττα, Ι. Καλαβρουζιώτης 572

76. DESIGN AND DEVELOPMENT OF SMART AGRICULTURAL TECHNOLOGIES FOR EDUCATIONAL PURPOSES AT POSTGRADUADE LEVEL

V. Arapostathis, D. Loukatos, K.G. Arvanitis, S. Fountas. T. Bartzanas & G. Papadakis 578

ΕΝΟΤΗΤΑ 1η

Ευφυή συστήματα γεωργικής παραγωγής, Γεωργία ακριβείας, Κτηνοτροφία ακριβείας

1. USER NEEDS AND STAKEHOLDER INSIGHTS FOR AI-DRIVEN ROBOTIC WEED MANAGEMENT: EVIDENCE FROM THE AGRIBOT PILOT IN GREECE

Georgios Ntakos[1], Eirini Kanakari[1], Evangelos Anastasiou[1,2], Soussana Simopoulou[3], Gregory Mygdakos[3], Spyros Fountas[1]

1 Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece

2 Laboratory of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece

3 AgroApps PC, Koritsas 34, 55133 Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

This study explores user needs and stakeholder expectations for smart farming technologies within the EU-funded AgRibot project, focusing on Pilot Case 1 (PC1) in Greece. PC1 involves AI-driven robotic weed detection and precision spot spraying, supported by extended reality (XR) interfaces for enhanced decision-making. A structured questionnaire was distributed among agricultural stakeholders, including farmers, agronomists, and technology providers. Most respondents (54 in total) were affiliated with agricultural enterprises (67%) and possessed university-level education. While practical experience with robotics (22%) and XR (3%) was limited, interest in automation remained high. Smartphones and laptops were the preferred interfaces, and respondents identified cost-effectiveness, time efficiency, and accuracy as the top priorities for achieving effective weed management with robotic systems. High labor costs were identified as a key challenge, while anticipated benefits included reduced labor needs, improved crop health, and cost savings. Concerns centered on data privacy and system reliability in field conditions. The findings highlight the need for robust, user-friendly, and economically viable robotic systems. Financial support, training, and demonstrations are critical for adoption. Incorporating stakeholder input early in the process of identifying practical system requirements can help ensure that the design of the robotic weed detection and spraying system aligns with farmers' real-world needs and operational conditions.

Keywords: Smart farming, Agri-robotics, User needs, Precision spraying, Weed management, Farmers, Agricultural advisors

1. Introduction

European agriculture is currently facing a complex set of structural challenges, including labor shortages, an aging and shrinking workforce, rising production costs, and hazardous working conditions (Jones, 2020). These challenges are further intensified by climate change, which contributes to extreme weather events, greenhouse gas emissions, and increasing demands for environmental sustainability (Fountas et al., 2020). The combined effect has led to a steady decline in both the number of operational farms and the participation of younger generations across the European Union (EU) (European Commission, 2020; Farm to Fork Strategy European Commission, 2020).

In this context, smart farming technologies, such as robotics, extended reality (XR), and advanced wireless communication systems like 5G, are being explored as potential solutions to improve productivity, enhance safety, and reduce the environmental footprint of agriculture (Fountas et al., 2020; Oliveira et al., 2021; Tang et al., 2021; S. Fountas et al., 2024; Singh et al., 2024). Robotic systems have the potential to automate labor-intensive and high- risk tasks, including weeding, spraying, and monitoring, while XR interfaces can support training, remote control, and decision-making through immersive and interactive user experiences (Anastasiou et al., 2023). The deployment of 5G infrastructure in agriculture further enhances these technologies by enabling real-time data transfer, remote operation, and seamless communication between devices and cloud-based services (Farm to Fork Strategy European Commission, 2020; Purohit & Garg, 2021).

This study analyzes stakeholder feedback from PC1 activities to inform the development of user-centric robotic weed management solutions. It captures the views of farmers, agronomists, researchers, and technology providers on key factors influencing acceptance and adoption, aiming to ensure that future systems are practical, trusted, and aligned with user needs.

2. Methodology

This study employed a structured questionnaire survey to gather insights from stakeholders involved in agriculture in the context of PC1 of the AgRibot project. The questionnaire was specifically designed to explore user needs, expectations, and perceptions regarding the integration of smart farming technologies, particularly robotics and extended reality (XR), for weed detection and precision spraying in real-world farming operations.

Input from project partners, including researchers, technical providers, and agricultural advisors, helped shape the questionnaire's answer options for clarity and relevance. These were also informed by prior studies on stakeholder engagement and common user needs in smart farming and robotics, reviewed within the AgRibot consortium.

The survey covered key thematic areas including:

- demographics and professional background
- familiarity with robotic and XR tools
- perceived benefits, challenges, and expectations of robotic system adoption
- safety concerns, connectivity and data governance issues

The questionnaire consisted primarily of close-ended questions, using structured multiple- choice and Likert-scale formats to enable quantitative analysis and comparability across responses. Where appropriate, "Other (please specify)" options were included to capture insights beyond the predefined categories.

Data collection was conducted over a six-week period (February 4 to March 17) using Google Forms. The survey was distributed in Greek to ensure accessibility and was disseminated through multiple outreach channels, including project partner networks, agricultural cooperatives, and social media platforms (e.g., LinkedIn). A total of 54 responses were collected for PC1, representing a diverse set of agricultural stakeholders, including farmers, agronomists, researchers, and technology providers. The collected data were cleaned, organized, and analyzed using descriptive statistics, including frequency analysis, to extract both quantitative trends and qualitative insights.

3. Results

Demographics and Professional background

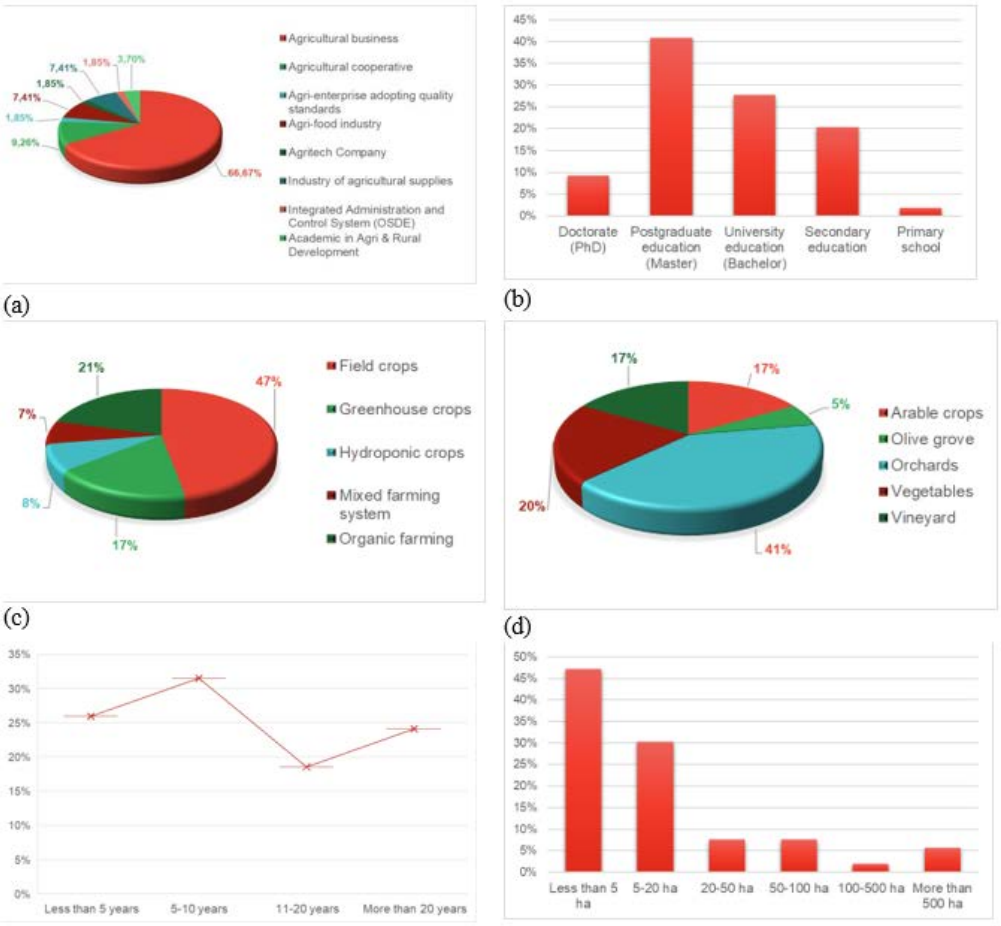


Figure 1. Demographics and Professional Background: (a) Industry or Sector of Employment, (b) Educational Attainment, (c) Farming System Type, (d) Main Crop Type
Managed, (e) Years of Experience in Agriculture, (f) Farm Size Managed

Most respondents (66.67%) are engaged in agricultural businesses, with smaller representations from cooperatives (9.26%), the agri-food industry (7.41%), and agricultural supply companies (7.41%) (Figure 1a). A highly educated respondent base is evident, with 77.78% holding a university degree or higher (40.74% Master's, 27.78% Bachelor's, 9.26% PhD) (Figure 1b).

In terms of farming systems, field crops dominate (75.93%), followed by organic farming (33.33%) and greenhouse crops (27.78%) (Figure 1c). Regarding crop types, orchards are the most common (40.74%), with vegetables (20.37%) and arable crops (16.67%) also significant (Figure 1d). Respondents showed a diverse range of experience: 31.48% have 5–10 years in farming, 25.93% under 5 years, and 24.07% over 20 years (Figure 1e). Most manage small farms, with nearly 77% cultivating less than 20 hectares (Figure 1f). Regarding digitalization, 46.3% use digital platforms, primarily through smartphones (48.05%) and laptops/PCs (35.06%).

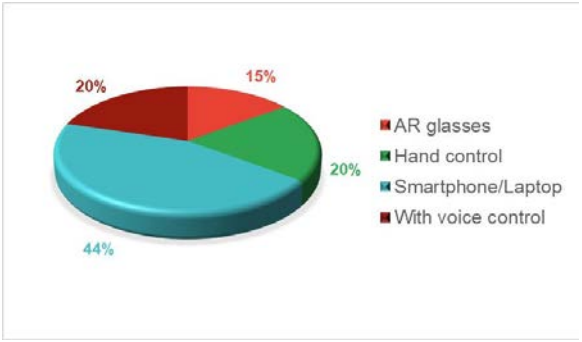
Weed management practices are still conventional: 50.75% use traditional sprayers, and 29.85% rely on mechanical weeding. Advanced methods like drone spraying (7.46%) and smart sprayers

(7.46%) remain limited. Key priorities that were rated as “very important”, when selecting a weed management approach, include cost-effectiveness (70.37%), time efficiency (62.96%), task effectiveness (61.11%), and environmental sustainability (48.14%). Half of the respondents (50%) are uncertain about investing in new machinery, though 34% plan to do so. Main challenges in current weeding operations cited by respondents include high labor costs (62.96%), a limited number of herbicide formulations (50%), strict environmental laws and regulations (42.59%), weed identification (40.74%), and lack of precision in weed management (37.03%). These percentages reflect the share of respondents who rated each challenge as “very important”.

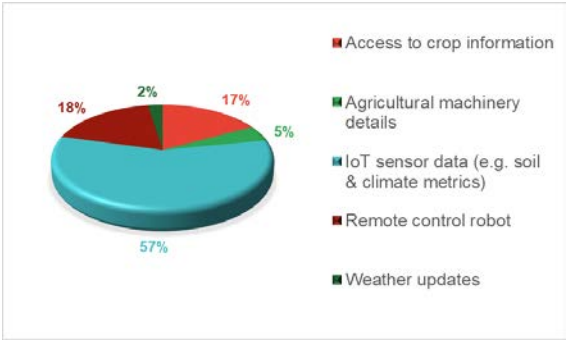
Familiarity with robotic and XR tools

The survey reveals that agricultural robotics remain largely unfamiliar to most respondents, with 61.11% reporting no familiarity at all, and only 7.41% stating they are very familiar. Even among those who are somewhat or very familiar, only 22.22% have used robotic systems, indicating limited practical experience in the field.

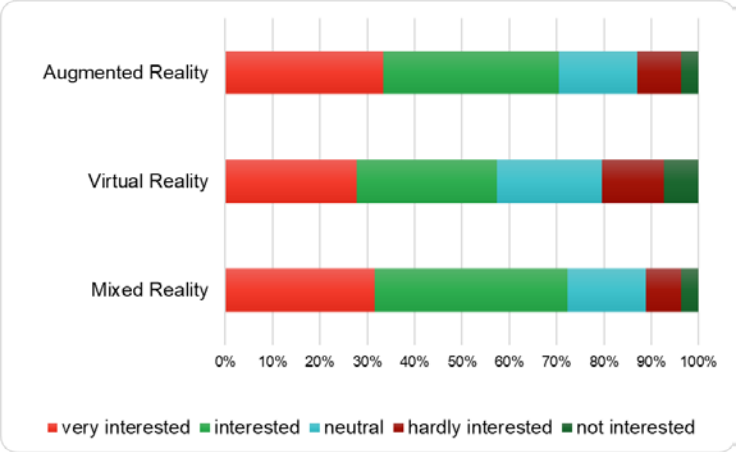
In terms of preferred interfaces for interacting with agricultural robots, the majority (44%) favored smartphones or laptops, while hand control and voice control each attracted 20% of respondents. AR glasses were preferred by a smaller segment (15%) (Figure 2a). When asked about desired XR functionalities, the clear priority was IoT data retrieval (e.g., soil moisture, temperature, pH), selected by 57% of participants. Other actions such as remote control of robots (18%) and access to crop information (17%) were also noted, while interest in weather updates (2%) and machinery details (5%) was minimal (Figure 2b). When it comes to XR technologies, familiarity is even lower: 80% of respondents are not familiar at all, and just 3% have had hands-on experience. Despite this low exposure, there is notable interest in XR applications within agriculture. For instance, Mixed Reality generated the highest enthusiasm, with 31.48% of respondents indicating they were “very interested” and 40.74% “interested.” Augmented Reality (AR) also showed strong interest, with a total of 70.33% of respondents either “very interested” (33.3%) or “interested” (37.03%). Virtual Reality followed with a total of 57.32% of respondents either “very interested” (27.7%) or “interested” (29.62%) (Figure 2c).



(a)



(b)



(c)

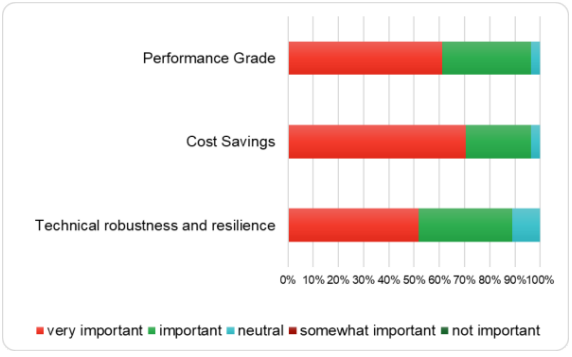
Figure 2. Robotics and XR tools: (a) Preferred Device for Interacting with the Robot, (b) Desired Actions with the XR System, (c) Level of interest in using XR technologies

Perceived Benefits, Challenges, and Expectations of Robotic System Adoption

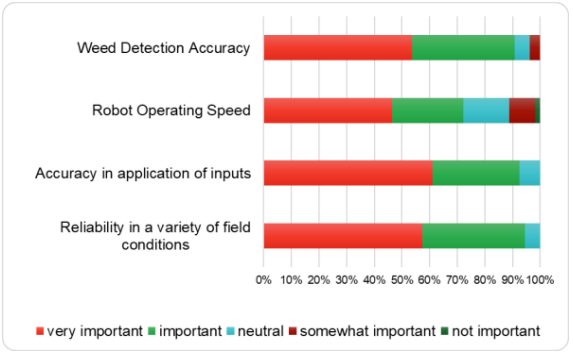
As shown in Figure 3, participants prioritized cost-effectiveness and performance in robotic weeding systems. Specifically, 70.4% rated cost savings as "very important," followed by performance grade, the system's efficiency during weeding operations, at 61.1%, and technical robustness at 51.9% (Figure 3a). These results suggest that stakeholders seek solutions that offer both economic benefits and consistent performance in the field.

In terms of specific performance expectations, accuracy in input application emerged as the top priority, with 61.1% rating it as "very important." This was followed by reliability under varying field conditions (57.4%) and weed detection accuracy (53.7%). While operating speed was slightly less emphasized, 46.3% still considered it "very important" (Figure 3b).

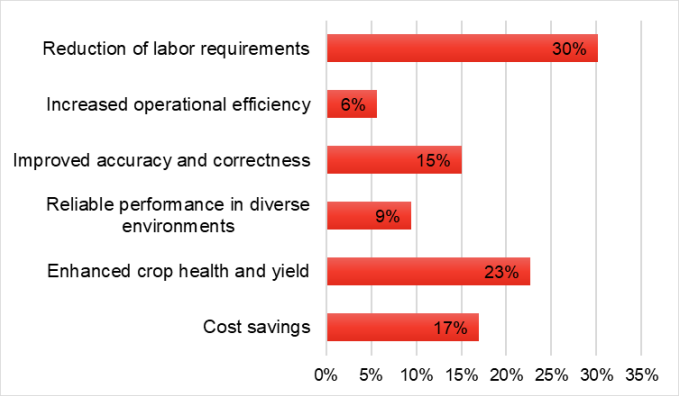
Regarding expected impacts of adopting robotic systems, respondents most frequently anticipated a reduction in labor requirements (30%), followed by improved crop health and yield (23%), and cost savings (17%). These findings reflect a strong expectation for both agronomic improvements and operational efficiency (Figure 3c).



(a)



(b)



(c)

Figure 3. Anticipated Performance of robotics and XR: (a) Importance of robotic weeding system aspects, (b) Performance of robotic systems in weed management, (c) Expected

Improvements from Adopting a Robotic Solution

There was strong agreement among respondents on the social value of reducing chemical inputs in agriculture. A majority (77.8%) rated operator health as “very important,” followed by improved working conditions (68.5%) and broader community benefits, such as food safety (57.4%). These results highlight a shared concern for the human and societal dimensions of farming practices.

In relation to the environmental impact, respondents saw multiple environmental gains from reducing chemical use, with top mentions including ecosystem benefits (29%), water quality (26%), and soil health (25%). Though biodiversity (21%) was rated slightly lower, all categories reflect a strong alignment between technological adoption and environmental stewardship.

Similarly, from an economic perspective, 66.7% believed robotic systems would reduce overall farming costs, and 59.3% expected long-term profit improvements. Additionally, 50% agreed these systems could add value to the final product, suggesting potential for market differentiation based on cleaner, more efficient production methods.

Participants also anticipated several improvements from the use of robotic systems, particularly in crop monitoring (29%), increased yield (25%), weed identification (23%), and enhanced operational safety (23%). Similarly, XR technologies were expected to support agricultural tasks by improving crop monitoring (27%), weed identification (23%), and the control and performance of equipment (21%).

Safety concerns, connectivity and data governance issues

According to the analysis of the responses, most respondents (71%) preferred semi- autonomous robotic control with human presence, showing a strong desire for oversight. Key safety concerns in robotic weeding included terrain navigation (38%), system failure risks (33%), and safety around people (29%). Field connectivity remains a challenge, with only 26% reporting excellent coverage, while 28% face frequent issues and 4% have no internet connection. Top data concerns were third-party data sharing (41%), privacy/security (39%), and data ownership (20%), highlighting trust and governance needs. To support adoption, farmers emphasized subsidies (40%), technical support (30%), and training (30%) as crucial resources.

Table 1. Summary of Key Challenges: Safety, Connectivity, Data Governance, and Adoption Support

Topic	Responses
Preferred Robotic Control for Safety	Semi-autonomous control (field presence but supervision and control/confirmation of robot tasks)
Safety Concerns in Robotic Weeding	Navigating rough terrain
Internet Coverage	Good (reliable in most areas)
Concerns About Data Collection	Sharing data with third parties; Privacy and data security
Support for Adopting Agricultural Robotics	Financial incentives

* It refers to the answer(s) with the highest frequency.

4. Discussion

The findings from PC1 of the AgRibot project provide a detailed overview of the current perceptions, expectations, and concerns of Greek agricultural stakeholders regarding the adoption of AI-enabled robotic systems for weed management. When compared with other European and international stakeholder studies, several consistent themes emerge.

First, the demographic profile of respondents, mostly university-educated professionals with diverse experience in farming systems, indicates a population that is generally open to technological innovation. While their direct experience with robotics and XR tools remains limited (only 22.2% of those familiar with robotics had used them, and just 3% had hands-on experience with XR), their high interest levels suggest a belief that such technologies could positively impact agriculture. This combination of strong educational background and openness to innovation, despite limited usage, aligns with findings from previous studies. Research by (Degieter et al., 2023) and (Anastasiou et al., 2023), for example, has shown that higher education is a reliable predictor of engagement with smart farming technologies.

Similarly, studies by (Duckett et al., 2018) and (Fountas et al., 2015) have documented a persistent gap between awareness and adoption of Agri-Tech tools, reinforcing the notion that interest often precedes usage. The PC1 responses, particularly the enthusiasm for functionalities like IoT-enabled data visualization, reflect a latent demand for digital integration that could be activated through targeted training and demonstration initiatives.

From a performance and economic perspective, the PC1 survey underscores stakeholder emphasis on cost savings (70.4% rated as “very important”), reliability, and task accuracy especially in input application and weed detection. These priorities are consistent with broader findings across European agriculture, where performance reliability and return on investment remain critical concerns for stakeholders considering robotic systems (Kutter et al., 2011; Ofori & El-Gayar, 2021). The preference for semi-autonomous systems with field supervision observed in PC1 also aligns with studies that highlight trust, system transparency, and controllability as pivotal to user confidence in robotic operations (Bechar & Vigneault, 2016; Pedersen et al., 2004).

Perceived benefits reported in PC1, particularly reduced labor needs, improved crop health, and operational efficiency, mirror the motivations cited in various stakeholder analyses, including this from the Robs4Crops project (Papadopoulos et al., 2025), where labor savings and pesticide reduction were seen as tangible, near-term benefits. At the same time, environmental benefits such as improved soil and water quality, while acknowledged in PC1, are ranked lower than economic incentives. This trend reflects the practical decision-making behavior of farmers, who tend to prioritize financial viability over environmental gains unless incentivized through policy frameworks or subsidies (Wilson & Hart, 2000).

Concerns about robotic navigation in rough terrain, risk of equipment failure, and safety near people point to the need for further development and field validation. These findings reinforce conclusions from earlier work, such as that of Bechar & Vigneault, 2016, which emphasizes the importance of robust and adaptable designs for agricultural robots operating in heterogeneous environments.

Issues surrounding internet access and data management, particularly trust in third-party data use and unclear data ownership, were also pronounced. These concerns are widely reflected in the literature, where data governance is increasingly viewed as a barrier to adoption, especially in the context of cloud-connected, AI-based systems (Wiseman et al., 2019).

Lastly, the support mechanisms identified in PC1, subsidies, technical assistance, and training, are consistent with stakeholder feedback in numerous European case studies. Demonstration farms, participatory pilot programs, and cooperative engagement models have been repeatedly recommended as effective tools to build trust and facilitate adoption (Eastwood et al., 2019).

5. Conclusions

This study explored stakeholder needs and perspectives for AI-driven robotic weed management, based on 54 responses from farmers, agronomists, researchers, and technology providers in AgRibot's Pilot Case 1 (PC1) in Greece.

The findings point to promising opportunities for the future of agricultural robotics. While practical experience with robotics and XR is limited, there is strong interest in their potential to reduce labor and improve precision. Stakeholders prioritized cost-effectiveness, reliability, and accuracy, with a preference for semi-autonomous systems under human supervision.

Barriers such as limited rural connectivity and data governance concerns remain significant. Respondents emphasized the need for financial incentives, training, and technical support to enable adoption.

These results aim to guide the development of robotic systems that are not only technically effective but also aligned with real-world farming needs. Future research should focus on participatory design and field testing to ensure practical and trusted solutions.

6. Acknowledgments

The research has been partially funded by the European Union project AgRibot: 'Harnessing Robotics, XR/AR, and 5G for a New Era of Safe, Sustainable, and Smart Agriculture', under the Grant Agreement No:101183158.

7. References

Anastasiou, E., Balafoutis, A. T., & Fountas, S. (2023). Applications of extended reality (XR) in agriculture, livestock farming, and aquaculture: A review. In Smart Agricultural Technology (Vol. 3). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100105

Barnes, A. P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., van der Wal, T., & Gómez-Barbero, M. (2019). Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. Land Use Policy, 80, 163–174. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004

Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. In Biosystems Engineering (Vol. 149, pp. 94–111). Academic Press. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014

Degieter, M., De Steur, H., Tran, D., Gellynck, X., & Schouteten, J. J. (2023). Farmers' acceptance of robotics and unmanned aerial vehicles: A systematic review. In Agronomy Journal (Vol. 115, Issue 5, pp. 2159–2173). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/agj2.21427

Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., Grieve, B., Chen, W.-H., Cielniak, G., Cleaversmith, J., Dai, J., Davis, S., Fox, C., From, P., Georgilas, I., Gill, R., Gould, I., Hanheide, M., Hunter, A., Iida, F., Mihalyova, L., Nefti-Meziani, S., … Yang, G.-Z. (2018). Agricultural Robotics: The Future of Robotic Agriculture. UK-RAS Network White Papers. https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.06762

Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M., & Dela Rue, B. (2019). Managing Socio-Ethical Challenges in the Development of Smart Farming: From a Fragmented to a Comprehensive Approach for Responsible Research and Innovation. Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 32(5–6), 741–768. https://doi.org/10.1007/s10806-017-9704-5

European Commission. (2020). EC (2020), EU agricultural outlook for markets, income and environment, 2020-2030. In DG Agriculture and Rural Developmen. https://doi.org/10.2762/252413

Farm to Fork Strategy European Commission. (2020).

Fountas, S., Mylonas, N., Malounas, I., Rodias, E., Santos, C. H., & Pekkeriet, E. (2020). Agricultural robotics for field operations. In Sensors (Switzerland) (Vol. 20, Issue 9). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/s20092672

Fountas, S., Sorensen, C. G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Liakos, V., & Gemtos, T. (2015). Farm machinery management information system. Computers and Electronics in Agriculture, 110, 131–138. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.11.011

Jones, A. , J. M. and M. J. (2020). Review of the future of agriculture and occupational safety and health (OSH) – Foresight on new and emerging risks in OSH. European Agency for Safety and Health at Work, Publications Office.

Kutter, T., Tiemann, S., Siebert, R., & Fountas, S. (2011). The role of communication and co-operation in the adoption of precision farming. Precision Agriculture, 12(1), 2–17. https://doi.org/10.1007/s11119-009-9150-0

Ofori, M., & El-Gayar, O. (2021). Drivers and challenges of precision agriculture: a social media perspective. In Precision Agriculture (Vol. 22, Issue 3, pp. 1019–1044). Springer. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09760-0

Oliveira, L. F. P., Moreira, A. P., & Silva, M. F. (2021). Advances in agriculture robotics: A state-of-the-art review and challenges ahead. In Robotics (Vol. 10, Issue 2). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/robotics10020052

Papadopoulos, G., Papantonatou, M. Z., Uyar, H., Nychas, K., Psiroukis, V., Kasimati, A., Nieuwenhuizen, A., Van Evert, F. K., & Fountas, S. (2025). Stakeholders' perspective on smart farming robotic solutions. Smart Agricultural Technology, 11. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100916

Pedersen, S. M., Fountas, S., Blackmore, B. S., Gylling, M., & Pedersen, J. L. (2004). Adoption and perspectives of precision farming in Denmark. Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science, 54(1), 2–8. https://doi.org/10.1080/09064710310019757

Purohit, A., & Garg, A. (2021). 5G in Smart Agriculture: Improving Farm Operations.

S. Fountas, B. Espejo-García, A. Kasimati, M. Gemtou, H. Panoutsopoulos, & E. Anastasiou. (2024). Agriculture 5.0: Cutting-Edge Technologies, Trends, and Challenges. IT Professional, 26(1), 40–47.

Singh, S., Vaishnav, R., Gautam, S., & Banerjee, S. (2024). Agricultural robotics: A comprehensive review of applications, challenges and future prospects. In 2024 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning Applications Theme: Healthcare and Internet of Things (AIMLA), 1–8.

Tang, Y., Dananjayan, S., Hou, C., Guo, Q., Luo, S., & He, Y. (2021). A survey on the 5G network and its impact on agriculture: Challenges and opportunities. In Computers and Electronics in Agriculture (Vol. 180). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105895

Wilson, G. A., & Hart, K. (2000). Financial imperative or conservation concern? EU farmers' motivations for participation in voluntary agri-environmental schemes. Environment and Planning A, 32(12), 2161–2185. https://doi.org/10.1068/a3311

Wiseman, L., Sanderson, J., Zhang, A., & Jakku, E. (2019). Farmers and their data: An examination of farmers' reluctance to share their data through the lens of the laws impacting smart farming. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 90–91. https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.04.007

2. ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ VERBASCUM SPP. ΣΕ ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Α. Γεωργιάδης, Ι. Γράβαλος, Ε. Βογιατζή

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Γεωπονίας - Αγροτεχνολογίας, , Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Γαιόπολις, 41500 Λάρισα gtasos34@gmail.com

Περίληψη

Τη διετία 2023-2024 έγινε καταγραφή της μορφομετρικής ανάπτυξης μεμονωμένων φυτών Φλόμου (*Verbascum* spp.) με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις πεδίου στις περιοχές του Κάτω Κισσάβου, Προφήτη Ηλία Κρανιάς και Καταρράκτης Αγίου Διονυσίου. Οι μετρήσεις περιελάμβαναν τα εξής: εμβαδόν, περίμετρος, μείζων άξονας, ελάσσων άξονας, διάμετρος Feret και ελάχιστη διάμετρος Feret. Ως κύρια μεταβλητή υιοθετήθηκε το μήκος του βλαστού. Το μήκος βλαστού αυξήθηκε συνολικά κατά +197,2 cm, με μέγιστο ρυθμό ~2,88 cm/ημέρα την άνοιξη του δευτέρου έτους. Το μοτίβο «βραδεία χειμερινή μεταβολή − ανοιξιάτικη επιτάχυνση − μετέπειτα επιβράδυνση» αποτυπώνει καθαρά τη μετάβαση από ροζέτα σε ανθοφόρο βλαστό. Στόχος αυτής της εργασίας είναι να αναπτυχθεί και να αξιολογηθεί ένα χαμηλού κόστους πρωτόκολλο φωτογραμμετρίας με χρήση του ImageJ/Fiji για την καταγραφή της χωροχρονικής μεταβολής των μορφομετρικών μεγεθών και επιμήκυνσης βλαστού για φυτά μείζονος ενδιαφέροντος ως ένα βήμα προς τυποποίηση και μελλοντική αυτοματοποίηση της όλης διαδικασίας.

Λέξεις κλειδιά: *Φλόμος*, μορφομετρικά μεγέθη, φωτογραμμετρία, ImageJ

SPATIOTEMPORAL RECORDING AND ANALYSIS OF THE GROWTH RATE OF VERBASCUM spp. IN THE NATURAL ENVIRONMENT USING DIGITAL TECHNOLOGICAL TOOLS

An. Georgiadis, E. Wogiatzi, & I. Gravalos

University of Thessaly, Department of Agrotechnology, Gaiopolis, 41500, Larisa

angeorgiadis@uth.gr

Abstract

During the two years 2023-2024, the morphometric growth of individual plants of Verbascum spp. was recorded with repeated field measurements in the areas of Kato Kissavos, Profitis Ilias Krania and Kataraktis Agios Dionysios. The measurements included the following: area, perimeter, major axis, minor axis, Feret diameter and minimum Feret diameter. The stem length was adopted as the main variable. The stem length increased by a total of +197.2 cm, with a maximum rate of ~2.88 cm/day in the spring of the second year. The pattern “slow winter change − spring acceleration − subsequent deceleration” clearly captures the transition from rosette to flowering stem. The aim of this work is to develop and evaluate a low-cost photogrammetry protocol using ImageJ/Fiji for recording the spatiotemporal variation of morphometric sizes and shoot elongation for plants of major interest as a step towards standardization and future automation of the entire process.

Keywords: Verbascum spp., morphometric measurements, photogrammetry, ImageJ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Φλώμος (*Verbascum* spp.) αναφέρεται στο σύνολο ειδών του γένους Verbascum (Scrophulariaceae), πολλά από τα οποία αφθονούν στη Μεσόγειο και ειδικά στην Ελλάδα. Ενδεικτικά, το V. Thapsus αποτελεί έναν από τους πλέον γνωστούς εκπροσώπους (Dong et al.,

2022; Khamar et al., 2023; Paschalidis et al., 2021). Για πολλά είδη του γένους τεκμηριώνεται διετής βιολογικός κύκλος (ροζέτα το πρώτο έτος, ανθοφόρος βλαστός το δεύτερο έτος (Reinartz, 1984), ενώ υπάρχει και φαρμακολογικό ενδιαφέρον, ιδίως για το V. Thapsus, σχετικά με την ανακούφιση του αναπνευστικού (Blanco-Salas et al., 2021; Türker & Gümüşel, 2005).

Η ψηφιακή ανάλυση εικόνων πραγματοποιήθηκε ImageJ/Fiji, επειδή επιτρέπει βαθμονομημένες, επαναλήψεις μετρήσεων και πλήθος μορφομετρικών παραμέτρων (π.χ., area, perimeter, άξονες, Feret, circularity, aspect ratio), καθώς και την αυτοματοποίηση με macros/batch εξασφαλίζοντας συγκρισιμότητα μεταξύ ημερομηνιών, σταδίων και γωνιών λήψης (Schneider et al., 2012; Schindelin et al., 2012; Rueden et al., 2017). Οι εξωγενείς περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως μικροκλίμα, υγρασία εδάφους, φωτισμός, και βόσκηση ή εντομοφαγία δεν απομονώθηκαν.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Θέση πεδίου

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μελέτη περίπτωσης που αποτυπώνει χωροχρονικά φυτοκοινότητες και μεμονωμένα φυτά σε πολλαπλές θέσεις (Κάτω Κίσσαβος, Προφήτης Ηλίας Κρανιάς, Καταρράκτης Αγίου Διονυσίου). Σκοπός είναι η τυποποίηση ενός απλού, χαμηλού κόστους πρωτοκόλλου φωτογραμμετρίας.

Ο υπό μελέτη Φλώμος (*Verbascum* spp.) βρίσκεται σε αγρόκτημα στον Ανατολικό Κίσσαβο (Ν. Λάρισας), σε χαμηλό υψόμετρο κοντά στη θάλασσα (ζώνη παραλιακού/παραμεσογειακού τοπίου). Στο ορθοφωτοχάρτη οι προβολικές συντεταγμένες x = 394264,69, y = 4411769,58 (σύστημα σε μέτρα, π.χ. ΕΓΣΑ ’87). Το μικροτοπίο είναι μωσαϊκό από θαμνώνες/δενδρώδη στοιχεία και ανοικτές κηλίδες εδάφους, με πρανή και άκρες δρόμου, περιβάλλον που συνδυάζει ήπιες διαταραχές και πλήρη ηλιοφάνεια, συνθήκες ευνοϊκές για ρουδερικά –ηλιοφυτικά είδη όπως ο φλόμος. Κλιματικά, η περιοχή εντάσσεται στο Μεσογειακό θερμό πρότυπο (Csa: ξηρά, θερμά καλοκαίρια, ήπιοι, υγροί χειμώνες), με θαλάσσιες επιδράσεις λόγω γειτνίασης με το Αιγαίο που μετριάζουν τα θερμοκρασιακά άκρα και αυξάνουν τη θερινή ξηροθερμική καταπόνηση (Kottek et al., 2006; Blondel et al., 2010). Η ετερογένεια μικροενδιαιτημάτων (αναβαθμίδες, μονοπάτια, πρανή) και οι άκρες καλλιεργειών δημιουργούν διαθέσιμες «νησίδες» εγκατάστασης/αναγέννησης για *Verbascum*, διευκολύνοντας τη χωροχρονική παρακολούθηση μορφομετρικών μεγεθών στο πεδίο.

2.2 Παράμετροι αναφοράς στο ImageJ

Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκε βαθμονομημένη ανάλυση εικόνας στο ImageJ/Fiji για την εξαγωγή τυποποιημένων μορφομετρικών παραμέτρων και τη βιολογική τους ερμηνεία στο *Verbascum* spp. Το Εμβαδόν (Area) αποδίδει το προβαλλόμενο αποτύπωμα της περιοχής ενδιαφέροντος και μετά από κλιμάκωση (cm/pixel), λειτουργεί ως δείκτης μεγέθους/ κατάληψης χώρου, συχνά συναφής με βιομάζα (Εικόνα 1 (α)). Είναι όμως ευαίσθητο στη γεωμετρία λήψης και στη διαδικασία τμηματοποίησης (thresholding), γι’ αυτό προτιμώνται κατακόρυφες λήψεις (Εικόνα 1(β)) και σταθερές ρυθμίσεις (Schneider et al., 2012; Schindelin et al., 2012).

Η Περίμετρος (Perimeter) μετρά το μήκος του περιγράμματος και σε συνδυασμό με το εμβαδόν, επιτρέπει δείκτες σχήματος αλλά επηρεάζεται από οδοντώσεις/θόρυβο στα όρια. Οι άξονες έλλειψης από τη συνάρτηση “Fit Ellipse” - Μείζων (Major) και Ελάσσων (Minor) -προσφέρουν σταθερές «χαρακτηριστικές» διαστάσεις του αποτυπώματος και τροφοδοτούν τον λόγο επιμήκυνσης (Aspect ratio = Major/Minor), όπου τιμές >1 δηλώνουν επιμήκες σχήμα, άρα πιθανή αλλαγή αρχιτεκτονικής (π.χ. από συμπαγή ροζέτα σε επιμήκη διάταξη φύλλων/βλαστών) (Rueden

et al., 2017). Οι διαστάσεις Feret (μέγιστη caliper διάμετρος) και MinFeret (ελάχιστη caliper διάμετρος) καταγράφουν το «περίβλημα» του σχήματος ανεξάρτητα από προσανατολισμό, η Feret συλλαμβάνει τη μέγιστη έκταση του αντικειμένου, ενώ η MinFeret τη μικρότερη, χρήσιμες όταν το περίγραμμα αποκλίνει από ελλειπτικότητα ή εμφανίζει προεξοχές (Schneider et al., 2012). Από τα παραπάνω παράγονται συνοπτικοί δείκτες σχήματος, όπως η Κυκλικότητα (Circularity = $4\pi \cdot \text{Area}/\text{Perimeter}^2$), η οποία τείνει στο 1 για κύκλο και αυξάνει προς το 0 για επιμήκη/ακανόνιστα περιγράμματα, διευκολύνοντας τη σύγκριση μορφής μεταξύ ημερομηνιών και σταδίων ανάπτυξης. Για τη φάση έντονης επιμήκυνσης (bolting), όπου οι λήψεις είναι πλάγιες, το μήκος βλαστού (Stem length) μετρήθηκε ως πραγματική διαδρομή κατά μήκος του κεντρικού βλαστού με εργαλείο Segmented Line, επιλογή που παραμένει έγκυρη ανεξάρτητα από τη γωνία λήψης και αποτυπώνει άμεσα τη δυναμική επιμήκυνσης που χαρακτηρίζει τους διετείς Φλόμους (*Verbascum* spp.) στο δεύτερο έτος (Reinartz, 1984; Schneider et al., 2012).

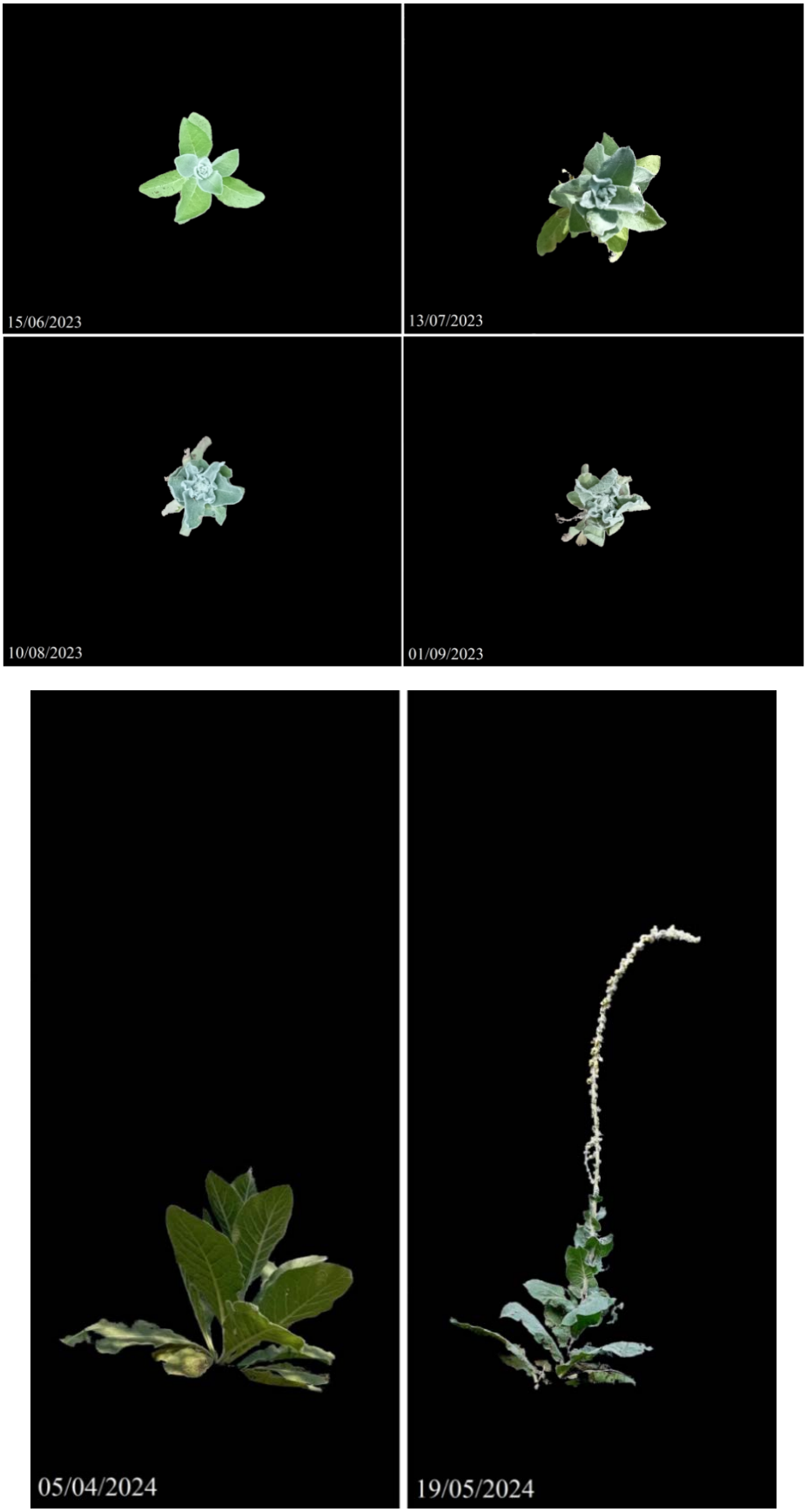
Επιπλέον, ποσοτικοποιήθηκε η δυναμική με τον σχετικό ρυθμό ανάπτυξης $\text{RGR} \approx [\ln L_2 - \ln L_1] / \Delta t$, ο οποίος εκφράζει το πόσο (%/ημέρα) που αυξάνει ο βλαστός και επιτρέπει συγκρίσεις μεταξύ περιόδων με διαφορετικά αρχικά μεγέθη (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Η αξιοπιστία των μετρήσεων ενισχύεται από σαφή βαθμονόμηση κλίμακας στο ίδιο επίπεδο με το φυτό, τυποποιημένες ρυθμίσεις προεπεξεργασίας (εξομάλυνση/thresholding), πλήρη μεταδεδομένα (ημερομηνία, στάδιο-ροζέτα, φακός/απόσταση, φωτισμός) και όπου είναι δυνατό, κατακόρυφες λήψεις για τα 2D μεγέθη. Σε αντίθετη περίπτωση, το μήκος βλαστού παρέχει ανθεκτική και βιολογικά άμεσα ερμηνεύσιμη εναλλακτική. Συνολικά, ο συνδυασμός Area–Perimeter–Major/Minor–Feret/MinFeret αποτυπώνει «πόσο μεγάλο και με ποιο σχήμα» είναι το προβαλλόμενο όργανο, ενώ το Stem length και οι ρυθμοί του περιγράφουν «πόσο γρήγορα και πότε» επιμηκύνεται ο βλαστός ένα σύνολο συμπληρωματικών μετρικών που καθιστούν τις χρονοσειρές μας συγκρίσιμες διαχρονικά και μεταξύ φαινολογικών φάσεων.

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Μεθοδολογία

Για τη βαθμονόμηση κλίμακας, σε κάθε λήψη τοποθετήθηκε ένα αντικείμενο γνωστού μήκους (scale bar) 5cm στο ίδιο επίπεδο με το φυτό. Στο ImageJ ορίστηκε Set Scale (Units: cm, Known distance: 5, Pixel aspect ratio: 1.0, *Global* ενεργό). Η ίδια κλίμακα εφαρμόστηκε σε όλα τα ROI του καρέ. Έλεγχος ακρίβειας: επαναλαμβανόμενη μέτρηση του scale bar (3×) ανά καρέ, με μέση απόκλιση 1%. Σταθερά σημεία/γεωμετρία, όπου ήταν δυνατό, χρησιμοποιήθηκαν για τη σταθεροποίηση του πλάνου και τις κατακόρυφες λήψεις. Όταν οι λήψεις ήταν πλάγιες, η κύρια μεταβλητή ήταν το μήκος βλαστού (Segmented Line).

Κατά τον πειραματικό σχεδιασμό δεν απομονώθηκαν οι εξωγενείς περιβαλλοντικοί παράγοντες (π.χ., μικροκλίμα, υγρασία εδάφους, φωτισμός, βόσκηση/εντομοφαγία), με αποτέλεσμα μέρος της παρατηρούμενης διακύμανσης να αντανακλά τις περιβαλλοντικές επιδράσεις πέρα από το καθαυτό αναπτυξιακό πρότυπο. Πραγματοποιήθηκε φωτογραφική παρακολούθηση πεδίου σταθερής κάθετης και οριζόντιας απόστασης και αποτύπωση του ίδιου φυτού με κάμερα υψηλής ανάλυσης (κύριος αισθητήρας 50 MP, f/1.8, PDAF και με δευτερεύοντα χαρακτηριστικά: υπερευρυγώνιος 8 MP/120°, macro 2 MP, αισθητήρας βάθους 2 MP). Η επεξεργασία εικόνων και οι μετρήσεις υλοποιήθηκαν στο ImageJ (λογισμικό ανοιχτού κώδικα), μετά από βαθμονόμηση κλίμακας με το αντικείμενο γνωστού μήκους (Schneider et al., 2012). Εξήχθησαν τυπικά μορφομετρικά μεγέθη της περιοχής ενδιαφέροντος (ROI): Εμβαδόν, Περίμετρος, Μείζων άξονας, Ελάσσων άξονας, Διάμετρος Feret, Ελάχιστη διάμετρος Feret (Area, Perimeter, Major, Minor, Feret, MinFeret).



Εικόνες 1 (α) & (β). Φωτογραφικές λήψεις του *Verbascum* spp. σε διαφορετικές περιόδους.

Η επιλογή/ορισμός φυτικών γνωρισμάτων και η ορολογία ακολούθησαν διεθνή πρωτόκολλα τυποποίησης (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Για τη σύγκριση τάσεων μεταξύ ετερογενών μεταβλητών χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένες τιμές (z-scores), ενώ οι κατανομές απεικονίστηκαν με boxplots και αξιολογήθηκαν ακραίες τιμές βάσει του κανόνα 1.5×IQR (Ο κανόνας 1.5×IQR αποτελεί το κλασικό, ανθεκτικό κριτήριο εντοπισμού ακραίων τιμών (outliers) στα διαγράμματα box-and-whisker. Ορίζουμε το IQR (Interquartile Range) ως τη διαφορά μεταξύ τρίτου και πρώτου τεταρτημορίου (IQR = Q3 − Q1). Οι τιμές που βρίσκονται κάτω από το Q1 − 1.5×IQR ή πάνω από το Q3 + 1.5×IQR χαρακτηρίζονται ως outliers) (Tukey, 1977; McGill et al., 1978) Μετά την τελευταία κατακόρυφη λήψη (Απρίλιος 2024), συνεχιστήκαν οι πλάγιες λήψεις, επειδή τα 2D μεγέθη (Area, Feret κ.λπ.) επηρεάζονται από προοπτική. Η ανάλυση συμπληρώθηκε με το μήκος βλαστού (cm), μετρημένο στο ImageJ με Segmented Line, το οποίο αποτυπώνει την πραγματική επιμήκυνση ανεξάρτητα από τη γωνία λήψης (Schneider et al., 2012; Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Η οργάνωση/οπτικοποίηση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε ανοικτό υπολογιστικό περιβάλλον (Python) με βιβλιοθήκες Matplotlib (Hunter, 2007).

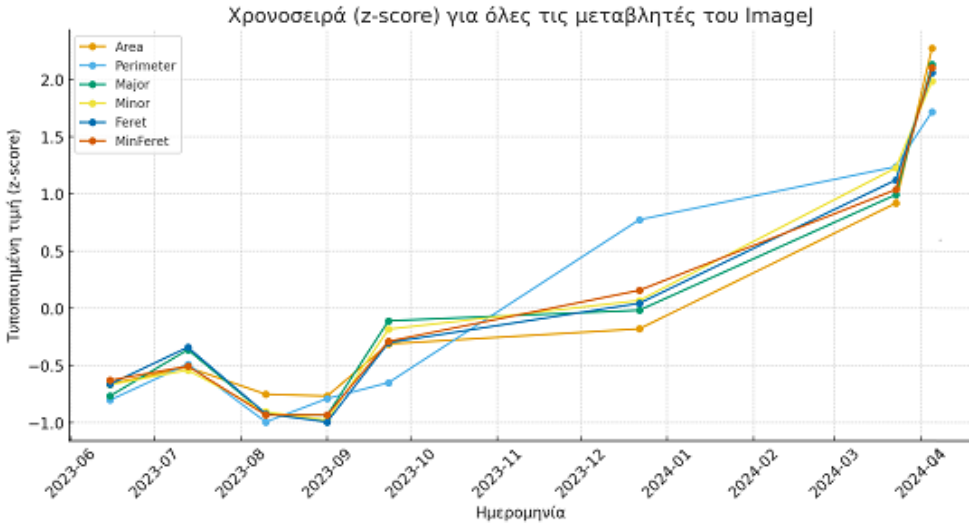
3.2 Επεξεργασία εικόνας

Για την επεξεργασία και ανάλυση των εικόνων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ImageJ/Fiji 2.14.0/1.54x (Rueden et al., 2017; Schindelin et al., 2012), στο λειτουργικό σύστημα Windows 10. Όλες οι αναλύσεις έγιναν με ενεργό το ίδιο προφίλ ρυθμίσεων, και τα αποτελέσματα εξήχθησαν σε CSV. Η όλη διαδικασία περιελάμβανε τα ακόλουθα βήματα: α) ορισμός κλίμακας (set scale) β) λήψη εικόνας, γ) Εισαγωγή εικόνας στο ImageJ, δ) τμηματοποίηση εικόνας (thresholding), ε) εξαγωγή μορφομετρικών μεγεθών, στ) εξαγωγή αποτελεσμάτων και τεκμηρίωση.

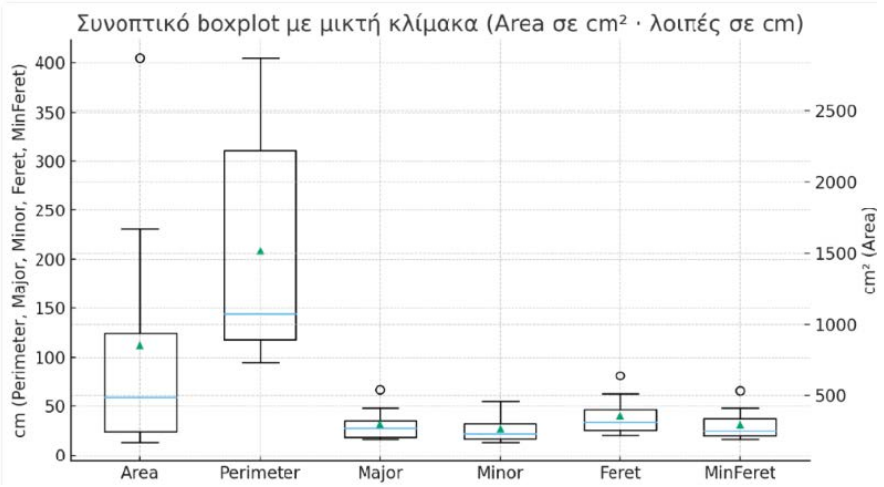
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι χρονοσειρές (z-scores) των Area, Perimeter, Major, Minor, Feret, MinFeret έδειξαν συστηματική αύξηση με τον χρόνο (Εικόνα 2). Η σχέση με τον χρόνο ήταν ισχυρή τόσο σε γραμμικό επίπεδο όσο και σε μονοτονικό επίπεδο: Pearson r (γραμμική συσχέτιση: Area ≈ 0,92, Perimeter ≈ 0,95, Major ≈ 0,95, Minor ≈ 0,93, Feret ≈ 0,94, Min Feret ≈ 0,93). Spearman ρ (μονοτονική συσχέτιση στις τάξεις: Area ≈ 0,88, Perimeter≈0,86, Major≈0,86, Minor≈0,88, Feret≈0,90, MinFeret≈0,88). Τα boxplots (Εικόνα 3). έδειξαν δεξιόστροφη ασυμμετρία (ιδίως στην Area) και ακραίες τιμές στο τέλος της περιόδου. Ενδεικτικά, η Area αυξήθηκε κατά ~10.6× από την πρώτη στην τελευταία μέτρηση, ενώ Major, Minor και Feret παρουσίασαν αυξήσεις ~3×. Ο λόγος Major/Minor (aspect ratio) κυμάνθηκε περί το 1,18 (μέτρια επιμήκυνση αποτυπώματος), και η Circularity είχε μέσο 0,22, υποδηλώνοντας πιο ελλειπτικά/ακανόνιστα περιγράμματα.

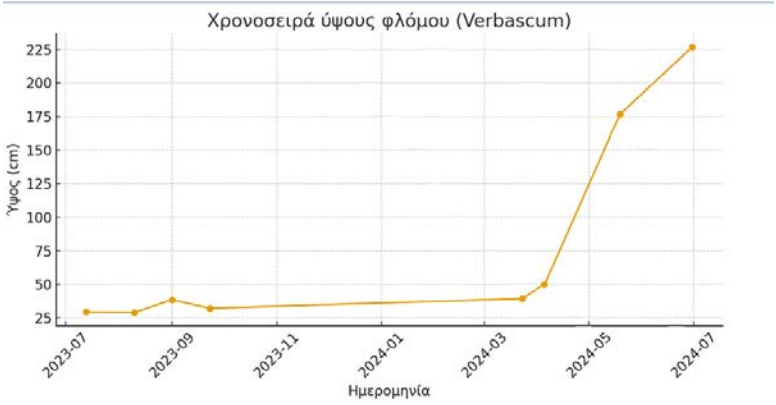
Για το μήκος βλαστού (Εικόνες 4 και 5) καταγράφηκε χαρακτηριστική μετάβαση: χαμηλές τιμές το πρώτο έτος (M = 32,35 cm, SD = 4,39), και έντονη αύξηση το δεύτερο (M = 123,18 cm, SD = 93,04), με μέγιστους ρυθμούς επιμήκυνσης την άνοιξη (2,88 cm/ημέρα), σε συμφωνία με τη φάση έκπτυξη/απότομη επιμήκυνση ανθοφόρου βλαστού (bolting). Ο Σχετικός ρυθμός ανάπτυξης είναι από 23/3/23 έως 5/4/23: ~1.8%/ημέρα, από 5/4/23 έως 19/5/23 (peak): ~2.9%/ημέρα, από 19/5/23 έως 30/6/23: ~0.6%/ημέρα και από 23/9/ 23 έως 23/3/24 (χειμώνας): ~0.11%/ημέρα. Τα boxplots (Εικόνα 6) το μήκος βλαστού δείχνει καθαρή μετατόπιση της κατανομής από το Έτος 2023 (διάμεσος 30,85 cm, IQR 6,10 cm) στο Έτος 2024 (διάμεσος 113,30 cm, IQR 157,05 cm), δηλαδή ~3,7× υψηλότερη διάμεση τιμή και εκτίναξη της διασποράς. Η κατανομή του έτους 2024 είναι δεξιόστροφα ασύμμετρη και ευρεία, χωρίς outliers με βάση τον κανόνα 1,5×IQR. Το προφίλ αυτό αποτυπώνει τη μετάβαση από βραδεία ανάπτυξη ροζέτας σε φάση απότομης επιμήκυνσης (bolting) με υψηλή ενδοετή παραλλακτικότητα, ενώ όλες οι τιμές του έτους 2024 υπερέχουν των τιμών του 2023 (πλήρης στοχαστική κυριαρχία).



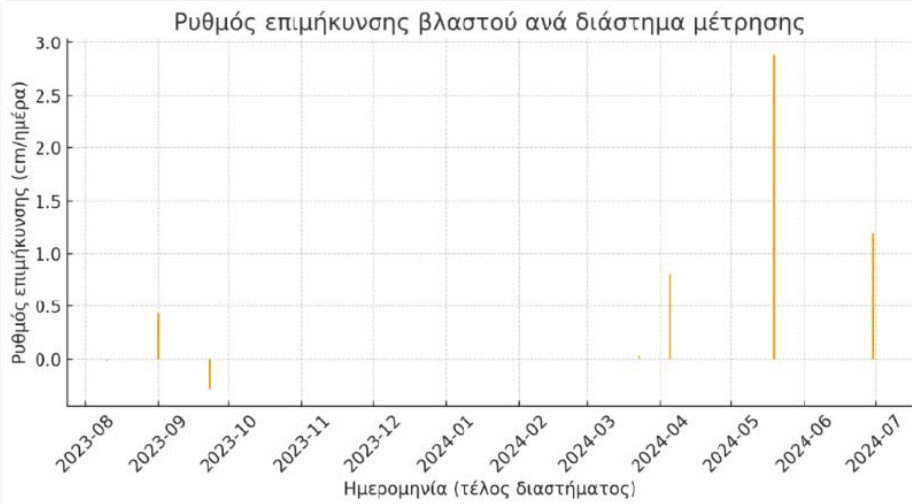
Εικόνα 2. Χρονοσειρές (z-scores) των Area, Perimeter, Major, Minor, Feret.



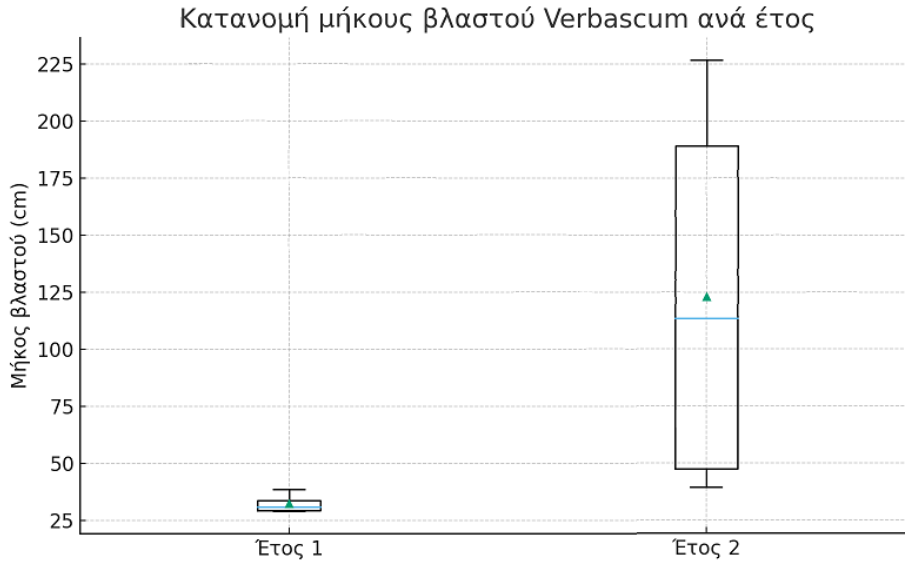
Εικόνα 3 Τα boxplots των Area, Perimeter, Major, Minor, Feret, MinFeret σε "μικτή" κλίμακα. (Area σε cm² Perimeter, Major, Minor, Feret, MinFeret σε cm).



Εικόνα 4. Χρονοσειρά μήκους βλαστού φλόμου (*Verbascum* spp.) σε cm.



Εικόνα 5. Ρυθμός ανάπτυξης βλαστού ανά διάστημα μέτρησης σε cm/ημέρα.



Εικόνα 6. Κατανομή μήκους (cm) βλαστού ανά έτος.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ευρήματα είναι συνεπή με τη βιβλιογραφία για τον διετή κύκλο ζωής του Φλώμου (*Verbascum* spp.), ροζέτα το πρώτο έτος, έκπτυξη ανθοφόρου βλαστού το δεύτερο (Reinartz, **1984). Η έντονη αύξηση των Major/Feret τεκμηριώνει την επιμήκυνση του στελέχους, ενώ οι πολύ** υψηλές τελικές τιμές μήκους/ύψους είναι βιολογικά αναμενόμενες για είδη όπως ο Φλώμος (*Verbascum* spp.) και συνδέονται με πλεονεκτήματα επικονίασης (Donnelly et al., 1998). Επιπλέον, το μέγεθος της ροζέτας κατά το πρώτο έτος προβλέπει την είσοδο στην αναπαραγωγή και το τελικό μέγεθος (Gross, 1981), ενώ έχουν καταγραφεί πληθυσμιακές διαφοροποιήσεις σε ρυθμό ανάπτυξης και ανθεκτικότητα (Kumschick et al., 2013). Το μοτίβο «βραδεία μεταβολή έως τέλη χειμώνα - απότομη ανάπτυξη - ελαφρά επιβράδυνση» είναι αναμενόμενο για διετή Φλώμο (*Verbascum* spp.), ρόζετα 1ου έτους, ισχυρή έκπτυξη ανθοφόρου βλαστού 2ου έτους (Reinartz, 1984). Οι καθαρές τιμές μήκους 1,77–2,27 m συνάδουν με γνωστές τιμές για V. thapsus και σχετίζονται με

πλεονεκτήματα ύψους στην επικονίαση (Donnelly et al., 1998). Μεθοδολογικά, η χρήση κατακόρυφων λήψεων είναι κρίσιμη για τα 2D μεγέθη, όταν οι λήψεις είναι πλάγιες, η στροφή στη μέτρηση μήκους βλαστού διασφαλίζει συγκρισιμότητα και ερμηνευσιμότητα της χρονοσειράς. Η συνδυαστική προσέγγιση βοτανικής παρατήρησης και τυποποιημένης φωτογραμμομέτρησης (ImageJ) ανέδειξε την ανάπτυξη των Φλώμων (*Verbascum* spp.) ως δυναμική διεργασία με ισχυρή χρονική τάση και βιολογικά αναμενόμενα άλματα στη φάση έκπτυξη/απότομη επιμήκυνση ανθοφόρου βλαστού (bolting). Η υιοθέτηση τυποποιημένων πρωτοκόλλων (Pérez-Harguindeguy et al., 2013) και ανοιχτών εργαλείων ανάλυσης (Schneider et al., 2012; McKinney, 2010; Virtanen et al., 2020; Hunter, 2007) ενισχύει την αναπαραγωγιμότητα και τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

Τα ευρήματα αφορούν λίγες χρονοσειρές και μία τοποθεσία συνεπώς η γενίκευση είναι προσεκτική λόγω μικρού n, πιθανής μεροληψίας επιλογής (ένα άτομο/μικροενδιαίτημα), εποχικότητας και μη ελέγχου εξωγενών παραγόντων (μικροκλίμα, υγρασία εδάφους, φωτισμός, βόσκηση/εντομοφαγία). Η προσέγγιση συνιστά πρωτόκολλο χαμηλού κόστους, φορητό και επαναλήψιμο για ποσοτική παρακολούθηση Φλώμου (*Verbascum* spp.) στο πεδίο. Η τυποποίηση μέτρησης (ImageJ/Fiji) και η ενσωμάτωση ροών αυτοματοποίησης ανοίγουν δρόμο για μελέτες με μεγαλύτερο n, πολλαπλούς οικότοπους και μοντελοποίηση της επιμήκυνσης/μορφομετρίας στον χρόνο.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Araus, J. L., & Cairns, J. E. (2014). Field high-throughput phenotyping: The new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science, 19*(9), 542–551.

Blanco-Salas, J., et al. (2021). A review on the case of mullein (*Verbascum*, Scrophulariaceae) as a relevant genus in ethnopharmacology. *Plants, 10*(8), 1746.

Blondel, J., Aronson, J., Bodiou, J.-Y., & Boeuf, G. (2010). *The Mediterranean region: Biological diversity in space and time* (2nd ed.). Oxford University Press.

Dong, X., et al. (2022). Taxonomy, comparative genomics of mullein (*Verbascum*, Scrophulariaceae). *BMC Genomics, 23*, 556.

Donnelly, S. E., Lortie, C. J., & Aarssen, L. W. (1998). Pollination in *Verbascum thapsus* (Scrophulariaceae): The advantage of being tall. *American Journal of Botany, 85*(11), 1618–1625.

Gross, K. L. (1981). Predictions of fate from rosette size in four "biennial" plant species: *Verbascum thapsus, Oenothera biennis, Daucus carota,* and *Tragopogon dubius*. *Oecologia, 48*, 209–213.

Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering, 9*(3), 90–95.

Khamar, H., et al. (2023). Nomenclature and typification in *Verbascum* (Scrophulariaceae). *PhytoKeys, 220*, 69–103.

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen–Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift, 15*(3), 259–263.

Kumschick, S., Hufbauer, R. A., Alba, C., & Blumenthal, D. M. (2013). Evolution of fast-growing and more resistant phenotypes in introduced common mullein (*Verbascum thapsus*). *Journal of Ecology, 101*(2), 378–387.

McGill, R., Tukey, J. W., & Larsen, W. A. (1978). Variations of box plots. *The American Statistician, 32*(1), 12–16.

McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 56–61.

Nicotra, A. B., et al. (2010). Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends in Plant Science, 15*(12), 684–692.

Paschalidis, K., et al. (2021). Pilot cultivation of the vulnerable Cretan endemic *Verbascum arcturus* L. *Sustainability, 13*(24), 14030.

Pérez-Harguindeguy, N., et al. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, *61*(3), 167–234.

Reinartz, J. A. (1984). Life history variation of common mullein (*Verbascum thapsus*) I–III. *Journal of Ecology*, *72*, 897–936.

Rueden, C. T., et al. (2017). ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics, 18*, 529.

Schindelin, J., et al. (2012). Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods, 9*(7), 676–682.

Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods, 9*(7), 671–675.

Türker, A. U., & Gümüşel, B. (2005). Common mullein (*Verbascum thapsus* L.): Recent advances in research. *Phytotherapy Research, 19*(9), 733–739.

Virtanen, P., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods, 17*(3), 261–272.

3. ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΒΑΜΒΑΚΟΣ

Αναστασία Καραμπούλα[1], Θωμάς Κυρίτσης[2] Βασίλειος Λιάκος[3] & Δημήτριος Καλφούντζος[4]

[1]*Ίδρυμα, Τμήμα, Γεωπονίας Αγροτεχνολογίας Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Λάρισα Γαιόπολις*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία σε έκταση 32 στρεμμάτων καλλιέργειας βάμβακος, στον Άγιο Γεώργιο Λάρισας, έγινε η χαρτογράφηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους με τη χρήση του αισθητήρα EM38 της εταιρείας GEONICS. Με βάση το χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αγροτεμαχίου διακρίθηκαν τέσσερις ζώνες καλλιέργειας. Μετά τις εδαφολογικές αναλύσεις σε κάθε ζώνη έγινε ομαδοποίηση σε δύο ζώνες. Με τη χρήση ενός προγράμματος που χρησιμοποιεί τις εδαφολογικές αναλύσεις εξήχθησαν οι φυσικές παράμετροι των δύο ζωνών. Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από τα μετεωρολογικά δεδομένα του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού που ήταν εγκατεστημένος εντός του αγροτεμαχίου. Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ETo) έγινε με την αναθεωρημένη μέθοδο FAO-56 Penman-Monteith. Η συμβουλευτική λίπανση των δύο ζωνών έγιναν με βάση τις εδαφολογικές αναλύσεις. Τέλος, η συμβουλευτική φυτοπροστασία και ειδικά η αντιμετώπιση των ζιζανίων στο βαμβάκι στηρίζεται στην Ολοκληρωμένη Διαχείριση Ζιζανίων. Για τις εντομολογικές ασθένειες έγιναν ενέργειες κατά την διάρκεια ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Λέξεις κλειδιά: άρδευση, λίπανση, φυτοπροστασία, μετεωρολογικά, ηλεκτρική αγωγιμότητα

ABSTRACT

In the present work, on an area of 32 acres, cotton crops, in Agios Georgios, Larissa, soil mapping was carried out using the EM38. Based on the electrical conductivity map of the plot, four cultivation zones were distinguished. After the soil analysis, each zone was grouped into two zones. Using a program that uses soil analyses, the physical parameters of the two zones were extracted. The amount of water applied in each irrigation was calculated from the meteorological data of the automatic meteorological station that was installed within the plot. The estimation of the reference evapotranspiration (ETo) was carried out using the revised FAO-56 Penman-Monteith method. The advisory fertilization of the two zones was carried out based on the soil analyses. And finally, advisory plant protection nd especially the treatment of weeds in cotton is based on Integrated Weed Management. For entomological diseases, actions were taken during the growth of the crop.

Keywords: irrigation, fertilization, pest management, meteorology, electrical conductivity

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το βαμβάκι συγκαταλέγεται στα βιομηχανικά-κλωστικά φυτά με μεγάλη σημασία παγκοσμίως. Αποτελεί αγροτικό προϊόν που όμως απασχολεί και μεγάλο μέρος της βιομηχανίας μεταποίησης. Στον ευρωπαϊκό χώρο καλλιεργείται κυρίως στην Ελλάδα και στην Ισπανία. Το βαμβάκι έχασε έδαφος στην αγορά με τη σταδιακή εισαγωγή και χρήση των συνθετικών ινών. Η καλλιεργούμενη έκταση έχει σταθεροποιηθεί στα 300-330 εκατομμύρια στρέμματα παγκοσμίως, με συνολική παραγωγή τους 22-23 εκατομμύρια τόνους εκκοκκισμένου βαμβακιού. Το βαμβάκι καλλιεργείται κυρίως για τις ίνες του, οι οποίες αποτελούν σημαντικό προϊόν για την κλωστοβιομηχανία. Στο Νομό Λάρισας την τελευταία δεκαετία η καλλιεργούμενη έκταση με βαμβάκι μειώθηκε από

320.733 στρ. το 2015 σε 196.481 στρ, το 2024, μείωση κατά 38,7%, η οποία οφείλεται στη συνεχόμενη μείωση των υδατικών πόρων. (Κόκκορα κ.α., 2021).

Η καλλιέργεια του βαμβακιού παρατηρείτε κυρίως στη Θεσσαλία (νομοί Λάρισας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Μαγνησίας), στη Μακεδονία (νομοί Θεσσ/νίκης, Σερρών, Δράμας, Πέλλας, Κιλκίς, Ημαθίας), στη Θράκη (νομοί Έβρου, Ροδόπης, Ξάνθης) και λιγότερο στα υπόλοιπα διαμερίσματα. Στο σύνολο της χώρας, η μέση στρεμματική απόδοση του βαμβακιού ήταν 55kg το 1931, 110 kg το 1960, 251 kg το1980 και 300 kg το 1995, απόδοση που περίπου επιτυγχάνεται μέχρι και σήμερα. Η βελτίωση στην τεχνική της καλλιέργειας , η κατασκευή αρδευτικών δικτύων καθώς και η βελτίωση των καλλιεργούμενων ποικιλιών συνέβαλαν σε αυτή την αύξηση παραγωγής. (Παπακώστα – Τασοπούλου Δ. 2013.).

Η εξάρτηση της γεωργικής παραγωγής από το νερό είναι εμφανής και καταγεγραμμένη με τη μορφή εξισώσεων σε πλήθος ερευνητικών εργασιών, (Αλεξίου κ.α., 2000, Κωτσόπουλος κ.α., 1999, Gipson et al., 1970, Stewart et al.). Πολλές από τις εξισώσεις αυτές ή είναι γενικές ή αναφέρονται σε ορισμένες περιοχές και καλλιέργειες. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις η διαπνοή ή η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά τα διάφορα στάδια ανάπτυξής της συσχετίζεται με την παραγωγή (Παπαζαφειρίου, 1984, Doorenbos et al., 1977, Doorenbos et al., 1979). Μια τέτοια αντιμετώπιση ενώ θεωρείται περισσότερο αξιόπιστη εν τούτοις είναι πρακτικά δυσχερής γιατί η υλοποίησή της απαιτεί τη χρήση πληθώρας κλιματικών και άλλων παραμέτρων. Για καθορισμένες όμως περιοχές και συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες σχέσεις νερού και ποιότητας βαμβακιού μπορούν να αξιοποιηθούν εύκολα και αποτελεσματικά για τη διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων.

Στην περιοχή της Θεσσαλίας μεγάλες εκτάσεις καταλαμβάνουν οι καλλιέργειες βαμβακιού που αντιμετωπίζουν, όπως και οι άλλες καλλιέργειες, κατά τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο ή και Σεπτέμβριο προβλήματα λειψυδρίας (Μπιλάλης, 2021) λόγω της εντατικοποίησης των αρδεύσεων και της υπερεκμετάλλευσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών (Κόκκορα κ.α., 2021).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Χαρτογράφηση εδαφών με EM38

Για την εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές νέες τεχνολογίες. Το δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού της θέσης μας στην επιφάνεια της Γης (GNSS) είναι ένα από αυτά.

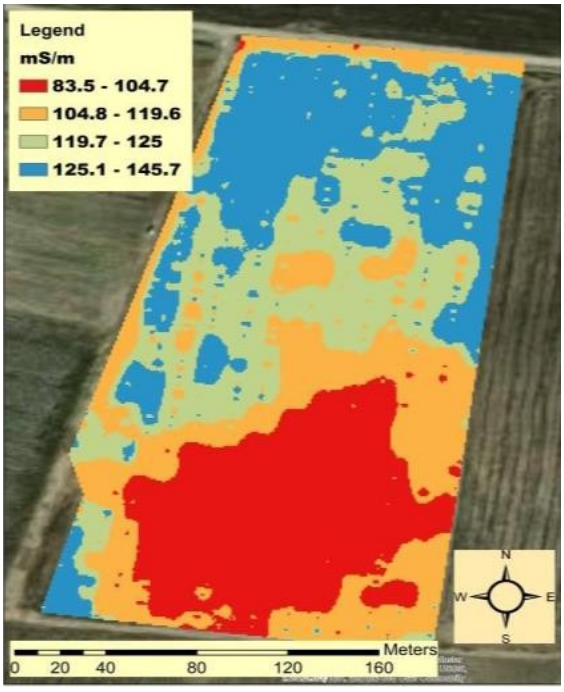
Το πρώτο στοιχείο που πρέπει να δούμε στο χωράφι για εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας είναι πόσο ομοιόμορφο είναι ή διαφορετικά πόσο διαφέρει από σημείο σε σημείο (παραλλακτικότητα). Για να προσδιορίσουμε την παραλλακτικότητα του εδάφους μπορούμε να το επιτύχουμε με αναλύσεις του εδάφους. Αν πάρουμε δείγματα εδάφους από πολλά σημεία και τα αναλύσουμε τότε μπορούμε να κάνουμε χάρτες με τις ιδιότητες του εδάφους όπως σύσταση (βαρύ, ελαφρύ, μέσο), περιεκτικότητα σε στοιχεία ή οργανική ουσία, pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα, περιεκτικότητα σε στοιχεία κ.λπ. (Πίνακες 1 και 2).

Υπάρχουν όμως και όργανα που μπορούν να μας δώσουν μια πρώτη εικόνα ενός χωραφιού με μέτρηση της φαινομενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Αυτή είναι η τιμή που το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει τη μάζα του εδάφους. Η ροή του ρεύματος στο έδαφος είναι συνάρτηση της υγρασίας του. Δεδομένου ότι τα πιο λεπτόκοκκα εδάφη (τα βαριά, τα αργιλώδη) συγκρατούν μεγαλύτερη υγρασία η μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα δείχνει υψηλότερο ποσοστό αργίλου και μικρότερο άμμου. Επομένως εάν πάρουμε μια μέτρηση με ομοιόμορφη υγρασία του εδάφους (π.χ. μετά από μια βροχή) τότε οι διαφορές της φαινομενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας δείχνουν διαφορές στη μηχανική σύσταση του εδάφους.

Ο χάρτης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρουσιάζει επιπλέον τη δράση της διάβρωσης του εδάφους. Από τα ανώτερα τμήματα η διάβρωση απομακρύνει τα λεπτόκοκκα υλικά (άργιλο κυρίως, αλλά και ιλύ) και αφήνει τα χονδρόκοκκα όπως την άμμο. Αποτέλεσμα μικρή ΦΗΑ. Τα λεπτόκοκκα υλικά έχουν μεταφερθεί με την απορροή του νερού στο κατώτερο σημείο του χωραφιού που έχει βαρύτερο έδαφος και μεγάλη ΦΗΑ.

Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήσαμε τον αισθητήρα EM38 (Geonics, LTD) για να χαρτογραφήσουμε την φαινομενική ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός αγροκτήματος έκτασης 32 στρεμμάτων στην περιοχή του Αγίου Γεωργίου Λάρισας (Εικόνα 1) και δημιουργήθηκαν τέσσερις ζώνες σε καλλιέργεια βαμβακιού για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας (Εικόνα 2).

Εικόνα 1 Φωτογραφία αγροτεμαχίου της υπό μελέτης περιοχής.



Εικόνα 2. Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αγροτεμαχίου. Ζώνη Α με κόκκινο χρώμα, Ζώνη Β με πράσινο, Ζώνη Γ με πορτοκαλί και Ζώνη Δ με μπλε χρώμα.

Πίνακας 1. Εδαφολογικές αναλύσεις των ζωνών της περιοχής

Δεδομένα	**Ζώνη Α**	**Ζώνη Β**	**Ζώνη Β**	**Ζώνη Δ**
Άργιλος (C)	50	47	42	44
Άμμος (S)	21	25	31	27
Ιλύς (Si)	29	28	27	29
Οργανική ουσία(%)	2	1,8	2,4	2,7
pH	7,8	7,9	8,0	8,1
EC (mS/cm)	0.15	0.20	0.15	0.1
$CaCO_3$ %	2	2	30	25
IAK (me/10g)	25	23	25	22
Άζωτο αμμων. (ppm)	8,6	8,6	8,6	8,6
Φώσφορος (ppm)	13	8,9	9,6	12
Κάλιο (ppm)	398	323,7	269,9	202,8
Μαγνήσιο (ppm)	144,3	398,4	222	410
Βόριο (ppm)	1,02	1,02	1,02	1,02
Σίδηρος (ppm)	11,47	11,5	11,35	11,55
Χαλκός (ppm)	2,91	3,01	2,78	3,13
Ψευδάργυρος (ppm)	0,73	0,93	1,02	0,82
Μαγγάνιο (ppm)	52,3	60,2	57,2	61,4

Πίνακας 2. Φυσικές παράμετροι των ζωνών της περιοχής

Δεδομένα	**Ζώνη Α**	**Ζώνη Β**	**Ζώνη Γ**	**Ζώνη Δ**
Υδατοϊκανότητα %	42,2	40,9	38,6	39,7
Σημείο Μόνιμης Μάρανσης %	29,7	28,2	25,7	26,7
Διαθέσιμη Υγρασία %	12,5	12,7	12,9	13,0
Υδραυλ. Αγωγ. Κορ. (Ks) σε mm/h	1,326	1,720	2,19	2,188
ΦΕΒ (g/cm^3)	1,31	1,33	1,37	1,34
Βάθος Ριζοστρώματος (m)	1	1	1	1
Συνολική Διαθέσιμη Υγρασία (mm)	163,75	168,91	176,73	174,2

2.2. ΥΔΑΤΟΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

Η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού σε κάθε άρδευση υπολογίζονταν από τα μετεωρολογικά στοιχεία που λαμβάνονταν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που ήταν εγκατεστημένος εντός του αγροκτήματος Γαιόπολις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη Λάρισα. Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, ETo, έγινε με τη χρήση της αναθεωρημένης μεθόδου FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή, ETc, υπολογίσθηκε από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ETo και τον απλό φυτικό συντελεστή (Allen et al., 1998) με τη σχέση:

$$ETc = Kc\ ETo \quad (1)$$

όπου Kc , ο φυτικός συντελεστής ο οποίος για το στάδιο (1) διάρκειας 20 ημερών είχε την τιμή 0,5, στο στάδιο (2) διάρκειας 22 ημερών αυξάνονταν γραμμικά από 0,5 έως 1,1, στο στάδιο (3) διάρκειας 60 ημερών ήταν 1,1 και τέλος στο στάδιο (4) διάρκειας 20 ημερών μειώνονταν γραμμικά από 1,11 έως 0,6. Οι μετρήσεις αναφέρονται στην περίοδο Μαΐου - Αυγούστου 2021. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται τα μήκη των σταδίων καθώς και η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά στάδιο ανάπτυξης.

Πίνακας 3 Διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας και συνολική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας κατά στάδιο για το έτος 2021.

Στάδιο	**1**	**2**	**3**	**4**	**Σύνολο**
Μήκος σταδίου (ημέρες)	20	22	60	20	**122**
(Α+Β) ET_c (mm)	40,70	80,52	357,27	101,97	**551,98**
(Γ+Δ) ET_c (mm)	42,68	85,56	357,18	98,57	**583,99**

Μετά τη σπορά του βαμβακιού , έγινε μια άρδευση για το φύτρωμα της καλλιέργειας, με αυτοπροωθούμενο εκτοξευτήρα στις 17-5-18 και δόση άρδευσης 20 mm. Η συνολική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ανήλθε σε 180,7 mm. Στον Πίνακα 4, δίνονται τα ύψη άρδευσης καθώς και το συνολικό νερό (άρδευση + βροχή + άρδευση φυτρώματος) για τις ζώνες Α και Β οι οποίες παρουσίασαν παρόμοιες υδροδυναμικές ιδιότητες καθώς και οι ζώνες Γ και Δ παρομοίως.

Πίνακας 4 Συνολικά ύψη άρδευσης για κάθε μεταχείριση, ποσοστό αρδευτικού νερού σε σχέση με το ύψος στη μεταχείριση Α και συνολικά ύψη νερού 2021.

Ζώνες καλλιέργειας	**Άρδευση (mm)**	**Συνολική Βροχόπτωση (mm)**	**Σύνολο νερού (mm)**
Α και Β	351,92	180,7	**532,62**
Γ και Δ	377,21	180,7	**557,79**

2.3. Λίπανση

Για να γίνει σωστή λίπανση είναι απαραίτητο να προηγηθεί εδαφολογική ανάλυση. Οι παραγωγοί πρέπει να κατανοήσουν την αναγκαιότητά της και να φροντίζουν να κάνουν αυτή την «ακτινογραφία» των χωραφιών τους.

Συμβουλευτική λίπανση ζώνης Α+Β

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΙΔΙΟΚΤΗΤΗ: Θωμάς Κυρίτσης
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ: βαμβάκι ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΑΓΡΟΥ: Βατιώνας, Άγιος Γεώργιος Λάρισας
ΕΚΤΑΣΗ: (στρεμ.) 9 ΒΑΘΟΣ (cm) : 0-30
ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΟ ΑΓΡΟ: ΣΥΝΤΕΤ.: X=39.48908, Y=22.357879

Άργιλος %	50	Άζωτο αμων. (ppm)	8,6
Άμμος %	21	Φώσφορος (ppm)	13
Ιλύς %	29	Κάλιο(ppm)	378
Οργ. Ουσία %	2,0	Μαγνήσιο (ppm)	149,32
pH	7,8	Βόριο (ppm)	1,02
EC (mS/cm)	0,15	Σίδηρος(ppm)	11,47
$CaCO_3$ (ολ.)%	2,0	Χαλκός (ppm)	2,91
IAK(me/10gr)	25	Ψευδάργυρος (ppm)	0,73
$CaCO_3$ (εν.)%		Μαγγάνιο (ppm)	52,3

Σχόλια για τη συμβουλευτική λίπανση

- **pH:** Το pH σε επίπεδα που δεν δημιουργεί προβλήματα στο βαμβάκι.
- **Οργανική ουσία:** Η οργανική ουσία σχετικά χαμηλή. Η προσθήκη χωνεμένης κοπριάς (1-2 τόνοι στο στρέμμα) ή άλλου οργανικού υλικού θα είχε ευνοϊκά αποτελέσματα.
- **Ολικό CaCO3:** Η περιεκτικότητα σε CaCO3 δεν δημιουργεί προβλήματα στο βαμβάκι. Το έδαφος αντέχει στα όξινα λιπάσματα.
- **Ηλεκτρική αγωγιμότητα:** Δεν υπάρχει πρόβλημα αλατότητας.
- **Μηχανική σύσταση:** Έδαφος βαρύ, πιθανόν να υπάρξουν προβλήματα στραγγίσεως.
- **Άζωτο:** Προτείνονται 14-16 μονάδες αζώτου στο στρέμμα. Μισές μονάδες στη βασική λίπανση και το υπόλοιπο σε δύο δόσεις, μία πριν το σχηματισμό των χτενιών και μία το αργότερο μέχρι την έναρξη σχηματισμού των πρώτων καρυδιών.
- **Φώσφορος:** Προτείνονται 4-5 μονάδες φωσφόρου στο στρέμμα. Όλες οι μονάδες στη βασική λίπανση.
- **Κάλιο:** Σε επάρκεια για μία ως δύο καλλιεργητικές περιόδους.
- **Μαγνήσιο:** Σε επάρκεια., **Σίδηρος:** Σε επάρκεια**. Μαγγάνιο:** Σε επάρκεια. **Ψευδάργυρος:** Σε επάρκεια. **Χαλκός:** Σε επάρκεια. **Βόριο:** Σε επάρκεια.

Συμβουλευτική λίπανση ζώνης Γ+Δ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΙΔΙΟΚΤΗΤΗ: Θωμάς Κυρίτσης
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ: βαμβάκι ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΑΓΡΟΥ: Βατιώνας, Άγιος Γεώργιος Λάρισας
ΕΚΤΑΣΗ: (στρεμ.) 7,5 ΒΑΘΟΣ (cm) : 0-30
ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΟ ΑΓΡΟ: ΣΥΝΤΕΤ.: Χ=39.487931, Υ=22.358339

Άργιλος %	42	Άζωτο αμων. (ppm)	8,6
Άμμος %	31	Φώσφορος (ppm)	9,6
Ιλύς %	27	Κάλιο(ppm)	269,9
Οργ. Ουσία %	2,4	Μαγνήσιο (ppm)	222
pH	8,0	Βόριο (ppm)	1,02
EC (mS/cm)	0,15	Σίδηρος(ppm)	11,47
$CaCO_3$ (ολ.)%	30	Χαλκός (ppm)	2,91
IAK(me/10gr)	25	Ψευδάργυρος (ppm)	0,73
$CaCO_3$ (εν.)%		Μαγγάνιο (ppm)	52,3

Σχόλια για τη συμβουλευτική λίπανση

- **pH:** Το pH σε επίπεδα που δεν δημιουργεί προβλήματα στο βαμβάκι.
- **Οργανική ουσία**: Η οργανική ουσία κανονική για της Ελληνικές συνθήκες.
- **Ολικό CaCO3:** Η παρουσία CaCO3 αυξάνει την πιθανότητα εμφανίσεως προβλημάτων με τον σίδηρο και ψευδάργυρο. Να προτιμώνται τα όξινα λιπάσματα, π.χ. θειική αμμωνία.
- **Ηλεκτρική αγωγιμότητα:** Δεν υπάρχει πρόβλημα αλατότητας.
- **Μηχανική σύσταση:** Έδαφος βαρύ, πιθανόν να υπάρξουν προβλήματα στραγγίσεως.
- **Άζωτο:** Προτείνονται 14-16 μονάδες αζώτου στο στρέμμα. Μισές μονάδες στη βασική λίπανση και το υπόλοιπο σε δύο δόσεις, μία πριν το σχηματισμό των χτενιών και μία το αργότερο μέχρι την έναρξη σχηματισμού των πρώτων καρυδιών.
- **Φώσφορος:** Προτείνονται 4-5 μονάδες φωσφόρου στο στρέμμα. Όλες οι μονάδες στη βασική λίπανση.
- **Κάλιο:** Σε επάρκεια για μία ως δύο καλλιεργητικές περιόδους.
- **Μαγνήσιο:** Σε επάρκεια. **Σίδηρος**: Σε επάρκεια. **Μαγγάνιο:** Σε επάρκεια. **Ψευδάργυρος:** Σε επάρκεια. **Χαλκός:** Σε επάρκεια. **Βόριο:** Σε επάρκεια.

2.4 Συμβουλευτική φυτοπροστασία βαμβακιού

2.4.1 Το βαμβάκι και τα ζιζάνια

Τα ζιζάνια στο βαμβάκι προκαλούν έως 90% μείωση παραγωγής και υποβάθμιση ποιότητας λόγω ανταγωνισμού για φως, νερό, θρεπτικά στοιχεία και χώρο. Επίσης, τα ζιζάνια, ως ξενιστές μικροοργανισμών και εντόμων, μπορούν να επιφέρουν ασθένειες και να προσελκύσουν εχθρούς στην καλλιέργεια του βαμβακιού, να δυσχεράνουν τις καλλιεργητικές εργασίες, να προκαλέσουν δυσκολία καθαρισμού του σύσπορου στο εκκοκκιστήριο και να υποβαθμίσουν την ποιότητα της ίνας. Η αντιμετώπιση των ζιζανίων στο βαμβάκι για να είναι αποτελεσματική πρέπει να εφαρμόζεται βάσει ολοκληρωμένου προγράμματος διαχείρισης των ζιζανίων.

Το βαμβάκι θεωρείται φυτό με αργό ρυθμό ανάπτυξης. Αυτό σε συνδυασμό με τις μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των γραμμών σποράς, δημιουργεί ακάλυπτο χώρο στον αγρό για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα που ευνοεί την ανάπτυξη των ζιζανίων. Η περίοδος κατά την οποία τα ζιζάνια ζημιώνουν περισσότερο την παραγωγή του βαμβακιού είναι από τη 2η ως την 11η εβδομάδα μετά το φύτρωμά του (ΕΜΦ) και κυρίως το διάστημα μεταξύ 4ης και 9ης ΕΜΦ. Στο χρονικό αυτό διάστημα (2η-11η ΕΜΦ), γνωστό ως «κρίσιμη περίοδο ανταγωνισμού», στον αγρό πρέπει να υπάρχουν όσο το δυνατό λιγότερο ζιζάνια. Ζιζάνια

που θα εμφανιστούν μετά την 11η ΕΜΦ, δηλ. μετά την κρίσιμη περίοδο ανταγωνισμού, δεν θα προκαλέσουν σημαντική μείωση παραγωγής που να δικαιολογεί την αντιμετώπισή τους. Από αυτά τα κυριότερα ζιζάνια αποτελούν η κύπερη. η αγριοτοματιά, η αγριομελιτζάνα, η περιπλοκάδα, η αγριοβαμβακιά, ο τάτουλας, ανάλογα με την περιοχή και τις συνθήκες υγρασίας εδάφους, (Τόλης, 1989).

2.4.2. Ολοκληρωμένη διαχείριση ζιζανίων

Η αντιμετώπιση των ζιζανίων στο βαμβάκι θα πρέπει να στηρίζεται στην Ολοκληρωμένη Διαχείριση Ζιζανίων. Αυτό σημαίνει αποτελεσματικός συνδυασμός όλων των διαθέσιμων μεθόδων/μέτρων αντιμετώπισης, με σκοπό τον έλεγχο των ζιζανίων που να προσδίδει οικονομικό όφελος με την όσο δυνατό μικρότερη επιβάρυνση στο περιβάλλον. Προληπτικά και καλλιεργητικά μέτρα, μηχανικές και χημικές μέθοδοι αποτελούν στοιχεία της Ολοκληρωμένης Διαχείρισης και ο σωστός συνδυασμός τους στοχεύει στην αποτελεσματική αντιμετώπιση των ζιζανίων. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα μέτρα και οι μέθοδοι που μπορούν να συνδυαστούν στο βαμβάκι.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αειφορική γεωργία, γενικά, χαρακτηρίζεται η οικολογική υγιής γεωργία, η οικονομικά βιώσιμη, η κοινωνικά δίκαιη και ανθρώπινη. Η καταγωγή του βαμβακιού προέρχεται από τροπικές και υποτροπικές περιοχές, γι'αυτό και πρέπει να καλλιεργείται σε περιοχές με σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλη ηλιοφάνεια όπως είναι ο Θεσσαλικός κάμπος.

Για την εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία μέσω της χρήσης του EM38. Το δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού της θέσης μας στην επιφάνεια της Γης (GPS) με τρεις τουλάχιστον δορυφόρους να στέλνουν από ένα σήμα με χρόνο εκπομπής που λαμβάνει ένας δέκτης στο σημείο που θέλουμε. Με το EM38 που διαθέτει το εργαστήριο Γεωργίας Ακριβείας του Τμήματος Γεωπονίας Αγροτεχνολογίας έγινε εφαρμογή σε χωράφι της περιοχής Αγίου Γεωργίου Λάρισας και δημιουργήθηκαν τέσσερις ζώνες σε καλλιέργεια βαμβακιού για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Σε κάθε ζώνη έγινε δειγματοληψία εδάφους. Με βάση τις αναλύσεις του εδάφους προσδιορίστηκαν οι φυσικές και χημικές ιδιότητες της κάθε ζώνης. Ο προγραμματισμός της άρδευσης έγινε με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού που διαθέτει το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε το πρόγραμμα FAO-56 για τη συμβουλευτική άρδευση και έγιναν 12 αρδεύσεις με σύνολο αρδευτικού νερού για τις ζώνες Α και Β 351,92 m3/στρ. και για τις ζώνες Γ και Δ 377,21 m3/στρ. , με συνολική βροχόπτωση 180.7 m3/στρ. .

Σε όλες τις ζώνες βρέθηκε ότι ήταν αναγκαία η προσθήκη 14 έως 16 μονάδων αζώτου το στρέμμα, 4 έως 5 μονάδες φωσφόρου το στρέμμα , και ότι υπάρχει επάρκεια καλίου για μία με δύο καλλιεργητικές περιόδους.

Από πλευράς φυτοπροστασίας, η ζιζανιοκτονία με βάση τα υπάρχοντα ζιζάνια, έγινε με προσπαρτική εφαρμογή συνδυασμού των δραστικών ουσιών pendimethalin (Stomp) και fluometuron (Cottoran) με ενσωμάτωση στο έδαφος, και μετέπειτα εφαρμογή του fluometuron επιφανειακά όπου ακολούθησε άρδευση φυτρώματος.

Για τους εντομολογικούς εχθρούς έγιναν ψεκασμοί μετά από παρακολούθηση των πληθυσμών τους, με πυρεθροειδή εντομοκτόνα, καθώς και με βιολογικά σκευάσματα όπου κρίθηκε απαραίτητο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η Ελλάδα είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός βάμβακος στην Ευρωπαϊκή Ένωση, καλύπτοντας πάνω από το 80% της συνολικής παραγωγής της Ε.Ε.

- Η γεωργία ακριβείας αποτελεί ένα συνδυασμό της τεχνολογίας με τη βιωσιμότητα, προσφέροντας καλύτερη απόδοση με λιγότερους πόρους και με σεβασμό στο περιβάλλον.

- Με τη συμβουλευτική άρδευση, λίπανση, φυτοπροστασία επιτυγχάνεται η βέλτιστη χρήση εφοδίων (νερό, λιπάσματα, φυτοφάρμακα) με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους παραγωγής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αλεξίου Ι., Κωτσόπουλος Σ., Καλφούντζος Δ., και Βύρλας Π., 2000. Εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής μέσω συναρτήσεων διαθεσιμότητας της εδαφικής υγρασίας. 8ο Πανελλήνιο Συνέδριο, Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Αθήνα, Πρακτικά , 493-500.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., 1998, Crop Evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, FAO, Rome.

Doorenbos, J. and Pruitt W. O. 1977. Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24. 144 p.

Doorenbos, J. and Kassam, A. H., 1979. Yield Response to Water, FAO Irrigation and Drainage Paper No 33. 193 p.

Gipson, J. R. and Ray, L. L., 1970. Temperature-variety interrelationships in cotton. I. Boll and fiber development. Cotton Growers Rev. 47:257-271.

Κόκκορα Μ., Τσιτούρας Α., Καλφούντζος Δ., 2021. Προβλήματα άρδευσης καλλιεργειών στη Θεσσαλία. 16ο Πανελλήνιο Συνέδριο, Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Θεσσαλονίκη, Πρακτικά.

Κωτσόπουλος Σ., Αλεξιου Ι., Καλφούντζος Δ. και Βύρλας Π. 1999. Σχέσεις νερού και παραγωγής βαμβακιού σε περιοχές της Θεσσαλίας. 4ο Εθνικό Συνέδριο ΕΕΔΥΠ Βόλος, Πρακτικά Τεύχος Α’, 177-182.

Μπιλάλης Δ. 2021 Κλιματική αλλαγή και βαμβακοκαλλιέργεια, 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο για το Βαμβάκι, Λάρισα.

Παπαζαφειρίου Ζ. Γ. 1984. Αρχές και Πρακτική των Αρδεύσεων, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Παπακώστα – Τασοπούλου Δ. 2013., Βιομηχανικά φυτά, εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη, σελ. 560.

Τόλη , Ι. (1989). Καλλιέργεια και φυτοπροστασία του Βαμβακιού στην Ελλάδα. Φουντάς Σ. & Γέμτος Θ. (2015). Γεωργία ακριβείας (χ.τ.) : Κάλλιπος.

Stewart, J. R. and Hagan, R. M., 1973. Functions to predict effects of crop water deficits. J. Irrig. and Drain. Engng, ASCE, 99 pp 421-439.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΚΛΗΡΟΥ ΣΙΤΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL-2

Μ. Μπέμπη, Α. Κυπαρίσσης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Φυτόκο, 38446, Βόλος, mbempi@uth.gr

Περίληψη

Η ακριβής εκτίμηση της απόδοσης του σκληρού σίτου είναι υψηλής σημασίας στην γεωργία ακριβείας. Τα πολυφασματικά δεδομένα της δορυφορικής αποστολής Sentinel-2 και οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αποτελούν ορισμένα σύγχρονα εργαλεία γι' αυτόν τον σκοπό. Η παρούσα εργασία επεκτείνει προϋπάρχουσα έρευνα, μέσω της εφαρμογής προηγμένων τεχνικών μηχανικής μάθησης για την εκτίμηση της παραγωγής στον Θεσσαλικό κάμπο. Για την ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν πολυφασματικά δεδομένα επταετίας (2017–2024) και δεδομένα απόδοσης από 271 αγροτεμάχια. Οι διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες υποβλήθηκαν σε χρονική παρεμβολή και επιλέχθηκαν 14 αντιπροσωπευτικές ημερομηνίες ανά καλλιεργητική περίοδο για την εκπαίδευση των μοντέλων. Η απόδοση έξι αλγορίθμων (Random Forests, K–Nearest Neighbors, Gradient Boosting, Elastic Net, AdaBoost, Neural Networks) αξιολογήθηκε με 5–fold cross–validation. Επίσης, διερευνήθηκε ο αντίκτυπος της σταδιακής μείωσης της χρονικής πληροφορίας στην ακρίβεια της πρόβλεψης και συγκρίθηκαν δύο μέθοδοι κανονικοποίησης δεδομένων, η τυπική z–score και μια καινοτόμος προσέγγιση βασισμένη στη ζώνη του εγγύς υπέρυθρου (NIR). Από τα αποτελέσματα, η υψηλότερη ακρίβεια (R^2>0.93) επιτεύχθηκε από τους αλγορίθμους AdaBoost και KNN στα z–score κανονικοποιημένα δεδομένα, με τον Random Forest να αποδίδει επίσης πολύ καλά (R^2=0.918). Στην περίπτωση της έγκαιρης πρόβλεψης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η υψηλή απόδοση (R^2=0.90) από τους Random Forest και KNN, ακόμη και με δεδομένα μόνο μέχρι τον Φεβρουάριο. Συμπερασματικά, η μελέτη συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των τρόπων με τους οποίους τα φασματικά δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά για την έγκαιρη και ακριβή πρόβλεψη της παραγωγής σκληρού σίτου, μέσω της εφαρμογής σύγχρονων μεθοδολογιών μηχανικής μάθησης.

Λέξεις κλειδιά: Σκληρό σιτάρι, Sentinel-2, μηχανική μάθηση, τηλεπισκόπηση, γεωργία ακριβείας

A COMPARATIVE ANALYSIS OF ADVANCED MACHINE LEARNING TECHNIQUES FOR DURUM WHEAT YIELD MODELING USING SENTINEL-2 MULTISPECTRAL DATA

M. Bempi ✉, A. Kyparissis

University of Thessaly, Department of Agriculture, Plant Production and Rural Environment, Fytoko, 38446, Volos, ✉mbempi@uth.gr

Abstract

The accurate estimation of durum wheat yield is of high importance in precision agriculture. Multispectral data from the Sentinel-2 satellite mission and machine learning algorithms are powerful modern tools for this purpose. The present study extends previous research, through the application of advanced machine learning techniques for yield estimation in the Thessaly plain. For the analysis, seven years of multispectral data (2017–2024) and yield data from 271 fields were utilized. The available satellite images were subjected to temporal interpolation, and 14

representative dates per growing season were selected for the model training. The performance of six algorithms (Random Forests, K–Nearest Neighbors, Gradient Boosting, Elastic Net, AdaBoost, Neural Networks) was evaluated with 5–fold cross–validation. Furthermore, the impact of the gradual reduction of temporal information on the prediction accuracy was investigated, and two data normalization methods were compared, the standard z-score and a novel approach based on the near-infrared (NIR) band. From the results, the highest accuracy (R^2>0.93) was achieved by the AdaBoost and KNN algorithms on the z-score normalized data, with Random Forest also performing very well (R^2=0.918). In the case of early prediction, the high performance (R^2≈0.90) from Random Forest and KNN is of interest, even with data only up to February. In conclusion, the study contributes to a better understanding of the ways in which spectral data can be effectively utilized for the early and accurate yield prediction of durum wheat, through the application of modern machine learning methodologies.

Key words: durum wheat, Sentinel-2, machine learning, remote sensing, precision agriculture

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκληρό σιτάρι αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα δημητριακά παγκοσμίως και κατέχει κεντρικό ρόλο στην αγροτική οικονομία. Στο πλαίσιο αυτό, η έγκαιρη και η ακριβής εκτίμηση της παραγωγής του είναι υψηλής σημασίας. Η γεωργία ακριβείας, με τις προσεγγίσεις που βασίζονται σε δεδομένα και τις στοχευμένες πρακτικές διαχείρισης, προσφέρει μια ελπιδοφόρα οδό για την βελτιστοποίηση της παραγωγής του σίτου και την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων του αγροτικού τομέα (Chergui, 2022). Η εφαρμογή των τεχνολογιών τηλεπισκόπησης, οι οποίες αξιοποιούν τις δορυφορικές εικόνες, αναδεικνύεται πλέον ως ένα χρήσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη της απόδοσης των καλλιεργειών (Ali et al., 2022). Η υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση των τεχνολογιών αυτών επιτρέπει την συνεχή παρακολούθηση της ανάπτυξης των φυτών και των περιβαλλοντικών παραγόντων και υποστηρίζει την λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο (Kayad et al., 2019). Πιο συγκεκριμένα, η αποστολή Sentinel-2 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) έχει συμβάλλει σημαντικά στην πρόοδο της γεωργικής παρακολούθησης. Η αποστολή είναι εξοπλισμένη με πολυφασματικούς αισθητήρες που καταγράφουν σε 13 φασματικές ζώνες και παρέχει εικόνες υψηλής ανάλυσης με συχνότητα επανάληψης έως και 5 ημερών, γεγονός που διευκολύνει τις λεπτομερείς παρατηρήσεις της ανάπτυξης των καλλιεργειών (Drusch et al., 2012).

Παράλληλα με την πρόοδο της τηλεπισκόπησης, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML) έχουν αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση των πολυδιάστατων και πολύπλοκων δεδομένων που προκύπτουν. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους που βασίζονται στους δείκτες βλάστησης, οι οποίοι αξιοποιούν ένα περιορισμένο σύνολο των φασματικών ζωνών, οι τεχνικές μηχανικής μάθησης έχουν την ικανότητα να αξιοποιούν το σύνολο της φασματικής πληροφορίας, να μοντελοποιούν μη–γραμμικές σχέσεις και να αποκαλύπτουν πρότυπα που δεν είναι εμφανή με τις κλασικές αναλυτικές μεθόδους (C. Zhang & Ma, 2012).

Η παρούσα εργασία αποτελεί επέκταση και εμβάθυνση προηγούμενης έρευνας (Bebie et al., 2022), στην οποία είχε γίνει μια αρχική σύγκριση μεταξύ μοντέλων που βασίζονταν σε δείκτες βλάστησης και μοντέλων μηχανικής μάθησης. Η τρέχουσα μελέτη ενισχύει την αρχική ανάλυση μέσω της επέκτασης του συνόλου δεδομένων από πέντε σε επτά καλλιεργητικές περιόδους και εστιάζει αποκλειστικά στον τομέα της μηχανικής μάθησης. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι η συνδυαστική χρήση δεδομένων από πολλά διαφορετικά έτη απαιτεί την κατάλληλη κανονικοποίηση (Shang & Zhu, 2019), γι’ αυτό και διερευνάται η εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών κανονικοποίησης των δεδομένων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συγκριτική ανάλυση προηγμένων τεχνικών μηχανικής μάθησης για την εκτίμηση της απόδοσης του σκληρού σίτου, με την χρήση πολυφασματικών

δεδομένων Sentinel-2 επταετίας. Ειδικότερα, οι επιμέρους στόχοι είναι να αξιολογηθεί η απόδοση έξι διαφορετικών αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, να διερευνηθεί η ανθεκτικότητα των μοντέλων και η δυνατότητα για έγκαιρη πρόβλεψη μέσω της σταδιακής μείωσης της διαθέσιμης χρονικής πληροφορίας, και τέλος να συγκριθεί η επίδραση δύο διαφορετικών μεθόδων κανονικοποίησης των δεδομένων εισόδου στην τελική ακρίβεια των προβλέψεων.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιοχή μελέτης και δεδομένα απόδοσης

Η έρευνα διεξήχθη σε αγροτεμάχια που βρίσκονται στον Θεσσαλικό κάμπο, στην κεντρική Ελλάδα. Για τις ανάγκες του πειράματος, έγινε συλλογή δεδομένων από συνολικά 271 αγροτεμάχια, κατά την διάρκεια επτά διαδοχικών καλλιεργητικών περιόδων (2017-2018 έως και 2023-2024). Η αναλυτική κατανομή των δεδομένων αυτών ανά έτος παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Τα αγροτεμάχια ήταν καλλιεργημένα με πολλές διαφορετικές ποικιλίες σκληρού σίτου (Iridae, Meridiano, Normano, Simeto, Svevo, κ.α.) και ανήκαν σε διαφορετικούς παραγωγούς που ακολουθούσαν τις δικές τους ξεχωριστές καλλιεργητικές πρακτικές. Η ποικιλομορφία των συνθηκών μεταξύ των αγρών δεν αποτέλεσε εμπόδιο στην πειραματική διαδικασία. Αντίθετα, επιλέχθηκε συνειδητά έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων θα μπορούσαν να αξιολογηθούν υπό διαφορετικές πραγματικές συνθήκες, το οποίο αυξάνει την γενικευσιμότητα τους. Η σπορά σε όλα τα αγροτεμάχια πραγματοποιήθηκε κατά τον Νοέμβριο και η συγκομιδή κατά τον Ιούνιο του εκάστου έτους. Τα δεδομένα της τελικής απόδοσης συλλέχθηκαν κατά τη συγκομιδή με τη χρήση θεριζοαλωνιστικής μηχανής (John Deere S660i), εξοπλισμένης με σύστημα χαρτογράφησης της απόδοσης. Τα αρχικά γεωαναφερμένα δεδομένα υποβλήθηκαν σε επεξεργασία στο λογισμικό QGIS για την αφαίρεση των ακραίων τιμών. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε η μετατροπή των δεδομένων σε μορφή raster με την μέθοδο της αντίστροφης στάθμισης απόστασης (inverse distance weighting, IDW), και η χωρική τους ανάλυση προσαρμόστηκε σε μέγεθος εικονοστοιχείου (pixel) στα 10×10 μέτρα, έτσι ώστε να είναι συμβατή με αυτή των δορυφορικών δεδομένων του Sentinel-2.

Πίνακας 1. Αναλυτική κατανομή των δεδομένων απόδοσης ανά καλλιεργητική περίοδο.

Καλλιεργητική περίοδος	Αριθμός αγροτεμαχίων	Έκταση (εκτάρια)	Αριθμός εικονοστοιχείων	Αριθμός εικόνων
2017 – 2018	21	53.04	5304	35
2018 – 2019	21	50.31	5031	26
2019 – 2020	24	85.91	8591	32
2020 – 2021	35	130.5	13050	34
2021 – 2022	56	149.49	14949	28
2022 – 2023	55	125.85	12585	36
2023 – 2024	59	109.25	10925	44
Σύνολο	**271**	**704.35**	**70435**	**235**

2.2 Δορυφορικά δεδομένα

Για τις ανάγκες της ανάλυσης, αξιοποιήθηκαν όλες οι διαθέσιμες, ελεύθερες νεφών, δορυφορικές εικόνες Sentinel-2 (A και B) από την πλατφόρμα Copernicus Data Space Ecosystem. Χρησιμοποιήθηκαν προϊόντα επιπέδου 2A, τα οποία παρέχουν τιμές της ανακλαστικότητας της επιφάνειας (Bottom of Atmosphere – BOA) οι οποίες έχουν ήδη υποστεί ατμοσφαιρική και ραδιομετρική διόρθωση. Για την διασφάλιση της ομοιομορφίας, όλες οι φασματικές ζώνες των εικόνων επαναδιατάχθηκαν (resampling) σε μέγεθος εικονοστοιχείου 10 μέτρων με την χρήση της πλατφόρμας SNAP-ESA. Δεδομένης της χρονικής ασυνέπειας στις ημερομηνίες λήψης μεταξύ των επτά ετών, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός χρονικά πλήρους συνόλου δεδομένων. Για

να γίνει αυτό, εφαρμόστηκε απλή γραμμική χρονική παρεμβολή (temporal interpolation) στο σύνολο των φασματικών δεδομένων, με την χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python (έκδοση 3.13.0), χωρίς να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη μέθοδος εξομάλυνσης (smoothing). Η παρεμβολή πραγματοποιήθηκε σε χρονικό βήμα πέντε ημερών, έτσι ώστε να παραχθεί ένα διαχειρίσιμο σε όγκο αλλά ταυτόχρονα πυκνό χρονικά σύνολο δεδομένων. Μέσω της διαδικασίας αυτής, δημιουργήθηκε μια πλήρης χρονοσειρά για το κάθε έτος, από την οποία επιλέχθηκαν 14 ημερομηνίες για την ανάλυση, που καλύπτουν όλα τα αναπτυξιακά στάδια της καλλιέργειας. Σημειώνεται εδώ πως η ποιότητα των αρχικών δεδομένων ήταν υψηλή, καθότι το μέγιστο κενό μεταξύ διαθέσιμων λήψεων δεν υπερέβαινε τις 30 ημέρες σε καμία καλλιεργητική περίοδο από το 2017 έως και το 2024.

2.3 Μοντελοποίηση

Για την μοντελοποίηση της απόδοσης, αξιολογήθηκε η απόδοση έξι αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Ο αλγόριθμος Random Forest (RF) είναι μια μέθοδος συνόλου (ensemble method) που κατασκευάζει πολλαπλά δέντρα απόφασης κατά την εκπαίδευση και συνδυάζει τις προβλέψεις τους, το οποίο βοηθάει στην μείωση της υπερπροσαρμογής και ενισχύει την ακρίβεια (Cutler et al., 2012). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιείται εκτενώς για την εκτίμηση της απόδοσης και χαρακτηρίζεται από χαμηλή ευαισθησία στις ακραίες τιμές (Dang et al., 2021; Roell et al., 2020). Ο αλγόριθμος K-Nearest Neighbors (KNN) είναι ένας μη παραμετρικός αλγόριθμος που προβλέπει την τιμή ενός νέου σημείου δεδομένων μέσα από τον υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών των «k» πλησιέστερων γειτόνων του στο σύνολο της εκπαίδευσης. Η μέθοδος βασίζεται στην παραδοχή ότι παρόμοια δεδομένα εισόδου παράγουν παρόμοιες τιμές εξόδου, το οποίο τον καθιστά κατάλληλο για την αντιμετώπιση μη-γραμμικών σχέσεων στα δεδομένα (Aha et al., 1991). Το Gradient Boosting είναι μια τεχνική συνόλου που συνδυάζει διαδοχικά πολλαπλούς «αδύναμους» μαθητές (συνήθως δέντρα απόφασης) για την δημιουργία ενός ισχυρότερου προγνωστικού μοντέλου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με κάθε νέο μαθητή να εστιάζει στην διόρθωση των σφαλμάτων του προηγούμενου. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα στον θόρυβο και στις ακραίες τιμές (Duffy & Helmbold, 2002; L. Zhang et al., 2019). Το AdaBoost είναι μια παραλλαγή των αλγορίθμων ενίσχυσης, καθώς προσαρμόζει διαδοχικά το μοντέλο δίνοντας μεγαλύτερο βάρος στα σημεία δεδομένων που ταξινομήθηκαν λανθασμένα από τους προηγούμενους μαθητές (Solomatine & Shrestha, 2004). Το Elastic Net Linear Regression είναι μια μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης που συνδυάζει τις τεχνικές κανονικοποίησης L1 και L2, το οποίο την καθιστά αποτελεσματική για δεδομένα που έχουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών (Z. Zhang et al., 2017). Τέλος, αξιολογήθηκε ένας αλγόριθμος Νευρωνικών Δικτύων (Neural Networks), και συγκεκριμένα ένα Multilayer Perceptron (MLP). Το μοντέλο ρυθμίστηκε με ένα κρυφό επίπεδο 100 νευρώνων, την συνάρτηση ενεργοποίησης ReLu, τον βελτιστοποιητή Adam, με κανονικοποίηση L2 (alpha=0.0001) και μέγιστο αριθμό 200 επαναλήψεων. Τα Neural Networks είναι υπολογιστικά μοντέλα που μοντελοποιούν τις εξαιρετικά πολύπλοκες, μη–γραμμικές σχέσεις μέσω ενός συστήματος αλληλοσυνδεδεμένων κόμβων (Aubakirova et al., 2022; Wu & Feng, 2018; Yuste, 2015).

Κατά την διαδικασία της μοντελοποίησης διερευνήθηκαν δύο διακριτές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση αφορούσε την διερεύνηση της δυνατότητας των μοντέλων για την έγκαιρη πρόβλεψη της τελικής απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία περιλάμβανε την σταδιακή αφαίρεση των δεδομένων ανά μήνα, ξεκινώντας από την τελευταία ημερομηνία και προχωρώντας σταδιακά προς την αρχή της καλλιεργητικής περιόδου. Σε κάθε βήμα, οι αλγόριθμοι επανεκπαιδεύονταν με το μειωμένο σύνολο δεδομένων και η απόδοσή τους αξιολογούνταν εκ νέου.

Η δεύτερη προσέγγιση εστίαζε στην σύγκριση και αξιολόγηση της απόδοσης μοντέλων που αξιοποιούν διαφορετικές μεθόδους κανονικοποίησης των δεδομένων. Οι κανονικοποιήσεις εφαρμόστηκαν στο σύνολο των δεδομένων εισόδου. Η πρώτη ήταν η τυπική κανονικοποίηση z–

score. Πρόκειται για έναν απλό μετασχηματισμό, κατά τον οποίο από κάθε τιμή αφαιρείται η μέση τιμή του συνόλου των δεδομένων και στην συνέχεια διαιρείται με την τυπική τους απόκλιση, έτσι ώστε τελικά τα δεδομένα να έχουν μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1 (Fei et al., 2021). Η δεύτερη προσέγγιση που αναπτύχθηκε αποτελεί μια σχετική ραδιομετρική κανονικοποίηση (Relative Radiometric Normalization – RRN), η οποία στοχεύει στην ομογενοποίηση των φασματικών αποκρίσεων μεταξύ των εικόνων που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (Gan et al., 2021). Στην παρούσα εργασία, αξιοποιήθηκε η τιμή ανακλαστικότητας της ζώνης του εγγύς υπέρυθρου (NIR–B8) ως μια δυναμική βάση αναφοράς για κάθε εικονοστοιχείο σε κάθε μεμονωμένη εικόνα. Με αυτόν τον τρόπο, οι τιμές των υπόλοιπων φασματικών ζωνών μετατράπηκαν σε λόγους χωρίς μονάδες, σχετικούς ως προς την τιμή του NIR, μια διαδικασία που αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των επιδράσεων από τις μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες και τις συνθήκες φωτισμού, το οποίο μειώνει την μεταβλητότητα των δεδομένων μεταξύ των ετών. Η σύγκριση αυτών των δύο μεθόδων πραγματοποιήθηκε για να διαπιστωθεί αν η στοχευμένη κανονικοποίηση βάσει NIR μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση και γενικευσιμότητα των μοντέλων πρόβλεψης.

2.4 Στατιστική ανάλυση

Η ανάπτυξη και η στατιστική ανάλυση όλων των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα Orange Data Mining (*Orange Data Mining*, 2025). Για την εκπαίδευση και την επικύρωση των μοντέλων, το σύνολο των δεδομένων χωρίστηκε τυχαία στο υποσύνολο εκπαίδευσης (training set), που περιλάμβανε το 80% των δεδομένων, και στο υποσύνολο ελέγχου (test set), που περιλάμβανε το υπόλοιπο 20%. Σε όλα τα μοντέλα εφαρμόστηκε 5–fold cross–validation. Η απόδοση των μοντέλων αξιολογήθηκε με βάση τον συντελεστή προσδιορισμού (R^2), τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και την κλίση της γραμμής βέλτιστης προσαρμογής μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών απόδοσης (slope).

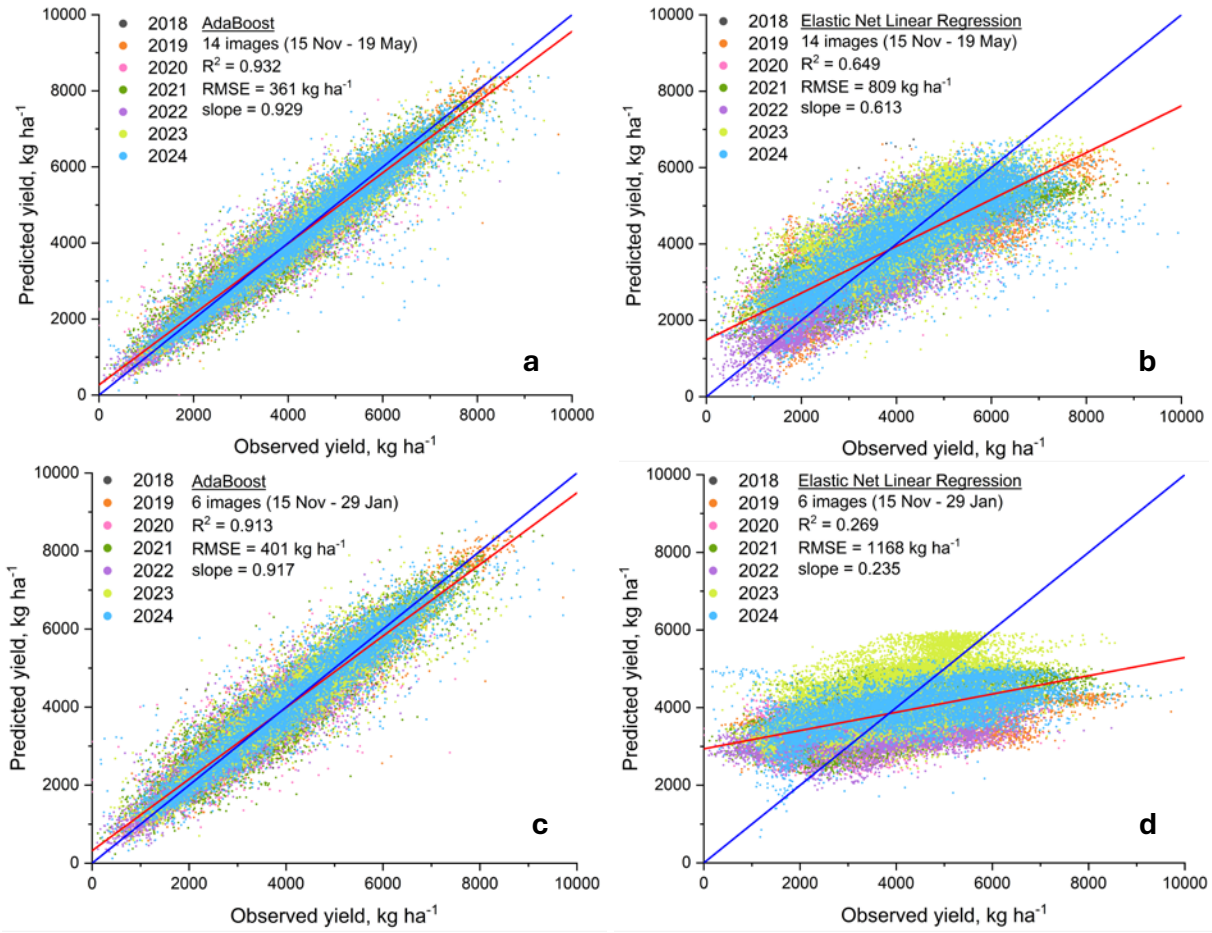
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πίνακας 2. Αξιολόγηση της απόδοσης των έξι μοντέλων μηχανικής μάθησης ως προς την σταδιακή μείωση της χρονικής πληροφορίας, με την χρήση της κανονικοποίησης z-score. Οι μετρικές R^2 (αδιάστατος), RMSE και MAE (kg ha^{-1}) υπολογίστηκαν στο υποσύνολο ελέγχου (test set). Οι καλύτερες επιδόσεις είναι σημειωμένες με έντονη γραμματοσειρά.

Αλγόριθμος	Μετρική	15/11 – 19/05	15/11 – 29/04	15/11 – 30/03	15/11 – 28/02	15/11 – 29/01
Random Forest	**R^2**	0.914	0.906	0.9	0.896	0.888
	RMSE	399	417	431	439	455
	MAE	276	289	300	306	319
kNN	**R^2**	0.919	0.91	0.901	0.896	0.888
	RMSE	387	408	429	438	456
	MAE	274	286	297	303	313
Gradient Boosting	**R^2**	0.772	0.737	0.683	0.607	0.533
	RMSE	650	699	767	854	931
	MAE	492	532	586	655	718
Elastic Net Linear Regression	**R^2**	0.647	0.581	0.467	0.373	0.265
	RMSE	809	881	994	1078	1168
	MAE	619	681	770	843	921
AdaBoost	**R^2**	**0.93**	**0.923**	**0.918**	**0.916**	**0.913**
	RMSE	**361**	**379**	**391**	**394**	**401**
	MAE	**248**	**259**	**270**	**274**	**280**

Neural Network	**R^2**	0.867	0.829	0.767	0.687	0.61
	RMSE	496	563	657	761	858
	MAE	365	418	492	572	647

Για την διερεύνηση της δυνατότητας για την έγκαιρη πρόβλεψη της απόδοσης, τα μοντέλα αξιολογήθηκαν σε δοκιμές με σταδιακά λιγότερες χρονικές πληροφορίες. Τα αποτελέσματα της προσέγγισης αυτής, με την χρήση της κανονικοποίησης z-score, παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2 και στο Σχήμα 1. Παρατηρήθηκε ότι οι αλγόριθμοι AdaBoost, Random Forest (RF) και k-Nearest Neighbors (kNN) παρουσίασαν την υψηλότερη και πιο σταθερή απόδοση. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος AdaBoost πέτυχε την υψηλότερη ακρίβεια με το πλήρες σύνολο δεδομένων (R^2=0.930) και διατήρησε πολύ υψηλή απόδοση (R^2=0.913) ακόμα και όταν χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μόνο μέχρι τον Φεβρουάριο, τέσσερις μήνες πριν τη συγκομιδή (Σχήμα 1c). Παρόμοια απόδοση επέδειξαν και οι αλγόριθμοι RF και kNN, με τον συντελεστή προσδιορισμού να παραμένει σε υψηλά επίπεδα (R^2≈0.89) ακόμα και όταν χρησιμοποιήθηκαν λίγες ημερομηνίες. Αντίθετα, οι υπόλοιποι αλγόριθμοι εμφάνισαν σημαντική μείωση της απόδοσης τους με την μείωση της χρονικής πληροφορίας. Η απόδοση του αλγορίθμου Gradient Boosting μειώθηκε σημαντικά, ενώ η απόδοση των αλγορίθμων Neural Network και κυρίως του Elastic Net Linear Regression μειώθηκε σε πολύ χαμηλά επίπεδα (Σχήμα 1d).



Σχήμα 1. Διαγράμματα διασποράς που απεικονίζουν την σχέση μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών απόδοσης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ του μοντέλου με την υψηλότερη απόδοση, AdaBoost (a, c), και του μοντέλου με τη χαμηλότερη, Elastic Net Linear Regression (b, d). Η πάνω σειρά (a, b) αφορά την πρόβλεψη με το πλήρες σύνολο δεδομένων (14 εικόνες), ενώ η κάτω σειρά (c, d) αφορά την έγκαιρη πρόβλεψη με περιορισμένο σύνολο δεδομένων (6 εικόνες). Για όλα τα δεδομένα εφαρμόστηκε κανονικοποίηση z-score. Σε κάθε διάγραμμα, τα σημεία που αντιστοιχούν σε διαφορετικό έτος απεικονίζονται με διαφορετικό χρώμα, ενώ οι μετρικές

αξιολόγησης που υπολογίστηκαν είναι ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και η κλίση (slope) της γραμμής παλινδρόμησης. Η διαγώνιος γραμμή αντιστοιχεί στην ιδανική σχέση 1:1.

Η δεύτερη προσέγγιση της εργασίας αφορούσε την σύγκριση της απόδοσης των μοντέλων όταν τα δεδομένα εισόδου υποβλήθηκαν στις δύο διαφορετικές τεχνικές κανονικοποίησης, δηλαδή την τυπική z–score και την προσέγγιση που βασίστηκε στην ζώνη του εγγύς υπέρυθρου (NIR–B8). Η σύγκριση αυτή πραγματοποιήθηκε με την χρήση του πλήρους συνόλου των χρονικών δεδομένων και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 3. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και οι δύο μέθοδοι κανονικοποίησης οδήγησαν σε συγκρίσιμα και υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα για τους κορυφαίους αλγορίθμους. Η κανονικοποίηση z–score αποδείχθηκε οριακά ανώτερη για τους αλγορίθμους AdaBoost (R^2=0.930 έναντι 0.917) και Random Forest (R^2=0.914 έναντι 0.890). Αντίθετα, η κανονικοποίηση που βασίστηκε στο NIR επέφερε μια μικρή βελτίωση στην απόδοση του αλγορίθμου kNN (R^2=0.921 έναντι 0.919), ενώ παράλληλα εμφάνισε και τα χαμηλότερα σφάλματα RMSE και MAE μεταξύ όλων των μοντέλων. Για τους υπόλοιπους αλγορίθμους, τα αποτελέσματα ήταν μικτά, χωρίς ωστόσο να παρατηρηθούν σημαντικές διαφοροποιήσεις που να υποδεικνύουν μια σαφή υπεροχή της μιας μεθόδου έναντι της άλλης.

Πίνακας 3. Συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης των δύο τεχνικών κανονικοποίησης (z–score και NIR–based) για το πλήρες σύνολο των δεδομένων (15/11 – 19/09). Οι μετρικές R^2 (αδιάστατος), RMSE και MAE (kg ha^{-1}) υπολογίστηκαν στο υποσύνολο ελέγχου (test set).

Αλγόριθμος	Μετρική	Κανονικοποίηση z–score	Κανονικοποίηση NIR–based (B8)
Random Forest	**R^2**	0.914	0.89
	RMSE	399	452
	MAE	276	318
kNN	**R^2**	0.919	0.921
	RMSE	387	382
	MAE	274	267
Gradient Boosting	**R^2**	0.772	0.754
	RMSE	650	675
	MAE	492	513
Linear Regression	**R^2**	0.647	0.685
	RMSE	809	765
	MAE	619	583
AdaBoost	**R^2**	0.93	0.917
	RMSE	361	392
	MAE	248	269
Neural Network	**R^2**	0.867	0.854
	RMSE	496	520
	MAE	365	387

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν την σημασία των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την ακριβή και έγκαιρη πρόβλεψη της απόδοσης του σκληρού σίτου, μέσα από την αξιοποίηση δεδομένων του δορυφόρου Sentinel-2. Η υψηλή ακρίβεια που επιτεύχθηκε, ιδιαίτερα από τους αλγορίθμους συνόλου (ensemble methods) όπως τον AdaBoost (Solomatine & Shrestha, 2004) και τον Random Forest (Cutler et al., 2012), καθώς επίσης και από τον μη παραμετρικό αλγόριθμο kNN (Aha et al., 1991), τονίζει την ικανότητα τους να μοντελοποιούν τις πολύπλοκες,

μη-γραμμικές σχέσεις μεταξύ των φασματικών δεδομένων και της τελικής παραγωγής, όπως έχει ήδη φανεί και σε άλλες γεωργικές εφαρμογές (Ogutu et al., 2012; Wu & Feng, 2018).

Ένα αποτέλεσμα που αξίζει να τονιστεί είναι η ανθεκτικότητα των αλγορίθμων AdaBoost, RF και kNN στην μείωση της χρονικής πληροφορίας. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, η διατήρηση ενός συντελεστή προσδιορισμού (R^2) σε επίπεδα της τάξης του 0.90, ακόμη και όταν χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μόνο μέχρι τα τέλη Ιανουαρίου είναι υψηλής σημασίας. Η απόδοση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην αρχιτεκτονική των συγκεκριμένων μοντέλων. Οι μέθοδοι συνόλου, όπως οι AdaBoost και RF, συνδυάζουν τις προβλέψεις πολλών «αδύναμων» μαθητών και δημιουργούν ένα τελικό μοντέλο που είναι λιγότερο επιρρεπές στην υπερπροσαρμογή (overfitting) και πιο ικανό να γενικεύει από περιορισμένα δεδομένα (Cao et al., 2013). Αντίστοιχα, η τοπική και μη παραμετρική φύση του kNN φαίνεται να τον βοηθάει να κάνει ακριβείς προβλέψεις. Η δυνατότητα για έγκαιρη πρόβλεψη, τέσσερις μήνες πριν τη συγκομιδή, έχει υψηλή πρακτική αξία για την γεωργία ακριβείας, καθότι βοηθάει τους παραγωγούς και τους αρμόδιους φορείς να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις.

Η σύγκριση των δύο μεθόδων κανονικοποίησης έδειξε επίσης ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Η τυπική κανονικοποίηση z-score, η οποία είναι μια καθιερωμένη πρακτική για την ομογενοποίηση των χαρακτηριστικών (Fei et al., 2021), παρείχε εξαιρετικά αποτελέσματα. Επιπλέον, η προσέγγιση της σχετικής ραδιομετρικής κανονικοποίησης (RRN) βάσει της ζώνης του εγγύς υπέρυθρου (NIR-B8) αποδείχθηκε σχεδόν ισοδύναμη σε απόδοση. Γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση μιας φασματικής ζώνης, που είναι εγγενώς συνδεδεμένη με την φυσιολογία της βλάστησης, μπορεί να λειτουργήσει ως αποτελεσματική βάση αναφοράς για την μείωση του θορύβου που προκαλείται από τις διακυμάνσεις μεταξύ των ετών (Shang & Zhu, 2019).

Η παρούσα εργασία αποτελεί επέκταση της προηγούμενης έρευνας (Bebie et al., 2022), διότι ενισχύει τα αρχικά συμπεράσματα με την προσθήκη δεδομένων δύο επιπλέον ετών, αυξάνοντας έτσι το σύνολο των δεδομένων από πέντε σε επτά έτη, και επίσης εισάγει νέες μεθοδολογικές προσεγγίσεις. Ενώ η προηγούμενη μελέτη εστίασε στη σύγκριση μοντέλων μηχανικής μάθησης έναντι των μοντέλων που βασίζονται σε δείκτες βλάστησης, η τρέχουσα έρευνα εμβαθύνει αποκλειστικά στον τομέα της μηχανικής μάθησης.

Παρά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, η εργασία παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Τα δεδομένα προέρχονται αποκλειστικά από την περιοχή του Θεσσαλικού κάμπου, και συνεπώς η γενικευσιμότητα των μοντέλων σε άλλες περιοχές με διαφορετικές εδαφοκλιματικές συνθήκες χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Επιπλέον, δεν ενσωματώθηκαν στο μοντέλο μετεωρολογικά δεδομένα (π.χ. βροχόπτωση, θερμοκρασία), τα οποία θα μπορούσαν ενδεχομένως να βελτιώσουν περαιτέρω την ακρίβεια της πρόβλεψης. Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την εφαρμογή και αξιολόγηση των μοντέλων σε πανελλαδική κλίμακα, την ενσωμάτωση υβριδικών μοντέλων που θα συνδυάζουν δορυφορικά και μετεωρολογικά δεδομένα, καθώς επίσης και την περαιτέρω διερεύνηση προηγμένων αρχιτεκτονικών βαθιάς μάθησης.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aha, D.W., Kibler, D., Albert, M.K. and Quinian, J.R., 1991. Instance-based learning algorithms. Machine Learning, 6, 37-66.

Ali, A.M., Abouelghar, M., Belal, A.A., Saleh, N., Yones, M., Selim, A.I., Amin, M.E.S., Elwesemy, A., Kucher, D.E., Maginan, S. and Savin, I., 2022. Crop yield prediction using multi sensors remote sensing (review article). The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 25(3), 711-716.

Aubakirova, G., Ivel, V., Gerassimova, Y., Moldakhmetov, S. and Petrov, P., 2022. Application of artificial neural networks for wheat yield forecasting. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(4-117), 31-39.

Bebie, M., Cavalaris, C. and Kyparissis, A., 2022. Assessing durum wheat yield through Sentinel-2 imagery: a machine learning approach. Remote Sensing, 14(16), 3880.

Cao, Y., Miao, Q.G., Liu, J.C. and Gao, L., 2013. Advance and prospects of AdaBoost algorithm. Acta Automatica Sinica, 39(6), 745-758.

Chergui, N., 2022. Durum wheat yield forecasting using machine learning. Artificial Intelligence in Agriculture, 6, 156-166.

Cutler, A., Cutler, R.D. and Stevens, J.R., 2012. Random forests. In: Ensemble Machine Learning. Springer, New York, 157-177.

Dang, C., Liu, Y., Yue, H., Qian, J.X. and Zhu, R., 2021. Autumn crop yield prediction using data-driven approaches: support vector machines, random forest, and deep neural network methods. Canadian Journal of Remote Sensing, 47(2), 162-181.

Demsar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, C., Hocevar, T., Milutinovic, M., Mozina, M., Polajnar, M., Toplak, M., Stajdohar, M., Strazar, M., Bratko, I. and Zupan, B., 2013. Orange: data mining toolbox in Python. The Journal of Machine Learning Research, 14, 2349-2353.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. and Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 120, 25-36.

Duffy, N. and Helmbold, D., 2002. Boosting methods for regression. Machine Learning, 47, 153-200.

Fei, N., Gao, Y., Lu, Z. and Xiang, T., 2021. Z-score normalization, hubness, and few-shot learning. In: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 8411-8420.

Gan, W., Albanwan, H. and Qin, R., 2021. Radiometric normalization of multitemporal Landsat and Sentinel-2 images using a reference MODIS product through spatiotemporal filtering. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14, 4000-4013.

Kayad, A., Sozzi, M., Gatto, S., Marinello, F. and Pirotti, F., 2019. Monitoring within-field variability of corn yield using Sentinel-2 and machine learning techniques. Remote Sensing, 11(23), 2873.

Ogutu, J.O., Schulz-Streeck, T. and Piepho, H.P., 2012. Genomic selection using regularized linear regression models: ridge regression, lasso, elastic net and their extensions. BMC Proceedings, 6(Suppl 2), S10.

Roell, Y.E., Beucher, A., Møller, P.G., Greve, M.B. and Greve, M.H., 2020. Comparing a random forest based prediction of winter wheat yield to historical yield potential. Agronomy, 10(3), 395.

Shang, R. and Zhu, Z., 2019. Harmonizing Landsat 8 and Sentinel-2: a time-series-based reflectance adjustment approach. Remote Sensing of Environment, 235, 111439.

Solomatine, D.P. and Shrestha, D.L., 2004. AdaBoost.RT: a boosting algorithm for regression problems. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 1163-1168.

Wu, Y.C. and Feng, J.W., 2018. Development and application of artificial neural network. Wireless Personal Communications, 102(2), 1645-1656.

Yuste, R., 2015. From the neuron doctrine to neural networks. Nature Reviews Neuroscience, 16(8), 487-497.

Zhang, C. and Ma, Y., 2012. Ensemble Machine Learning. Springer, New York.

Zhang, L., Traore, S., Ge, J., Li, Y., Wang, S., Zhu, G., Cui, Y. and Fipps, G., 2019. Using boosted tree regression and artificial neural networks to forecast upland rice yield under climate change in Sahel. Computers and Electronics in Agriculture, 166, 105031.

Zhang, Z., Lai, Z., Xu, Y., Shao, L., Wu, J. and Xie, G.S., 2017. Discriminative elastic-net regularized linear regression. IEEE Transactions on Image Processing, 26(3), 1466-1481.

5. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΙΤΑΡΙΟΥ

N. Magazin[1], B. Lalić[1], P. Benka[1], V. Ćirić[1], A. Sedlar[1], S. Vujić[1], V. Koči[2], B. Ćupina[1], E. Μπιτάκου[3], M. Κοτζαμπασάκη[4], K. Δεμέστιχας[3] & Θ. Μπαρτζάνας[4]

[1] *University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad, Serbia*
[2] *CLIMATE SMART SOLUTIONS, Novi Sad, Serbia*
[3] *Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αγροτικής Οικονομίας και Ανάπτυξης, Εργαστήριο Πληροφορικής, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, Ελλάδα, * bitakou@aua.gr; cdemest@aua.gr*
[4] *Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, Ελλάδα*

Περίληψη

Το σιτάρι αποτελεί μια καλλιέργεια στρατηγικής σημασίας, με την παγκόσμια παραγωγή του να επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς και τεχνολογικούς παράγοντες. Οι τεχνολογίες ψηφιακής γεωργίας αξιοποιούνται τόσο για την αύξηση της παραγωγικότητας όσο και για τη διασφάλιση της αγροτικής παραγωγής σε συνθήκες έντονων κλιματικών αλλαγών. Η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο τη διερεύνηση των δυνατοτήτων και των προκλήσεων της ψηφιακής γεωργίας στη διαχείριση και παρακολούθηση της καλλιέργειας σιταριού. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση με βάση τη μεθοδολογία PRISMA 2020. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι το 16% των μελετών ήταν επισκοπήσεις, ενώ οι υπόλοιπες ήταν ερευνητικά άρθρα, κυρίως από την Κίνα, τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Αυστραλία. Οι πιο συχνές θεματικές περιοχές που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία αφορούσαν την τηλεπισκόπηση, τις γεωργικές επιστήμες, τη γεωργία ακριβείας και τη μηχανική μάθηση. Συνολικά, προσδιορίστηκαν 18 διαφορετικοί τύποι αισθητήρων, με τους πολυφασματικούς να είναι οι πιο διαδεδομένοι. Οι συνηθέστερες πλατφόρμες παρακολούθησης ήταν οι δορυφόροι, τα UAV και οι επίγειες πλατφόρμες, όπως φορητές συσκευές. Επομένως, η συγκεκριμένη μελέτη προσφέρει μια ολοκληρωμένη αποτύπωση των πρόσφατων εξελίξεων στη ψηφιακή γεωργία αναφορικά με την παραγωγή σιταριού. Παράλληλα, αναδεικνύει νέες ευκαιρίες για περαιτέρω έρευνα και αξιοποίηση των τεχνολογικών δυνατοτήτων, με σκοπό τη βελτίωση της διαχείρισης καλλιεργειών και την αύξηση της αποδοτικότητας της παραγωγής.

Λέξεις κλειδιά: ψηφιακή γεωργία, τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική μάθηση, παραγωγικότητα, σιτάρι

DIGITAL AGRICULTURE TECHNOLOGIES FOR THE IMPROVEMENT OF WHEAT PRODUCTION

N. Magazin[1], B. Lalić[1], P. Benka[1], V. Ćirić[1], A. Sedlar[1], S. Vujić[1], V. Koči[2], B. Ćupina[1], E. Bitakou[3,□], M. Kotzabasaki[4], K. Demestichas[3,□] & T. Bartzanas[4]

[1]University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad, Serbia
[2]CLIMATE SMART SOLUTIONS, Novi Sad, Serbia
[3]Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Economics and Rural Development, Informatics Laboratory, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece, □ bitakou@aua.gr; cdemest@aua.gr
4Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Laboratory of Farm Structures, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece

ABSTRACT

Wheat is a strategically important crop, with its global production being influenced by environmental and technological factors. Digital agriculture technologies are utilized both to increase productivity and to ensure agricultural production under conditions of intense climate change. This study aims to explore the opportunities and challenges of digital agriculture in the management and monitoring of wheat cultivation. In this context, a systematic literature review was conducted using the PRISMA 2020 methodology. The results revealed that 16% of the studies were reviews, while the remainder were research articles, mainly from China, the United States, and Australia. The most common thematic areas identified in the literature were remote sensing, agricultural sciences, precision agriculture, and machine learning. In total, eighteen different types of sensors were identified, with multispectral sensors being the most widespread. The most common monitoring platforms were satellites, UAVs, and ground-based platforms such as portable devices. Therefore, this study provides a comprehensive overview of recent developments in digital agriculture regarding wheat production. At the same time, it highlights new opportunities for further research and the exploitation of technological capabilities, aiming to improve crop management and increase production efficiency.

Keywords: digital agriculture, artificial intelligence, machine learning, productivity, wheat

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σιτάρι (*Triticum aestivum* L.) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες βασικές τροφές σε παγκόσμιο επίπεδο (Ruan et al., 2021), καθώς καλύπτει μεγάλο μέρος των διατροφικών αναγκών του ανθρώπου και καλύπτει σημαντική ποσότητα της απαιτούμενης καθημερινής ενέργειας και θρεπτικών συστατικών. Η ιστορική πορεία της αξιοποίησής του είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανθρώπινη προσπάθεια για έλεγχο της τροφής και αντιμετώπιση της πείνας (Igrejas et. al, 2020). Η εξέλιξη των γεωργικών πρακτικών οδήγησε σε σημαντική αύξηση των αποδόσεων, αναδεικνύοντας το σιτάρι σε στρατηγικό αγροτικό προϊόν και βασικό αγαθό του διεθνούς εμπορίου.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η ψηφιακή γεωργία ενσωματώθηκε σταδιακά στην αγροτική παραγωγή ως τεχνολογική καινοτομία με στόχο την ενίσχυση της παραγωγικότητας και της κερδοφορίας, μέσω της αξιοποίησης τεχνολογιών πληροφορικής και γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (Zhou et al., 2023). Η ψηφιοποίηση στη γεωργία αναφέρεται στη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών για τη συστηματική παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των καλλιεργητικών πρακτικών και τη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων (π.χ. εδάφους, νερού) και εισροών (π.χ. λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων) (Shamshiri et al., 2024).

Σήμερα, ο αγροτικός και αγροδιατροφικός τομέας αξιοποιεί τις τεχνολογίες της ψηφιακής γεωργίας, όπως τα Μεγάλα Δεδομένα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, τη ρομποτική, τους αισθητήρες, την Τεχνητή Νοημοσύνη, τη Μηχανική Μάθηση, τα Ψηφιακά Δίδυμα και την τεχνολογία Blockchain. Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες επιτρέπουν τη συλλογή ιστορικών δεδομένων, την παρακολούθηση της τρέχουσας κατάστασης και την πρόβλεψη μελλοντικών εξελίξεων, με σκοπό να λαμβάνονται έγκαιρες και ακριβείς αποφάσεις σε όλα τα επίπεδα της γεωργικής παραγωγής (Wolfert et al., 2017).

Η ψηφιακή γεωργία έχει ήδη αρχίσει να εφαρμόζεται ευρέως στην καλλιέργεια σιταριού σε παγκόσμιο επίπεδο, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών και στην ενίσχυση της αποδοτικότητας. Ωστόσο, εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις. Μεταξύ αυτών οι κυριότερες είναι η αυξανόμενη ζήτηση τροφίμων, η υποβάθμιση των φυσικών πόρων (Nasani et al., 2019) - κυρίως του εδάφους - το αυξανόμενο κόστος

εργασίας, η ανάγκη μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Thayer et al., 2020) και η απαίτηση μείωσης της χρήσης εισροών σε πολλές αγροτικές περιοχές (Langridge et al., 2022).

Συνεπώς, η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο τη διερεύνηση των δυνατοτήτων και των προκλήσεων της ψηφιακής γεωργίας στη διαχείριση και παρακολούθηση της καλλιέργειας σιταριού, παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα συστηματικής βιβλιογραφικής επισκόπησης των τεχνολογιών ψηφιακής γεωργίας για την πρόβλεψη της παραγωγικότητας, καθώς και τον εντοπισμό ερευνητικών κενών και προοπτικών ανάπτυξης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

1.1 Αναζήτηση επιστημονικών άρθρων

Η παρούσα συστηματική επισκόπηση ακολουθεί τη μεθοδολογία Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020). Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε σε δύο επιστημονικές βάσεις δεδομένων, Scopus και Web of Science, με σκοπό τον εντοπισμό όλων των σχετικών ερευνητικών εργασιών που αφορούν την εφαρμογή ψηφιακών τεχνολογιών στην καλλιέργεια σιταριού.

Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας λογικούς τελεστές (όπως AND και OR) σε συνδυασμό με λέξεις-κλειδιά που σχετίζονται με το αντικείμενο της μελέτης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμοί όρων που περιλάμβαναν τεχνολογίες όπως UAV, UAS, Drone, και άλλες σχετικές έννοιες (π.χ. κάμερες πολυφασματικές και υπερφασματικές, ανάλυση εικόνας), καθώς και όρους που αφορούν την τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική μάθηση και τις εφαρμογές τους στη γεωργία, όπως η ανίχνευση ασθενειών, ζιζανίων, παρασίτων, και η πρόβλεψη απόδοσης στις καλλιέργειες σιταριού.

1.2 Επιλογή αποτελεσμάτων

Η αναζήτηση περιορίστηκε σε ερευνητικά άρθρα σε περιοδικά στην αγγλική γλώσσα, τα οποία δημοσιεύθηκαν από τον Ιανουάριο του 2015 έως και τον Απρίλιο του 2025. Συνολικά, εντοπίστηκαν 392 άρθρα (Scopus: 170 και Web of Science: 222). Από αυτά, αφαιρέθηκαν οι διπλότυπες δημοσιεύσεις (125 άρθρα). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος συνάφειας με βάση τον τίτλο, την περίληψη και τις λέξεις-κλειδιά, με αποτέλεσμα τον αποκλεισμό 154 άρθρων. Τελικά, ο αριθμός των άρθρων περιορίστηκε σε 113, τα οποία στη συνέχεια μελετήθηκαν στο σύνολό τους.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά το αντικείμενο των άρθρων, 18 αφορούν βιβλιογραφικές επισκοπήσεις και τα υπόλοιπα 95 ερευνητικές εργασίες. Από αυτές, οι περισσότερες από τις μισές διαθέτουν τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί μετά από αίτημα στον συγγραφέα. Σχετικά με τη γεωγραφική κάλυψη, η πλειονότητα αφορά στην Κίνα (28 άρθρα), ακολουθούμενη από τις ΗΠΑ (17 άρθρα) και την Αυστραλία (9 άρθρα). Διαπιστώθηκε ότι οι χώρες με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την εφαρμογή ψηφιακών τεχνολογιών στη γεωργία είναι αυτές με μεγάλη έκταση καλλιεργειών σιταριού και υψηλή ερευνητική δραστηριότητα.

Επιπλέον, οι πιο συχνές θεματικές περιοχές που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία αφορούσαν στην τηλεπισκόπηση, τις γεωργικές επιστήμες, τη γεωργία ακριβείας και τη μηχανική μάθηση - συμπεριλαμβανομένης της βαθιάς μάθησης. Όσον αφορά τους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες περιλαμβάνονται 18 διαφορετικοί τύποι, με τους πολυφασματικούς να είναι οι πιο διαδεδομένοι. Οι επικρατέστερες πλατφόρμες αισθητήρων για την παρακολούθηση

καλλιεργιών σίτου είναι οι δορυφόροι, ακολουθούμενοι από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη και τις επίγειες πλατφόρμες (π.χ. φορητές συσκευές και οχήματα).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι ψηφιακές τεχνολογίες στη γεωργία έχουν μετασχηματίσει σημαντικά τη χρήση γης και πόρων, καθώς και τις καλλιεργητικές πρακτικές σε παγκόσμια κλίμακα (Balasundram et al., 2023). Μετά το 2020, παρατηρήθηκε έντονη αύξηση του πλήθους των επιστημονικών άρθρων αναφορικά με την ψηφιοποίηση στα αγροδιατροφικά συστήματα (Hassoun et al., 2023), ενώ η περίοδος της πανδημίας του COVID-19 δημιούργησε νέες συνθήκες που επιτάχυναν τη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών (Sridhar et al., 2023). Σε αυτό το πλαίσιο, οι ψηφιακές τεχνολογίες προσφέρουν καινοτομίες με μεγάλη προοπτική για τη μελλοντική παραγωγή τροφίμων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα παρακολούθησης μικροκλιματικών συνθηκών που επηρεάζουν άμεσα την παραγωγή σε συγκεκριμένες περιοχές (Morisse et al., 2022).

Με βάση την παρούσα βιβλιογραφική επισκόπηση, η ψηφιακή γεωργία ήδη εφαρμόζεται στην καλλιέργεια του σιταριού σε διάφορες χώρες παγκοσμίως. Ειδικότερα, η μηχανική μάθηση αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη και ευρέως διαδεδομένη, η οποία βρίσκει εφαρμογή σε διάφορες πτυχές της παραγωγής, όπως η διαχείριση νερού και εδάφους, η ανίχνευση ασθενειών και ζιζανίων και η πρόβλεψη αποδόσεων και βροχοπτώσεων (Gawdiya et al., 2024; Abbasi et al., 2022). Αναμένεται ότι στο προσεχές μέλλον το αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον και η ραγδαία εξέλιξη των τεχνολογιών θα αναδείξουν νέες προοπτικές για βιώσιμη και αποδοτική καλλιέργεια σιταριού.

Ευχαριστίες:

Η παρούσα δημοσίευση αποτελεί μέρος του έργου TALLHEDA, το οποίο έχει χρηματοδοτηθεί από το πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης, βάσει της συμφωνίας επιχορήγησης αριθ. 101136578. Οι απόψεις και οι γνώμες που εκφράζονται ανήκουν αποκλειστικά στους/στις συγγραφείς και δεν αντανακλούν απαραίτητα τις απόψεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης ή της Ευρωπαϊκής Εκτελεστικής Υπηρεσίας Έρευνας. Ούτε η Ευρωπαϊκή Ένωση ούτε η αρμόδια αρχή χορήγησης μπορούν να θεωρηθούν υπεύθυνες για αυτές.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abbasi, R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). The digitization of agricultural industry–a systematic literature review on agriculture 4.0. *Smart Agricultural Technology*, *2*, 100042.

Balasundram, S. K., Shamshiri, R. R., Sridhara, S., & Rizan, N. (2023). The role of digital agriculture in mitigating climate change and ensuring food security: an overview. *Sustainability*, *15*(6), 5325.

Gawdiya, S., Kumar, D., Ahmed, B., Sharma, R. K., Das, P., Choudhary, M., & Mattar, M. A. (2024). Field scale wheat yield prediction using ensemble machine learning techniques. *Smart Agricultural Technology*, *9*, 100543.

Hassoun, A., Marvin, H. J., Bouzembrak, Y., Barba, F. J., Castagnini, J. M., Pallarés, N., Rabail, R., Aadil, R. M., Bangar, S. P., Bhat, R., Cropotova, J., Masqood, S., Regenstein, J. M. (2023). Digital transformation in the agri-food industry: Recent applications and the role of the COVID-19 pandemic. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *7*, 1217813.

Igrejas, G., Ikeda, T. M., & Guzmán, C. (Eds.). (2020). *Wheat quality for improving processing*

and human health (pp. 1-7). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.

Langridge, P., Alaux, M., Almeida, N. F., Ammar, K., Baum, M., Bekkaoui, F., ... & Zhang, X. (2022). Meeting the challenges facing wheat production: The strategic research agenda of the Global Wheat Initiative. *Agronomy*, *12*(11), 2767.

Morisse, M., Wells, D. M., Millet, E. J., Lillemo, M., Fahrner, S., Cellini, F., ... & Janni, M. (2022). A European perspective on opportunities and demands for field-based crop phenotyping. *Field Crops Research*, *276*, 108371.

Nassani, A. A., Awan, U., Zaman, K., Hyder, S., Aldakhil, A. M., & Abro, M. M. Q. (2019). Management of natural resources and material pricing: Global evidence. *Resources Policy*, *64*, 101500.

Ruan, S., Wang, L., Li, Y., Li, P., Ren, Y., Gao, R., & Ma, H. (2021). Staple food and health: a comparative study of physiology and gut microbiota of mice fed with potato and traditional staple foods (corn, wheat and rice). *Food & Function*, *12*(3), 1232-1240.

Shamshiri, R. R., Sturm, B., Weltzien, C., Fulton, J., Khosla, R., Schirrmann, M., . & Hameed, I. A. (2024). Digitalization of agriculture for sustainable crop production: a use-case review. *Frontiers in Environmental Science*, *12*, 1375193.

Sridhar, A., Balakrishnan, A., Jacob, M. M., Sillanpää, M., & Dayanandan, N. (2023). Global impact of COVID-19 on agriculture: role of sustainable agriculture and digital farming. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(15), 42509-42525.

Thayer, A. W., Vargas, A., Castellanos, A. A., Lafon, C. W., McCarl, B. A., Roelke, D. L., Winemiller, K. & Lacher, T. E. (2020). Integrating agriculture and ecosystems to find suitable adaptations to climate change. *Climate*, *8*(1), 10.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming–a review. *Agricultural systems*, *153*, 69-80.

Zhou, X., Chen, T., & Zhang, B. (2023). Research on the impact of digital agriculture development on agricultural green total factor productivity. *Land*, *12*(1), 195.

6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΣΙΤΗΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ MONTE CARLO

Κ. Πλιατσίδης, Ξ.Ε. Πανταζή, Β. Φράγκος & Α. Μιχαηλίδης

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Αγίου Δημητρίου, 54124, Θεσσαλονίκη, xpantazi@agro.auth.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει και αξιολογεί τις οικονομικές επιπτώσεις που έχει η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ) σε καλλιέργειες δημητριακών. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν οι σχέσεις κόστους-οφέλους στο καθαρό εισόδημα των παραγωγών σιταριού της Λιθουανίας με τη βοήθεια προσομοιώσεων Monte Carlo για τα εξής τρία διακριτά σενάρια που αντιστοιχούσαν σε συγκεκριμένες τεχνολογίες ΓΑ : α) επιλεκτικής συγκομιδής (SH), β) προληπτικών ψεκασμών σε μεταβλητές δόσεις (PSSS), και γ) πρωτότυπης συνδυαστικής εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών σε μεταβλητές δόσεις και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH) έναντι των αντίστοιχων μεμονωμένων τεχνολογιών ΓΑ. Λόγω απουσίας πειραματικών δεδομένων για την εφαρμογή επιλεκτικής συγκομιδής, εφαρμόστηκε προσομοίωση Monte Carlo για την εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων, ενώ η συνδυαστική λύση αξιολογήθηκε ως συνδυασμός των επιμέρους προσομοιώσεων. Η μεθοδολογία βασίστηκε σε δεδομένα από 61 τυχαία επιλεγμένους παραγωγούς εμπορικού σιταριού, μελών της Λιθουανικής Ένωσης Καλλιεργητών Σιτηρών.

Λέξεις κλειδιά: ψηφιακές τεχνολογίες, προσδιορισμός επιχειρηματικού κινδύνου, ανάλυση κόστους ωφελειών, εκπαίδευση αγροτών

EVALUATION OF INVESTMENT RISK AND ECONOMIC VIABILITY OF INNOVATIVE PRECISION AGRICULTURE TECHNOLOGIES IN CEREAL CROPS USING MONTE CARLO SIMULATIONS

K. Pliatsidis, X.E. Pantazi[1], V. Fragkos, & A. Michailidis

Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture., Agiou Dimitriou, 54124, Thessaloniki
[1]*xpantazi@agro.auth.gr*

ABSTRACT

This study investigates and assesses the economic implications of developing and implementing Precision Agriculture (PA) technologies in cereal production. The analysis focuses on cost–benefit relationships in the net income of Lithuanian wheat producers through Monte Carlo simulations across three distinct scenarios: (a) selective harvesting (SH), (b) preventive spraying with variable-rate applications (PSSS), and (c) an integrated approach that combines preventive variable-rate spraying with selective harvesting (PSSS-SH), benchmarked against the respective stand-alone PA technologies. In the absence of experimental data on selective harvesting, Monte Carlo simulations were employed to estimate its potential economic effects, while the combined approach was evaluated by synthesizing the outcomes of the individual simulations. The empirical framework has been drawn on data collected from 61 randomly selected commercial wheat producers, members of the Lithuanian Grain Growers Association.

Keywords: digital technologies, business risk assessment, cost–benefit analysis, farmer training

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ) αποτελούν καινοτόμα εργαλεία για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας της γεωργικής παραγωγής, προσφέροντας δυνατότητες βέλτιστης διαχείρισης εισροών, αύξησης αποδόσεων και μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Ωστόσο, η υιοθέτησή τους σε καλλιέργειες σιτηρών συνδέεται με οικονομικές αβεβαιότητες, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την αξιολόγηση του επενδυτικού κινδύνου και της οικονομικής βιωσιμότητας τους (Addis & Sani, 2021). Η ανάλυση κόστους–οφέλους, σε συνδυασμό με εργαλεία προσομοίωσης, είναι δυνατό να ποσοτικοποιήσει τις οικονομικές επιπτώσεις της εφαρμογής ΓΑ σε διαφορετικά σενάρια τεχνολογιών. Επιπλέον, η εκπαίδευση των παραγωγών και η εξοικείωσή τους με τις τεχνολογίες αυτές θεωρείται κρίσιμη για την αποτελεσματική εφαρμογή και την επίτευξη των αναμενόμενων οικονομικών και περιβαλλοντικών οφελών (Costa et al., 2023). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση του επενδυτικού κινδύνου και της οικονομικής βιωσιμότητας καινοτόμων τεχνολογιών ΓΑ σε καλλιέργειες σιτηρών, με έμφαση στην ανάλυση κόστους–οφέλους μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo, χρησιμοποιώντας δεδομένα από παραγωγούς σιταριού στη Λιθουανία. Οι καινοτόμες τεχνολογίες που διερευνήθηκαν υπό τη μορφή τριών σεναρίων αντιστοιχούσαν στην επιλεκτική συγκομιδή (SH), την εφαρμογή προληπτικών ψεκασμών σε μεταβλητές δόσεις (PSSS) και τη συνδυαστική τους εφαρμογή (PSSS-SH) αντίστοιχα.

1. ΘΕΩΡΙΑ

1.1 Μέθοδος Monte Carlo

Η μέθοδος Monte Carlo βασίζεται στον, γνωστό από τις πιθανότητες, νόμο των μεγάλων αριθμών. Η λογική της μεθόδου είναι η προσομοίωση μιας τυχαίας μεταβλητής XX με την χρήση πολλών, ανεξάρτητων μεταξύ τους, επαναλήψεων και στην συνέχεια υπολογισμό της μέση τιμής αυτών των τυχαίων αριθμών ως εκτίμηση της μέσης τιμής της XX. Η μέθοδος κινείται υπό τη λογική ότι αυξανομένου του αριθμού των επαναλήψεων, η τελική εκτίμηση θα προσεγγίσει όλο και περισσότερο την πραγματική τιμή της $EE(XX)$. Η μέθοδος Monte Carlo είναι καθιερωμένη μεθοδολογία για την ανάλυση συστημάτων υπό καθεστώς αβεβαιότητας, προσεγγίζοντας τις κατανομές των εκβάσεων μέσω επαναληπτικής δειγματοληψίας από τις κατανομές των εισόδων (Rubinstein & Kroese, 2016). Στο πεδίο των αγροοικονομικών αναλύσεων, όπου οι αποδόσεις, οι τιμές και το κόστος παρουσιάζουν έντονη μεταβλητότητα και αλληλεξαρτήσεις, η προσομοιωτική μέθοδος Monte Carlo επιτρέπει την αξιολόγηση όχι μόνο της αναμενόμενης απόδοσης αλλά και των σχετικών και των δυσμενών εκβάσεων, οι οποίες είναι κριτικής σημασίας για τη λήψη αποφάσεων (Hardaker et al., 2015).
Σύμφωνα με το θεώρημα που αφορά το νόμο των μεγάλων αριθμών:

Έστω Xn , $n \in \mathbb{N}$ μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών, όπου οι $Xn \in \mathbb{R}$ είναι ανεξάρτητες και ισόνομες τυχαίες μεταβλητές. Επίσης, έστω $\mu = E(X1)$, τότε ισχύει ότι:

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \overset{n\to\infty}{\to} \mu \qquad (1)$$

με πιθανότητα 1) όπου μ είναι η θεωρητική μέση τιμή των τυχαίων μεταβλητών $(Xn)n\in\mathbb{N}$. Άρα ο αριθμητικός μέσος των $X1, X2, \dots , Xn$ τείνει στην θεωρητική μέση τιμή μ.

Η χρήση του αλγόριθμου της μεθόδου Monte Carlo απαρτίζεται από τα παρακάτω βήματα:

1. Παράγονται n ∈ ℕ τυχαίες μεταβλητές X_i , ii= 1,2, … , n , ανεξάρτητες μεταξύ τους και ισόνομες με μια τυχαία μεταβλητή X.
2. Εκτιμάται η $E(X)$ από τον αριθμητικό μέσο $\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$

Στην παρούσα εργασία, προσομοιώθηκε η οικονομική επίδοση υιοθέτησης και εφαρμογής τριών σεναρίων που ανταποκρινόταν σε διαφορετικές τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας (PSSS, SH και ο συνδυασμός τους-PSSS-SH), ορίζοντας κατανομές εισόδου για αποδόσεις, τιμές και συνιστώσες κόστους βάσει εμπειρικών δεδομένων και τεκμηριωμένων παραδοχών. Για κάθε σενάριο εκτελέστηκαν 1000 επαναλήψεις τυχαίας δειγματοληψίας, παράγοντας κατανομή του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος.

2.3 Δείκτες αποδοχής κινδύνου

Η αποτίμηση κινδύνου σε οικονομικές αξιολογήσεις μπορεί να γίνει με ποικίλα μέτρα, ανάλογα με το είδος της αβεβαιότητας και τις προτιμήσεις κινδύνου του αναλυτή ή του λήπτη απόφασης. Πέρα από βασικά περιγραφικά μέτρα όπως αυτά της διακύμανσης και της τυπικής απόκλισης, χρησιμοποιούνται ευρέως δείκτες σχετικού κινδύνου όπως ο Συντελεστής Διακύμανσης (C_v), η Αξία σε Κίνδυνο (Value-at-Risk, VaR), το Conditional Value- at-Risk/Expected Shortfall), μέτρα ασυμμετρίας και κύρτωσης για το σχήμα της κατανομής, καθώς και κριτήρια χρησιμότητας ή στοχαστικής κυριαρχίας που ενσωματώνουν ρητά τη στάση απέναντι στον κίνδυνο. Στην παρούσα εργασία δόθηκε έμφαση σε δύο συμπληρωματικούς, διαφανείς και ευρέως χρησιμοποιούμενους δείκτες: τον Συντελεστή Διακύμανσης (C_V) για τον σχετικό κίνδυνο και το Value-at-Risk (VaR)

Ο Συντελεστής Διακύμανσης (C_V) λειτουργεί ως κανονικοποιημένο μέτρο μεταβλητότητας του καθαρού αποτελέσματος, επιτρέποντας συγκρίσεις μεταξύ σεναρίων με διαφορετικά επίπεδα μέσου εισοδήματος χωρίς να επηρεάζονται από την κλίμακα. Ως λόγος της τυπικής απόκλισης προς τον μέσο όρο, αποτυπώνει τον σχετικό κίνδυνο, καθιστώντας τον ιδιαιτέρως κατάλληλο όταν αξιολογούνται εναλλακτικές με διαφορετική κεντρική τάση ή όταν οι μονάδες μέτρησης δεν είναι απευθείας συγκρίσιμες. Πρακτικά, μικρότερη τιμή C_V υποδηλώνει χαμηλότερο σχετικό κίνδυνο για δεδομένο επίπεδο απόδοσης, άρα μεγαλύτερη προβλεψιμότητα του αποτελέσματος. Επιπλέον, ο C_V είναι ευαίσθητος σε αλλαγές τόσο της διασποράς όσο και του μέσου, προσφέροντας μια λιτή αλλά ισορροπημένη σύνοψη του κινδύνου που συμπληρώνει μέτρα εστιασμένα στις δυσμενείς εκβάσεις χαμηλού ποσοστημορίου, όπως αυτή της αξίας σε κίνδυνο (VaR) (Kvålseth, 2017). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο C_v προκειμένου να αξιολογηθεί αν οι τυπικές αποκλίσεις είναι εντός των επιτρεπτών ορίων για κάθε μέθοδο. Ο C_V υπολογίστηκε εκφράζοντας την τυπική απόκλιση ως ποσοστό του μέσου όρου. Βασικός στόχος ήταν και οι τρεις υπό μέθοδοι να παρουσιάζουν συντελεστές διακύμανσης (C_V) πολύ χαμηλότερες της τάξεως του 5%, οι οποίες θεωρούνται γενικά αποδεκτές για γεωργοοικονομικές αναλύσεις.

Η αξία σε κίνδυνο (VaR) είναι ένα εργαλείο μέτρησης κινδύνου που προσφέρει στους επενδυτές ένα μέσο για την εκτίμηση των πιθανών ζημιών, επιτρέποντάς τους έτσι να αξιολογούν προσεκτικά τη δυναμική κινδύνου-απόδοσης που ενυπάρχει στις επενδυτικές τους επιλογές. Αυτό διευκολύνει την κατανομή του κεφαλαίου μεταξύ διαφόρων κατηγοριών περιουσιακών στοιχείων και επενδύσεων, λαμβάνοντας υπόψη την ανοχή του επενδυτή στον κίνδυνο και τους οικονομικούς του στόχους. Με τη εκτίμηση της Αξίας σε Κίνδυνο (VaR) στο πλαίσιο λήψης αποφάσεων, οι επενδυτές μπορούν να βελτιστοποιήσουν αποτελεσματικά τα χαρτοφυλάκιά τους

ώστε να επιτύχουν την επιθυμητή ισορροπία μεταξύ κινδύνου και απόδοσης (Dimitrova , 2021) καθώς επίσης και να εξασφαλίσουν τη βέλτιστη κατανομή κεφαλαίων σε μεμονωμένες επενδύσεις ή επιχειρηματικές γραμμές. Η VaR αξιολογεί τα χαμηλότερα ποσοστημόρια της κατανομής του οικονομικού αποτελέσματος σε δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης. Σε συνδυασμό με τον συντελεστή διακύμανσης (Cv), παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα του προφίλ κινδύνου-απόδοσης ανά σενάριο. Η εκτίμηση του VaR στο 5% ποσοτικοποιεί το χειρότερο αναμενόμενο αποτέλεσμα στο 5ο ποσοστημόριο, προσφέροντας μια συντηρητική εκτίμηση κινδύνου (Hull, 2018).

Στην παρούσα μελέτη η επιλογή των παραπάνω δεικτών αποδοχής κινδύνου (VaR, Cv) έγινε με σκοπό να προκύψει μια συμπληρωματική, διαφανή και επιχειρησιακά χρήσιμη απεικόνιση του προφίλ κινδύνου-απόδοσης, κατάλληλη για τεκμηριωμένη σύγκριση πολιτικών και σεναρίων σε αγροοικονομικά περιβάλλοντα.

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Πίνακας 1. Δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδότηση του μοντέλου Monte Carlo για κάθε μια από τις τρεις εξεταζόμενες τεχνολογίες ΓΑ (PSSS (Preventive site-specific spraying), SH (Selective harvesting), PSSS-SH) ανά ha.

Παράμετρος		Πηγή Πληροφορίας
Μέγεθος χωραφιού (wheat)	1 ha	
Ομοιόμορφος Ψεκασμός (UF)	7.73 tons/ha	Δεδομένα πεδίου (2023)
Προληπτικός Ψεκασμός Μεταβλητών Δόσεων (PSSS)	7.92 tons/ha	Δεδομένα πεδίου (2023)
Τιμή χειμερινου σιταριού (καθορισμένη τιμή)	235 €/ton	Δεδομένα πεδίου (2023)
Τιμή σιταριού (ποιότητα I)	250 €/ton	EU (2023)
Τιμή σιταριού (ποιότητα II-)	238 €/ton	EU (2023)
Τιμή σιταριού (ποιότητα III-)	219 €/ton	EU (2023)
Εφαρμοζόμενο μυκητοκτόνο (UF)	1.0 liter/ha	Δεδομένα πεδίου (2023)
Εφαρμοζόμενο μυκητοκτόνο (PSSS	1.0 liter/ha	Δεδομένα πεδίου (2023)
Κόστος Μηκυτοκτόνου	25 €/liter	Δεδομένα πεδίου (2023)
Κατανάλωση καυσίμου (UF)	18.96 lit/ha	Δεδομένα πεδίου (2023)
Κατανάλωση καυσίμου (SH)	22.83 lit/ha	Δεδομένα πεδίου (2023)
Πρόσθετη εργασία για PSSS & SH	2 hour/ha	Δεδομένα πεδίου (2023)
Μισθός	11.6 €/hour	Λιθουανική Στατιστική Αρχή (2023)
Χρέωση υπηρεσίας PSSS	25€/ha/year	Πληροφορίες επαγγελματιών (2023)
Χρέωση υπηρεσίας SH	5€/ha/year	Πληροφορίες επαγγελματιών (2023)

Με βάση τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν και τους υπολογισμούς που έγιναν, εφαρμόστηκε η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo προκειμένου να συγκριθούν οι οικονομικές επιπτώσεις που απορρέουν από την εφαρμογή τριών σεναρίων τα οποία αντιστοιχούν στην τεχνολογία επιλεκτικής συγκομιδής, της τεχνολογίας των προληπτικών ψεκασμών καθώς και της

τεχνολογίας συνδυαστικής εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών και επιλεκτικής συγκομιδής αντίστοιχα. Η επιλογή των τριών σεναρίων έγινε προκειμένου να συγκριθούν οι υπάρχουσες τεχνολογίες ΓΑ που αφορούν την εφαρμογή ψεκασμών φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων και επιλεκτικής συγκομιδής με την τεχνολογία συνδυαστικής εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών και επιλεκτικής συγκομιδής. Η τεχνολογία εφαρμογής των προληπτικών ψεκασμών και επιλεκτικής συγκομιδής εξετάστηκαν χωριστά προκειμένου να διευκολύνουν τον προσδιορισμό των οικονομικών επιπτώσεων της τεχνολογίας συνδυαστικής εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών και επιλεκτικής συγκομιδής. Για τη μέθοδο Monte Carlo, αναπτύχθηκε σχετικός αλγόριθμος για κάθε περίπτωση εφαρμογής στο περιβάλλον της Python 3.11.

3.1 Συλλογή Δεδομένων

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αφορούσαν την καλλιεργητική περίοδο 2022-2023 και αναλύθηκαν σε βάση 1 ha για λόγους στατιστικής αντιπροσωπευτικότητας και συγκρισιμότητας. Ως δεδομένα εισόδου, χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

4. Αποτελέσματα

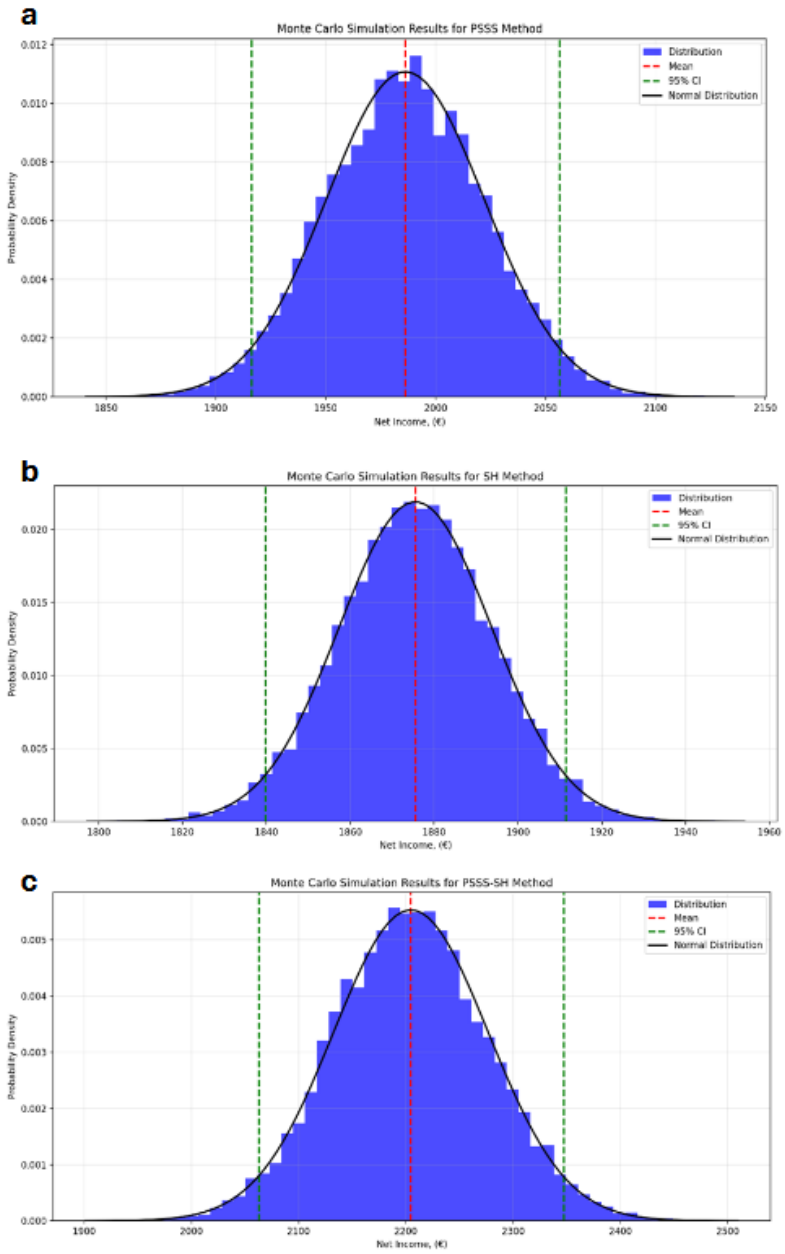
Αρχικά προσδιορίστηκε η βελτίωση που προκύπτει έπειτα από εφαρμογή της κάθε μιας από τις τρεις εξεταζόμενες τεχνολογίες που αφορούν τις τεχνολογίες PSSS (Preventive site- specific spraying), SH (Selective harvesting) και το συνδυασμό PSSS-SH ως προς το μέσο καθαρό εισόδημα, τη διακύμανση (C_V) και το προσεγγιστικό VaR (5%), με στόχο την αποτίμηση απόδοσης και κινδύνου μεταξύ εναλλακτικών προσεγγίσεων.

Πίνακας 2. Στατιστικές παράμετροι που αφορούν την κερδοφορία και την ποικιλομορφία που είναι πιθανό να προκύψουν από την εφαρμογή της κάθε μιας από τις τρεις εξεταζόμενες τεχνολογίες ΓΑ (PSSS (Preventive site-specific spraying), SH (Selective harvesting), PSSS-SH)

Τεχνολογία	Μέσο καθαρό εισόδημα (€/ha)	Τυπική απόκλιση (€/ha)	Βελτίωση vs baseline (€/ha)	CV (%)	VaR (5%) (€/ha)
PSSS	1986.2	36.03	10.99	1.81	1926.93
SH	1875.55	18.23	4.81	0.97	1845.56
PSSS-SH	2204.7	72.13	23.2	3.27	2086.05

Γενικά, παρατηρείται ότι οι τρεις εξεταζόμενες προσεγγίσεις, διαφοροποιούνται τόσο ως προς το επίπεδο απόδοσης όσο και ως προς τον σχετικό κίνδυνο. Η συνδυαστική τεχνολογία PSSS-SH εμφανίζει το υψηλότερο μέσο καθαρό εισόδημα, συνοδευόμενη από αυξημένο συντελεστή διακύμανσης (C_V), γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη σχετική διακύμανση γύρω από τον μέσο. Η μέθοδος SH παρουσιάζει τον χαμηλότερο C_V, προσφέροντας το πιο

«σταθερό» προφίλ, ενώ το PSSS τοποθετείται ενδιάμεσα, εξισορροπώντας απόδοση και κίνδυνο. Επιπλέον, βάσει του προσεγγιστικού VaR (5%), η τεχνολογία PSSS-SH διατηρεί το υψηλότερο κατώφλι εισοδήματος σε δυσμενείς συνθήκες σε σχέση με τις εναλλακτικές, κάτι που ενισχύει την εικόνα υπεροχής της σε επίπεδο απόδοσης ακόμη και σε σενάρια αρνητικών εκβάσεων. Συνολικά, τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι ο συνδυασμός PSSS-SH μεγιστοποιεί το προσδοκώμενο αποτέλεσμα με αυξημένο μεν, αλλά ποσοτικοποιημένο σχετικό κίνδυνο, ενώ το SH ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο με μικρότερη προσδοκώμενη απόδοση, και το PSSS παρέχει μια ισορροπημένη ενδιάμεση επιλογή (Πίνακας 2).



Σχήμα 1. Κατανομή του καθαρού εισοδήματος (€) με προσαρμοσμένη κανονική καμπύλη που αφορούν την εφαρμογή της τεχνολογίας (a) εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών σε μεταβλητές δόσεις (PSSS) (b) της επιλεκτικής συγκομιδής (SH) (c) της συνδυασμένης εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH) με τη βοήθεια προσομοίωσης Monte Carlo.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν τρία ιστογράμματα κατανομής κέρδους (profit distribution histograms) για κάθε μία από τις τεχνολογίες ΓΑ που εξετάστηκαν. Το κάθε ιστόγραμμα παρουσιάζει οπτικά τη διανομή κέρδους για κάθε μία από τις τρεις τεχνολογίες ΓΑ αντίστοιχα που εξετάστηκαν συνοδευόμενα από τη μέση (mean) και τυπική απόκλιση (standard deviation) όσο αφορά το καθαρό εισόδημα. Επιπλέον, εκτιμήθηκε το ελάχιστο και το μέσο καθαρό εισόδημα ανά τεχνολογία ΓΑ που εξετάστηκε. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η τεχνολογία συνδυασμένης εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών σε μεταβλητές δόσεις και επιλεκτικής συγκομιδής επιδεικνύουν το υψηλότερο μέσο καθαρό εισόδημα αλλά και την υψηλότερη ποικιλομορφία όπως αυτό καταδεικνύεται από τις τιμές της μέσης τυπικής απόκλισης

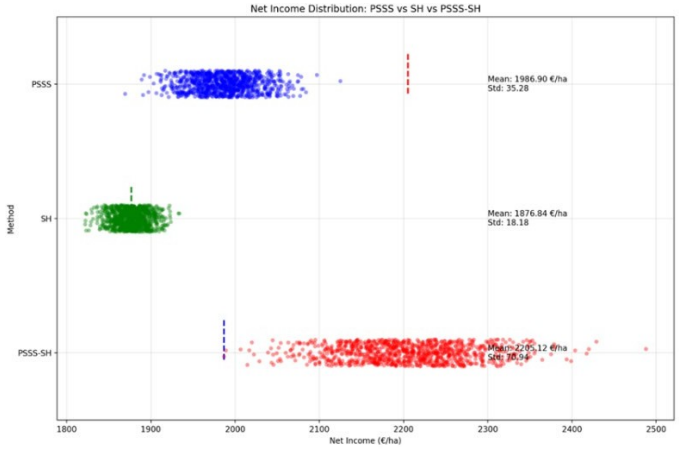
για κάθε τεχνολογία η οποία κυμαίνεται από 36 έως περίπου 72 €. Η τεχνολογία της επιλεκτικής συγκομιδής (SH) συγκεκριμένα παρουσιάζει την χαμηλότερη μέση τυπική απόκλιση, δείχνοντας ότι είναι η πιο σταθερή μέθοδος σε σχέση με τις άλλες δύο τεχνολογίες (PSSS, PSSS-SH) οι οποίες περιλαμβάνουν μια ακόμα δραστηριότητα αυτή της εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών σε μεταβλητές δόσεις.

Για κάθε ένα από τα γραφήματα, η κατανομή των κερδών (€/ha) απεικονίζεται στον άξονα x. Η συχνότητα εμφάνισης απεικονίζεται στον άξονα y, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή δείχνει το μέσο κέρδος (Σχήμα 1 (a,b,c)). Οι διακεκομμένες γραμμές καταδεικνύουν το πιθανολογικό εύρος των οικονομικών αποτελεσμάτων που απορρέει από την εφαρμογή της κάθε τεχνολογίας ξεχωριστά.

Η ανάλυση του κάθε ιστογράμματος παρείχε πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των διαφόρων γεωργικών μεθόδων, αναδεικνύοντας την ανώτερη απόδοση της ολοκληρωμένης προσέγγισης της συνδυαστικής εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH) όσον αφορά το καθαρό εισόδημα και τη συνέπεια.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1a, η τεχνολογία προληπτικού ψεκασμού σε μεταβλητές δόσεις (PSSS) παρουσιάζει μέτριες επιδόσεις με μέτρια μεταβλητότητα με καθαρό εισόδημα που κυμαίνεται από 1850 έως 2.150€, ενώ η επίλεκτη συγκομιδή (SH) παρουσιάζει την πιο συγκεντρωμένη κατανομή, υποδεικνύοντας χαμηλότερη μεταβλητότητα (1.800-1.950) (Σχήμα 1.b). Επιπλέον, η ολοκληρωμένη προσέγγιση της συνδυαστικής εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH) παρουσιάζει συνεργιστικά οφέλη, έχοντας καλύτερες επιδόσεις από οποιαδήποτε μεμονωμένη μέθοδο, παρουσιάζοντας υψηλότερο δυναμικό καθαρού εισοδήματος με τιμές που φθάνουν περίπου τα 2.400€ (Σχήμα 1.c).

Τέλος, δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα με τη χρήση των παρεχόμενων δεδομένων για τις μεθόδους προληπτικού ψεκασμού σε μεταβλητές δόσεις (PSSS), επίλεκτης συγκομιδής (SH) και η συνδυαστική εφαρμογή προληπτικών ψεκασμών με μεταβλητές δόσεις και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH) (Σχήμα 2) ενώ στη συνέχεια υπολογίστηκαν συνοπτικά στατιστικά στοιχεία προκειμένου να εξασφαλιστεί καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και για να γίνει καλύτερη σύγκριση των κατανομών του καθαρού εισοδήματος για κάθε είδος τεχνολογίας που εξετάστηκε.



Σχήμα 2. Σύγκριση κατανομής πιθανοτήτων του καθαρού εισοδήματος που δημιουργήθηκε μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo μεταξύ της τεχνολογίας εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών σε μεταβλητές δόσεις (PSSS), της επιλεκτικής συγκομιδής (SH) και της συνδυαστικής εφαρμογής προληπτικών ψεκασμών και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH).

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2 η τυπική απόκλιση των 70,94 €/στρέμμα στην συνδυαστική εφαρμογή προληπτικών ψεκασμών με μεταβλητές δόσεις και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH) είναι μεν αρκετά υψηλή, αλλά αποδίδεται δε στη συνδυασμένη επίδραση των αβεβαιοτήτων και των δύο άλλων τεχνολογιών (PSSS και SH) οι οποίες δρουν συνδυαστικά. Η υψηλότερη αυτή μεταβλητότητα μπορεί να αποδοθεί σε τρεις κύριους παράγοντες συμπεριλαμβανομένης της πολυπλοκότητα που προκύπτει κατά τη συνδυαστική εφαρμογή των δύο τεχνολογιών (προληπτικός ψεκασμός σε μεταβλητές δόσεις (PSSS) και επίλεκτης συγκομιδής (SH)), καθώς οι μεμονωμένες αβεβαιότητές τους μπορούν να επιδεινωθούν. Επιπλέον, οι προκλήσεις ολοκλήρωσης μεταξύ των δύο συστημάτων μπορεί να είναι υπεύθυνες για τυχόν πρόσθετη μεταβλητότητα που προκύπτει καθώς επίσης και η ύπαρξη των πιθανών αποτελεσμάτων αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο τεχνολογιών.

Τέλος, η υψηλότερη τυπική απόκλιση υποδηλώνει ότι, ενώ η συνδυαστική εφαρμογή προληπτικών ψεκασμών με μεταβλητές δόσεις και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH) έχει το υψηλότερο μέσο καθαρό εισόδημα (2.205,12 €/ha), έχει επίσης τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα στα αποτελέσματα, η οποία είναι σημαντική για την αξιολόγηση του κινδύνου και τις αποφάσεις διαχείρισης. Αυτό δείχνει ότι ο συνδυασμός τεχνολογιών, αν και δυνητικά πιο κερδοφόρος κατά μέσο όρο, συνοδεύεται από αυξημένη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον αποδεικνύεται ότι η ενοποίηση συστημάτων εισάγει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από τον απλό συνδυασμό δύο ανεξάρτητων συστημάτων.

Η χαμηλότερη μεταβλητότητα καθιστά την επίλεκτη συγκομιδή (SH) μια πιο προβλέψιμη τεχνολογία όσον αφορά τα αναμενόμενα αποτελέσματα, παρόλο που το μέσο αναμενόμενο εισόδημά που μπορεί να προκύψει από την εφαρμογή της (1.875,55 €/στρέμμα) είναι χαμηλότερο τόσο σε σχέση με αυτό που προκύπτει από την εφαρμογή τεχνολογίας προληπτικού ψεκασμού σε μεταβλητές δόσεις (PSSS) (1.986,2 €/στρέμμα) όσο και από την συνδυαστική εφαρμογή προληπτικών ψεκασμών με μεταβλητές δόσεις και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH) (2.204,7 €/στρέμμα). Η παρατήρηση αυτή αποτελεί πολύτιμη πληροφορία για όσους χρήστες επιθυμούν να αποφύγουν τον επενδυτικό κίνδυνο και δίνουν προτεραιότητα στη συνέπεια έναντι των μέγιστων πιθανών αποδόσεων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν τα σημαντικά συνεργιστικά οφέλη της καινοτόμου προσέγγισης που περιλαμβάνει τη συνδυαστική εφαρμογή προληπτικών ψεκασμών σε μεταβλητές δόσεις και επιλεκτικής συγκομιδής (PSSS-SH). Συγκεκριμένα, η τεχνολογία PSSS- SH επιτυγχάνει το υψηλότερο δυναμικό καθαρού εισοδήματος με τιμές που φθάνουν περίπου τα 2.400€/ha, έναντι 1.600-2.000€ των αντίστοιχων μεμονωμένων τεχνολογιών ΓΑ. Το πρόσθετο κόστος επένδυσης κυμάνθηκε από 25€ έως 72€/ha, ενώ παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων κατά 23,2%, υποδεικνύοντας μειωμένο επιχειρηματικό κίνδυνο. Η ανάλυση κόστους-οφέλους επιβεβαιώνει την οικονομική βιωσιμότητα με περίοδο απόσβεσης 3-5 ετών και θετική καθαρή παρούσα αξία, επιβεβαιώνοντας ότι η πρωτότυπη τεχνολογία που προέκυψε στα πλαίσια υλοποίησης του ερευνητικού έργου POSHMyCo παρουσιάζει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι των υπαρχουσών λύσεων. Παρά το υψηλότερο αρχικό κόστος (25-72€/ha), η συνδυαστική προσέγγιση (PSSS-SH) προσφέρει βελτιωμένη αποτελεσματικότητα με αύξηση εισοδήματος έως 25% και μειωμένο κίνδυνο κατά 23,2% δικαιολογώντας την υιοθέτησή της. Τα παραπάνω ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της ολοκληρωμένης αξιολόγησης για την επιτυχή εμπορική εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών στον αγροτικό τομέα και παρέχουν κατευθύνσεις για τη μελλοντική ανάπτυξη βιώσιμων γεωργικών πρακτικών με ενισχυμένη οικονομική απόδοση.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Addis, Y., & Sani, S. (2021). Impact of adoption of improved agricultural production technologies on cereal crops productivity and farmers' welfare in Central Ethiopia. Indian Journal of Science and Technology, 14(44), 3280-3287.

Costa, F., Frecassetti, S., Rossini, M., & Portioli-Staudacher, A. (2023). Industry 4.0 digital technologies enhancing sustainability: Applications and barriers from the agricultural industry in an emerging economy. Journal of Cleaner Production, 408, 137208.

Dimitrova, M., Treapăt, L. M., & Tulyakova, I. (2021). Value at Risk as a tool for economic-managerial decision-making in the process of trading in the financial market. Ekonomicko-manazerske spektrum, 15(2), 13-26.

Hardaker, J. B., Lien, G., Anderson, J. R., & Huirne, R. B. (2015). *Coping with risk in agriculture: Applied decision analysis*. Cabi.

Kvålseth, T. O. (2017). Coefficient of variation: the second-order alternative. Journal of Applied Statistics, 44(3), 402-415.

Rubinstein, R. Y., & Kroese, D. P. (2016). Simulation and the Monte Carlo method. John Wiley & Sons.

7. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΤΕΧΝΗΝΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΥΜΠΤΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΑΠΟ ΩΙΔΙΟ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ

Ξ.Ε. Πανταζή & Α. Μορέλλος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Αγίου Δημητρίου, 54124, Θεσσαλονίκη xpantazi@agro.auth.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια μη καταστροφική προσέγγιση για την ανίχνευση προσβολής από ωίδιο σε προσυμπτωματικό στάδιο, σε φυτά αμπέλου βιολογικής καλλιέργειας με συνδυαστική χρήση φασματικών τεχνολογιών και αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης. Αρχικά, συλλέχθηκαν υπερφασματικές εικόνες τόσο από υγιή όσο και από μολυσμένα από ωίδιο φυτά. Κατά την προεπεξεργασία, από τα 12 χαρακτηριστικά, τα οποία αντιστοιχούσαν σε διαφορετικούς δείκτες βλάστησης (NDRE, NDVI, REHBI, TVI, ARI, gNDVI, PSSRa, PSSRb, REIP, SR_{CHLTOT}, VOG1, VOG2), μόνον τα 5 επιλέχθηκαν τελικώς ως πλέον επιδραστικά όσο αφορά στην ανίχνευση προσβολής από ωίδιο τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την ανάπτυξη τριών διαφορετικών μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκαν τα μοντέλα Random Forest (RF), K-Nearest Neighbors (KNN) και Multilayer Perceptron (MLP) για τον προσδιορισμο της φαινοτυπικής κατάστασης των φυτών. Και τα τρία μοντέλα παρουσίασαν αρκετά υψηλή ακρίβεια όσο αφορά την ανίχνευση του ωιδίου σε προσυμπτωματικό στάδιο, με το μοντέλο RF να επιτυγχάνει την υψηλότερη ακρίβεια στη φάση εκπαίδευσης και ελέγχου (99%), επιβεβαιώνοντας ότι τα ψηφιακά πρωτόκολλα που υποβοηθούνται από τεχνικές Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να εξασφαλίσουν υψηλή απόδοση όσο αφορά τον προσδιορισμό της προβολής σε αρχικό στάδιο.

Λέξεις κλειδιά: μηχανική μάθηση, φυτοπροστασία, εγγύς παρακολούθηση, υπολογιστική όραση, μη καταστροφικός έλεγχος

A COMBINED APPROACH OF HYPERSPECTRAL IMAGING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES FOR PRESYMPTOMATIC DETECTION OF POWDERY MILDEW IN VINEYARDS

X.E. Pantazi[1] & A. Morellos

Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture., Agiou Dimitriou, 54124, Thessaloniki
[1]*xpantazi@agro.auth.gr*

ABSTRACT

This study presents a non-destructive approach for powdery mildew detection at the presymptomatic level in organic vineyards, through combining spectral technologies and artificial intelligence (AI) algorithms. Initially, hyperspectral images were collected from both healthy and powdery mildew-infected plants. At preprocessing phase, from a total of 12 features that corresponded to different vegetation indices (VIs) (NDRE, NDVI, REHBI, TVI, ARI, gNDVI, PSSRa, PSSRb, REIP, SR_{CHLTOT}, VOG1, VOG2), only 5 were ultimately selected as the most influential for detecting powdery mildew infection. The extracted features were used for the development of three different AI models, namely Random Forest (RF), K-Nearest Neighbors (KNN), and Multilayer Perceptron (MLP), for determining the plants' phenotypic status. All

three employed models demonstrated high accuracy in detecting powdery mildew infection at the presymptomatic stage, with the RF model being the most performant, achieving accuracies of 99% both in the training and testing phases. The results confirmed that the development of such digital protocols supported by AI techniques can ensure high precision in the early-stage detection.

Keywords: machine learning, crop protection, proximal sensing, computer vision, non-destructive control

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προσβολή της αμπέλου από ωίδιο μπορεί να μειώσει σημαντικά την ποιότητα και την ποσότητα της παραγωγής, ενώ μπορεί να επηρεάσει και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του κρασιού (Fontaine et al., 2021). Η μόλυνση κατά τη φάση της ωρίμανσης των σταφυλιών είναι κρίσιμη, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απώλεια σακχάρων και αρωμάτων (Rouxinol et al., 2023). Τα τελευταία χρόνια, ο τομέας της φυτοπροστασίας έχει ενισχυθεί αισθητά με την εφαρμογή τεχνολογιών αιχμής οι οποίες συνδυάζουν τη χρήση οπτικών αισθητήρων, τεχνικών σύντηξης δεδομένων και αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (Moshou & Pantazi, 2022). Για την ανίχνευση ασθενειών της αμπέλου, αρκετές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει διάφορες τεχνικές φασματικής ανίχνευσης, όπως η χρήση πολυφασματικής κάμερας σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) (Morellos et al., 2022; Wang et al., 2023), η εγγύς ανίχνευση με χρήση θερμικής απεικόνισης (Cohen et al., 2022; Zia-Khan et al., 2022) και η υπερφασματική ανίχνευση (Bendel et al., 2020; Junges et al., 2018). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ψηφιακού εργαλείου για το μη καταστροφικό εντοπισμό της προσβολής από ωίδιο σε αμπελώνες βιολογικής γεωργίας. Έμφαση δόθηκε στον εντοπισμό των προσβολών σε προσυμπτωματικό στάδιο με χρήση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης και τεχνικών υπερφασματικής ανάλυσης, με στόχο τη μείωση της χρήσης χημικών προϊόντων και την ενίσχυση της βιώσιμης γεωργίας.

2. ΘΕΩΡΙΑ

Καθώς τα δεδομένα φασματικής απεικόνισης συχνά περιλαμβάνουν σύνθετα μοτίβα και αλληλεπιδράσεις, η ανάλυση και η ερμηνεία τους επιλέγεται να γίνεται με τη βοήθεια αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης λόγω της ικανότητάς τους να αξιοποιούν αποτελεσματικά την ετερογένεια των δεδομένων και να εντοπίζουν σχέσεις που δεν είναι άμεσα εμφανείς. Στην παρούσα μελέτη, τα χαρακτηριστικά που προέρχονται από τα σύνολα δεδομένων υπερφασματικής απεικόνισης χρησιμοποιήθηκαν ως κρίσιμες είσοδοι στα μοντέλα μηχανικής μάθησης που έχουν ως αποστολή την ανίχνευση ασθενειών των καλλιεργειών (Pantazi et al, 2020). Αναπτύχθηκαν τα μοντέλα Multilayer Perceptron (MLP), K-Nearest Neighbors (KNN) και Random Forest (RF) τα οποία αξιολογήθηκαν ως προς την αποτελεσματικότητά τους για την ακριβή διάκριση της υγιούς κατάστασης της καλλιέργειας από αυτών της καταπονημένης με εμφάνιση ορατών, και μη ορατών συμπτωμάτων προσβολής από ωίδιο, αξιοποιώντας τον όγκο και τη λεπτομέρεια πληροφοριών που παρέχονται μέσω της υπερφασματικής απεικόνισης.

2.1 Πολυστρωματικό Perceptron (Multilayer Perceptron, MLP)

Το Πολυστρωματικό Perceptron (Multilayer Perceptron, MLP) αποτελεί έναν τύπο τεχνητού νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιείται για την ανάλυση δεδομένων με σύνθετες σχέσεις. Αποτελείται από πλήρως συνδεδεμένα στρώματα, όπου κάθε νευρώνας συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επόμενου στρώματος, επιτρέποντας τη διάχυση της πληροφορίας. Βασικό του πλεονέκτημα είναι η εισαγωγή μη γραμμικότητας μέσω συναρτήσεων ενεργοποίησης, όπως η ReLU, η σιγμοειδής ή η tanh, επιτρέποντας την εκμάθηση σύνθετων μοτίβων. Το MLP έχει

αποδειχθεί αποτελεσματικό στην ανίχνευση ασθενειών καλλιεργειών, αξιοποιώντας μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις υπερφασματικών καναλιών για έγκαιρη διάκριση υγιών έναντι καταπονημένων φυτών.

2.2 K-Nearest Neighbors (KNN)

Το K-Nearest Neighbors (KNN) είναι ένας μη παραμετρικός αλγόριθμος ταξινόμησης του οποίου η εκπαίδευση βασίζεται στη γειτνίαση των δεδομένων για επίλυση προβλημάτων ταξινόμησης ή παλινδρόμησης. Το KNN χρησιμοποιεί την Ευκλείδεια Απόσταση ή την Απόσταση Manhattan, για την εύρεση των πλησιέστερων γειτόνων ενός σημείου Ο αριθμός των πλησιέστερων γειτόνων, που καθορίζεται από την τιμή K, επηρεάζει άμεσα την πρόβλεψη του μοντέλου (Taunk et al., 2019). Το KNN έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην επισκόπηση της κατάστασης των καλλιεργειών, αξιοποιώντας την τοπική δομή του χώρου χαρακτηριστικών για την αξιόπιστη διάκριση μεταξύ υγιών και καταπονημένων φυτών και εντοπισμό τυχών ανωμαλιών ως προς την ανάπτυξη και τη φαινοτυπική συμπεριφορά τους (Zhang et al.,2020;Karadag et al., 2020).

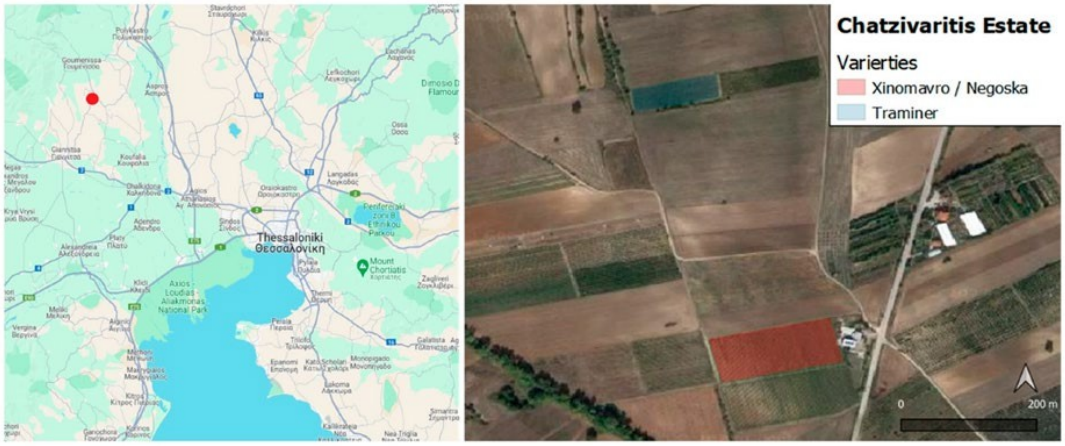
2.3 Random Forest (RF)

Τα Random Forest (RF) αποτελούν συνδυασμό πολλών δέντρων απόφασης και των πιθανών συνέπειών που προκύπτουν από τους συνδυασμούς τους για την παροχή ακριβών και σταθερών προβλέψεων. Κάθε δέντρο εκπαιδεύεται σε τυχαία υποσύνολα των δεδομένων, ενώ η τελική πρόβλεψη προκύπτει από τη μέση πρόβλεψη (για παλινδρόμηση) ή την πλειοψηφική ψήφο (για ταξινόμηση) όλων των δέντρων (Quinlan, 1986). Μέσω του εντοπισμού της σημασίας των χαρακτηριστικών, τα RF συμβάλλουν στην κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την κατάσταση ομαλής λειτουργίας διαφόρων βιοσυστημάτων, όπως αυτά των καλλιεργειών. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση του RF έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα αποτελεσματική σε επίπεδο ανίχνευσης ασθενειών των καλλιεργειών , μέσω της ανάδειξης σημαντικών παραγόντων που συνεισφέρουν στην ανίχνευση ανωμαλιών στην ανάπτυξη των φυτών (Kale & Shitole, 2021).

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Ως περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τμήματα εμπορικού αμπελώνα, βιολογικής γεωργίας του Κτήματος Χατζηβαρύτη. Ο αμπελώνας έχει συνολική έκταση 18 ha και βρίσκεται στην περιοχή της Γουμένισσας, στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονία. Η αξιολόγηση του αμπελώνα πραγματοποιήθηκε σε πραγματικές συνθήκες αγρού, χωρίς τεχνητή μόλυνση. Έμπειρος φυτοπαθολόγος του κτήματος, με εξειδίκευση στην αμπελοκαλλιέργεια, εντόπισε φύλλα με ορατά συμπτώματα ωιδίου, τα οποία και επισημάνθηκαν. Η λήψη υπερφασματικών δεδομένων έγιναν σε τμήματα του αμπελώνα που αφορούσαν τις ποικιλίες Ξινόμαυρο και Νεγκόσκα και Traminer (Σχήμα 1).

Οι επιλεγμένες υπερφασματικές εικόνες ελήφθησαν τόσο από υγιή όσο και από φυτά προσβεβλημένα από ωίδιο. Δεδομένου ότι ο μύκητας (Erysiphe necator) παράγει σπόρια (κονίδια) που μπορούν να μεταφερθούν μέσω ανέμου ή ακόμα και μέσω άμεσης επαφής μεταξύ φύλλων, θεωρήθηκε πολύ πιθανό ότι τα γειτονικά φύλλα των ήδη μολυσμένων θα μολυνθούν μελλοντικά. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκαν διπλανά φύλλα που αρχικά θεωρούνταν υγιή (χωρίς ορατά συμπτώματα), με την εκτίμηση ότι η ασθένεια θα μπορούσε να μεταφερθεί σε αυτά σε σύντομο χρονικό διάστημα, λόγω της χωρικής εγγύτητας με τα μολυσμένα φύλλα.



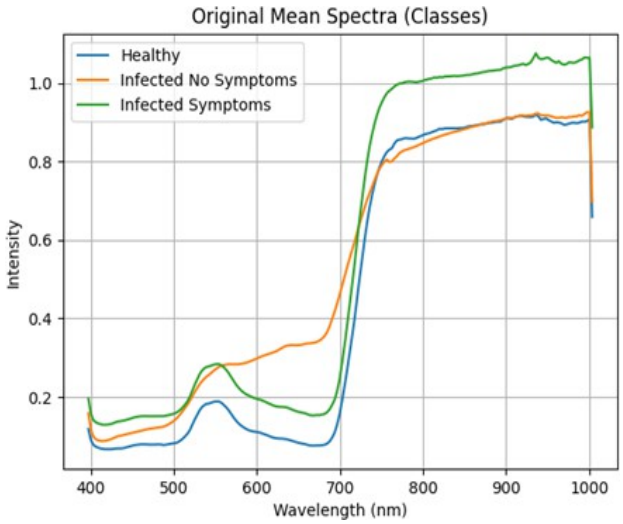
Σχήμα 1. Τοποθεσία του οινοποιείου Χατζηβαρίτη (αριστερά) και των σχετικών πεδίων πειραματικών δοκιμών (δεξιά).

Ταυτόχρονα, έγινε συλλογή δεδομένων από υγιή φύλλα τα οποία συλλέχθηκαν σε περιοχές του αμπελώνα όπου δεν υπήρχαν ενδείξεις μόλυνσης και όπου δεν είχε καταγραφεί ιστορικό εμφάνισης ωιδίου).

3.1 Λήψη Υπερφασματικών εικόνων

Τα υπερφασματικά δεδομένα συλλέχθηκαν με την κάμερα Specim IQ, έπειτα από ρύθμιση για βέλτιστη λειτουργία σύμφωνα με την ανάλυση, το φασματικό εύρος και τις συνθήκες φωτισμού. Η συσκευή τοποθετήθηκε ~60 cm από το φυτό-στόχο. Η λευκή πλάκα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε σε λειτουργία ταυτόχρονης αναφοράς (simultaneous mode), είτε με λήψη ανά ημέρα μέτρησης είτε με προκαθορισμένη αναφορά της συσκευής. Η δειγματοληψία στόχευσε συγκεκριμένα φυτά βάσει πληροφοριών από το προσωπικό του οινοποιείου. Συνολικά συλλέχθηκαν 112 υπερφασματικές εικόνες, εκ των οποίων 81 αφορούσαν φυτά προσβεβλημένα από ωίδιο. Τα δεδομένα εξήχθησαν μέσω του λογισμικού Specim IQ Studio και τη συνέχεια υποβλήθηκαν σε έλεγχο ποιότητας.

3.2 Εξαγωγή δεδομένων



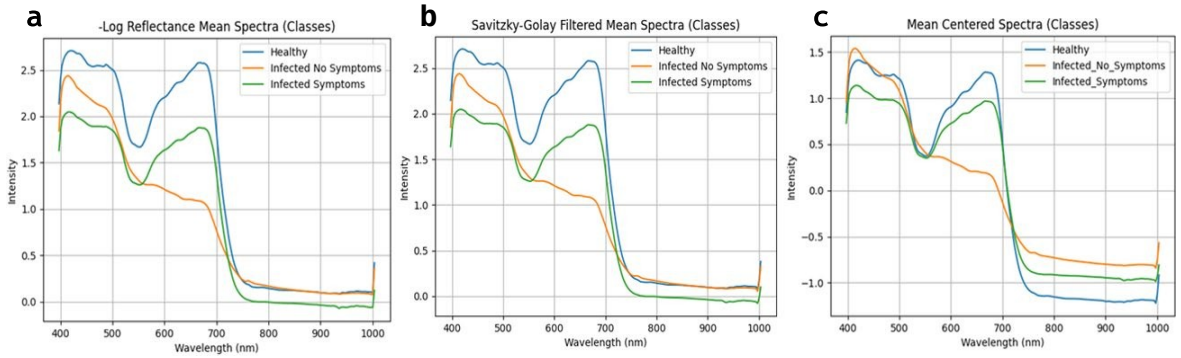
Σχήμα 2. Μέσος όρος των επιλεγμένων φασματικών αποκρίσεων για κάθε μία από τις 3 κλάσεις που αφορούν τη φαινοτυπική κατάσταση υγείας των φυτών της αμπέλου.

Πριν την εξαγωγή δεδομένων εφαρμόστηκαν μέθοδοι διόρθωσης θορύβου και γεωμετρικές διορθώσεις για ορθή ευθυγράμμιση των υπερφασματικών εικόνων. Κατόπιν, εξήχθησαν φασματικές υπογραφές από επιλεγμένες περιοχές ενδιαφέροντος (Region of Interest, ROI), με ανάλυση χαρακτηριστικών όπως ανακλαστικότητα και ζώνες απορρόφησης. Οι υπογραφές αναλύθηκαν περαιτέρω για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών και τον εντοπισμό κρίσιμων χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια ορίστηκαν τρεις κλάσεις: υγιής, προσβεβλημένη χωρίς ορατά συμπτώματα και προσβεβλημένη με ορατά συμπτώματα. Οι μέσοι όροι ανά κλάση παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.

3.3 Προεπεξεργασία Φασματικών Δεδομένων

Αρχικά, έγινε αφαίρεση των ακραίων τιμών, που αφορά στο 2.5% των δεδομένων από τις κορυφαίες και χαμηλότερες φασματικές υπογραφές. Μετά από την αφαίρεση των ακραίων τιμών, δημιουργήθηκε η δομοσειρά (pipeline) προεπεξεργασίας των δεδομένων με τη σειρά που παρατίθεται παρακάτω:

1. Χρησιμοποιήθηκε αρνητικός αλγόριθμος για τη μετατροπή των φασματικών δεδομένων σε λογαριθμική κλίμακα, μειώνοντας τις μη γραμμικότητες και ενισχύοντας τα χαρακτηριστικά του φάσματος που είναι λιγότερο εμφανή στη γραμμική κλίμακα (Σχήμα 3a).
2. Εφαρμόστηκε φίλτρο Savitzky-Golay ως τεχνική εξομάλυνσης για τη διατήρηση της ακρίβειας των κορυφών και άλλων σημαντικών χαρακτηριστικών του φάσματος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε πολυώνυμο δευτέρου βαθμού με 5 σημεία υποστήριξης (window size), το οποίο εξισορροπεί την απομάκρυνση του θορύβου και τη διατήρηση της γεωμετρίας των δεδομένων (Σχήμα 3b).
3. Εφαρμόστηκε Κεντροποίηση ως προς το μέσο όρο (Mean Centering) για την κανονικοποίηση των δεδομένων αφαιρώντας τον μέσο όρο από κάθε φασματική τιμήμε σκοπό να μειώσει την επίδραση της βασικής γραμμής και να διευκολύνει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών δειγμάτων(Σχήμα 3c).



Σχήμα 3. Διάγραμμα απεικόνισης προεπεξεργασμένων αποκρίσεων των μέσων όρων με τον αρνητικό λογάριθμο (a) με το φίλτρο Savitzky-Golay (2ου βαθμού πολυώνυμο, με 5 σημεία υποστήριξης) (b) με τη μέθοδο mean centering (c) για τις 3 κλάσεις των φυτών αμπέλου, που αφορούν στη φαινοτυπική κατάσταση της υγείας των φυτών

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3 a,b και c, διακρίνεται ότι οι επιλεγμένες φασματικές υπογραφές έχουν κανονικοποιηθεί και εξομαλυνθεί σημαντικά. Η συνδυαστική χρήση αυτών των παραπάνω μεθόδων προεπεξεργασίας οδήγησε σε δεδομένα υψηλής ποιότητας, βελτιώνοντας σημαντικά την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των επόμενων σταδίων ανάλυσης.

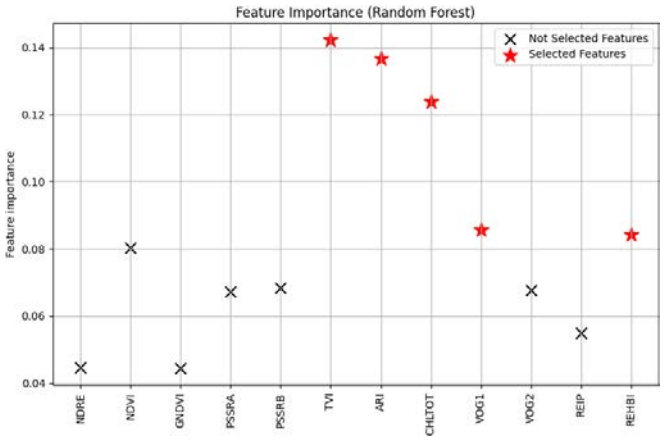
3.4 Εξαγωγή Χαρακτηριστικών μέσω Δεικτών Βλάστησης

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 12 διαφορετικοί δείκτες βλάστησης (Πίνακας 1) για την εξαγωγή χαρακτηριστικών με βάση τις φασματικές ζώνες που χρησιμοποιούνται στον κάθε δείκτη, όπως αυτό προκύπτει από τη σχετική βιβλιογραφία.

Πίνακας 1. Φασματικοί δείκτες Βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή χαρακτηριστικών

Δείκτης Βλάστησης	Τύπος Δείκτη Βλάστησης	Βιβλιογραφία
NDVI	$\frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670}}$	(Rouse et al., 1972)
REHBI	$\frac{(R_{842} - R_{665})(842 - 665) - (R_{783} - R_{665})(783 - 665)}{2}$	(Liu et al., 2020)
NDRE	$\frac{R_{790} - R_{720}}{R_{790} + R_{720}}$	(Barnes et al., 2000)
TVI	$0{,}5 * [120 * (R_{750} - R_{550}) - 200 * (R_{670} - R_{550})]$	(Broge & Leblanc, 2001)
ARI	$\frac{1}{R_{550}} - \frac{1}{R_{700}}$	(Gitelson et al., 2003)
gNDVI	$\frac{R_{810} - R_{560}}{R_{810} + R_{560}}$	(Datt, 1998)
PSSRa	$\frac{R_{800}}{R_{675}}$	(Blackburn, 1998)
PSSRb	$\frac{R_{800}}{R_{650}}$	(Blackburn, 1998)
REIP	$700 + 40 * \frac{R_{RE} - R_{700}}{R_{740} - R_{700}}$, όπου $R_{RE} = \frac{R_{670} + R_{780}}{2}$	(Dawson & Curran, 1998)
SR_{CHLTOT}	$\frac{R_{760}}{R_{500}}$	(Datt, 1998)
VOG1	$\frac{R_{740}}{R_{720}}$	(Vogelmann et al., 1993)
VOG2	$\frac{R_{734} - R_{747}}{R_{715} - R_{720}}$	(Vogelmann et al., 1993)

3.5 Εξαγωγή Χαρακτηριστικών μέσω Δεικτών Βλάστησης



Σχήμα 4. Σημαντικότητα χαρακτηριστικών, όπως προέκυψαν από το μοντέλο Random Forest, για τα φασματικά δεδομένα που ελήφθησαν από τα φυτά της αμπέλου. Με κόκκινο αστέρι σημειώνονται τα 5 κορυφαία χαρακτηριστικά που έχουν επιλεγεί, ενώ με μαύρο "x" σημειώνονται τα μη επιλεγμένα χαρακτηριστικά.

Για την εξαγωγή και επιλογή χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Τυχαία Δάση (RF), το οποίο προσφέρει έναν αξιόπιστο τρόπο για την αξιολόγηση της σημαντικότητας των χαρακτηριστικών. Η σημαντικότητα κάθε χαρακτηριστικού υπολογίστηκε με τη μέθοδο Mean Decrease Impurity (MDI), επιτρέποντας την εκτίμηση της μέσης μείωσης της αβεβαιότητας που προκαλείται από τη χρήση ενός συγκεκριμένου χαρακτηριστικού για τον διαχωρισμό των δεδομένων στα δέντρα απόφασης. Η αβεβαιότητα μετρήθηκε με τη μέθοδο Εντροπίας (Entropy) για τα δεδομένα που προέκυψαν από τις υπερφασματικές εικόνες. Τελικώς, επιλέχθηκαν τα 5 κορυφαία χαρακτηριστικά για να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στα μοντέλα μηχανικής μάθησης που αναπτύχθηκαν, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 4.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Επιλογή Υπερπαραμέτρων

Για την επιλογή υπερπαραμέτρων επιλέχθηκε η μέθοδος αναζήτησης πλέγματος (Grid Search) η οποία περιλαμβάνει τον έλεγχο μιας σειράς υπερπαραμέτρων και την επιλογή αυτής που δίνει την καλύτερη απόδοση σε ένα σύνολο επικύρωσης. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η επιτυχία του μοντέλου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον τρόπο κατανομής των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές διασταυρούμενης επικύρωσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να αξιολογηθεί κάθε πιθανός συνδυασμός στο πλέγμα. η ιδανική συλλογή υπερπαραμέτρων για το μοντέλο προσδιορίζεται μέσω του συνδυασμού των παραμέτρων με τρόπο που να αποδίδει το καλύτερο αποτέλεσμα όπως προσδιορίζεται από τη μέτρηση απόδοσης στο σύνολο επικύρωσης.

4.2 Ανίχνευση ωιδίου

Πίνακας 1. Επιδόσεις αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (ML) κατά τη φάση εκπαίδευσης και δοκιμής

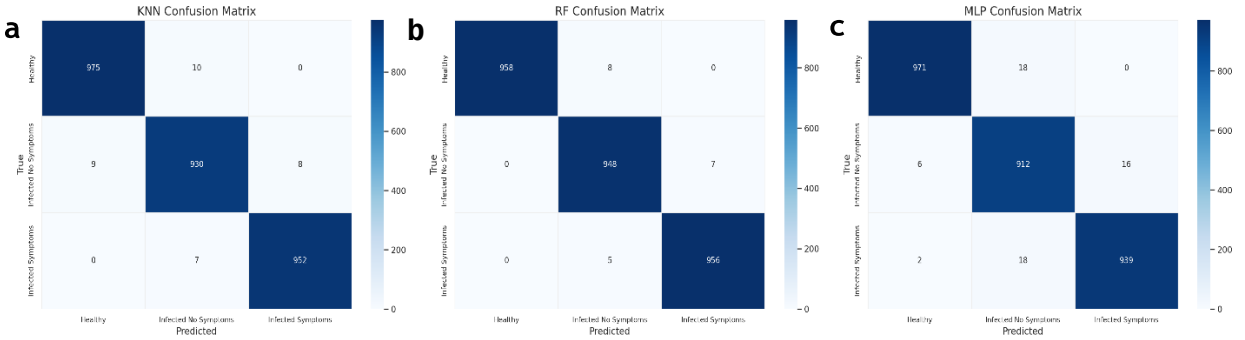
Μοντέλο	Στατιστικό Μετρικό	Εκπαίδευση	'Ελεγχος
RF	Accuracy	0.99	0.99
	Precision	1.00	0.99
	F1 Score	0.99	0.99
KNN	Accuracy	0.99	0.99
	Precision	0.98	0.98
	F1 Score	0.99	0.99
MLP	Accuracy	0.98	0.98
	Precision	0.99	0.99
	F1 Score	0.98	0.99

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1, και τα τρία μοντέλα παρουσιάζουν ακρίβεια 0.99, που είναι σχεδόν άριστο αποτέλεσμα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι στη φάση της εκπαίδευσης η ακρίβεια ήταν είτε υψηλότερη είτε ίση με τη φάση της δοκιμής, πράγμα που υποδηλώνει ότι η εκμάθηση των δεδομένων ήταν εξαιρετικά αποδοτική. Το RF σημείωσε Ακρίβεια (Precision) ίση με 1.00, γεγονός που σημαίνει ότι αναγνωρίζει σωστά όλες τις θετικές τιμές της κλάσης του κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης.

Τέλος, οι τιμές των F1-Score σε όλα τα μοντέλα είναι σχεδόν άριστες και αυτό επιβεβαιώνει την ιδιαίτερα υψηλή δυναμική των μοντέλων που αναπτύχθηκαν όσο αφορά την ανίχνευση του

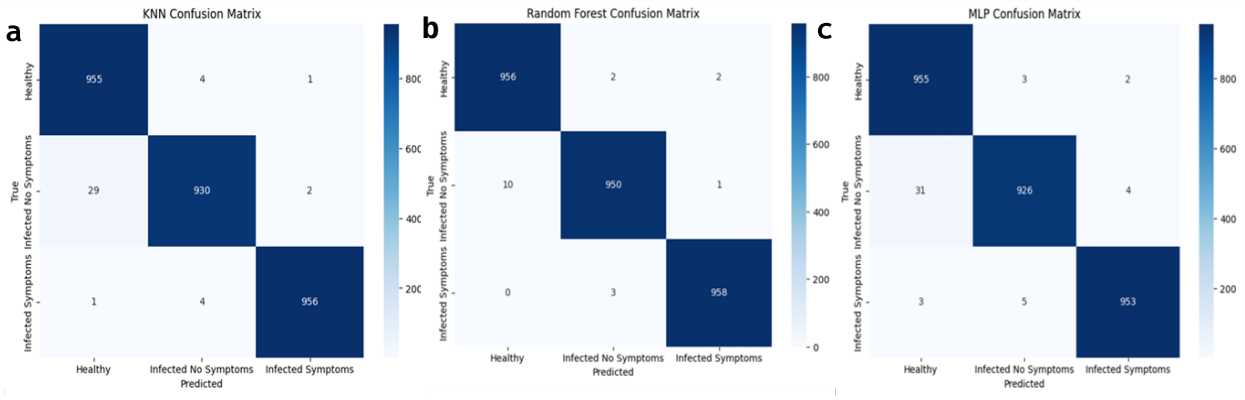
ωιδίου σε προσυμπτωματικό στάδιο. Ταυτόχρονα, το γεγονός ότι οι τιμές των F1-Score ήταν τόσο κοντά με τα αποτελέσματα της ακρίβειας επιβεβαιώνει ότι υπήρχε ίση κατανομή των δεδομένων στις διαφορετικές κλάσεις που προέκυψαν μετά και από τη διαδικασία υποδειγματοληψίας των συλλεχθέντων φασματικών δεδομένων.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 1 για την φάση της εκπαίδευσης και ελέγχου του κάθε μοντέλου απεικονίζονται και στους πίνακες σύγχυσης που ακολουθούν (Σχήμα 5 & 6).



Σχήμα 5. Πίνακας σύγχυσης αποτελεσμάτων των φασματικών αποκρίσεων κατά τη φάση εκπαίδευσης με τη μέθοδο KNN (a),RF (b), MLP (c).

Οι πίνακες σύγχυσης επιβεβαιώνουν την πολύ υψηλή απόδοση και στα τρία μοντέλα τόσο στο κατά την φάση εκπαίδευσης (training) όσο και κατά τη φάση ελέγχου (testing) που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 1, με επικράτηση της διαγωνίου και την εμφάνιση ελάχιστων σφαλμάτων. Κατά τον έλεγχο, το RF σημείωσε περίπου 99.2% ακρίβεια με ελάχιστες συγχύσεις για τις κλάσεις των προσβεβλημένων φυτών της αμπέλου με ορατά και μη ορατά συμπτώματα. Το μοντέλο KNN ακολουθεί παρόμοιο μοτίβο όσο αφορά τη γενίκευση, ενώ το MLP είναι ελαφρώς πιο αδύναμο σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα. Σε όλα τα μοντέλα, η κλάση της υγιούς κατάστασης αναγνωρίζεται σχεδόν άψογα. Παρατηρείται επίσης ότι τα ποσοστά επιτυχούς αναγνώρισης είναι παραμένουν οριακά υψηλότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα κατά τη φάση ελέγχου, γεγονός που υποδηλώνει ισχυρή γενίκευση χωρίς ενδείξεις υπερπροσαρμογής. Τέλος, το κυρίαρχο μοτίβο σφάλματος που εμφανίζεται σε όλα τα μοντέλα είναι οι ελαφριά σύγχυση που παρατηρείται μεταξύ της κλάσης των προσβεβλημένων φυτών της αμπέλου με ορατά και μη ορατά συμπτώματα, με το RF να παρουσιάζει τις ελάχιστες συγχύσεις (Σχήμα 5 &6).



Σχήμα 6. Πίνακας σύγχυσης αποτελεσμάτων των φασματικών αποκρίσεων κατά τη φάση ελέγχου με τη μέθοδο KNN (a),RF (b), MLP (c).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, τα προτεινόμενα μοντέλα απέδωσαν πολύ ικανοποιητικά στη φάση εκπαίδευσης και ελέγχου. Το μοντέλο RF σημείωσε την υψηλότερη συνολική ακρίβεια ίση με 99%, ακολουθούμενο από το KNN, ενώ το μοντέλο MLP εμφάνισε οριακά αυξημένες συγχύσεις διατηρώντας επίδοση άνω του 98%. Το κυρίαρχο σφάλμα εντοπίστηκε στις συγχύσεις μεταξύ των κλάσεων των προσβεβλημένων φυτών της αμπέλου με ορατά και μη ορατά συμπτώματα, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω των παρεμφερών φασματικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται μεταξύ των δύο κλάσεων, ενώ η κατηγορία υγιών φυτών αναγνωρίστηκε σχεδόν άριστα. Συνολικά, τα ευρήματα τεκμηριώνουν ότι τα φασματικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν, παρέχουν επαρκή διακριτική ισχύ όσο αφορά τον επιτυχή προσδιορισμό της κατάστασης υγείας της καλλιέργειας της αμπέλου, με το μοντέλο RF να αναδεικνύεται ως το πλέον ενδεδειγμένο μοντέλο για την ενσωμάτωση του σε ροές έγκαιρης ανίχνευσης προσβολών, όπως το ωίδιο, με σκοπό την αποτελεσματική και έγκαιρη διαχείριση των αμπελοκαλλιεργειών.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AOAC, 1997. *Official Methods of Analysis, 16th ed*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.

Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., … Thompson, T. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data.

Bendel, N., Backhaus, A., Kicherer, A., Köckerling, J., Maixner, M., Jarausch, B., Biancu, S., Klück, H.-C., Seiffert, U., & Voegele, R. T. (2020). Detection of two different grapevine yellows in Vitis vinifera using hyperspectral imaging. Remote Sensing, 12(24), 4151.

Blackburn, G. A. (1998). Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches. Remote Sensing of Environment, 66(3), 273–285.

Broge, N. H., & Leblanc, E. (2001). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. Remote sensing of environment, 76(2), 156-172.

Cohen, B., Edan, Y., Levi, A., & Alchanatis, V. (2022). Early detection of grapevine (Vitis vinifera) downy mildew (Peronospora) and diurnal variations using thermal imaging. Sensors, 22(9), 3585

Datt, B. (1998). Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+ b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. Remote Sensing of Environment, 66(2), 111–121.

Dawson, T. P., & Curran, P. J. (1998). Technical note A new technique for interpolating the reflectance red edge position.

Fontaine, M. C., Labbé, F., Dussert, Y., Delière, L., Richart-Cervera, S., Giraud, T., & Delmotte, F. (2021). Europe as a bridgehead in the worldwide invasion history of grapevine downy mildew, Plasmopara viticola. Current Biology, 31(10), 2155-2166.

Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. Journal of plant physiology, 160(3), 271-282.

Grabowski, S.G., Marcotte, M and Ramaswamy, S.H., 2003. *Drying of fruits, vegetables and spices.* In: A. Chakraverty, A.S. Mujumdar, G.S.V. Raghavan and H.S. Ramaswamy (eds), Handbook of postharvest technology: cereals, fruits, vegetables, tea and spices. Marcel Dekker, Inc. New York, 653-695.

KALE, M. R., & SHITOLE, M. S. (2021). Analysis of crop disease detection with SVM, KNN and random forest classification. Information Technology in Industry, 9(1), 364-372.

Karadağ, K., Tenekeci, M. E., Taşaltın, R., & Bilgili, A. (2020). Detection of pepper fusarium disease using machine learning algorithms based on spectral reflectance. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 28, 100299.

Liu, J., & Wang, X. (2020). Early recognition of tomato gray leaf spot disease based on MobileNetv2-YOLOv3 model. Plant Methods, 16, 1–16.

Morellos, A., Pantazi, X. E., Paraskevas, C., & Moshou, D. (2022). Comparison of deep neural networks in detecting field grapevine diseases using transfer learning. Remote sensing, 14(18), 4648.

Moshou, D. E., & Pantazi, X. E. (2022). Data fusion and its applications in agriculture. In Information and Communication Technologies for Agriculture—Theme II: Data (pp. 17-40). Cham: Springer International Publishing.

Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1972). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium.

Rouxinol, M. I., Martins, M. R., Barroso, J. M., & Rato, A. E. (2023). Wine grapes ripening: A review on climate effect and analytical approach to increase wine quality. Applied Biosciences 2: 347–372.

Taunk, K., De, S., Verma, S., & Swetapadma, A. (2019, May). A brief review of nearest neighbor algorithm for learning and classification. International conference on intelligent computing and control systems (ICCS) 2019, (pp. 1255-1260). IEEE.

Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. Machine learning, 1(1), 81-106.

Vogelmann, J. E., Rock, B. N., & Moss, D. M. (1993). Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. Journal of Remote Sensing, 14(8), 1563–1575.

Wang, Y. M., Ostendorf, B., & Pagay, V. (2023). Evaluating the Potential of High-Resolution Visible Remote Sensing to Detect Shiraz Disease in Grapevines. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2023.

Zhang, N., Yang, G., Pan, Y., Yang, X., Chen, L., & Zhao, C. (2020). A review of advanced technologies and development for hyperspectral-based plant disease detection in the past three decades. Remote Sensing, 12(19), 3188.

Zia-Khan, S., Kleb, M., Merkt, N., Schock, S., & Müller, J. (2022). Application of infrared imaging for early detection of Downy Mildew (Plasmopara viticola) in grapevine. Agriculture, 12(5), 617.

8. INVENTORY OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND DATA-DRIVEN SOLUTIONS FOR LIVESTOCK TRACKING

S. Vouraki[1], V. Anestis[2], A. Arsenos[3], G. Arsenos[4] & T. Bartzanas[2]

[1] *University of Ioannina, Department of Agriculture, Kostakioi, 47100 Arta, Greece*
[2] *Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece*
[3] *National and Kapodistrian University of Athens, Department of Digital Industry Technologies, Euripus Campus, 34400 Euboea, Greece 4Aristotle University, School of Veterinary Medicine, University Campus, 54124 Thessaloniki, Greece svouraki@uoi.gr*

ABSTRACT

The objective was to develop an inventory of existing digital technologies and data-driven solutions for livestock tracking and assess their information content. Systematic online research was performed using three identification criteria; (i) main category (industry products, applications, datasets, and projects), (ii) application area (animal health and welfare, production, resilience, transparency and traceability, animal tracking, reproduction and breeding, feed intake and grazing, environment, policy and administration), and (iii) animal species - production system (dairy cows, dairy sheep and goats, beef cattle, meat sheep, pigs, and poultry). A digital platform (https://aua-site.vercel.app/) was built using cutting-edge web technologies to dynamically manage and display inventory data. A total of 378 industry products (n=306), applications (n=15), datasets (n=20), and projects (n=37) were identified and included in the inventory. The majority (69.6%) were used for dairy cows, followed by pigs (32.5%), beef cattle (24.3%), dairy sheep and goats (20.4%), meat sheep (16.7%), and poultry (9.8%). The prevailing application area was animal health and welfare monitoring (87.8%); feed intake and grazing, production, reproduction and breeding, animal tracking, environment, resilience, transparency and traceability, and policy-administration features were reported in 34.9%, 19.6%, 19.3%, 10.9%, 9.8%, 7.4%, and 1.9% of cases, respectively. Overall, the inventory developed provides easy access and navigation to a wide range of digital and data-driven solutions for livestock tracking per animal species and application area. This inventory is expected to help increase awareness and adoption of digital technologies in the livestock sector. This work is part of the Digi4Live project that is funded by the European Union.

Keywords: inventory, digital technologies, data-driven solutions, livestock tracking

1. INTRODUCTION

A significant increase in global demand for livestock products is expected by year 2050 (Alexandratos and Bruisna, 2012; Falcon et al., 2022). This highlights the need for efficient and sustainable livestock production systems. Digital technologies and data-driven solutions allow for real-time monitoring, automated data collection and evaluation of farm sustainability indicators (Berchmans et al., 2017; Gabriel and Gandorfer, 2022). Specifically, real-time animal data can be collected with the use of sensors, and then processed, integrated, and evaluated using statistical algorithms and artificial intelligence. Moreover, decision support tools enable informed decision-making processes at the animal and farm level, thus promoting professionalization and sustainable development.

These state-of-the-art innovations can help improve production, animal health and welfare, and environmental impact towards more sustainable and efficient livestock farming. However, this potential remains underutilized because of inadequate coordination and support to fully exploit the available technologies, integrate multi-source data, and showcase the expected benefits from data use (Wysel et al., 2021, Tey and Brindal, 2022; Krampe et al., 2024).

Digi4Live is an EU project (https://digi4live.eu/) that aims to support stakeholders across Europe towards harnessing the potential of digital and data-generating technologies for the benefit of livestock sector. A key theme of research in Digi4Live is to enhance our understanding regarding the potential of data-based tracking solutions and digital technologies in the livestock sector. Here, our objective was to develop a pan-European inventory of existing digital technologies and data-driven solutions for livestock tracking and assess their usefulness and potential.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Identification of digital technologies and data-driven solutions for livestock tracking

A systematic online research for livestock tracking digital technologies and data-driven solutions was performed. Three categories of identification criteria were used; (i) main category (industry products, applications, datasets, and projects), (ii) application area (animal health and welfare, production, resilience, transparency and traceability, animal tracking, reproduction and breeding, feed intake and grazing, environment, policy and administration), and (iii) animal species - production system (dairy cows, dairy sheep/goats, beef cattle, meat sheep, pigs, and poultry). Identified solutions were included in an inventory database using the following structural information: (i) name of product/application/dataset/project, (ii) company/owner, (iii) short description, (iv) application area, (v) animal species, (vi) end user, and (vii) relevant keywords.

2.2 Inventory digital platform design

A digital platform was developed to dynamically manage and display inventory data. Its frontend architecture was developed using Next.js and TypeScript, providing a robust foundation for Server-Side Rendering (SSR), Static Site Generation (SSG), and dynamic client-side interactivity. By adopting modular React components, the platform was engineered as a scalable and efficient system that ensures high levels of reusability, maintainability, and scalability.

3. RESULTS

3.1 Digital technologies and data-driven solutions for livestock tracking

A total of 306, 15, 20, and 37, industry products, applications, datasets, and projects, respectively were identified. The majority (69.6%) were used in farms raising dairy cows, followed by pigs (32.5%), beef cattle (24.3%), dairy sheep and goats (20.4%), meat sheep (16.7%), and poultry (9.8%). In terms of application area, most digital solutions were used for monitoring animal health and welfare (87.8%); feed intake and grazing, production, reproduction and breeding, animal tracking, environment, resilience, transparency and traceability, and policy-administration features were reported in 34.9%, 19.6%, 19.3%, 10.9%, 9.8%, 7.4%, and 1.9% of cases, respectively. At the main category level, industry products were the most common to address animal health and welfare (92.5%) as well as feed intake and grazing monitoring (39.5%). Applications and datasets were the most frequent in terms of reproduction and breeding (20% in both cases), whereas projects had the highest frequency regarding environmental, resilience transparency and traceability, production, and policy-administration aspects (56.8%, 56.8%, 35.1%, and 13.5%, respectively).

3.2 Inventory digital platform

The digital platform (https://aua-site.vercel.app/) hosting the inventory of digital technologies and data-driven solutions for livestock tracking is presented in Figure 1. It provides easy access and navigation to the identified solutions through the following features:

- “Search” engine: Allows for easy search and access to information related to specific digital solutions in livestock tracking.

- "Browse Solutions" tab: Allows for easy navigation through the different main categories (industry products, applications, datasets, and project) per animal species and application area.

Moreover, by selecting a specific digital solution users can access all relevant information including website, company, application area, animal species, end users, and relevant keywords.

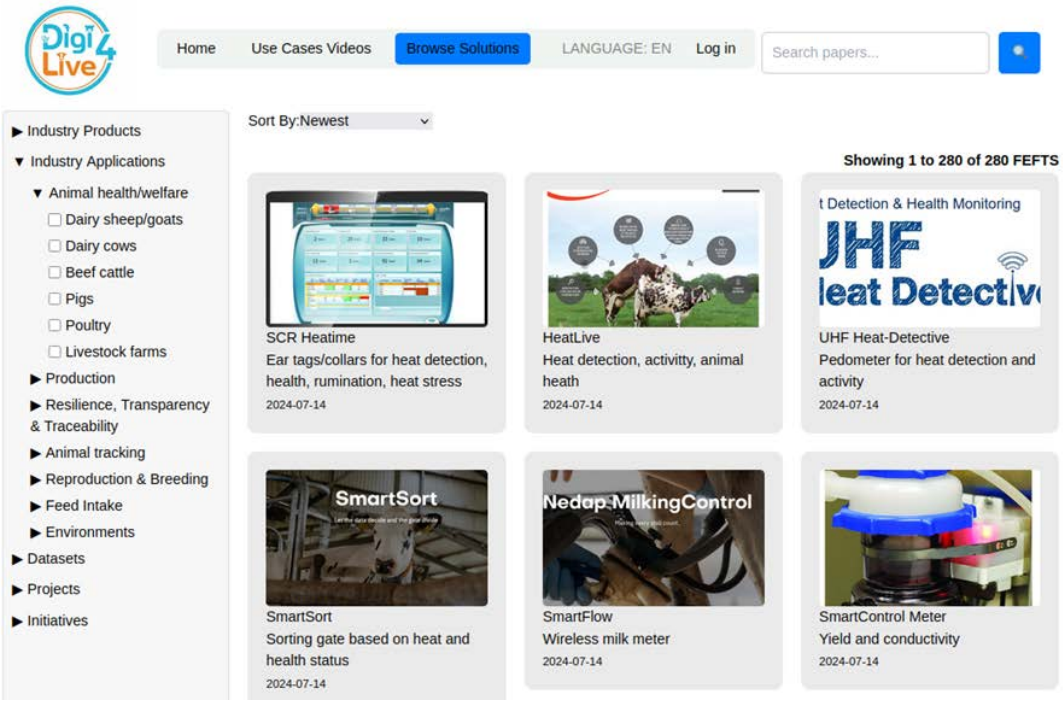


Figure 1. Digital platform of the Digi4Live inventory of digital technologies and data-driven solutions for livestock tracking.

4. CONCLUSIONS

The Digi4Live inventory includes a wide range of digital and data-driven solutions for livestock tracking. Overall, 378 industry products, applications, datasets and projects were identified. The majority were used for dairy cows, and the most frequent application area was for monitoring animal health and welfare aspects. Future updates will be a continuous process in order to include any new industry and research solutions that have not been yet identified or will emerge during the course of the Digi4live project. This inventory is a unique initiative that is expected to help increase awareness and adoption of digital technologies in the livestock sector.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the Digi4Live project (101134866) that is funded by the European Union.

6. REFERENCES

Alexandratos, N. and Bruinsma, J., 2022. *World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision*. ESA Working Paper. FAO, Rome.

Berckmans, D., 2017. *General introduction to precision livestock farming*. Animal Frontiers, *7*(1), 6-11.

Falcon, W. P., Naylor, R. L. and Shankar, N. D., 2022. *Rethinking global food demand for 2050*. Population and Development Review, 48(4), 921-957.

Gabriel, A. and Gandorfer, M., 2023. *Adoption of digital technologies in agriculture—an inventory in a european small-scale farming region*. Precision Agriculture, 24(1), 68-91.

Krampe, C., Ingenbleek, P. T., Niemi, J. K. and Serratosa, J., 2024. *Designing precision livestock farming system innovations: A farmer perspective*. Journal of Rural Studies, 111, 103397.

Tey, Y. S. and Brindal, M., 2022. *A meta-analysis of factors driving the adoption of precision agriculture*. Precision Agriculture, 23(2), 353-372.

Wysel, M., Baker, D. and Billingsley, W., 2021. *Data sharing platforms: How value is created from agricultural data*. Agricultural Systems, 193, 103241.

9. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΡΑΟΥΛΑΣ

Ε. Μπιτάκου[1], Μ. Κοτζαμπασάκη[2], Κ. Νυχάς[3], Β. Ψηρούκης[3], Κ. Δεμέστιχας[1] & Θ. Μπαρτζάνας[2]

[1] *Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αγροτικής Οικονομίας και Ανάπτυξης, Εργαστήριο Πληροφορικής, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, Ελλάδα,* bitakou@aua.gr; cdemest@aua.gr
[2] *Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, Ελλάδα*
[3] *Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, Ελλάδα*

Περίληψη

Η συνεχής αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και οι αυξανόμενες πιέσεις στους φυσικούς πόρους αναδεικνύουν την ανάγκη για πιο αποδοτικές και βιώσιμες πρακτικές στη γεωργία. Οι σύγχρονες τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση και τα αυτόνομα συστήματα, διαμορφώνουν το μέλλον της ψηφιακής γεωργίας, προσφέροντας εργαλεία για καλύτερη παρακολούθηση, πρόβλεψη και διαχείριση των καλλιεργειών. Η καλλιέργεια της φράουλας, λόγω της ευαισθησίας της σε ασθένειες και της υψηλής εμπορικής της αξίας, αποτελεί μια ιδανική περίπτωση για την εφαρμογή αυτών των καινοτομιών. Μέσω συστηματικής επισκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας, εξετάστηκε η υιοθέτηση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης με έμφαση στην πρόβλεψη παραγωγικότητας όσον αφορά την καλλιέργεια φράουλας. Τα αποτελέσματα δείχνουν αυξανόμενο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, με ευρεία χρήση αισθητήρων, όπως κάμερες RGB, υπερφασματικές κάμερες και αισθητήρες εδάφους, ενώ οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης και επεξεργασίας εικόνας κυριαρχούν στην ανάλυση των δεδομένων. Επομένως, η παρούσα μελέτη αναδεικνύει σημαντικές ευκαιρίες για περαιτέρω έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη, με στόχο την ενίσχυση της βιωσιμότητας και της αποτελεσματικότητας στη γεωργική παραγωγή φράουλας.

Λέξεις κλειδιά: ψηφιακή γεωργία, ευφυής γεωργία, τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική μάθηση, παραγωγικότητα, φράουλα

INVESTIGATION OF DIGITAL INNOVATIVE SOLUTIONS FOR OPTIMIZING STRAWBERRY PRODUCTION

E. Bitakou[1,*], M. Kotzabasaki[2], K. Nychas[3], V. Psiroukis[3], K. Demestichas[1,*] & T. Bartzanas[2]

[1]*Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Economics and Rural Development, Informatics Laboratory, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece, * bitakou@aua.gr; cdemest@aua.gr*
[2]*Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Laboratory of Farm Structures, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece*
[3]*Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Laboratory of Farm Machine Systems, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece*

ABSTRACT

The continuous growth of the global population and the growing pressures on natural resources highlight the need for more efficient and sustainable practices in agriculture. Modern technologies, such as artificial intelligence, machine learning, and autonomous systems, are shaping the future of digital agriculture, providing tools for better monitoring, forecasting, and management of crops. Strawberry cultivation, due to its sensitivity to diseases and high commercial value, presents an ideal case for the application of these innovations. Through a systematic review of the international literature, the adoption of artificial intelligence technologies with a focus on productivity forecasting for strawberry cultivation was examined. The results show increasing interest in recent years, with widespread use of sensors such as RGB cameras, hyperspectral cameras, and soil sensors, while machine learning and image processing methods dominate the data analysis. Therefore, this study highlights significant opportunities for further research and technological development, aiming to enhance the sustainability and efficiency of strawberry agricultural production.

Keywords: digital agriculture, precision agriculture, artificial intelligence, machine learning, productivity, strawberry

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ταχεία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και η πίεση στους φυσικούς πόρους έχουν αναδείξει τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα ως βασικούς στόχους της σύγχρονης γεωργικής παραγωγής (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004). Στο πλαίσιο αυτό, η ψηφιακή γεωργία εμφανίζεται ως κεντρική λύση στις προκλήσεις αυτές, αξιοποιώντας τεχνολογίες αιχμής, όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση και τα αυτόνομα συστήματα, με σκοπό την ενίσχυση της παρακολούθησης, της πρόβλεψης και της λήψης αποφάσεων (Zhang et al., 2002).

Η καλλιέργεια της φράουλας (*Fragaria × ananassa*) αποτελεί παράδειγμα εφαρμογής των συγκεκριμένων τεχνολογιών, καθώς συνδυάζει υψηλή εμπορική αξία και σημαντική ευαισθησία σε ασθένειες, έντομα και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανίχνευσης ασθενειών βασίζονται σε οπτικές παρατηρήσεις και χειρωνακτικές μετρήσεις, που συχνά είναι χρονοβόρες και περιορισμένης ακρίβειας (Chen et al., 2019).

Συνεπώς, η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στη διερεύνηση ψηφιακών καινοτόμων λύσεων στην πρόβλεψη παραγωγικότητας και στην ανίχνευση ασθενειών στην καλλιέργεια φράουλας. Η έρευνα βασίζεται σε συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση των διαθέσιμων τεχνολογιών και μεθοδολογιών ψηφιακής γεωργίας, όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση και τα αυτόνομα συστήματα, με σκοπό την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και των περιορισμών τους, ενώ παράλληλα επιδιώκει τον εντοπισμό ερευνητικών κενών και την ανάδειξη μελλοντικών προοπτικών ανάπτυξης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Αναζήτηση επιστημονικών άρθρων

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, πραγματοποιήθηκε συστηματική επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε σε δύο επιστημονικές βάσεις δεδομένων, Scopus και Web of Science, με σκοπό τον εντοπισμό όλων των σχετικών ερευνητικών εργασιών που αφορούν την εφαρμογή ψηφιακών τεχνολογιών στην καλλιέργεια φράουλας.

2.2 Επιλογή αποτελεσμάτων

Η αναζήτηση στις δύο βάσεις δεδομένων πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 2025. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν λογικοί τελεστές (όπως AND και OR) σε συνδυασμό με λέξεις-κλειδιά που σχετίζονται με το αντικείμενο της μελέτης. Επιπλέον, εφαρμόστηκαν συνδυασμοί όρων που κάλυπταν τεχνολογίες απομακρυσμένης παρακολούθησης (π.χ. UAV, drone, κάμερες), αναλύσεις εικόνας, τεχνητή νοημοσύνη, και μηχανική μάθηση, καθώς και εφαρμογές τους στη γεωργία, όπως για την ανίχνευση των ασθενειών, των παρασίτων, αλλά και της πρόβλεψης παραγωγής. Επιπλέον, περιλήφθηκαν όροι που αφορούσαν την καλλιέργεια φράουλας.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι στις περισσότερες μελέτες για την καλλιέργεια της φράουλας χρησιμοποιήθηκαν κυρίως κάμερες RGB, με τις υπερφασματικές να ακολουθούν, ενώ άλλοι τύποι αισθητήρων (θερμικές, πολυφασματικές, δορυφορικές) χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά (Elhariri et al., 2023; Lawal, 2024).

Οι περισσότερες μελέτες εστιάζουν στη μηχανική μάθηση και την υπολογιστική όραση, με σταθερή παρουσία της γεωργικής μηχανικής, της τηλεπισκόπησης και της πληροφορικής. Η ρομποτική και η τεχνητή νοημοσύνη εμφανίζονται περιορισμένα, ενώ άλλες θεματικές εντάσσονται στην ευρύτερη κατηγορία «Άλλο», η οποία συγκεντρώνει μια ποικιλία θεμάτων, όπως η γεωργία ακριβείας, η ανίχνευση αντικειμένων, η μοντελοποίηση καλλιεργειών, η φυτοπαθολογία, η επιστήμη τροφίμων, η βαθιά μάθηση και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Debnath et al. 2023).

Επιπλέον, οι εφαρμογές που εντοπίζονται στις μελέτες ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες: παρακολούθηση, προγνωστική μοντελοποίηση και αυτοματοποίηση. Η παρακολούθηση περιλαμβάνει την εκτίμηση της υγείας των φυτών, την ανίχνευση ασθενειών και την αξιολόγηση της ποιότητας των καρπών. Η προγνωστική μοντελοποίηση εστιάζει στην πρόβλεψη της απόδοσης, στην εκτίμηση του σταδίου ωρίμανσης και στη μοντελοποίηση φαινοτυπικών χαρακτηριστικών. Τέλος, η αυτοματοποίηση αφορά τη ρομποτική συγκομιδή, την εφαρμογή εισροών και την αυτόματη παρακολούθηση της καλλιέργειας μέσω μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (Liu et al., 2024).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω της παρούσας συστηματικής βιβλιογραφικής επισκόπησης διαπιστώθηκε ότι η καλλιέργεια της φράουλας αποτελεί ένα κατάλληλο πεδίο για την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών και ιδιαίτερα της τεχνητής νοημοσύνης, καθώς ελάχιστα έχει χρησιμοποιηθεί, λόγω της υψηλής εμπορικής της αξίας και της ευαισθησίας της σε περιβαλλοντικές πιέσεις. Επιπλέον, η αξιοποίηση αισθητήρων υψηλής ακρίβειας, συστημάτων μηχανικής μάθησης και προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας εικόνας, επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών και την ακριβή πρόβλεψη αποδόσεων. Επομένως, η αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα και η συνεχής βελτίωση των τεχνολογιών προσφέρουν σημαντικές προοπτικές για μια πιο βιώσιμη και αποδοτική παραγωγή φράουλας.

Ευχαριστίες:

Η παρούσα δημοσίευση αποτελεί μέρος του έργου TALLHEDA, το οποίο έχει χρηματοδοτηθεί από το πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης, βάσει της συμφωνίας επιχορήγησης αριθ. 101136578. Οι απόψεις και οι γνώμες που εκφράζονται ανήκουν αποκλειστικά στους/στις συγγραφείς και δεν αντανακλούν απαραίτητα τις απόψεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης ή της Ευρωπαϊκής

Εκτελεστικής Υπηρεσίας Έρευνας. Ούτε η Ευρωπαϊκή Ένωση ούτε η αρμόδια αρχή χορήγησης μπορούν να θεωρηθούν υπεύθυνες για αυτές.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bongiovanni R. & Lowenberg-DeBoer, J.(2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture,5*, 359– 387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

Chen, Y., Lee, W. S., Gan, H., Peres, N., Fraisse, C., Zhang, Y., & He, Y. (2019). Strawberry yield prediction based on a deep neural network using high-resolution aerial orthoimages. *Remote Sensing*, *11*(13), 1584.

Debnath, B., Mghames, S., Mandil, W., Parsa, S., Parsons, S., & Ghalamzan-E, A. (2023). Towards Autonomous Selective Harvesting: A Review of Robot Perception, Robot Design, Motion Planning and Control. *arXiv preprint arXiv:2304.09617*.

Elhariri, E., El-Bendary, N., & Saleh, S. M. (2023). Strawberry-DS: Dataset of annotated strawberry fruits images with various developmental stages. *Data in Brief*, *48*, 109165.

Lawal, O. M. (2024). Study on strawberry fruit detection using lightweight algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, *83*(3), 8281-8293.

Liu, H., Wang, X., Zhao, F., Yu, F., Lin, P., Gan, Y., ... & Tu, J. (2024). Upgrading swin-B transformer-based model for accurately identifying ripe strawberries by coupling task-aligned one-stage object detection mechanism. *Computers and Electronics in Agriculture*, *218*, 108674.

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture, 36,* 113–132. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0

10. DEVELOPMENT OF A COMMON FRAMEWORK AND METHODOLOGY FOR EVALUATING DIGITAL LIVESTOCK INNOVATIONS

A. Arsenos[1], V. Anestis[2], S. Vouraki[3], G. Arsenos[4] & T. Bartzanas[2]

[1] *National and Kapodistrian University of Athens, Department of Digital Industry Technologies, Euripus Campus, 34400 Euboea, Greece*
[2] *Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece*
[3] *University of Ioannina, Department of Agriculture, Kostakioi, 47100 Arta, Greece*
[4] *Aristotle University, School of Veterinary Medicine, University Campus, 54124 Thessaloniki, Greece anarsenos@dind.uoa.gr*

ABSTRACT

Digital transformation in livestock systems requires more than the availability of technological tools. It demands structured, inclusive, and context-sensitive methodologies to assess their suitability, usability, and alignment with stakeholder needs. The objective of this work was to develop a unified analytical framework to support the systematic assessment of digital and data-driven innovations in livestock farming across Europe. The framework was built around seven key dimensions: (i) tool functionality, (ii) stakeholder alignment, (iii) usability and accessibility, (iv) data interoperability and standards, (v) barriers and enablers,
(vi) impact potential, and (vii) scalability and replicability. These dimensions were developed to capture the multifaceted nature of digital innovation in agriculture and guide analysis across technological, social, and regulatory contexts. To support the framework's development and implementation, an artificial intelligence (AI)-assisted approach was piloted using a fine-tuned open-source Large Language Model (LLaMA 2). This AI-supported process enabled semantic analysis and pattern detection across large volumes of qualitative and regulatory data, enhancing the consistency, scalability, and insight depth of the framework, while preserving transparency and human oversight. The resulting methodology serves as a practical tool for identifying innovation gaps, user needs, and policy alignment opportunities. Leveraging Large Language Models (LLMs), the methodology supports structured interpretation of complex datasets, meaningful linking of stakeholder insights with digital solutions, and nuanced understanding of policy contexts strengthening the foundation for intelligent, context-sensitive adoption of digital technologies in livestock systems. The work is part of an EU funded project, Digi4Live that focuses on promoting data- driven, sustainable transformation in the livestock sector.

Keywords: Smart agricultural production systems, Precision agriculture, Precision livestock farming

INTRODUCTION

Livestock farming today stands at the intersection of multiple pressures. On the one hand, the demand for animal products continues to increase globally, driven by population growth and rising incomes in emerging economies (Steinfeld et al., 2006; van der Linden et al., 2021). On the other hand, the sector is under mounting pressure to reduce greenhouse gas emissions, preserve biodiversity, and improve standards of animal welfare (Herrero et al., 2020; Godde et al., 2021). Balancing these competing demands requires new approaches that extend beyond incremental improvements in traditional production methods.

Digital technologies are frequently identified as key enablers of this transition. Tools such as wearable and on-animal sensors, automated monitoring systems, advanced imaging, and decision support platforms promise to improve the efficiency, transparency, and resilience of livestock systems (Rutten et al., 2013; Berckmans, 2017; Eastwood et al., 2019). These innovations can generate real-time data for herd management, support traceability across supply chains, and even provide early warnings for animal health and welfare issues. Despite this potential, adoption across Europe has been patchy and uneven, often concentrated in intensive, high-tech or large-scale farming systems while remaining limited in smallholder or extensive production contexts (Rose et al., 2018; Ingrand and Hostiou, 2022).

A central reason for this uneven adoption is that many evaluations of digital tools remain fragmented. Assessments are often ad hoc, context-specific, or focused on narrow technical performance measures such as accuracy or speed (Gargiulo et al., 2018). Broader issues, including usability, data interoperability, alignment with farmer priorities, and compliance with regulatory frameworks, are frequently overlooked (Eastwood et al., 2017; Klerkx et al., 2019). Without structured methodologies to capture these dimensions, promising innovations risk failing to demonstrate value in practice or struggling to gain legitimacy with policymakers and end users.

The Digi4Live project[1] was launched to address this gap by promoting the evaluation integration, and adoption of data-driven technologies across the livestock sector in Europe. As part of this initiative, the present work sought to develop a common framework and methodology for systematically evaluating digital livestock innovations. The approach integrates expert-driven criteria with AI-assisted analysis to combine scientific rigor, practical relevance, and scalability. In doing so, it aims to create a foundation for more intelligent, transparent, and context-sensitive adoption of digital solutions in livestock systems.

1. MATERIALS AND METHODS

2.1 Framework development

The framework was organized into seven key dimensions, designed to capture the technological, social, and regulatory aspects of digital innovation:

1.1.1 Tool functionality
1.1.2 Stakeholder alignment
1.1.3 Usability and accessibility
1.1.4 Data interoperability and standards
1.1.5 Barriers and enablers
1.1.6 Impact potential
1.1.7 Scalability and replicability

[1] https://digi4live.eu/

These categories were identified through an iterative process that combined literature review with consultations involving farmers, technology developers, and policy experts. Each dimension was refined with reference to concrete cases of digital tool use in livestock farming, ensuring that the framework was both comprehensive and practical.

2.2 AI-assisted methodology

To support the use of the framework, an AI-assisted workflow was piloted based on a fine- tuned LLaMA-2 Large Language Model. The model was trained to handle tasks such as:

- Extracting and classifying information from qualitative reports and regulatory documents,
- Detecting patterns across heterogeneous datasets,
- Highlighting consistencies and gaps that might otherwise be overlooked.

The AI component was designed to operate under human oversight, with experts reviewing, validating, and contextualizing all outputs. This "human-in-the-loop" design was essential to preserve transparency and ensure that results were not only scalable but also sensitive to real-world conditions.

2. RESULTS

The application of the framework and AI-assisted methodology yielded several important insights:

- Technological issues such as limited interoperability between platforms and uneven levels of user accessibility were consistently identified.
- Stakeholder misalignments were highlighted, showing that farmers' practical needs were not always matched by the focus of technology developers.
- Policy and regulatory mapping revealed both enablers (e.g., funding schemes for digitization) and barriers (e.g., lack of harmonized data standards).

The AI-assisted process made it possible to analyze large volumes of text efficiently, helping to spot recurring themes across contexts. Compared to purely manual evaluation, this approach improved the consistency of analysis and reduced the time required, while still leaving interpretation in expert hands.

3. CONCLUSIONS

This study presents a methodology for evaluating digital livestock innovations that integrates a structured, multi-dimensional framework with AI-assisted semantic analysis. The framework addresses the technical, social, and policy aspects of innovation, while the AI component enhances scalability without sacrificing transparency.

The work is part of the Digi4Live project and is intended to serve multiple stakeholder groups:

- farmers and advisors, by clarifying which technologies are truly usable and relevant,
- policymakers, by identifying areas where regulation supports or hinders adoption,
- technology developers, by highlighting gaps and opportunities for improved design.

Future work will involve applying the methodology across additional case studies in different European contexts. Over time, this may contribute to the creation of a European standard framework for evaluating digital livestock innovations, strengthening pathways toward sustainable and inclusive digital transformation.

4. ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the Digi4Live project (101134866) that is funded by the European Union.

5. REFERENCES

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. (2006). Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options. FAO.

Van der Linden, A., Poppe, K. J., & Wolfert, S. (2021). Digitalisation in agriculture: A review of stakeholders and the challenges for governance. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 92, 100347.

Herrero, M., Thornton, P. K., Mason-D'Croz, D., et al. (2020). Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system. Nature Food, 1, 266–272.

Godde, C. M., de Boer, I. J. M., Ermgassen, E. K., et al. (2021). Soil carbon sequestration in livestock production systems: Processes, constraints and opportunities. Earth-Science Reviews, 214, 103501.

Rutten, C. J., Velthuis, A. G. J., Steeneveld, W., & Hogeveen, H. (2013). Invited review: Sensors to support health management on dairy farms. Journal of Dairy Science, 96(4), 1928– 1952.

Eastwood, C., Ayre, M., Nettle, R., & Dela Rue, B. (2017). Making sense in the cloud: Farm advisory services in a smart farming future. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 90–91, 47–60.

Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M., & Dela Rue, B. (2019). Managing socio-ethical challenges in the development of smart farming: From a fragmented to a comprehensive approach for responsible research and innovation. Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 32, 741–768.

Rose, D. C., et al. (2018). Factors affecting the adoption of precision agriculture: A systematic review. Sustainability, 10(3), 761.

Ingrand, S., & Hostiou, N. (2022). Precision livestock farming and the resilience of livestock systems. Animal Frontiers, 12(2), 38–46.

Gargiulo, J. I., Eastwood, C. R., Garcia, S. C., & Lyons, N. A. (2018). Dairy farmers with larger herd sizes adopt more precision dairy technologies. Journal of Dairy Science, 101(8), 7427–7438.

Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 90–91, 100315.

11. ΔΙΑΧΕΙΜΑΣΗ ΜΕΛΙΣΣΟΣΜΗΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΑΣ

Χαράλαμπος Παπαδάκης , Άννα Βατσανίδου & Ευθύμιος Ροδιάς

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αγροτικής ανάπτυξης αγροδιατροφής και διαχείρισης φυσικών πόρων, 34400 Ψαχνά, Ευβοίας. Email: haralampos.papadakes@gmail.com

Περίληψη

Η μελισσοκομία παρουσιάζει σημαντική πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες στην Ευρώπη και παγκοσμίως. Ανάμεσα στις πολλές προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει ένας μελισσοκόμος σχετίζονται με τις διαφορετικές φάσεις ανάπτυξης κατά την διάρκεια του έτους. Ενδεικτικά αναφέρονται η περίοδος της διαχείμασης, η φάση ανάπτυξης, η περίοδος της σμηνουργίας, ο τρύγος των μελιών, ασθένειες και πρόληψη, αντιμετώπιση βαρρόα, κ.α.. Ωστόσο, η σύγχρονη μελισσοκομία αξιοποιεί πολλά τεχνολογικά μέσα για την συνολική έξυπνη παρακολούθηση ενός μελισσοκομείου καθώς και λοιπές μελισσοκομικές εργασίες. Η παρούσα μελέτη στοχεύει στη διερεύνηση των διαφορών στις συνθήκες διαχείμασης μελισσοσμηνών μεταξύ δύο κλιματικά διαφορετικών περιοχών της Ελλάδας: του Ρεθύμνου (Κρήτη) και του Πόρτο Ράφτη (Αττική). Για τον σκοπό αυτό, εγκαταστάθηκαν δύο ταυτόσημα συστήματα παρακολούθησης βασισμένα στον έξυπνο μελισσοκομικό ζυγό Metriflex E1, ο οποίος καταγράφει αυτόματα το βάρος της κυψέλης, τη θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος, καθώς και την εσωτερική θερμοκρασία της κυψέλης. Η διάρκεια της μελέτης ορίστηκε από Νοέμβριο του 2024 έως Ιανουάριο του 2025, ώστε να καλύψει ένα κρίσιμο χρονικό διάστημα της διαχείμασης. Στόχος ήταν η παρακολούθηση της ζωτικότητας των μελισσιών-δεικτών και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων για την μείωση των απωλειών του χειμώνα και των εξόδων παραγωγής. Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν μικρές αλλά σημαντικές διαφοροποιήσεις στην ανάπτυξη των δυο μελισσοσμηνών.

Λέξεις κλειδιά : Μελισσοκομία, Διαχείμαση μελισσοσμηνών, Έξυπνος μελισσοκομικός ζυγός, Παρακολούθηση μελισσιών, Ζωτικότητα μελισσιών.

BEE COLONIES OVERWINTERING BY USING TELEMETRY SYSTEMS

Charalambos Papadakis , Anna Vatsanidou & Euthimios Rodias1

National and Kapodistran University of Athens, Agricultural Develpment, Agrofood and Management of Natural Resources, 34400 Psachna Evias aralampos.papadakes@gmail.com

Abstract

Beekeeping has shown significant progress in recent decades in Europe and worldwide. Among the many challenges a beekeeper has to face are the different developmental phases throughout the year. Indicatively, these include the wintering period, the development phase, the swarming period, honey harvesting, diseases and prevention, varroa mite control, etc. However, modern beekeeping utilizes various technological tools for the comprehensive smart monitoring of an apiary as well as for other beekeeping tasks. The present study aims to investigate the differences in the wintering conditions of honey bee colonies between two

climatically different regions of Greece: Rethymno (Crete) and Porto Rafti (Attica). For this purpose, two identical monitoring systems were installed based on the smart beekeeping scale Metriflex E1, which automatically records hive weight, ambient temperature and humidity, as well as internal hive temperature. The study period was set from November 2024 to January 2025, covering a critical timeframe of the wintering season. The objective was to monitor the vitality of the reference colonies and use the results to reduce winter losses and production costs. The experimental results revealed small but significant differences in the development of the two colonies.

Keywords: Beekeeping, Overwintering of bee colonies, Smart beekeeping scale, Hive monitoring, Colony vitality.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελισσοκομία, ως αρχαία δραστηριότητα του πρωτογενούς τομέα, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο τόσο στην παραγωγή μελιού και παραγώγων του όσο και στη διατήρηση της βιοποικιλότητας μέσω της επικονίασης. Από την προϊστορική συλλογή μελιού έως τη σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή, η τέχνη της εκτροφής μελισσών έχει εξελιχθεί σημαντικά, αξιοποιώντας πλέον σύγχρονες τεχνικές και τεχνολογίες. Η ιστορική της πορεία περιλαμβάνει αναφορές από την αρχαία Αίγυπτο και την Ελλάδα, την επιστημονική μελέτη της μέλισσας από τον Αριστοτέλη, τη χρήση του μελιού στην ιατρική από τον Ιπποκράτη, καθώς και την επανάσταση του 19ου αιώνα με την ανακάλυψη της κυψέλης με κινητά πλαίσια από τον Lorenzo Langstroth.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η σύγχρονη γεωργία έχει κάνει τεράστια βήματα προόδου, όχι μόνο στις τεχνολογικές εξελίξεις αλλά και στη σχετική επιστημονική έρευνα. Η χρήση του Διαδικτύου των Πραγμάτων έχει ενσωματωθεί μαζί με άλλες τεχνολογίες αιχμής, όπως η γεωργική ρομποτική, ο τηλεχειρισμός, η τηλεμετρία, η απομακρυσμένη παρακολούθηση κ.α. [1,2,3]. Παρόλο που οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες έχουν εφαρμοστεί σε συστήματα φυτικής και ζωικής παραγωγής, υπάρχουν πολλά που πρέπει να γίνουν στον τομέα της μελισσοκομίας, δεδομένου ότι οι μέλισσες είναι οι κύριοι επικονιαστές στις περισσότερες καλλιέργειες που επικονιάζονται από έντομα, αναδεικνύοντας τον κρίσιμο ρόλο τους [4]. Η αξιοποίηση του τεράστιου όγκου δεδομένων που μπορούν να εξαχθούν στις σύγχρονες αποικίες μελισσών αποτελεί πρόκληση και θα μπορούσε να αποτελέσει το σημείο εκκίνησης διαφόρων τεχνολογικών βημάτων. Η συλλογή και η κοινοποίηση δεδομένων, καθώς και η διαχείριση και επεξεργασία τους μέσω διαφόρων πηγών (αισθητήρες, δεδομένα παρατήρησης), είναι κρίσιμη και απαιτεί ένα σύστημα πληροφοριών διαχείρισης κυψελών, παρόμοιο με τα Συστήματα Πληροφοριών Διαχείρισης Γεωργικών Εκμεταλλεύσεων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα παραγωγής καλλιεργειών [5,6]. Το επόμενο βήμα είναι η συνολική τηλεπαρακολούθηση των αποικιών μελισσών [7].Σκοπός της εργασίας ήταν να διερευνηθεί η ορθή διαχείριση μελισσοσμηνών κατά τη διάρκεια της διαχείμασης με τη χρήση ευφυών συστημάτων παρακολούθησης. Η έρευνα εστίασε στη σύγκριση της συμπεριφοράς των μελισσών σε δύο διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας (Αθήνα και Κρήτη) την ίδια χρονική περίοδο. Για τον σκοπό αυτό, εγκαταστάθηκαν ταυτόσημοι μελισσοκομικοί ζυγοί σε δύο αποικίες με ίδιες βιολογικές και παραγωγικές συνθήκες (ηλικία βασίλισσας, αριθμός πλαισίων, ποσότητα γόνου και μελιού), στο ίδιο υψόμετρο, ώστε να μειωθούν τα πιθανά σφάλματα. Μέσω της καταγραφής και ανάλυσης των δεδομένων που συλλέχθηκαν, επετεύχθη η αξιόπιστη σύγκριση των συνθηκών διαχείμασης στις δύο περιοχές.

2. ΘΕΩΡΙΑ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δύο μελισσοσμήνη ίδιας πληθυσμιακής δύναμης, με παρόμοιο αριθμό γόνων και ποσότητα μελιού, καθώς και βασίλισσες ηλικίας ενός έτους, ώστε να διασφαλιστεί ομοιότητα στον ρυθμό ανάπτυξης. Και οι δύο αποικίες είχαν δεχθεί ίδιες διαχειριστικές πρακτικές, με μοναδική διαφοροποίηση στη μέθοδο θεραπείας με οξαλικό οξύ: στην Κρήτη χρησιμοποιήθηκαν ταινίες τριών εβδομάδων, ενώ στην Αττική εφαρμόστηκε εξάχνωση. Κατά την έναρξη της διαχείμασης, οι αποικίες κατείχαν έξι πλαίσια η καθεμία, με το μελίσσι της Κρήτης να περιλαμβάνει δύο ώριμους κλειστούς γόνους, έναν μικρό ανοιχτό γόνο και τρία πλαίσια με μέλι και γύρη, συνολικού βάρους 23,2 kg. Το μελίσσι της Αττικής διέθετε δύο κλειστούς γόνους και τέσσερα πλαίσια με μέλι και γύρη, συνολικού βάρους 21,7 kg. Η αρχική καταγραφή έδειξε διαφορά 1,5 kg υπέρ της κυψέλης της Κρήτης. Η περίοδος διαχείμασης των μελισσών εκτείνεται από το τέλος Οκτωβρίου έως το τέλος Ιανουαρίου, με σταδιακή επανεκκίνηση της ανάπτυξης από τις πρώτες ανθοφορίες, όπως της αμυγδαλιάς. Η παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε από 25/11/2024 έως 05/01/2025, διάρκειας 42 ημερών, με στόχο τη σύγκριση δύο διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών. Η καταγραφή επικεντρώθηκε σε τέσσερις βασικές παραμέτρους: βάρος κυψέλης, θερμοκρασία περιβάλλοντος, υγρασία και εσωτερική θερμοκρασία κυψέλης. Το βάρος παρέχει στοιχεία για την κατανάλωση αποθεμάτων και την ανάγκη τροφοδότησης, η θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτυπώνει τις συνθήκες διαβίωσης, ενώ η υγρασία σε ακραία επίπεδα μπορεί να ευνοήσει την ανάπτυξη ασθενειών. Η εσωτερική θερμοκρασία, μετρημένη στην περιοχή του γόνου, αποτελεί κρίσιμο δείκτη δυναμικότητας της αποικίας, καθώς παρατεταμένες τιμές κάτω από 22–25°C υποδηλώνουν ανεπαρκή αριθμό εργατριών για τη συντήρηση του γόνου.

2.1 Τύπος ζυγού

Η πρόοδος της σύγχρονης γεωργίας, με τεχνολογίες όπως το IoT, η ρομποτική και τα συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης, μπορεί να αξιοποιηθεί περισσότερο στη μελισσοκομία, η οποία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην επικονίαση και τη γεωργική παραγωγικότητα. Η συλλογή και ανάλυση δεδομένων από αισθητήρες μπορεί να υποστηρίξει ένα σύστημα διαχείρισης μελισσοσμηνών, ιδιαίτερα χρήσιμο για τη νομαδική μελισσοκομία [8,9]. Τα βασικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι το οικονομικό (εύρεση κατάλληλων τοποθεσιών, μείωση κόστους μεταφορών, αύξηση παραγωγής) και το περιβαλλοντικό (μείωση ανθρακικού αποτυπώματος). Τεχνολογίες απομακρυσμένης παρακολούθησης, όπως η μέτρηση καιρικών συνθηκών, βάρους κυψέλης, κίνησης μελισσών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, μπορούν να βελτιώσουν τη διαχείριση, να μειώσουν το κόστος και να περιορίσουν τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η διαχείριση κινδύνων στη μελισσοκομία περιλαμβάνει εντοπισμό, αξιολόγηση, κατάταξη και αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων, καθώς και συνεχή παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, το σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης κυψελών που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Metriflex©, τύπος μοντέλου E1 (Χαλκίδα, Ελλάδα). Οι δυνατότητες του συστήματος περιλαμβάνουν μια σειρά από αισθητήρες για τη μέτρηση διαφόρων τύπων δεδομένων:

- Καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος και σχετική υγρασία) του μελισσοκομείου
- Θερμοκρασία εντός της κυψέλης

- Βάρος κυψέλης
- Εκτίμηση συνθηκών πτήσης
- Καταγραφή δραστηριότητας της εισόδου της κυψέλης
- Παρακολούθηση θέσης μέσω GPS

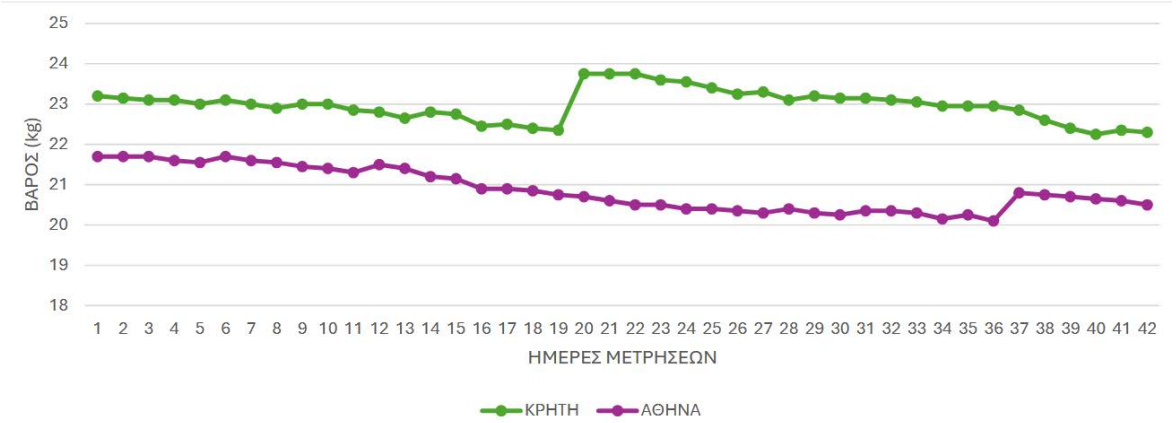
Ο αλγόριθμος βάσει του οποίου γίνεται ο έλεγχος ολόκληρου του συστήματος και η διαχείριση των σχετικών δεδομένων περιλαμβάνει τα εξής στάδια. Ως σημείο εκκίνησης της ροής θεωρείται η συλλογή των δεδομένων από τη συσκευή στο πεδίο. Τα δεδομένα μετατρέπονται σε κρυπτογραφημένη μορφή ώστε να αποστέλλονται με ασφάλεια μέσω του δικτύου GSM. Κατόπιν, τα κρυπτογραφημένα δεδομένα προωθούνται στη βάση δεδομένων του cloud συστήματος μέσω του ίδιου δικτύου. Η κύρια επεξεργασία ξεκινά με την αποκρυπτογράφηση των δεδομένων και τον συνδυασμό τους με το ιστορικό δεδομένων του χρήστη για τη δημιουργία γραφημάτων. Επιπρόσθετα, συλλέγονται μετεωρολογικά δεδομένα από εξωτερικό πάροχο, βάσει της θέσης της συσκευής, και παρέχονται ενημερώσεις στον χρήστη. Τα παραγόμενα δεδομένα και γραφήματα αποστέλλονται στον χρήστη, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει τις παραμέτρους και τις ρυθμίσεις του συστήματος οποιαδήποτε στιγμή.

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων στις δύο κυψέλες (Κρήτη – Αττική) καταγράφηκαν διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά και στα αποθέματα τροφών των αποικιών. Στην πρώτη επιθεώρηση και οι δύο κυψέλες διατηρούσαν σταθερό πληθυσμό 6 πλαισίων με ώριμο και φρέσκο γόνο, αλλά παρουσίασαν μείωση αποθεμάτων μελιού και γύρης. Στην Κρήτη κρίθηκε απαραίτητη η ενίσχυση με τροφή (τύπου βανίλιας), ενώ στην Αττική τα αποθέματα επαρκούσαν. Στη δεύτερη επιθεώρηση, στην Κρήτη οι μέλισσες μετέτρεψαν την τροφή σε μέλι, ενισχύθηκαν ξανά με βανίλια και εφαρμόστηκε βιολογική θεραπεία κατά της βαρρόα με ταινίες οξαλικού οξέος. Στην Αττική, παρατηρήθηκε μείωση αποθεμάτων και τοποθετήθηκε μελισσοτροφή, ενώ εφαρμόστηκε θεραπεία με οξαλικό οξύ μέσω εξάχνωσης. Στην τρίτη επιθεώρηση, και οι δύο κυψέλες διατηρούσαν τον πληθυσμό τους στα 6 πλαίσια, με παρουσία ώριμου και φρέσκου γόνου, καθώς και επαρκή αποθέματα μελιού, χωρίς να απαιτηθεί νέα τροφοδότηση. Οι παρατηρήσεις ανέδειξαν την εξέλιξη των αποικιών, τη διαχείριση των αποθεμάτων και την εφαρμογή στοχευμένων χειρισμών κατά τις επιθεωρήσεις για τη διατήρηση της υγείας και της βιωσιμότητάς τους. Μετά τη συλλογή των δεδομένων και τη καταγραφή τους, ακολούθησε η ανάλυση τους και ο προσδιορισμός των διαφορών μεταξύ τους στο σύνολο των ημερών του πειράματος. Βάση λοιπόν των δεδομένων παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς το ρυθμό της μείωσης του βάρους σε βάθος χρόνου, αλλά και της διαφορές της θερμοκρασίας και της υγρασίας μεταξύ των δύο περιοχών. Επίσης ένα πολύ σημαντικό δεδομένο που έγινε λήψη είναι η εσωτερική θερμοκρασίας της κυψέλης καθώς στο σύνολο τους αυτά τα δεδομένα προσφέρουν πολύ χρήσιμες πληροφορίες επιτυγχάνοντας την άμεση ενημέρωση μας από απόσταση εξυπηρετώντας το σκοπό μας. Για την καλύτερη ανάλυση των δεδομένων και την ορθότερη παρατήρησή τους ώστε να οδηγηθούμε στα ανάλογα συμπεράσματα κατηγοριοποιήσαμε τα δεδομένα των δύο περιοχών συγκρίνοντάς τα μεταξύ τους, παράλληλα δημιουργήσαμε τα ανάλογα διαγράμματα για την ευκολότερη κατανόηση των δεδομένων.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Το διάγραμμα (1) παρουσιάζει την εξέλιξη του βάρους δύο κυψελών μελισσών σε Αθήνα και Κρήτη για 42 συνεχόμενες ημέρες, εν μέσω της περιόδου της διαχείμασης. Η καταγραφή του βάρους αποτελεί κρίσιμο δείκτη για την εκτίμηση της κατάστασης της αποικίας, καθώς σχετίζεται με την κατανάλωση αποθεμάτων τροφής, την πιθανή εισροή ή μη νέκταρος, τις παρεμβάσεις του μελισσοκόμου (π.χ. τροφοδοσία), την απώλεια πληθυσμού ή και τυχόν κλοπή του σμήνους.

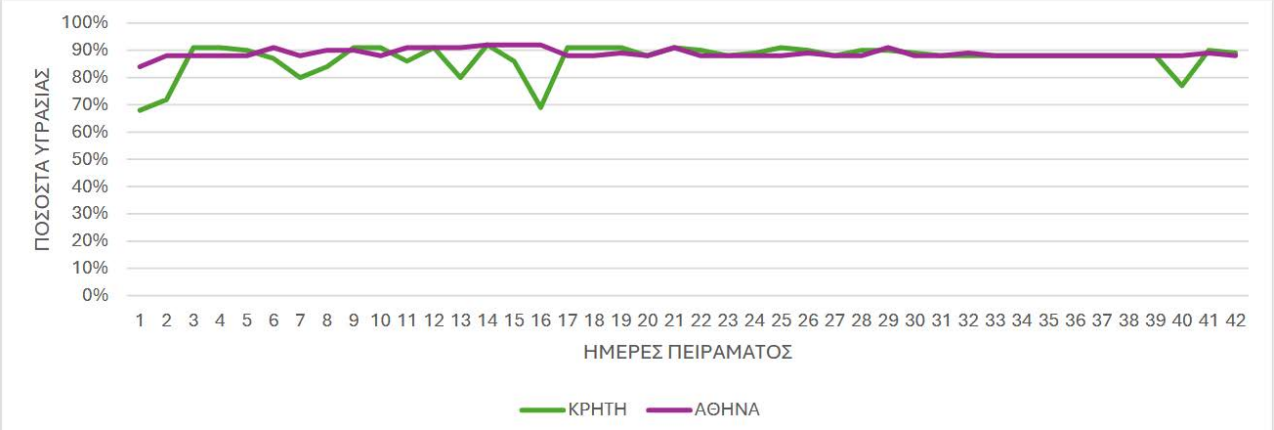


Διάγραμμα 1: Εξέλιξη τους βάρους (σε kg) των μελισσοσμηνων για τη διάρκεια του πειράματος

Η 1η κυψέλη (Κρήτη) ξεκινά με βάρος περίπου 23,2 kg. Υπάρχει μία μικρή αλλά σταδιακή μείωση βάρους (~1 kg) έως την 18η ημέρα, γεγονός που υποδηλώνει μία φυσιολογική κατανάλωση τροφής από την αποικία, περιορισμένη (ή καθόλου) νεκταροσυλλογή την περίοδο αυτή. Την 19η ημέρα παρατηρείται απότομη αύξηση βάρους (~+1,5 kg), ένδειξη εξωτερικής παρέμβασης με την προσθήκη της τροφής. Μετά την παρέμβαση, το βάρος μειώνεται σταδιακά έως το τέλος (~22,7 kg), με ομαλή πορεία. Διαβλέποντας, η αποικία στην Κρήτη διατηρεί αρκετά αποθέματα, γεγονός θετικό για τη βιωσιμότητά της. Η τροφοδοσία φαίνεται να έγινε προληπτικά και όχι ως αντίδραση σε επικείμενη λιμοκτονία. Η ήπια μείωση δείχνει σταθερή κατανάλωση, χωρίς σημάδια κατάρρευσης. Από την άλλη η 2η κυψέλη (Αττική) ξεκινά με μικρότερο αρχικό βάρος (~21,7 kg), κάτι που μπορεί να οφείλεται σε λιγότερα αποθέματα τροφής ή πιο μικρή αποικία ή διαφορετική αρχική διαχείριση. Παρουσιάζει συνεχή πτώση βάρους (~1,2 kg έως την 36η ημέρα) χωρίς διακοπές, στοιχείο που φανερώνει έλλειψη εξωτερικής τροφής (νεκταροέκκρισης) και συστηματική κατανάλωση εσωτερικών αποθεμάτων. Την 37η ημέρα εμφανίζεται απότομη αύξηση (~+0,7 kg) από τροφοδότηση, μετά από αυτό, ξαναρχίζει ήπια πτώση, τερματίζοντας στις ~20,8 kg. Εικάζοντας, η αποικία στην Αθήνα φαίνεται να εξαντλεί συστηματικά τα αποθέματά της. Η καθυστερημένη τροφοδοσία έγινε μόλις εντοπίστηκε σημαντική απώλεια βάρους. Η σταθερή μείωση υποδεικνύει περιορισμένη φυσική ενίσχυση και ενδεχομένως αυξημένες ανάγκες θέρμανσης, λόγω ψυχρότερων καιρικών συνθηκών.

Η αποικία στην Κρήτη εμφανίζεται πιο ανθεκτική και καλά συντηρημένη, διατηρώντας υψηλότερο βάρος και επάρκεια τροφής καθ' όλη τη διάρκεια. Η πρώιμη τροφοδότηση ενίσχυσε τη σταθερότητά της. Αντίθετα, η αποικία στην Αθήνα φαίνεται να βρίσκεται σε πιο οριακή κατάσταση, με συνεχώς φθίνον βάρος και καθυστερημένη υποστήριξη, κάτι που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη βιωσιμότητά της.

Το διάγραμμα (2) δείχνει την εξέλιξη της σχετικής υγρασίας (Σ.Υ.) περιβάλλοντος στις δύο γεωγραφικές περιοχές κατά την περίοδο παρακολούθησης.



Διάγραμμα 2: Απεικόνιση της Σ.Υ. (%) στις δυο περιοχές

Η πορεία της κυψέλης της Αθήνας (μωβ γραμμή) έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

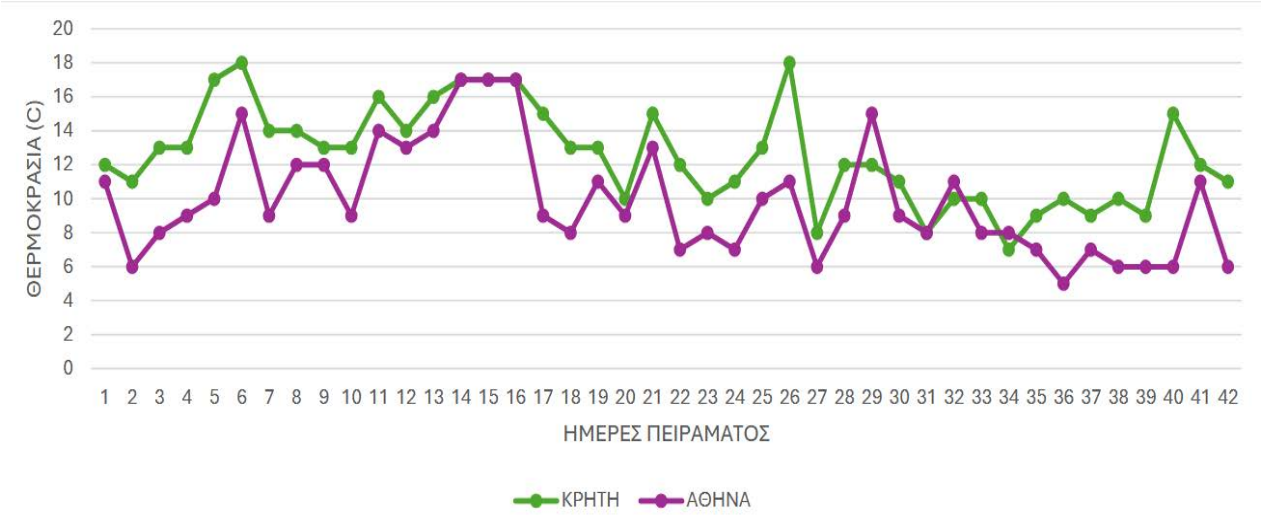
- Η σχετική υγρασία παραμένει σχεδόν σταθερή σε τιμές μεταξύ 88% και 90% κατά τις 42 ημέρες του πειράματος.
- Δεν παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις ή «βουτιές» στις τιμές, γεγονός που δείχνει σταθερό μικροκλίμα.

Η σχετική υγρασία γύρω στο 85-90% θεωρείται ευνοϊκή για τη διαχείμαση των μελισσών, καθώς περιορίζει την αφυδάτωση των μελισσών. Παράλληλα συνεισφέρει στη σταθερή θερμοκρασία μέσα στην κυψέλη. Προστατεύει το γόνο από ξηρασία ή μούχλα. Η σταθερότητα δείχνει καλή θερμομόνωση ή τοποθέτηση της κυψέλης σε σημείο προστατευμένο από εξωτερικές κλιματικές μεταβολές. Ενώ από την άλλη η πορεία της κυψέλης στη Κρήτη (πράσινη γραμμή) ξεκινά από χαμηλότερες τιμές (~68%), φτάνει στο ~90% τις πρώτες ημέρες, αλλά στη συνέχεια εμφανίζει σημαντικές διακυμάνσεις. Επίσης παρατηρείται:

- Μείωση κάτω του 70% γύρω στη 16η ημέρα.
- Ξαφνική πτώση ξανά στην 39η ημέρα.
- Παρά τις απότομες πτώσεις, η γραμμή επανέρχεται, δείχνοντας ότι οι μεταβολές είναι παροδικές.

Οι απότομες πτώσεις υγρασίας (κάτω από 75% ή ακόμη και 70%) μπορεί να προκαλέσουν στρες στον πληθυσμό της αποικίας. Μπορεί να επηρεάσουν την επιβίωση του γόνου, ιδιαίτερα αν συνδυαστούν με θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Αυξήσουν τον κίνδυνο αφυδάτωσης της αποικίας. Η αυξομείωση ίσως οφείλεται σε μεγαλύτερη έκθεση της κυψέλης σε ανέμους ή ηλιακή ακτινοβολία ή πιθανή έλλειψη σκίασης ή ανεπαρκής μονωτική προστασία. Ετερογένεια στη μικροκλιματική επίδραση του εδάφους και της τοπογραφίας (π.χ., η Κρήτη μπορεί να έχει πιο έντονη κυκλοφορία υγρού αέρα, υγρασίας και ανέμων). Η κυψέλη στην Αθήνα εμφανίζει ένα πιο ευνοϊκό και σταθερό μικροκλίμα, ιδιαίτερα σε σχέση με τη σχετική υγρασία, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα κατά τη διάρκεια της διαχείμασης. Αντίθετα, η κυψέλη στην Κρήτη επηρεάζεται από περισσότερους εξωτερικούς παράγοντες, με αποτέλεσμα έντονες διακυμάνσεις που ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά την υγεία και τη σταθερότητα της αποικίας.

Το διάγραμμα (3) δείχνει την εξέλιξη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε δύο γεωγραφικές περιοχές κατά την περίοδο παρακολούθησης.



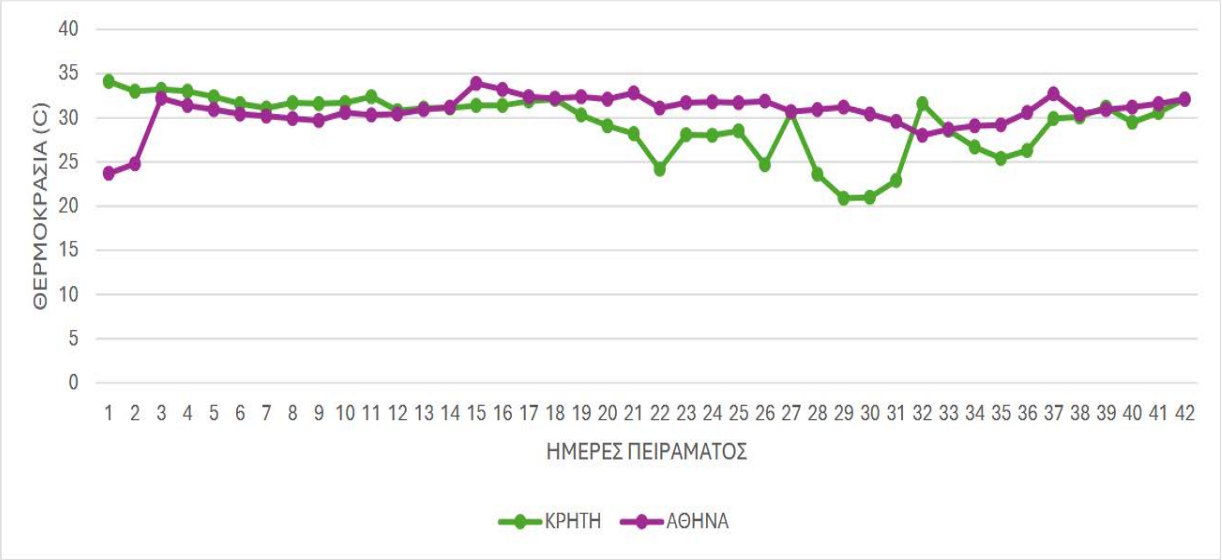
Διάγραμμα 3: Απεικόνιση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (°C) στις δυο περιοχές

Ο ζυγός της Κρήτης (Πράσινη γραμμή) όσο αναφορά τις θερμοκρασίες κινούνται σταθερά σε υψηλότερα επίπεδα από την Αθήνα, με μέση τιμή περίπου 13–15°C. Υπάρχουν αιχμές ανόδου (π.χ. ημέρα 6, 14, 26 με θερμοκρασίες έως 18–19°C), που υποδηλώνουν ήπιο χειμώνα ή/και πιο σταθερό μικροκλίμα. Οι μειώσεις είναι πιο ήπιες, με σπάνιες πτώσεις κάτω από τους 10°C, εκτός των ημερών 28 και 39. Συνολικά η θερμοκρασία είναι πιο σταθερή, γεγονός που ευνοεί τη δραστηριότητα των μελισσών και τη χαμηλότερη κατανάλωση τροφής. Ο ζυγός της Αθήνας (Μοβ γραμμή) οι θερμοκρασίες είναι συστηματικά χαμηλότερες σε σχέση με την Κρήτη, ιδιαίτερα στις πρώτες και τελευταίες 10 ημέρες. Παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις, με συχνές απότομες πτώσεις: π.χ. ημέρα 2 (~6°C), ημέρα 17 (~9°C), ημέρα 28 (~6°C), ημέρα 42 (~6°C). Οι περίοδοι σχετικής ζέστης (π.χ. ημέρες 14–16, 29) είναι σύντομες και ασταθείς. Πιο χαμηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε μειωμένη εξωτερική δραστηριότητα και αυξημένες ανάγκες θέρμανσης εντός κυψέλης.

Συμπεραίνοντας η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην Κρήτη είναι σαφώς πιο ήπια και σταθερή, δημιουργώντας ευνοϊκότερες συνθήκες για τη διαχείμαση των μελισσών. Η σταθερή θερμοκρασία άνω των 10°C για το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου επιτρέπει περιορισμένη έξοδο για πτήσεις καθαριότητας και μικρότερη κατανάλωση τροφής, όπως επιβεβαιώνεται και από την πορεία του βάρους των κυψελών. Αντίθετα, στην Αθήνα καταγράφεται έντονη μεταβλητότητα και χαμηλότεροι μέσοι όροι θερμοκρασίας, οδηγώντας σε αυξημένες ενεργειακές ανάγκες για θερμορύθμιση του γόνου, εκτενέστερη κατανάλωση αποθεμάτων τροφής και περιορισμό των εξόδων από την κυψέλη. Αυτό ενισχύει τα προηγούμενα ευρήματα από το διάγραμμα βάρους: η πιο ψυχρή και ασταθής κλιματικά Αθήνα δημιουργεί μεγαλύτερες πιέσεις στις αποικίες, ενώ η Κρήτη προσφέρει σταθερότερο μικρο-περιβάλλον για το μελίσσι.

Το διάγραμμα (4) παρουσιάζει την πορεία της εσωτερικής θερμοκρασίας στις δύο κυψέλες (Κρήτης και Αθήνας) κατά τις 42 ημέρες του πειράματος. Η εσωτερική θερμοκρασία είναι κρίσιμος δείκτης για τη θερμορύθμιση και τη βιωσιμότητα του γόνου.

ΣΙΑ (C)



Διάγραμμα 4: Απεικόνιση της εσωτερικής θερμοκρασίας κυψέλης(°C) στις δυο περιοχές

Αναλύοντας τις δύο γραμμές Κρήτη (πράσινη γραμμή) - Αθήνα (μοβ γραμμή) οδηγηθήκαμε σε ορισμένα συμπεράσματα. Αρχικά σταθερή περί τους 33–34°C (ημέρες 1–10). Από την ημέρα 11 και εξής παρουσιάζεται σταδιακή πτώση της θερμοκρασίας, φθάνοντας σε χαμηλά επίπεδα (~23–26°C) τις ημέρες 22–31. Στη συνέχεια παρατηρείται μερική ανάκαμψη, με τιμές να πλησιάζουν ξανά τους 30–32°C, χωρίς όμως να επιτυγχάνεται η αρχική σταθερότητα. Οι πτώσεις συμπίπτουν με πτώσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και αυξημένης υγρασίας (σύμφωνα με προηγούμενα διαγράμματα). Ενδεχομένως υπήρξε ελάττωση πληθυσμού ή μείωση εκτροφής γόνου προσωρινά. Ο ζυγός της Αθήνας από την άλλη συμπεραίνοντας από τα στοιχεία των μετρήσεων ξεκινά χαμηλότερα (24–25°C) αλλά ανεβαίνει γρήγορα στους 30–32°C από την ημέρα 4 και διατηρείται εξαιρετικά σταθερή για το μεγαλύτερο μέρος του διαστήματος. Υπάρχουν μικρές αποκλίσεις (±2°C), αλλά η θερμοκρασία παραμένει πιο σταθερή από την Κρήτη, ειδικά από την ημέρα 10 έως την 35. Στο τέλος (~ημέρες 37–42) παρατηρείται ελαφρά άνοδος, κοντά στους 32–33°C. Παρότι η εξωτερική θερμοκρασία στην Αθήνα ήταν πιο ασταθής, η εσωτερική θερμοκρασία διατηρείται καλά, πιθανώς λόγω καλύτερης θερμομόνωσης ή υψηλότερης κατανάλωσης τροφής από τις μέλισσες για θερμορύθμιση.

Η κυψέλη της Αθήνας παρουσιάζει πολύ πιο σταθερή και ελεγχόμενη εσωτερική θερμοκρασία, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μέλισσες ήταν πιο δραστήριες στη θερμορύθμιση, παρά τις χαμηλές και ασταθείς εξωτερικές θερμοκρασίες. Αυτό πιθανότατα συνοδεύεται από αυξημένη κατανάλωση αποθεμάτων, κάτι που επιβεβαιώνεται και στο προηγούμενο διάγραμμα βάρους (όπου υπήρχε συνεχής μείωση). Αντίθετα, η κυψέλη στην Κρήτη, παρά τις καλύτερες εξωτερικές συνθήκες, παρουσιάζει μεγαλύτερες εσωτερικές διακυμάνσεις και πτωτικές τάσεις, κάτι που ίσως υποδεικνύει είτε την μειωμένη δραστηριότητα της αποικίας, πιθανώς λόγω μικρότερου πληθυσμού, είτε την προσωρινή διακοπή εκτροφής γόνου, ώστε να περιοριστεί η ανάγκη θερμορύθμισης. Αυτό φανερώνει ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος από μόνη της δεν αρκεί. Η δυναμική της αποικίας και τα αποθέματα παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η Αθηναϊκή αποικία εμφανίζεται πιο σταθερή, αλλά με πιθανό κόστος σε ενεργειακά αποθέματα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την πειραματική περίοδο των 42 ημερών συγκρίθηκαν δύο κυψέλες, στην Κρήτη και στην Αθήνα, ως προς το βάρος, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την εσωτερική θερμοκρασία. Η αποικία της Αθήνας εμφάνισε σταθερή θερμορύθμιση (30–32°C) ακόμη και σε χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα όμως μεγαλύτερη κατανάλωση αποθεμάτων και συνεχή απώλεια βάρους. Στην Κρήτη, παρά τις ηπιότερες κλιματικές συνθήκες, η εσωτερική θερμοκρασία παρουσίασε μεγαλύτερες διακυμάνσεις και πτώση κάτω από τους 25°C, ενώ παρατηρήθηκε αιφνίδια αύξηση βάρους λόγω τροφοδότησης. Συνολικά, η αποικία της Αθήνας έδειξε πιο αποτελεσματική προσαρμογή στις εξωτερικές προκλήσεις μέσω εντατικής θερμορύθμισης, ενώ η αποικία της Κρήτης, παρότι σε θερμότερο περιβάλλον, παρουσίασε μειωμένη θερμορυθμιστική σταθερότητα, πιθανόν λόγω χαμηλότερης δραστηριότητας ή διαφορετικής στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Goap, A.; Sharma, D.; Shukla, A.K.; Krishna, C.R. An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. Comput. Electron. Agric. 2018, 155, 41–49.

Bohnenkamp, D.; Behmann, J.; Mahlein, A.K. In-field detection of Yellow Rust in Wheat on the Ground Canopy and UAV Scale. Remote Sens. 2019, 21, 2495.

Fountas, S.; Mylonas, N.; Malounas, I.; Rodias, E.; Santos, C.H.; Pekkeriet, E. Agricultural robotics for field operations. Sensors 2020, 9, 2672.

FAO. FAO Statistics. Available online: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC .

Guruprasad, S.M.; Leiding, B. BeeOpen—An Open Data Sharing Ecosystem for Apiculture. Agriculture 2024, 14, 470.

Cota, D.; Martins, J.; Mamede, H.; Branco, F. BHiveSense: An integrated information system architecture for sustainable remote monitoring and management of apiaries based on IoT and microservices. J. Open Innov. Technol. Mark. Complex. 2023, 9, 3.

Kviesis, A.; Komasilovs, V.; Ozols, N.; Zacepins, A. Bee colony remote monitoring based on IoT using ESP-NOW protocol. PeerJ Comput. Sci. 2023, 9, e1363.

Rodias, E.; Kilimpas, V. Remote Monitoring of Bee Apiaries as a Tool for Crisis Management. AgriEngineering 2024, 6, 2269-2282.

Abu, E. (2020). THE USE OF SMART APICULTURE MANAGEMENT SYSTEM: REVIEW PAPER. , 6-16.

12. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΛΛΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ

Α. Χ. Ταγαράκης[1], Κ. Μπινιάρη[2] , Ι. Δασκαλάκης[2], Μ. Σταυρακάκη[2] , Δ. Παλιοκώστας[2] , Δ. Κατέρης[1], Α. Μπαλαφούτης[1] & Δ. Μπόχτης[1]

[1]Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Ινστιτούτο Βιο-Οικονομίας και Αγρο- Τεχνολογίας (iBO), Δ. Γεωργιάδου 118, 38333, Βόλος
[2]Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής, Εργαστήριο Αμπελολογίας, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα
** a.tagarakis@certh.gr*

Περίληψη

Η διαχείριση των αμπελώνων σύμφωνα με τις πρακτικές της Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ) μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμο εργαλείο στα χέρια των σύγχρονων αμπελουργών. Η Αμπελουργία Ακριβείας (ΑΑ), δηλαδή η εφαρμογή της ΓΑ στην αμπελουργία, έχει προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον από αμπελουργούς και επιστήμονες τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως έπειτα από την ανάπτυξη και τη διαθεσιμότητα ψηφιακών τεχνολογιών αφιερωμένων σε γεωργικές εφαρμογές. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή πρακτικών ΑΑ και ψηφιακών τεχνολογιών και η χρήση τους για τον καθορισμό ζωνών διαχείρισης και την εκτίμηση της κατάστασης των πρέμνων από μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου «AGROSYS» σε πειραματικό αμπελώνα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στα Σπάτα Αττικής, σε αμπέλια της ποικιλίας Σαββατιανό (Vitis vinifera L.). Τα αρχικά αποτελέσματα έδειξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές σε βασικές φυσιολογικές και ποιοτικές παραμέτρους των πρέμνων και των σταφυλιών μεταξύ των διαφορετικών ζωνών διαχείρισης που ορίστηκαν σύμφωνα με χαρτογραφήσεις και τεχνικές ΓΑ. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει τη σημασία και τα πιθανά οφέλη της διαχείρισης της τοπικής χωρικής μεταβλητότητας σε εμπορικούς αμπελώνες.

Λέξεις κλειδιά: Αμπελουργία Ακριβείας, φυσιολογία αμπέλου, χωρική παραλλακτικότητα, ζώνες διαχείρισης

MANAGING LOCAL FIELD VARIABILITY IN VITICULTURE

A.C. Tagarakis[1*], K. Biniari[2], I. Daskalakis[2], M. Stavrakaki[2], D. Palaiokostas[2], D. Kateris[1], A. Balafoutis[1], D. Bochtis[1]

[1] Institute for Bio-Economy and Agri-Technology (iBO), Centre of Research and Technology-Hellas (CERTH), 6th Km Charilaou-Thermi Rd., 57001, Thessaloniki, Greece
[2] Agricultural University of Athens, Department of Crop Science, Laboratory of Viticulture, 75 Iera Odos Street, GR-11855 Athens, Greece
** a.tagarakis@certh.gr*

ABSTRACT

Managing vineyards according to Precision Agriculture (PA) practices can prove to be a valuable tool in the hands of modern viticulturists. Precision Viticulture (PV), naming the application of PA in viticulture, has attracted significant interest from growers and scientists

over the last decades, mainly following the development and availability of digital technologies dedicated to agricultural applications. In this study, the results from the application of PV practices and digital technologies, and their use for defining management zones and assessing vine status are presented. The research was carried out within the framework of the "AGROSYS" project in an experimental vineyard of the Agricultural University of Athens in Spata, Attica, on vines of the Savatiano variety (*Vitis vinifera L.*). The initial results showed statistically significant differences in key physiological and quality parameters of vines and grapes between the different management zones defined through mapping and PA techniques. This finding highlights the importance and potential benefits of managing local spatial variability in commercial vineyards.

Keywords: Precision Viticulture, Vine Physiology, Spatial Variability, Management Zones

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαχείριση των αμπελιών σύμφωνα με τις πρακτικές της Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ) μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πλεονέκτημα στα χέρια των σύγχρονων αμπελουργών. Η Αμπελουργία Ακριβείας (ΑΑ), δηλαδή η εφαρμογή της ΓΑ στην αμπελουργία, έχει προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον από αμπελουργούς και επιστήμονες τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως έπειτα από την ανάπτυξη και τη διαθεσιμότητα ψηφιακών τεχνολογιών αφιερωμένων σε γεωργικές εφαρμογές. (Ferro and Catania, 2023). Οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της εφαρμογής της ΑΑ, είναι RGB, πολυφασματικοί, υπερφασματικοί, θερμικοί και LiDAR (Ferro and Catania, 2023). Ανάμεσα σε όλες αυτές τις επιλογές αισθητήρων, υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης παραμέτρων του φυτού και του αγρού είτε με εναέρια συστήματα με τους αισθητήρες τοποθετημένους σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs), είτε με επίγεια συστήματα, προσαρμοσμένα σε μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα (UGVs), καθώς και άλλα οχήματα ή σε φορητές συσκευές.

Ένα εξίσου σημαντικό σύστημα που χρησιμοποιείται στη ΓΑ είναι οι αισθητήρες χαρτογράφησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του εδάφους, οι οποίοι παρέχουν τη δυνατότητα εκτίμησης της χωρικής παραλλακτικότητας του εδάφους με υψηλή ανάλυση. Οι ιδιότητες του εδάφους παρουσιάζουν σημαντική χωρική παραλλακτικότητα ακόμη και σε μικρούς αμπελώνες. Θεωρούνται παράμετροι χρονικά αμετάβλητες, οδηγώντας στη δημιουργία ζωνών διαχείρισης που είναι πιο σταθερές με την πάροδο του χρόνου (Tagarakis et al., 2011). Η διαχείριση της χωρικής παραλλακτικότητας ενδέχεται να αποτελεί το κλειδί για τη βέλτιστη διαχείριση των αμπελώνων, αξιοποιώντας ζώνες διαχείρισης με διαφορετικές ιδιότητες ως προς την απόδοση και τη σύσταση των σταφυλιών (Tagarakis et al., 2013; Serrano et al., 2023). Ανάμεσα στις παραμέτρους του εδάφους, η EC έχει αποδειχθεί αποτελεσματική για την οριοθέτηση ζωνών διαχείρισης και έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς (Kitchen et al., 2005; Tagarakis et al., 2013; Serrano et al., 2023), ιδίως μετά τη διάθεση των σχετικών εργαλείων ανίχνευσης και χαρτογράφησης. Η αξιοποίηση της EC είναι ιδανική για τέτοιες εφαρμογές στην αμπελοκαλλιέργεια, καθώς σχετίζεται με βασικές ιδιότητες του εδάφους, όπως η σύσταση και η αλατότητα (Corwin and Plant, 2005), καθώς και με ιδιότητες των πρέμνων (Tagarakis et al., 2013; Tagarakis et al., 2014).

Για την οριοθέτηση ζωνών διαχείρισης σε αμπελώνες έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι ανάλυσης. Μία από τις πιο συχνές πρακτικές για τη σύντηξη των διαφορετικών επιπέδων πληροφοριών χαρτογράφησης του αγρού και την οριοθέτηση ζωνών διαχείρισης είναι η χρήση τεχνικών ασαφούς ομαδοποίησης (fuzzy clustering) (Tagarakis et al., 2013; González-Fernández et al., 2019). Μία άλλη μεθοδολογία για την οριοθέτηση ζωνών διαχείρισης περιλαμβάνει την εφαρμογή ανάλυσης κύριων συνιστωσών (PCA) στα χωρικά δεδομένα που

συλλέγονται από τον αγρό (Tagarakis et al., 2011). Ωστόσο, η ανάλυση fuzzy clustering έχει αποδειχθεί πιο ακριβής σε σχετική μελέτη στην αμπελοκαλλιέργεια (González- Fernández et al., 2019).

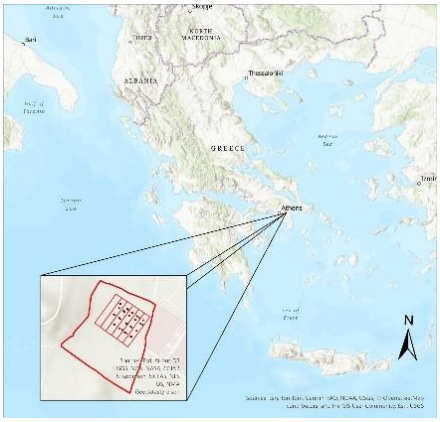
Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή πρακτικών Αμπελουργίας Ακριβείας (ΑΑ) και ψηφιακών τεχνολογιών σε έναν εμπορικό αμπελώνα στην περιοχή της Αττικής στην Ελλάδα, στο πλαίσιο μελέτης που πραγματοποιήθηκε στο έργο

«AGROSYS». Ο κύριος στόχος ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας διαφορετικών αισθητήρων, εναέριων ή επίγειων, για τη χαρτογράφηση της χωρικής παραλλακτικότητας των εδαφικών χαρακτηριστικών και φυσιολογικών παραμέτρων των αμπέλων. Παράλληλα μελετήθηκε, η εκτίμηση της επίδρασής των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών του εδάφους στις ιδιότητες των πρέμνων και των σταφυλιών από μετρήσεις εντός της καλλιεργητικής περιόδου.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Πειραματικός αμπελώνας

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2024 σε εμπορικό αμπελώνα στην περιοχή της Αττικής (23.9059097°E, 37.9872950°N). Η πειραματική έκταση ήταν 35 στρέμματα, τμήμα ενός αμπελώνα 260 στεμμάτων που καλλιεργείται με την παραδοσιακή ελληνική ποικιλία Σαββατιανό (Vitis vinifera L.).



2.2Χαρτογράφηση της χωρικής παραλλακτικότητας εδάφους και τοπογραφικού ανάγλυφου

Η φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (ECa) χαρτογραφήθηκε αρχικά με τον ηλεκτρομαγνητικό αισθητήρα EM38-MK2 (Geonics LTD, Ontario, Canada), τοποθετημένο σε ειδικά κατασκευασμένο τροχήλατο έλκηθρο συρόμενο από όχημα, το οποίο ακολούθησε παράλληλες διαδρομές μεταξύ των γραμμών του αμπελώνα ανά 12 m. Για την παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους αξιοποιήθηκαν μετρήσεις από RTK-GNSS (Stonex, MI, Italy).

2.3 Οριοθέτηση ζωνών διαχείρισης και μετρήσεις καλλιέργειας

Οι ιδιότητες του εδάφους και του ανάγλυφου αναλύθηκαν με χρήση του αλγορίθμου ασαφούς ομαδοποίησης (Fuzzy clustering) και δημιουργήθηκαν ζώνες διαχείρισης, βάσει των οποίων ορίστηκαν τα πειραματικά τεμάχια. Σε κάθε τεμάχιο επιλέχθηκαν τρία αντιπροσωπευτικά πρέμνα, τα οποία μετρήθηκαν ως προς τη φυσιολογική και φαινοτυπική τους κατάσταση με χειροκίνητες μεθόδους και ψηφιακές τεχνολογίες. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη των πρέμνων μετρήθηκε με χρήση πολυφασματιών αισθητήρων με επίγεια και εναέρια συστήματα. Για τον σκοπό αυτό, ο πολυφασματικός αισθητήρας CropCircle (Holland Scientific Inc., Lincoln, NE, USA) τοποθετήθηκε σε μη επανδρωμένο επίγειο όχημα (UGV) Thorvald (SAGA Robotics SA, Oslo, Norway), το οποίο κινήθηκε κατά μήκος των γραμμών με τον αισθητήρα σε απόσταση 0,5 m από την πλαϊνή κόμη των πρέμνων. Συμπληρωματικά, οι ιδιότητες της άνω κόμης χαρτογραφήθηκαν με το μη επανδρωμένο εναέριο όχημα MAVIC 3M (DJI Technology Co., Ltd., Shenzhen, China), εξοπλισμένο με πολυφασματικό αισθητήρα και GNSS υψηλής ακρίβειας (RTK). Επιπλέον, η θερμοκρασία του φυλλώματος μετρήθηκε με φορητή θερμική

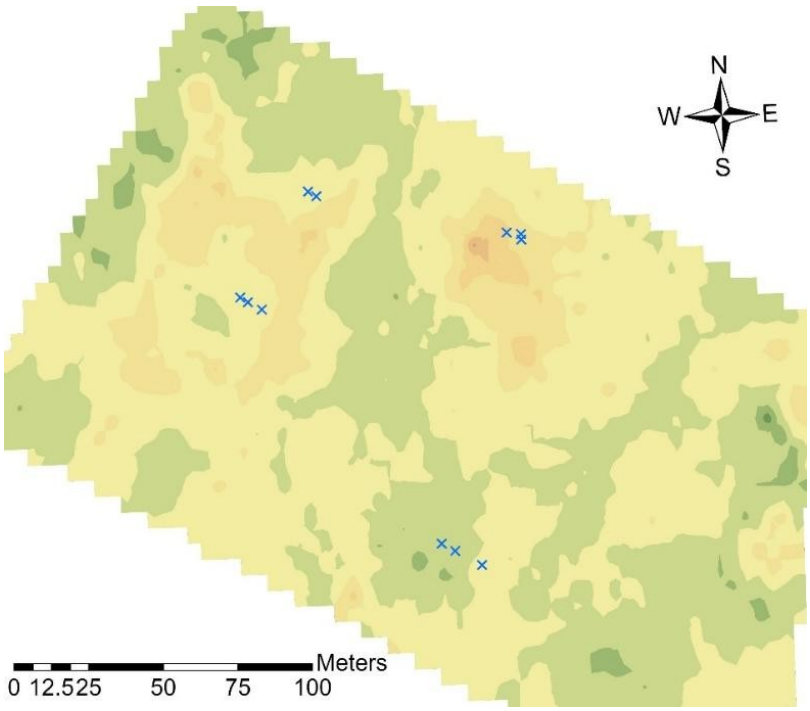
(IR) κάμερα (FLIR Systems, Inc.). Οι επίγειες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο στάδια ανάπτυξης των πρέμνων, στον περκασμό (veraison) και στη συγκομιδή, ενώ οι μετρήσεις με UAV έγιναν μόνο στη συγκομιδή, λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών (ισχυροί άνεμοι) κατά τον περκασμό. Οι φυσιολογικές παράμετροι των πρέμνων μετρήθηκαν τις ίδιες χρονικές στιγμές.

2.4 Στατιστική ανάλυση

Για τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό JASP (JASP Team, 2024, έκδοση 0.19.3), προκειμένου να εξαχθούν περιγραφικά στατιστικά, ανάλυση της παραλλακτικότητας (ANOVA) και ανάλυση συσχέτισης (Pearson's Correlation). Στην ANOVA εφαρμόστηκαν δοκιμές Post Hoc (Tukey) για την ανίχνευση σημαντικών διαφορών μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων εντός των ζωνών.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η χωρική ανάλυση των παραμέτρων εδάφους και τοπογραφικού ανάγλυφου οδήγησε στο διαχωρισμό του πειραματικού αμπελώνα σε τέσσερις ζώνες. Από κάθε ζώνη επιλέχθηκαν τρία πρέμνα για τη διενέργεια μετρήσεων (Εικ. 1). Η αρχική ανάλυση έδειξε ότι οι δείκτες βλάστησης NDVI και NDRE, από τα επίγεια και εναέρια συστήματα, εμφάνισαν υψηλή παραλλακτικότητα, σε αντίθεση με τις μετρήσεις θερμοκρασίας του φυλλώματος. Αυτό αποδίδεται στο σημαντικά μικρότερο εύρος των μετρήσεων με τη θερμική κάμερα, το οποίο υποδεικνύει την ικανότητα των πρέμνων να προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές συνθήκες.



Σχήμα 1. Ζώνες διαχείρισης παραγόμενες από την ανάλυση ασαφούς ομαδοποίησης των εδαφικών παραμέτρων.

Η ανάλυση της παραλλακτικότητας (ANOVA) μεταξύ των ζωνών ανέδειξε την απόκριση των πρέμνων στη χωρική παραλλακτικότητα των εδαφικών και τοπογραφικών παραμέτρων. Στην ανάλυση, οι ζώνες που προέκυψαν από την ECa και το υψόμετρο χρησιμοποιήθηκαν ως

παράγοντας, ενώ οι παράμετροι των πρέμνων (φυσιολογικές και ποιοτικές) που μετρήθηκαν στα στάδια περκασμού και ωρίμανσης χρησιμοποιήθηκαν ως εξαρτημένες μεταβλητές. Τα αποτελέσματα της ANOVA έδειξαν ότι χαρακτηριστικά όπως το βάρος και το μήκος ραγών, καθώς και ποιοτικές παράμετροι όπως τα διαλυτά στερεά (Brix), οι συνολικές φιανόλες, το γαλλικό οξύ, το ασκορβικό οξύ και το τρυγικό οξύ εμφάνισαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ζωνών. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν για τη θερμοκρασία φυλλώματος και τις μετρήσεις NDVI με UAV.

Πίνακας 1. Συσχέτιση των μετρούμενων παραμέτρων (Pearson's Correlation).

Pearson's Correlations

			Pearson's r		p
UAV NDVI (harvest)	-	NDVI (harvest)	0.706	*	0.015
UAV NDVI (harvest)	-	Percentage of skin weight per berry (%)	0.657	*	0.02
UAV NDVI (harvest)	-	Tartaric acid/ must	0.602	*	0.038
UAV NDVI (harvest)	-	Ascorbic acid/ must	-0.609	*	0.035
UAV NDVI (harvest)	-	E-transpiration (harvest)	0.667	*	0.018
UAV NDVI (harvest)	-	gs - stomatal conductance (harvest)	0.595	*	0.041
UAV NDVI (harvest)	-	Chlorophyll (harvest)	0.87	***	< .001
NDRE (harvest)	-	Total soluble solids (Brix)	0.696	*	0.017
NDRE (harvest)	-	Tartaric acid/ must	0.677	*	0.022
NDRE (harvest)	-	Malic acid/ must	0.602	*	0.05
Thermal (harvest)	-	Weight of grape (gr)	-0.6	*	0.039
Thermal (harvest)	-	Length of grape (cm)	-0.616	*	0.033
Thermal (veraison)	-	NDRE (veraison)	-0.706	*	0.01
Thermal (veraison)	-	NDVI (veraison)	-0.698	*	0.012
Thermal (veraison)	-	Percentage of skin weight per berry (%)	-0.707	*	0.022
Thermal (veraison)	-	Fumaric acid/ must	0.701	*	0.024
Thermal (veraison)	-	Chlorophyll (veraison)	-0.647	*	0.043
Thermal (veraison)	-	length of grape (cm)	-0.801	**	0.005
Thermal (veraison)	-	E(transpiration)	-0.814	**	0.004
Thermal (veraison)	-	gs - stomatal conductance (harvest)	-0.821	**	0.004

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Επίσης μελετήθηκε η συσχέτιση των φυσιολογικών παραμέτρων με τις μετρήσεις των ψηφιακών συστημάτων, ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητά τους για αυτοματοποιημένη εκτίμηση της κατάστασης των πρέμνων. Η ανάλυση έδειξε ότι ο NDVI από το εναέριο σύστημα UAV συσχετίστηκε στατιστικώς σημαντικά ($p < .05$) με το NDVI του επίγειου αισθητήρα ($r=0.706$), υποδεικνύοντας τη συνάφεια των δύο συστημάτων, αν και χαρτογραφούσαν διαφορετικά μέρη της φυτοκόμης (πλαϊνή με το επίγειο και κορυφή με το εναέριο σύστημα). Επιπλέον, το UAV NDVI συσχετίστηκε με παραμέτρους ποιότητας και φυσιολογίας, με την υψηλότερη τιμή να παρατηρείται για το περιεχόμενο σε χλωροφύλλη ($r=0.87$, $p<0.001$). Οι μετρήσεις με τον αισθητήρα CropCircle συσχετίστηκαν με παραμέτρους ποιότητας (Brix, τρυγικό και μηλικό οξύ). Μόνο το NDRE έδειξε σημαντική συσχέτιση με παραμέτρους καλλιέργειας κατά τη συγκομιδή. Στον περκασμό, οι δείκτες NDRE και NDVI συσχετίστηκαν αρνητικά με τη θερμοκρασία φυλλώματος ($r=-0.706$, $p<.05$ και $r=-0.698$, $p<.05$ αντίστοιχα), ως ένδειξη της δυνατότητας των δεικτών για την ανίχνευση υδατικού στρες των πρέμνων. Η συσχέτιση αυτή παρατηρήθηκε μόνο στον περκασμό λόγω υψηλών θερμοκρασιών και της έλλειψης βροχοπτώσεων. Αντίθετα, οι βροχοπτώσεις πριν τη συγκομιδή εξάλειψαν τα φαινόμενα στρες. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας φυλλώματος συσχετίστηκαν επίσης με

φυσιολογικά χαρακτηριστικά όπως το βάρος και το μήκος ραγών, με υψηλότερη συσχέτιση στον περκασμό (r=-0.801, p<0.1). Σημαντικές συσχετίσεις παρατηρήθηκαν επίσης με παραμέτρους όπως το ποσοστό βάρους φλοιού ανά ράγα, το φουμαρικό οξύ, η χλωροφύλλη, το μήκος ραγών, η διαπνοή (E) και η στοματική αγωγιμότητα (gs). Οι δύο τελευταίες εμφάνισαν ισχυρή αρνητική συσχέτιση (r=-.814 και r=-.821, p<0.01), επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης του υδατικού στρες με χρήση θερμικών αισθητήρων. Το αρνητικό πρόσημο εξηγείται από το κλείσιμο των στομάτων σε κατάσταση θερμικής και υδατικής καταπόνησης, που μειώνει τη φυσιολογική δραστηριότητα. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται και σε άλλες μελέτες (Venios et al., 2020; Ferro and Catania, 2023).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν τη σημασία του terroir στην ανάπτυξη των πρέμνων, την επίδρασή του στην απόδοση και την ποιότητα των σταφυλιών και του παραγόμενου οίνου. Οι στατιστικά σημαντικές διαφορές στις φυσιολογικές και ποιοτικές παραμέτρους μεταξύ των ζωνών υπογραμμίζουν τα οφέλη της διαχείρισης της τοπικής χωρικής παραλλακτικότητας σε εμπορικούς αμπελώνες. Επιπλέον, αναδείχθηκε η δυναμική των UAV και UGV για την παρακολούθηση της φυσιολογικής κατάστασης των πρέμνων και την πρόβλεψη ποιοτικών παραμέτρων των σταφυλιών. Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για τον εμπλουτισμό των δεδομένων και τη διερεύνηση των επιδράσεων των εδαφικών και τοπογραφικών παραμέτρων στα πρέμνα σε διαφορετικές εδαφοκλιματικές συνθήκες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου «ΑΓΡΟΣΥΣ – Ανάπτυξη αυτόνομου συνεργατικού ρομποτικού Συστήματος αμπελουργίας ακριβείας που ενσωματώνει Ηλεκτροκίνητα επίγεια και εναέρια Μη Επανδρωμένα Οχήματα και μικρής κλίμακας ηλιακούς σταθμούς φόρτισης» (Κωδικός έργου: ΤΑΕΔΚ-06184), στο πλαίσιο της Δράσης «Ερευνώ – Δημιουργώ – Καινοτομώ», του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας Ελλάδα 2.0, που συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το ΕΣΠΑ 2021-2027.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Corwin D. L. and Plant R. E., 2005. *Editorial: Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 46, 1–10.

Ferro M.V. and Catania P., 2023. *Technologies and Innovative Methods for Precision Viticulture:A Comprehensive Review*. Horticulturae, 9, 399. https://doi.org/10.3390/horticulturae9030399

González-Fernández A.B., Rodríguez-Pérez J.R., Sanz-Ablanedo E., Valenciano J.B. and Marcelo V., 2019. *Delineating vineyard zones by fuzzy K-means algorithm based on grape sampling variables*. Scientia Horticulturae, 243, 559-566. ISSN 0304-4238, https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.012.

Kitchen N. R., Sudduth K. A., Myers D. B., Drummond S. T. and Hong S. Y., 2005. *Delineating productivity zones on claypan soil fields apparent soil electrical conductivity*. Computers and Electronics in Agriculture, 46, 285–308.

Tagarakis A., Koundouras S., Papageorgiou E. I., Dikopoulou Z., Fountas S. and Gemtos T., 2014. *A fuzzy inference system to model grape quality in vineyards*. Precision Agriculture 15 (5), 555-578.

Tagarakis A., Liakos V., Fountas S., Koundouras S. and Gemtos T., 2013. *Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines.* Precision Agriculture 14(1),

18- 39. DOI 10.1007/s11119-012-9275-4

Tagarakis A., Liakos V., Fountas S., Koundouras S. and Gemtos T., 2011. Using Soil and Landscape Properties to Delineate Management Zones in Vines. Journal of Agricultural Machinery Science (Tarım Makinaları Bilimi Dergisi) 7(1), 33-38.

Venios X., Korkas E., Nisiotou A. and Banilas, 2020. Grapevine Responses to Heat Stress and Global Warming. Plants 2020, 9, 1754; doi:10.3390/plants912

13. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AGROSYS ΣΕ ΠΙΛΟΤΙΚΟ ΑΜΠΕΛΩΝΑ

Α. Μπαλαφούτης, Δ. Κατέρης, Γ. Παπαδάκης, Β. Αραποστάθης, Μ. Μωραϊτης, Μ. Κατσιβελάκης, Π. Ζέρβας, Μ. Τουπαλής, Α. Μέμλικα και Δ. Μπόχτης

[1]*Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Ινστιτούτο Βιο-Οικονομίας και Αγρο-Τεχνολογίας (iBO), Δημάρχου Γεωργιάδου 118, 38333, Βόλος *d.kateris@certh.gr*
[2]*ΓΠΑ, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα*
[3]*Energy Trading A.E., Αιόλου 67, 10559, Αθήνα*
[4]*Gizelis Robotics A.B.E.E., Θέση Κορματζίνι, Σχηματάρι Βοιωτίας, 32009, Αθήνα,*

Περίληψη

Η αμπελουργία ακριβείας αξιοποιεί τεχνολογίες αυτοματοποίησης και συλλογής δεδομένων για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης αμπελώνων. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η πειραματική αξιολόγηση ενός ολοκληρωμένου αυτόνομου συστήματος UAV–UGV για παρακολούθηση αμπελώνων υπό πραγματικές συνθήκες. Το σύστημα, υποστηριζόμενο από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και αγώγιμη ασύρματη φόρτιση, επιτυγχάνει μεγάλη ακρίβεια πλοήγησης, επιτυχία απόκτησης δεδομένων >90% και πλήρη αυτονομία φόρτισης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα του συστήματος να υποστηρίξει βιώσιμες, ενεργειακά αυτόνομες εφαρμογές αμπελουργίας ακριβείας.

Λέξεις κλειδιά: γεωργία ακριβείας, αυτόνομα ρομπότ, συνεργασία UAV-UGV, αγώγιμη φόρτιση, ενεργειακή αυτονομία

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE INTEGRATED AGROSYS SYSTEM IN A PILOT VINEYARD

A. Balafoutis[1], D. Kateris[1,*], G. Papadakis[2], V. Arapostathis[2], M. Moraitis[2], M. Katsivelakis[3], P. Zervas[3], M. Toupalis[4], A. Memlika[4] & D. Bochtis[1]

[1]*Centre for Research and Technology Hellas (CERTH), Institute for Bio-Economy and Agri-Technology (iBO), Dimarchou Georgiadou 118, 38333, Volos, *d.kateris@certh.gr*
[2]*Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, 75 Iera Odos, 11855, Athens,*
[3]*Energy Trading S.A., Aiolou 67, 10559, Athens,*
[4]*Gizelis Robotics S.A., Kormatzini Area, Schimatari Viotias, 32009, Athens,*

ABSTRACT

Precision viticulture leverages automation and data acquisition technologies to optimize vineyard management. This study presents the development and experimental evaluation of an integrated autonomous UAV–UGV system for vineyard monitoring under real conditions. Supported by photovoltaic stations and a conductive wireless charging mechanism, the system achieved high navigation accuracy, data acquisition success above 90%, and full charging autonomy. Results confirm the system's potential to support sustainable and energy- autonomous precision viticulture applications.

Keywords: precision agriculture, autonomous robotics, UAV–UGV cooperation, conductive charging, field autonomy

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο παγκόσμιος αγροτικός τομέας αντιμετωπίζει αυξανόμενες πιέσεις λόγω της κλιματικής αλλαγής, της αστικοποίησης και της έλλειψης εργατικού δυναμικού (Wolfert et al., 2017). Στην αμπελουργία, όπου απαιτείται εντατική και ακριβής παρακολούθηση, οι παραδοσιακές χειρωνακτικές μέθοδοι είναι επίπονες και ολοένα λιγότερο βιώσιμες. Η αμπελουργία ακριβείας, η οποία αξιοποιεί δεδομένα από αισθητήρες για στοχευμένες παρεμβάσεις, προσφέρει πλέον μια αποτελεσματική λύση (Bramley & Hamilton, 2004).

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε αμπελώνες για τη συλλογή πολυφασματικών και θερμικών εικόνων με σκοπό την αξιολόγηση της ζωτικότητας της φυλλικής επιφάνειας (Poblete-Echeverria et al., 2024) και του υδατικού στρες (Bellvert et al., 2016). Παράλληλα, τα μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα (UGVs) εξοπλισμένα με αισθητήρες LiDAR και RGB-D έχουν αποδείξει υψηλή ακρίβεια στη χαρτογράφηση και στη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων των αμπελώνων (Herrero- Huerta et al., 2015). Τα οχήματα αυτά συμπληρώνουν τα UAVs, παρέχοντας λεπτομερείς πλευρικές παρατηρήσεις της αρχιτεκτονικής του φυλλώματος.

Ωστόσο, ολοκληρωμένοι στόλοι UAVs–UGVs παραμένουν σπάνιοι σε επιχειρησιακούς αμπελώνες, εξαιτίας των προκλήσεων που σχετίζονται με την αυτόνομη πλοήγηση, τη συγχώνευση δεδομένων και την ενεργειακή αυτονομία. Επομένως, υπάρχει ανάγκη για ηλιακά τροφοδοτούμενα, συστήματα που είναι εγκατεστημένα στο πεδίο τα οποία επιτρέπουν συνεχή λειτουργία χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Η παρούσα εργασία υλοποιεί και αξιολογεί έναν πλήρως αυτόνομο στόλο UAVs–UGVs σε αμπελώνα, υποστηριζόμενο από φωτοβολταϊκό μικροδίκτυο και σύστημα αγώγιμης φόρτισης. Το σύστημα συνδυάζει RTK-GPS πλοήγηση, εντοπισμό SLAM και συλλογή δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες, ενώ στόχος της μελέτης είναι η αξιολόγηση της ακρίβειας πλοήγησης, της πληρότητας των δεδομένων, της ενεργειακής διαχείρισης και της επεκτασιμότητας της πλατφόρμας.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Η πειραματική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε αμπελώνα 14 εκταρίων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, στον οποίο και επιχείρησε συντονισμένος στόλος αποτελούμενος από τέσσερα UAV (DJI S1000+, Acceligence Drone 4 Farm, Parrot Anafi Thermal και Bluegrass) (Εικόνα 1) και δύο UGV (Thorvald και Husky A-200) (Εικόνα 2). Οι πλατφόρμες λειτούργησαν αυτόνομα, υποστηριζόμενες από δυο φωτοβολταϊκούς σταθμούς που παρείχαν ενεργειακή αυτονομία και φόρτιση πεδίου (Εικόνα 3).

DJI S1000+ (με υπερφασματική κάμερα)

Acceligence Drone 4 Farm (με κάμερα RGB)

Parrot Anafi (με θερμική κάμερα) Bluegrass (με πολυφασματική κάμερα)

Εικόνα 1: Τα UAVs που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική αξιολόγηση του έργου AGROSYS.

Thorvald Husky A-200

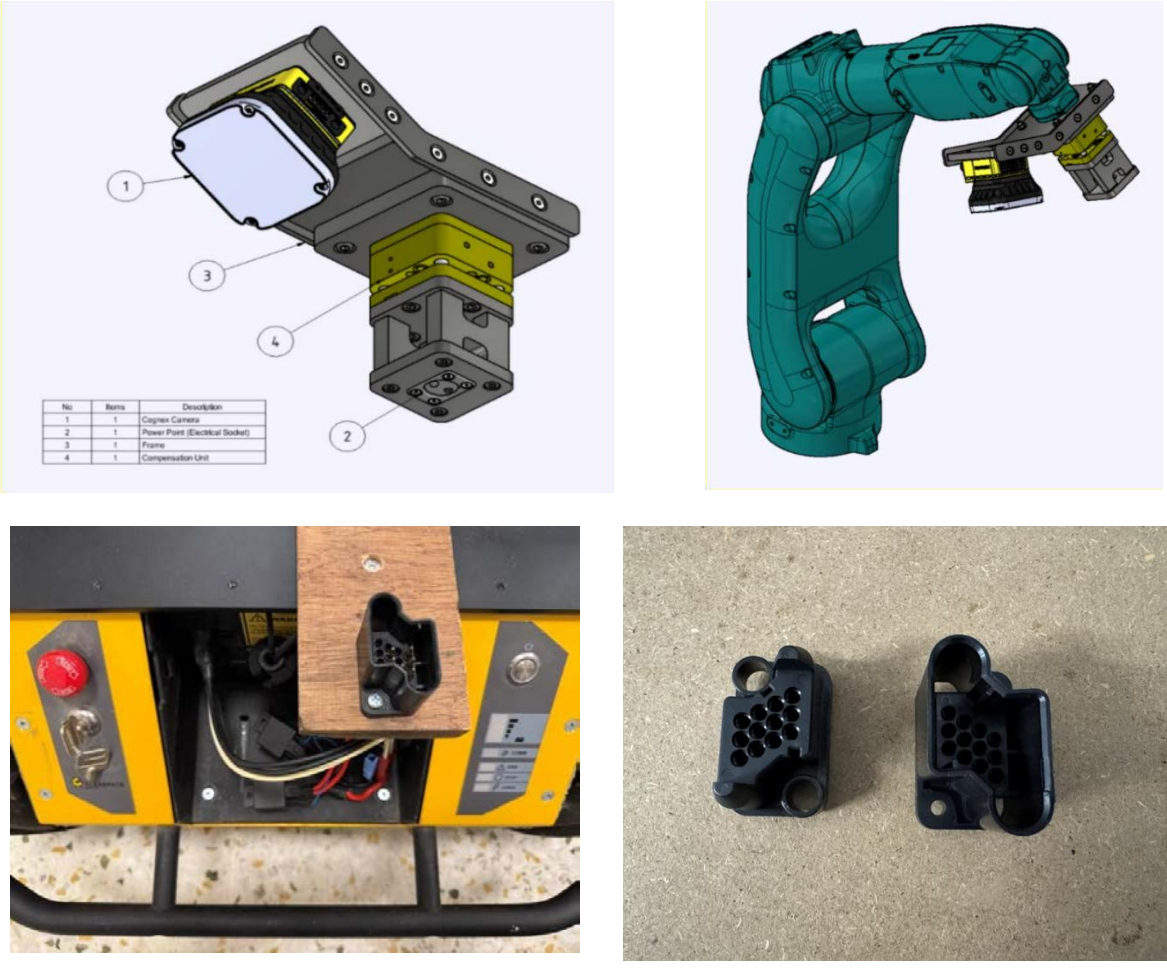
Εικόνα 2: Τα UGVs που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική αξιολόγηση του έργου AGROSYS.

Εικόνα 3: Ένας εκ των δυο φωτοβολταϊκών σταθμών εγκατεστημένος στο πεδίο.

2.1 Σύστημα Αγώγιμης Φόρτισης UAVs–UGVs

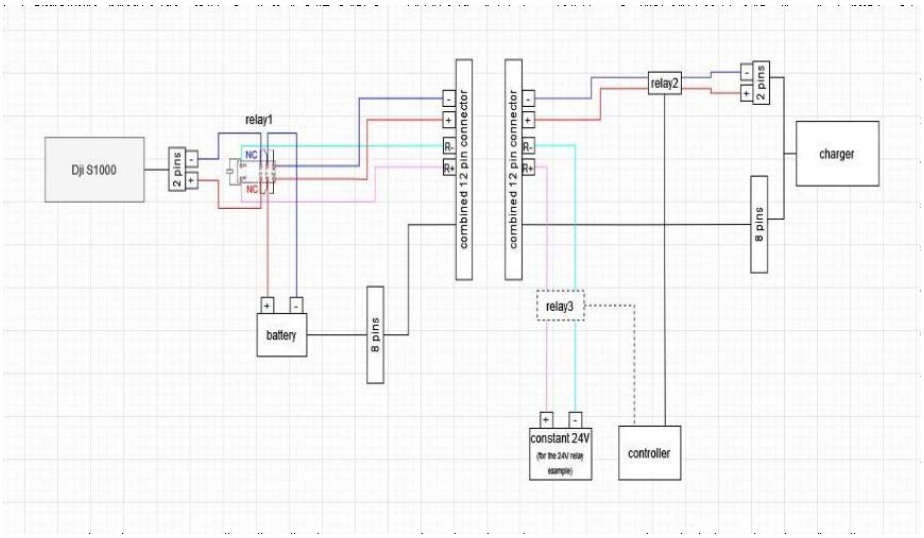
Η φόρτιση των UAVs και UGVs πραγματοποιήθηκε μέσω ενός αγώγιμου μηχανισμού που σχεδιάστηκε για πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Το σύστημα αποτελούταν από έναν ρομποτικό βραχίονα, έναν οπτικό αισθητήρα και ένα καθολικό βύσμα σύνδεσης (Εικόνα 4). Ο οπτικός αισθητήρας εντόπιζε έναν data matrix πίνακα τοποθετημένο σε κάθε όχημα, καθορίζοντας τη θέση και τον προσανατολισμό του (Εικόνα 5). Με βάση αυτές τις πληροφορίες, ο βραχίονας κινούταν και ευθυγράμμιζε το βύσμα, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία φόρτισης.

Για την επίτευξη ασφαλούς λειτουργίας, ενσωματώθηκε ένα κύκλωμα ρελέ στη διεπαφή μπαταρίας–οχήματος, το οποίο απομόνωνε τη μπαταρία από το υπόλοιπο κύκλωμα κατά τη διάρκεια της φόρτισης, χωρίς να επηρεάζει τη λειτουργία του οχήματος κατά τις αποστολές (Εικόνα 6). Το σημείο σύνδεσης μεταξύ βραχίονα και οχήματος έφερε ειδικό βύσμα που επιτρέπει αγώγιμη επαφή, ενώ παράλληλα προστατεύεται μηχανικά και ηλεκτρικά. Το σύστημα εφαρμόστηκε επιτυχώς σε όλα τα οχήματα (Εικόνα 7).



Εικόνα 4: Κύρια εξαρτήματα του σταθμού αγώγιμης φόρτισης (ρομποτικός βραχίονας, οπτικός αισθητήρας και καθολικό βύσμα σύνδεσης).

Εικόνα 5: Τοποθέτηση data matrix στο όχημα για οπτική ευθυγράμμιση.



Εικόνα 6: Διάταξη ρελέ στη διεπαφή μπαταρίας–οχήματος.

α)

β)

Εικόνα 7: Δοκιμές του συστήματος φόρτισης α) UAV στο εργαστήριο και β) UGV εντός του σταθμού φόρτισης.

2.2 Αρχιτεκτονική Ελέγχου και Συλλογή Δεδομένων

Η αρχιτεκτονική ελέγχου βασίστηκε στο Robot Operating System (ROS), ενσωματώνοντας αλγορίθμους RTK-GPS, SLAM (Gmapping, AMCL), Dijkstra και Dynamic Window Approach για πλοήγηση και αποφυγή εμποδίων. Οι πλατφόρμες εξοπλίστηκαν με αισθητήρες LiDAR, RGB- D, υπερφασματικούς, πολυφασματικούς και θερμικούς, επιτρέποντας λεπτομερή χαρτογράφηση του θόλου και καταγραφή βιοφυσικών παραμέτρων. Τα δεδομένα αναλύθηκαν με λογισμικά ENVI και FMIS για παραγωγή δεικτών βλάστησης (NDVI, NDRE), τρισδιάστατων μοντέλων και χαρτών υδατικού στρες.

Οι αποστολές περιελάμβαναν συντονισμένες εναέριες και επίγειες λειτουργίες σε βασικά φαινολογικά στάδια ανάπτυξης του αμπελιού, με συνεχή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ UAV και UGV.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

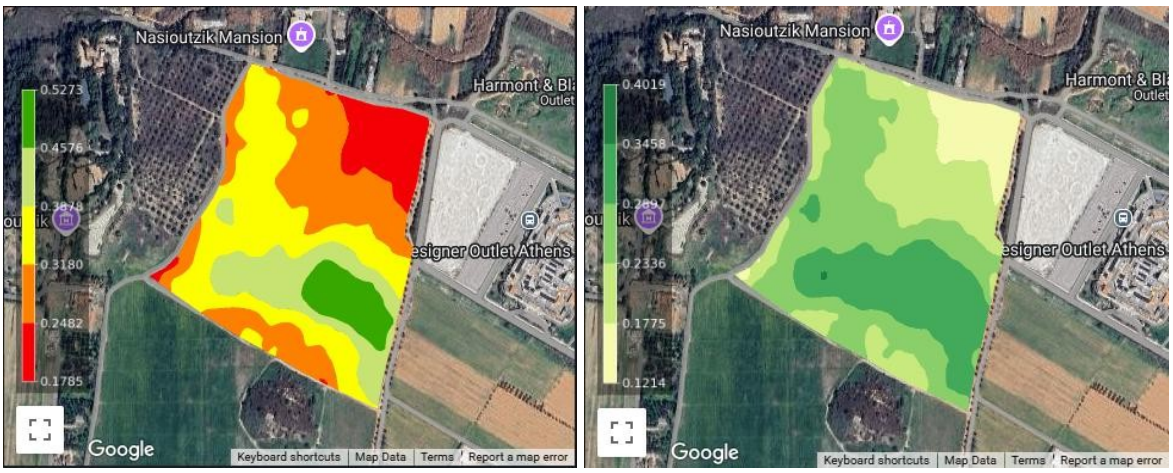
Ο αυτόνομος στόλος ολοκλήρωσε περισσότερες από τέσσερις αποστολές UGV και δέκα αποστολές UAV κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Η ακρίβεια πλοήγησης ξεπέρασε το 94% τόσο στις επίγειες όσο και στις εναέριες πλατφόρμες, με τα UAV να επιτυγχάνουν ελαφρώς υψηλότερη απόδοση λόγω απουσίας εμποδίων. Τα ποσοστά συλλογής δεδομένων διατηρήθηκαν πάνω από 90%, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του συστήματος υπό ποικίλες συνθήκες.

Οι δείκτες βλάστησης NDVI και NDRE από τα UAV παρουσίασαν ακρίβεια μέτρησης άνω του 89%, ενώ η υπερφασματική ανάλυση από τα UGV εντόπισε ζώνες ωρίμανσης των

σταφυλιών με ακρίβεια 87% (Εικόνα 8). Η λειτουργική διαθεσιμότητα του συστήματος ξεπέρασε το 85%, ενώ οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί εξασφάλισαν ενεργειακή αυτονομία ακόμη και σε απομονωμένες περιοχές εκτός δικτύου.

Οι δοκιμές φόρτισης απέδειξαν ότι το αγώγιμο σύστημα σύνδεσης λειτουργούσε με απόλυτη επαναληψιμότητα και ασφάλεια. Ο ρομποτικός βραχίονας συνέδεε κάθε φορά με ακρίβεια το βύσμα στον στόχο, απομονώνοντας επιτυχώς τη μπαταρία και εκκινώντας τη διαδικασία φόρτισης χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Η διαδικασία τερματιζόταν αυτόματα μετά την πλήρη φόρτιση, χωρίς καμία παρέμβαση στη λειτουργία των οχημάτων.

Η συνδυασμένη λειτουργία UAV και UGV απέδειξε την επιχειρησιακή σκοπιμότητα πλήρως αυτόνομων, ενεργειακά ανεξάρτητων ρομποτικών στόλων, ικανών να εκτελούν συνεχείς αποστολές παρακολούθησης και χαρτογράφησης σε πραγματικό χρόνο.



NDVI NDRE

Εικόνα 8: Χάρτες δεικτών NDVI και NDRE της περιοχής μελέτης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα κατέδειξε ότι ο συνδυασμός ενός αυτόνομου στόλου UAV και UGV με πλήρως αυτοματοποιημένο αγώγιμο σύστημα φόρτισης και φωτοβολταϊκή υποστήριξη συνιστά μια τεχνικά ώριμη και επιχειρησιακά βιώσιμη λύση για την αμπελουργία ακριβείας. Το προτεινόμενο σύστημα μειώνει την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης, αυξάνει την αποδοτικότητα και εξασφαλίζει πλήρη ενεργειακή ανεξαρτησία. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν τη δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας ενεργειακά αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων για ακριβή παρακολούθηση και διαχείριση αμπελώνων. Μελλοντικές έρευνες θα πρέπει να επικεντρωθούν στη βελτίωση της ανθεκτικότητας σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και στην ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης για αυτόνομη λήψη αποφάσεων.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου «ΑΓΡΟΣΥΣ – Ανάπτυξη αυτόνομου συνεργατικού ρομποτικού Συστήματος αμπελουργίας ακριβείας που ενσωματώνει Ηλεκτροκίνητα επίγεια και εναέρια Μη Επανδρωμένα Οχήματα και μικρής κλίμακας ηλιακούς σταθμούς φόρτισης» (Κωδικός έργου: ΤΑΕΔΚ-06184), στο πλαίσιο της Δράσης «Ερευνώ – Δημιουργώ – Καινοτομώ», του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας Ελλάδα 2.0, που συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το ΕΣΠΑ 2021-2027.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., & Fereres, E., 2016. Vineyard irrigation scheduling based on airborne thermal imagery and water potential thresholds, Australian Journal of Grape and Wine Research. 22, 307-315.

Bramley, R. G. V., & Hamilton, R. P., 2004. Understanding variability in winegrape production systems, Australian Journal of Grape and Wine Research, 10(1), 32–45.

Herrero-Huerta, M., González-Aguilera, D., Rodriguez-Gonzalvez, P., Hernández-López, D., 2015. Vineyard yield estimation by automatic 3D bunch modelling in field conditions. Computers and Electronics in Agriculture, 110, 17–26.

Poblete-Echeverria, C., Chalmers, T., Vivier, M. V., 2024. High-resolution aerial thermography for water stress estimation in grapevines. IVES Conference Series, Open GPB 2024.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J.,2017. Big Data in Smart Farming – A Review. Agricultural Systems, 153, 69–80.

14. COMPARATIVE REFLECTANCE ANALYSIS OF VALERIANELLA LOCUSTA PLANTS IN VERTICAL FARMING AND GREENHOUSE SYSTEMS FOR EARLY WATER DEFICIENCY DETECTION

D. D. Avgoustaki[1], S. Iatropoulou[1] & T. Bartzanas[1]

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, dafni_av@aua.gr

ABSTRACT

Early identification of crop water stress is pivotal for the implementation of precision irrigation strategies within controlled-environment agriculture (CEA). The present study investigates the use of multispectral imaging as a non-invasive, non-destructive sensing modality for the early detection of water deficit in Valerianella locusta (lamb's lettuce), cultivated under hydroponic conditions in both a greenhouse and a vertical farming system. Each cultivation environment was subjected to two irrigation treatments: a well-watered control (100% of standard irrigation) and a water-stressed condition (50% irrigation reduction). The experimental trials were conducted at the Laboratory of Farm Structures, Agricultural University of Athens. The greenhouse system operated under semi-controlled environmental conditions—specifically regulated temperature and humidity, with natural solar radiation—while the vertical farming system was fully enclosed, utilizing artificial illumination exclusively via LED lighting. Canopy reflectance was recorded periodically across the growth cycle using a multispectral camera configured to capture radiometric data at eight narrow spectral bands. Temporal and treatment-based differences in spectral signatures—imperceptible to visual inspection—were detected as early indicators of abiotic stress. Key vegetation indices, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Photochemical Reflectance Index (PRI), exhibited statistically significant divergence between control and stress treatments, affirming their diagnostic utility for early water stress detection. The results validate the potential of multispectral sensing technologies to serve as immediate, scalable tools for monitoring plant physiological responses to water availability. Such methodologies contribute to the optimization of water-use efficiency and the advancement of data-driven crop management practices in both greenhouse and vertical agriculture frameworks. Finally, the integration of remote sensing techniques with unmanned aerial systems (UAS) such as drones presents a promising avenue for scalable, high-throughput monitoring in CEA systems, enabling real-time spatial diagnostics and precision resource management at canopy and sub-canopy levels.

Keywords: agricultural systems, CEA, remote sensing, multispectral vision, spectral indices

1. INTRODUCTION

Efficient water management has become a central challenge in contemporary agriculture, particularly as climate variability intensifies and freshwater resources become increasingly scarce [Fereres & Soriano, 2007, IPCC, 2022]. In this context, the early identification of crop water stress is critical for enabling precision irrigation

strategies that optimize water use without compromising yield or crop quality [Jones, 2004]. This imperative is especially pronounced in controlled-environment agriculture (CEA), where resource input is tightly managed, and technological integration offers a unique opportunity to enhance decision- making through sensor-driven feedback systems [Benke & Tomkins, 2017]. CEA systems—including greenhouses and vertical farms—offer controlled or semi-controlled growing environments that decouple crop production from outdoor climatic variability. While they afford significant advantages in terms of year-round cultivation, reduced pesticide use, and higher yield per unit area [Kalantari, et al., 2017], they are also characterized by high operational input costs, particularly with respect to energy and water [Beacham et al., 2019, Al-Kodmany]. Therefore, improving input-use efficiency, particularly in hydroponic systems where water and nutrient delivery is tightly regulated, is a key priority for advancing the sustainability of these systems [Tzortzakis, 2010].

One promising approach to monitoring crop physiological status in CEA is the application of remote sensing technologies, particularly multispectral imaging [Thenkabail, 2004, Mulla, 2013]. Multispectral sensors capture narrow-band reflectance data across specific regions of the electromagnetic spectrum, enabling the detection of subtle changes in plant physiology— such as those induced by water stress—before visual symptoms become apparent [Zarco- Tejada & Ustin, 2001]. This non-invasive, high-resolution monitoring capability provides a powerful tool for early stress detection, with potential applications in both manual crop scouting and automated feedback systems [Li et al., 2014].

To date, much of the research on remote sensing for plant stress detection has focused on field-grown crops or large-scale greenhouse operations [Padilla et al., 2014], with relatively less emphasis on small-leaf leafy vegetables such as Valerianella locusta (lamb's lettuce) under hydroponic cultivation. Moreover, comparative studies between greenhouse and vertical farming systems—differing substantially in terms of light quality, microclimate, and operational complexity—remain limited [Koirala et al., 2022]. This gap in literature impedes the development of robust, transferable monitoring protocols that can support irrigation optimization across diverse CEA environments.

The present study addresses this knowledge gap by investigating the use of multispectral imaging for the early detection of water deficit in Valerianella locusta, cultivated hydroponically under both semi-controlled greenhouse conditions and fully controlled vertical farming systems. Through the analysis of canopy reflectance and vegetation indices such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Photochemical Reflectance Index (PRI), we evaluate the sensitivity of spectral signals to irrigation treatments. By quantifying temporal and treatment-based differences in spectral response, this work contributes to the development of scalable, non-destructive diagnostics for precision irrigation in CEA and highlights the potential integration of such sensing tools with unmanned aerial systems (UAS) for broader deployment [Gao, 1996, Zarco-Tejada et al., 2012].

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Greenhouse Facility (GH)

The experiment was conducted in the greenhouse of the Agricultural University of Athens over the periods from November 11, 2023, until December 2, 2023.

Valerianella locusta (lamp lettuce) were opted for the purposes of cultivation inside the greenhouse facility, due to their small height and fast-growing development in combination with its high yield and nutritional value. In the first stage, the plants were grown in the seedling incubator made of rockwool, as shown in Figure 2, for 2 weeks. In total, 250 seeds where plants were sowed in the growing disks. After this period, the seedling plants were transplanted in each line inside the greenhouse facility.

Inside the greenhouse, 4 different lines were occupied for experimental purposes. Each line consisted of 17 rockwool blocks that each block had 3 plants. In total, every line had 51 plants of lamp lettuce. The experimental design consisted of 2 lines that were occupied by control treatment plants and 2 lines by stress treatment plants. The distance between the lines was 1.3 meters in order to facilitate the cultivation practices, movement of machinery and workers/researchers.

After the transplant process, seedlings in all lines were following identical cultivation techniques for one week to validate that all lamp lettuce plants follow the same growing rate under control conditions. After standardizing the growing rate of plants, different water treatments were applied in the growing lines as they are visualized in Figure 1. More specifically, the first two lines were provided with control water treatment of two water irrigation sessions of 10 minutes duration per day, compared to the water stress treatment that received one irrigation session for 5 minutes per day until the end of the experiment. All water for irrigation purposes was derived from the central water tank of the greenhouse with 1000 L H_2O capacity. The nutrient solution was identical for all lines, and the recipe was defined by NUTRISENSE DSS (https://nutrisense.online) (Savvas et al., 2021). Three different nutrient tanks of 200 L capacity were used for the mixing of the desired recipe and one of the nitrate acid.

The circulation and distribution of the nutrient solution within the greenhouse was carried out using the Alagro IQ40Touch pump. The pump was equipped with timers to regulate and control the irrigation cycles, thus providing the possibility of programming the pump's operation. To meet the requirements of the different experimental treatments (control and stress), two distinct irrigation schedules were programmed. Electrical conductivity was maintained at 2.6 $mS*m^{-1}$ and pH at 5.5.

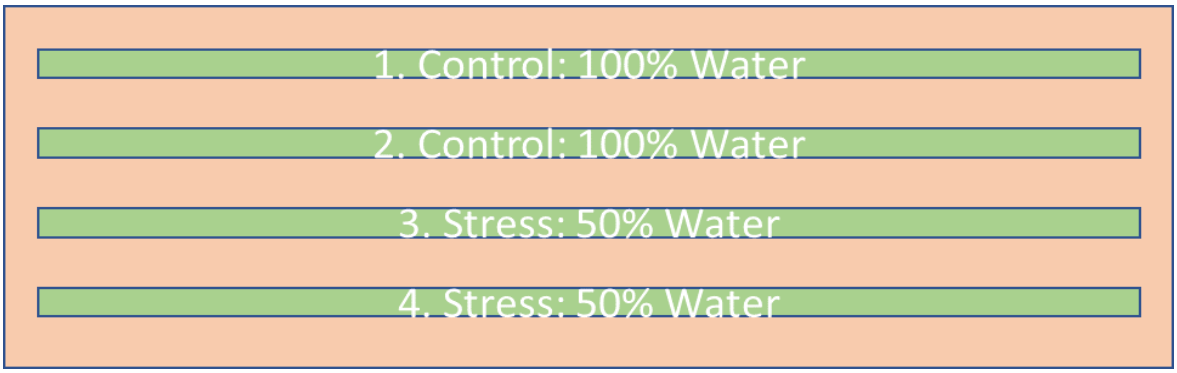


Figure 1. The two different treatments applied in the greenhouse in the four different cultivation lines.

1.2. Vertical Farming Facility (VF)

The experiment was carried out in the period between May and July 2023 on the premises of Agricultural University of Athens and, more specifically, inside the pilot vertical farm of the Laboratory of Farm Structures. A 40 ft (≈ 30 m^2) container hosts

the installation of the pilot vertical farm with external dimensions of 12m (L) * 2.44m (W) * 3m (H) and on the inside it consists of 4 growing towers (T1, T2, T3 and T4) and 3 growing layers (L1, L2, L3) per tower, as shown in Figure 2. A close loop Ebb & Flow hydroponic system was installed in each of the four growing towers delivering water concurrently to all layers with the assistance of a 53- Watt water pump and then, was suctioned back into each tower's water tank.

Figure 2. Left: Pilot Vertical Farm. Right: Interior layout.

Valerianella locusta plant was opted for the purposes of cultivation inside the vertical farm, due to its small height and fast-growing development in combination with its high yield and nutritional value. In the first stage, the plants were grown in the seedling incubator made of rockwool, as shown in Figure 2, for 2 weeks. After this period, the seedling plants were transplanted in each layer of the 4 towers. A total of 24 plants and 0.7627 m^2 of growth space per layer (31.5 plants/m^2) were planted at a density of 10 * 10 cm in each layer. Measurements started 7 days after the transplant for each plant to have the required time to develop three pairs of true leaves.

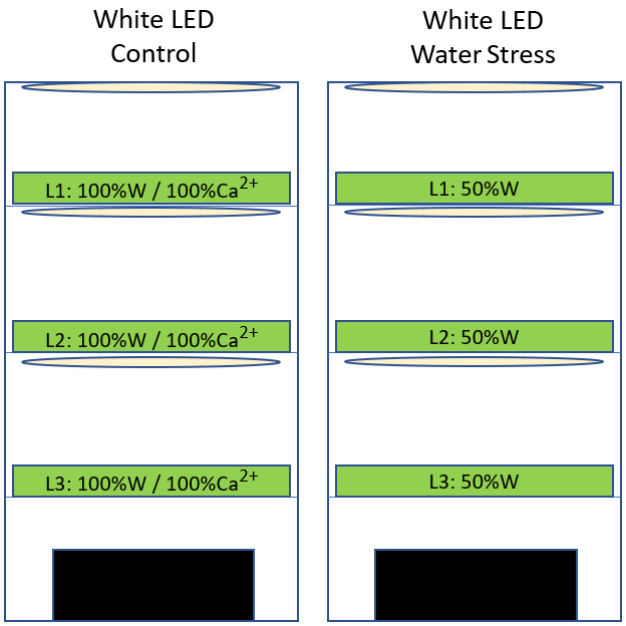


Figure 3. The two different towers and the treatments applied in each layer.

The four towers were equipped with 36 White LED and 36 Blue/Red/Far-Red LED lamps.The T1 and T2 were supplied with 6 White LED lamps in each layer and the T3 and T4 with 6 Blue/Red/Far-Red LED lamps in each layer. The photoperiod of each LED lamp was set to 14/10 (light/dark) and the PPFD intensity was set to 250 PPFD μmol/m^2s. The dimensions of each LED bulb were 141*22 cm, and each consumed 23-24 W/m of electricity. The spectral performance of each LED type is demonstrated in Figure 3.

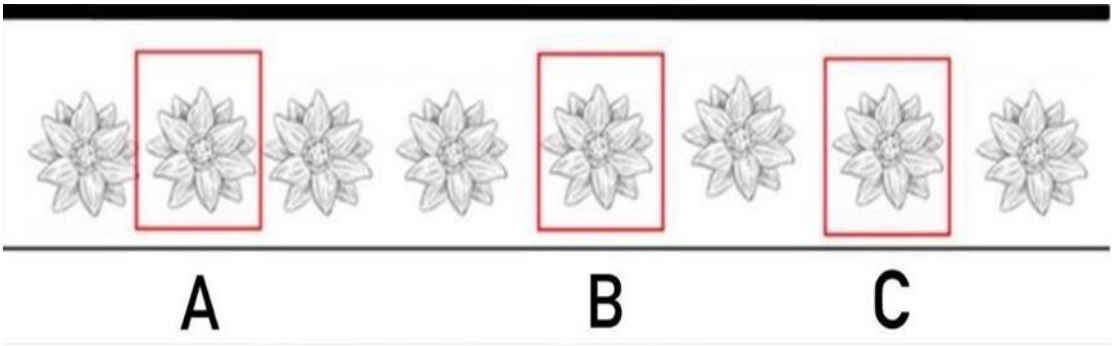


Figure 4. Positions A, B and C for data collection with multispectral camera CMS USB-3.

Imaging data were acquired using a CMS USB-3 multispectral camera (Silios Technologies, Peynier, France) equipped with a fixed focal length lens suited for CMS series cameras. The camera maintained a consistent distance from the subjects at 27 cm between the lens of the camera and the cultivation area. Prior to each imaging session, the camera underwent calibration. Subsequent data collection entailed capturing three images per plant in a predetermined sequence: control (plant A), control (plant B), control (plant C), stress (plant A), stress (plant B), stress (plant C) (Figure 4).

The camera was calibrated daily using a dark and white reference prior to the commencement of each imaging session. For the dark reference image, the lens was occluded with its built-in shutter, ensuring no light infiltration. Conversely, the white reference image was captured using a highly reflective diffusive surface positioned directly in front of the lens. The camera was strategically placed 50 cm away from the substrate tubes, with an approximate 30 cm gap between the lens and the top of the plant canopy, optimizing the field of view and light capture.

Imaging sessions were meticulously scheduled to occur within a consistent one-hour window, from 15:00 to 16:00 every day, to minimize variations in natural lighting conditions. Each session involved capturing six images per treatment group (labeled A, B, C) for each plant species studied—lamp lettuce plants. This regimented approach resulted in the accumulation of six images per treatment group per day, providing a robust dataset for subsequent spectral analysis and interpretation.

A python script was developed, along the lines of the open-source GitHub repository of George Alexakis, to serve the purpose of raw image acquisition, band separation, vegetation indices calculation and, consequently, uploading the results in Google Drive repository.

2.3. Image processing

In our experimental research, we employed the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Photochemical Reflectance Index (PRI) to assess plant health and photosynthetic activity, respectively. The NDVI calculation utilized bands 5 and 8, which are known for their efficacy in distinguishing between vegetative and non-vegetative surfaces by measuring the difference in reflectance between the near-infrared (NIR) and red light. Meanwhile, the PRI utilized bands 1 and 2, focusing on the reflectance in specific blue and green wavelengths that are sensitive to changes in xanthophyll pigments associated with photosynthetic light use efficiency. These indices were pivotal in our analysis, providing critical insights into the physiological status of the plants under study.

Image processing and data analysis were conducted using OpenCV and Python. Each image collection session began with the acquisition of black-and-white calibration images, which were essential for standardizing the reflectance measurements. Reflectance was computed using the formula:

$$R = 100 \times (I - D)/(W - D), \qquad [1]$$

where, R represents the converted relative reflectance image, I is the raw spectral image, D is the current dark image, and W is the white reflectance image.

Due to inherent noise associated with light variations in the raw images, a normalization process was implemented to ensure a consistent and comparable set of grayscale images. This was achieved through the min-max normalization technique, described by the equation:

$$x' = (x - xmin)/(xmax - xmin), \qquad [2]$$

Throughout the experiment, young and fully developed leaves were monitored as our selected sample. The most widely used metric for assessing the health and vitality of vegetation is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Pasimeni et al., 2019). It is used for quantifying the photosynthetic capacity of the plant and is calculated as follows:

$$NDVI = (NIR\text{-}RED)/(NIR+RED) \qquad [3]$$

The green color of the plants is due to the chlorophyl pigment, which reflects green wavelengths and absorbs red. When photosynthesis occurs, the plant develops cells that reflect near-infrared (NIR) wavelengths, so when a plant is in a healthy condition, it will reflect a lot NIR and absorb RED. The value of the NDVI will always fall between -1 and +1, with +1 being the healthiest for plants. The values were then normalized and rescaled to [0-1] and then to [0-255] scale, which is the range of grayscale values commonly used for image display, making it easier to visualize and interpret the NDVI map.

The photochemical reflectance index (PRI) and the normalized difference vegetation index (NDVI) are the most commonly used and analyzed indices for crop water stress assessment (Katsoulas, et al., 2016). PRI uses wavelengths from the spectrum around the green peak. As happened with the NDVI index, PRI values were then normalized and rescaled to [0-1] and then to [0-255] scale.

PRI = (BLUE-GREEN)/(BLUE+GREEN) [4]

2.4. Post-Processing

The post-processing of the images consists of the creation of patches in the leaf area of each plant. Each region of interest (ROI) was extracted manually using OpenCV library's function, rectangle, as depicted in the following figure and has a size of 900 pixels [Avgoustaki et al., 2022].

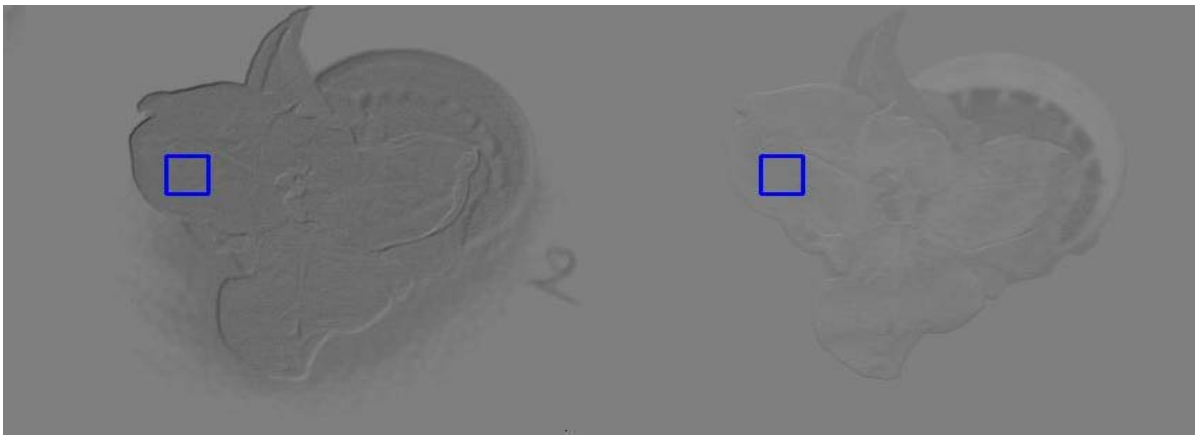


Figure 5. Patch in NDVI (left) and PRI (right) images.

The process of creating patches was implemented for both NDVI and PRI indices (Figure 5). For each patch, the mean and standard deviation values were calculated using the NumPy corresponding functions of mean and std. An aggregate table was, then, constructed with the calculations concerning each patch of all three plants of all three layers in each of the four towers of control and stress treatments and the final results were extracted through SPSS , an IBM statistical software platform.

After 30 days of daily data collection, plants were harvested and evaluated with post-harvest measurements that included plants' dimensions (diameter in cm), Leaf Area (LA in cm^2), Fresh Weight (in g) and Dry Weight (in g).

2. RESULTS

Data was compared with statistical analysis and more specifically through the t-test to verify the existence of a statistically significant difference for the samples of the three different treatments. The null hypothesis of t-test is that we assume that the mean values of NDVI and PRI for both treatments, control and water stress, are the same (same null hypothesis also applied to control and nutrient stress treatments comparison). The more the samples deviate from the null hypothesis, the smaller the p-value becomes. In the t-test, df expresses the degrees of freedom and p-value is defined as the significant level of t-test and is set to 0.05.

Table 2. Results of statistical analysis of Valerianella locusta plants, comparing the mean quantitative values of the two different irrigation treatments, control and stress, for the NDVI and PRI value. The columns represent the 1) the treatment, 2) the sample size (N), 3) the mean values (Mean), 4) the standard deviation (Std. Deviation), 5) the level of significance (Sig. (p-value)), 6) the t-test (t), 7) the degrees of freedom (df) and 8) Sig. (2-tailed). Significance level $p < 0.05$.

		Treatments	N	Mean	Std. Deviation	t	df	Sig. (2-tailed)
NDVI	VF	control	28	94.2681	.84796	.764	50.109	0.448
		water stress	28	94.0642	1.12896			
	GH	control	22	133.1	2	4.566	42	<0.0001
		water stress	22	130.5	1.8			
PRI	VF	control	28	121.025	2.10172	2.142	38.376	0.039
		water stress	28	119.0246	4.47121			
	GH	control	22	136.3	0.8	3.310	30.808	0.002
		water stress	22	135	1.6			

Table 3. Results of statistical analysis of Valerianella locusta plants comparing the mean quantitative values of the two different irrigation treatments, control and stress for the quantitative characteristics of the plant. The columns show 1) the treatment, 2) the sample size (N), 3) the mean values (Mean), 4) the standard deviation (Std. Deviation), 5) the level of significance (p-value), 6) the t-test (t), 7) the degrees of freedom (df) and 8) Sig. (2-tailed). Significance level $p < 0.05$

		Treatments	N	Mean	Std. Deviation	Sig. (p-value)	t	df	Sig. (2-tailed)
CCI	VF	control	84	40.11	3.8	0.46	0.61	166	0.54
		water stress	84	37.46	1.1				
	GH	control	45	60.26	2.4	0.327	0.714	88	0.477
		water stress	45	57.36	1.8				
Height (cm)	VF	control	36	53.94	15.92	0.14	0.27	70	0.79
		water stress	36	52.72	22.45				
	GH	control	20	10.75	1.1	0.926	1.557	38	0.128
		water stress	20	10.14	1.3				
Leaf Area (cm^2)	VF	control	36	8049.33	5752.2	0.43	-0.46	70	0.65
		water stress	36	8736.92	6956.81				
	GH	control	20	802.5	138.7	0.120	1.334	38	0.190
		water stress	20	750.3	106.5				
Fresh Weight (g)	VF	control	36	224.47	169.69	0.11	-0.65	70	0.52
		water stress	36	257.36	249.59				
	GH	control	20	36.5	5.8	0.032	1.946	32.449	0.060
		water stress	20	33.6	3.7				
Dry Weight (g)	VF	control	36	54.58	30.53	0.18	-1.34	70	0.19
		water stress	36	65.83	40.33				
	GH	control	20	3.36	0.7	0.255	-1.866	38	0.070
		water stress	20	3.5	0.6				

4. DISCUSSION

This study investigated the potential of multispectral imaging for the early detection of water stress in Valerianella locusta cultivated under two distinct controlled-environment agriculture (CEA) systems: a greenhouse and a vertical farm. The results confirmed the utility of vegetation indices—specifically NDVI and PRI—as non-invasive indicators of plant physiological response to varying irrigation regimes. Importantly, this study contributes to the growing body of literature demonstrating the applicability of remote sensing in hydroponic leafy crop systems, an area previously underexplored compared to field or fruit-bearing crops [Padilla et al., 2014, Koirala et al., 2022].

In both environments, plants subjected to water stress treatments exhibited measurable spectral shifts when compared to well-watered controls. In the greenhouse, NDVI and PRI values showed statistically significant differences ($p < 0.05$), aligning with previous findings that associate water stress with chlorophyll degradation and alterations in xanthophyll cycle activity [Fereres & Soriano, 2007, Katsoulas et al., 2016]. In contrast, NDVI differences in the vertical farming system were not statistically significant, although PRI showed marginal sensitivity to water deficit. This divergence may be attributed to the uniform artificial lighting and more stable environmental parameters in the vertical farm, which could buffer or delay the physiological manifestations of water stress [Benke & Tomkins, 2017].

Notably, the PRI index exhibited greater sensitivity to water stress than NDVI in both systems. This observation supports prior studies indicating that PRI responds more dynamically to short-term changes in photosynthetic efficiency and stress-induced pigment shifts, particularly under controlled lighting conditions [Gamon & Surfus, 1999]. While NDVI is widely recognized for assessing biomass and canopy vigor, its utility may be limited in early-stage stress detection in leafy greens with low canopy complexity [Zarco-Tejada & Ustin, 2001].

Post-harvest biometric measurements—including leaf area, plant height, and biomass—did not exhibit significant differences between treatments, particularly in the vertical farming system. This further validates the advantage of spectral indices over traditional morphological parameters for early stress detection. It is well established that physiological changes precede phenotypic symptoms, and thus remote sensing can offer an anticipatory lens for managing resource inputs [Jones, 2004, Li et al., 2014].

From a system-level perspective, the greater spectral distinction observed in the greenhouse may reflect its exposure to variable environmental conditions, such as fluctuating temperature and natural light spectra. These external variables can amplify the impact of water stress on plant physiology, thereby enhancing detectability. Conversely, vertical farms offer high environmental consistency, potentially narrowing the spectral response gap between stress and control treatments [Kalantari et al., 2017].

Finally, the imaging and processing pipeline established in this study, using fixed-view CMS multispectral sensors, demonstrated robustness and repeatability. While promising, this configuration may require adaptation for real-time deployment on autonomous systems such as drones or robotic platforms, especially in vertically structured cultivation layouts [Mulla, 2013]. Nonetheless, the results underscore the potential for integrating precision imaging into irrigation decision support systems to improve water-use efficiency in CEA.

3. CONCLUSIONS

This study demonstrates that multispectral imaging, particularly through the use of NDVI and PRI indices, can serve as a reliable, non-destructive method for early detection of water stress in *Valerianella locusta* cultivated under hydroponic conditions in both greenhouses and vertical farming systems. The findings highlight that:

- PRI outperforms NDVI in sensitivity to early water deficit in both systems.
- Spectral indices can detect stress responses before significant differences appear in biometric traits.
- Environmental variability in greenhouses may enhance the visibility of stress signals, while vertical farming systems may suppress or delay such effects due to tightly regulated conditions.

By validating these indices in small-leaf crops and across diverse CEA contexts, this study bridges a critical knowledge gap in the deployment of imaging-based diagnostics for precision irrigation. Future research should focus on expanding this methodology to other crop types and incorporating real-time multispectral data acquisition into autonomous decision-making systems. Additionally, the integration of multispectral sensing with unmanned aerial systems (UAS) presents a scalable and practical solution for large-scale monitoring in urban and peri-urban CEA deployments.

Ultimately, such innovations will support the transition to data-driven, resource-efficient agriculture—critical for achieving sustainability goals in food production under increasing climatic and resource constraints.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. Buildings, 8(2), 24.

Avgoustaki, D. D., Avgoustakis, I., Miralles, C. C., Sohn, J. & Xydis, G. (2022). Autonomous Mobile Robot with Attached Multispectral Camera to Monitor the Development of Crops and Detect Nutrient and Water Deficiencies in Vertical Farms. Agronomy; 12, 2691. doi.org/10.3390/agronomy12112691

Beacham, A. M., Vickers, L. H., & Monaghan, J. M. (2019). Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 94(3), 277–283.

Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. Sustainability: Science, Practice and Policy, 13(1), 13– 26.

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany, 58(2), 147–159.

Gamon, J. A., & Surfus, J. S. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. New Phytologist, 143(1), 105–117.

Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257–266.

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.

Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. Journal of Experimental Botany, 55(407), 2427–2436.

Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2017). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. Journal of Landscape Ecology, 11(1), 35–60.

Katsoulas, N., et al. (2016). Crop reflectance indices as water stress indicators in greenhouse- grown tomato under Mediterranean conditions. Biosystems Engineering, 151, 126–135.

Koirala, B. P., et al. (2022). Remote sensing in hydroponic and vertical farming: potentials and challenges. Agricultural Reviews, 43(2), 182–189.

Li, L., Zhang, Q., & Huang, D. (2014). A review of imaging techniques for plant phenotyping. Sensors, 14(11), 20078–20111.

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4), 358–371.

Padilla, F. M., Gallardo, M., & Thompson, R. B. (2014). Plant-based methods to optimize irrigation for vegetable crops in intensive Mediterranean agriculture. Agricultural Water Management, 146, 131–139.

Thenkabail, P. S., et al. (2004). Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. Remote Sensing of Environment, 91(2), 234–245.

Tzortzakis, N. G. (2010). Lettuce yield and nitrate content as affected by substrate composition and N-fertilization. Scientia Horticulturae, 123(3), 379–384.

Zarco-Tejada, P. J., & Ustin, S. L. (2001). Modeling canopy water content for carbon estimates from MODIS data at land EOS validation sites. Remote Sensing of Environment, 76(3), 282– 294.

Zarco-Tejada, P. J., et al. (2012). Remote sensing of environment. Remote Sensing of Environment, 117, 86–102

ΕΝΟΤΗΤΑ 2η

Γεωργικός εξοπλισμός, ρομποτικά συστήματα, αισθητήρες και αυτοματισμοί στη γεωργία

15. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΡΟΠΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΡΟΜΠΟΤ

Ν. Καρανίκας, Α. Μακρής , Ι. Γράβαλος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας- Αγροτεχνολογίας, Γαιόπολις, 41500, Λάρισα nkaranikas@uth.gr

Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση των ρομπότ στη γεωργία επιτάσσει την ανάπτυξη μεθόδων σχεδιασμού που ενισχύουν την ποιότητα, την αξιοπιστία και την ασφάλεια των συστημάτων αυτών. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Τρόπων και Επιπτώσεων Αστοχίας (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA) κατά τον σχεδιασμό ενός τροχοφόρου γεωργικού ρομπότ, με έμφαση στη δομή του μεταλλικού πλαισίου και του συστήματος ηλεκτρομηχανικής ανάρτησης. Μέσω ενός εικονικού πρωτοτύπου της πλατφόρμας του ρομπότ, το οποίο αναπτύχθηκε με λογισμικό CAD τρισδιάστατης σχεδίασης, εντοπίστηκαν κρίσιμες αστοχίες και αναθεωρήθηκαν σχεδιαστικά στοιχεία για τη βελτιστοποίηση της κατασκευής. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη συνεισφορά της μεθόδου FMEA στη μείωση των κινδύνων, στην αύξηση της δομικής αντοχής και στην αποτελεσματικότερη λειτουργία του γεωργικού ρομπότ σε συνθήκες πεδίου.

Λέξεις κλειδιά: ρομπότ, κινητή πλατφόρμα, αστοχία, αξιοπιστία, κατασκευή.

APPLICATION OF THE FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS METHOD IN THE DESIGN OF AGRICULTURAL ROBOTS

N. Karanikas*, A. Makris, I. Gravalos

University of Thessaly, Department of Agrotechnology, Gaiopolis, 41500, Larisa,
**nkaranikas@uth.gr*

Abstract

The increasing use of robots in agriculture requires design methods that enhance the quality, reliability, and operational safety of these systems. The purpose of this paper is to apply the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method to the design of a wheeled agricultural robot, with emphasis on the structure of the metal frame and the electromechanical suspension system. Through a virtual prototype of the robot platform, which was developed with 3D CAD software, critical failures were identified and design elements were revised to optimize the construction. The results confirm the contribution of the FMEA method to reducing risks, increasing structural strength and more effective operation of the agricultural robot in field conditions.

Keywords: robot, mobile platform, failure, reliability, manufacturing.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση των ρομπότ στη γεωργία δημιουργεί νέες απαιτήσεις όσον αφορά τον σχεδιασμό και την αξιοπιστία των συστημάτων αυτών. Ένα βασικό πρόβλημα που εντοπίζεται είναι η έλλειψη μιας δομημένης προσέγγισης στην αναγνώριση και πρόληψη πιθανών αστοχιών, ιδιαίτερα σε κρίσιμα υποσυστήματα όπως είναι το πλαίσιο, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το σύστημα ανάρτησης, το σύστημα τροφοδοσίας, καθώς και τα υποσυστήματα που περιλαμβάνουν τα ηλεκτρονικά και τους αισθητήρες των αυτόνομων γεωργικών ρομπότ. Η μέθοδος Ανάλυσης Τρόπων και Επιπτώσεων Αστοχίας (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA) προσφέρει ένα εργαλείο ανάλυσης των δυνητικών σημείων αστοχίας κατά το στάδιο του σχεδιασμού, με στόχο την ενίσχυση της απόδοσης και της ασφάλειας των ρομποτικών συστημάτων καθώς και της αξιόπιστης λειτουργίας τους.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εφαρμογή της μεθόδου FMEA στον σχεδιασμό ενός κινητού γεωργικού ρομπότ, εστιάζοντας στην κινητή πλατφόρμα, η οποία αποτελείται από το μεταλλικό πλαίσιο και το σύστημα ηλεκτρομηχανικής ανάρτησης, ώστε να διασφαλιστεί η αποτελεσματική και ασφαλής λειτουργία της σε πραγματικές συνθήκες πεδίου.

1. ΘΕΩΡΙΑ

Η FMEA είναι μια μέθοδος συστηματικής αναγνώρισης αστοχιών σε συστήματα ή υποσυστήματα, ταξινομώντας τις αστοχίες αυτές με βάση τη σοβαρότητα, τη συχνότητα εμφάνισης και την πιθανότητα ανίχνευσης. Χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές και μηχανολογικές εφαρμογές για τη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού με έμφαση στην ποιότητα και την αξιοπιστία (Stamatis, 2019). Στη γεωργική ρομποτική, η ανθεκτικότητα της πλατφόρμας και η δυναμική απόδοσή της είναι καθοριστικής σημασίας για την επιβίωση του ρομπότ σε δύσβατα, επικλινή και ανομοιογενή περιβάλλοντα. Η ευστάθεια είναι συνάρτηση του χαμηλού κέντρου βάρους και της κατανομής μάζας, ενώ η ροπή σχετίζεται με το σύστημα μετάδοσης κίνησης και την απόδοση των κινητήρων (Bekker, 1969).

Γενικά, έχουν καθιερωθεί τέσσερις κύριοι τύποι για τη FMEA. Οι τύποι αυτοί είναι:

- *System FMEA* (ονομάζεται και concept FMEA): Χρησιμοποιείται για την ανάλυση συστημάτων και υποσυστημάτων στο αρχικό στάδιο της σύλληψης και του σχεδιασμού. Μία system FMEA εστιάζει σε πιθανές καταστάσεις αστοχίας μεταξύ των διαφόρων λειτουργιών του συστήματος που προκαλούνται από σφάλματα. Περιλαμβάνει πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ συστημάτων και στοιχείων του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα: α) Μία πιθανή λίστα τρόπων αστοχίας ταξινομημένη με βάση τον Αριθμό Προτεραιότητας Κινδύνου (Risk Priority Number, RPN), β) Μία πιθανή λίστα λειτουργιών του συστήματος που θα μπορούσαν δυνητικά να εμφανίσουν πιθανές αστοχίες και γ) Μια πιθανή λίστα ενεργειών κατά τον σχεδιασμό με αποτέλεσμα την εξάλειψη των τρόπων αστοχίας και τη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης αυτών.

Τα οφέλη από την εφαρμογή μίας μελέτης system FMEA είναι τα εξής: α) Βοήθεια στην επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής λύσης σχεδιασμού ενός συστήματος, β) Βοήθεια στον καλύτερο προσδιορισμό περιττών σχεδιαστικών λύσεων, γ) Βοήθεια στον ορισμό της βάσης των διαγνωστικών διαδικασιών σε επίπεδο συστήματος, αυξάνοντας την πιθανότητα να ληφθούν υπόψη πιθανά προβλήματα και δ) Βοήθεια στον εντοπισμό πιθανών αποτυχιών του συστήματος και της αλληλεπίδρασής τους με άλλα συστήματα ή υποσυστήματα (Stamatis, 2019).

- *Design FMEA*: Χρησιμοποιείται για την ανάλυση προϊόντων πριν από την εισαγωγή τους στην παραγωγική διαδικασία. Μία μελέτη FMEA σχεδιασμού εστιάζει σε τρόπους αστοχίας που προκαλούνται εξαιτίας ελλείψεων κατά τον σχεδιασμό ενός προϊόντος.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα: α) Μια πιθανή λίστα τρόπων αστοχίας

ταξινομημένη από τον RPN, β) Μια πιθανή λίστα κρίσιμων ή και σημαντικών χαρακτηριστικών, γ) Μια πιθανή λίστα ενεργειών κατά τον σχεδιασμό με σκοπό τη μείωση των τρόπων αστοχίας και τη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης αυτών, δ) Μια πιθανή λίστα κατάλληλων μεθόδων δοκιμών και επιθεώρησης που θα οδηγήσουν σε αυξημένη πιθανότητα ανίχνευσης αστοχιών, ε) Μια πιθανή λίστα προτεινόμενων ενεργειών για τα κρίσιμα και σημαντικά χαρακτηριστικά του προϊόντος που θα αναδειχθούν από τη μελέτη.

Τα οφέλη της εφαρμογής μίας μελέτης Design FMEA είναι τα εξής: α) Βοήθεια στον καθορισμό προτεραιοτήτων για ενέργειες που έχουν σχέση με τη βελτίωση του σχεδιασμού του προϊόντος, β) Βοήθεια στην Τεκμηρίωση του σκεπτικού των αλλαγών που πρέπει να γίνουν, γ) Βοήθεια στην παροχή πληροφοριών που συμβάλουν στην επαλήθευση του σχεδιασμού του προϊόντος και των δοκιμών του, δ) Βοήθεια στον εντοπισμό των κρίσιμων ή σημαντικών χαρακτηριστικών στη φάση ανάπτυξης του προϊόντος, ε) Βοήθεια στην αξιολόγηση των απαιτήσεων σχεδιασμού και των εναλλακτικών λύσεων, στ) Βοήθεια στον εντοπισμό και εξάλειψη πιθανών ζητημάτων ασφάλειας και ζ) Βοήθεια στον εντοπισμό αστοχιών νωρίς στη φάση της ανάπτυξης του προϊόντος (Stamatis, 2019).

- *Process FMEA*: Χρησιμοποιείται για την ανάλυση διαδικασιών της κατασκευής και συναρμολόγησης. Μια μελέτη Process FMEA εστιάζει στους τρόπους αστοχίας που προκαλούνται από ελαττώματα κατά τη διαδικασία κατασκευής και συναρμολόγησης. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα: α) Μια πιθανή λίστα τρόπων αστοχίας ταξινομημένη από τον RPN, β) Μια πιθανή λίστα κρίσιμων ή και σημαντικών χαρακτηριστικών, γ) Μια πιθανή λίστα προτεινόμενων ενεργειών για τα κρίσιμα και σημαντικά χαρακτηριστικά του προϊόντος που θα αναδειχθούν από τη μελέτη.

Τα οφέλη της εφαρμογής μιας μελέτης Process FMEA είναι τα εξής: α) Βοήθεια στην ανάλυση της διαδικασίας κατασκευής ή συναρμολόγησης, β) Βοήθεια στον εντοπισμό ελλείψεων στη διαδικασία και παροχή ενός σχεδίου διορθωτικών ενεργειών, γ) Βοήθεια στον εντοπισμό των κρίσιμων ή και σημαντικών χαρακτηριστικών μιας διαδικασίας και βοήθεια στην ανάπτυξη σχεδίων ελέγχου αυτών, δ) Βοήθεια στον καθορισμό διορθωτικών ενεργειών που πρέπει να γίνουν και ε) Βοήθεια στην τεκμηρίωση του σκεπτικού των αλλαγών που πρέπει να γίνουν (Stamatis, 2019).

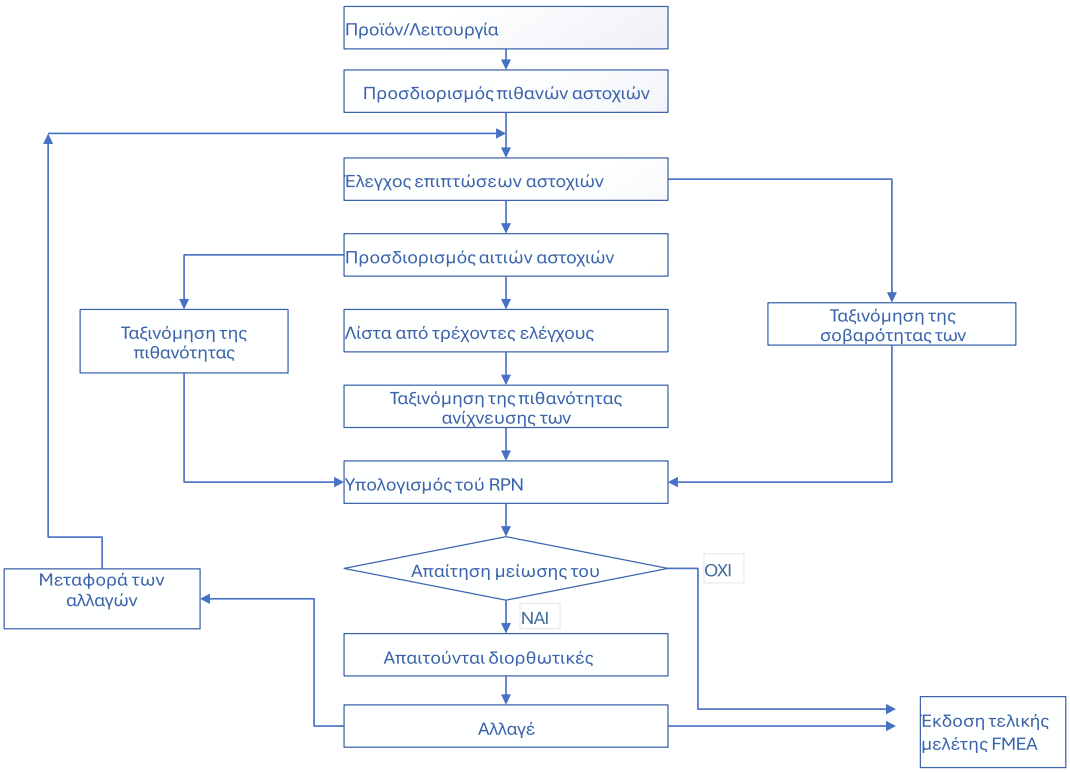
- *Service FMEA*: Χρησιμοποιείται για την ανάλυση διαφόρων υπηρεσιών πριν φτάσουν στον πελάτη. Μία μελέτη Service FMEA εστιάζει στους τρόπους αστοχίας στις διάφορες φάσεις της κάθε υπηρεσίας που προκαλούνται από ελλείψεις του συστήματος ή των διεργασιών της υπηρεσίας.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα: α) Μια πιθανή λίστα τρόπων αστοχίας ταξινομημένη από τον RPN, β) Μια πιθανή λίστα κρίσιμων ή σημαντικών εργασιών ή διεργασιών, γ) Μια πιθανή λίστα διεργασιών ή εργασιών που παρουσιάζουν καθυστέρηση ως αποτέλεσμα συμφόρησης, δ) Μια πιθανή λίστα για την εξάλειψη των σφαλμάτων κατά τη διεργασία της υπηρεσίας και ε) Μια πιθανή λίστα λειτουργιών παρακολούθησης του συστήματος-διεργασίας.

Τα οφέλη της μελέτης ServiceFMEA είναι τα εξής: α) Βοήθεια στην ανάλυση της ροής της εργασίας, β) Βοήθεια στην ανάλυση του συστήματος ή της διαδικασίας, γ) Βοήθεια στον εντοπισμό αποτυχιών των διαφόρων εργασιών, δ) Βοήθεια στον εντοπισμό κρίσιμων ή σημαντικών εργασιών και βοήθεια στην ανάπτυξη σχεδίων ελέγχου για αυτές, ε) Βοήθεια στον καθορισμό των δράσεων βελτίωσης κατά προτεραιότητα και στ) Βοήθεια στην τεκμηρίωση του σκεπτικού των αλλαγών που πρέπει να γίνουν (Stamatis, 2019).

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθείται είτε για τον σχεδιασμό ενός νέου προϊόντος είτε για μια νέα εφαρμογή ενός υπάρχοντος προϊόντος που χρειάζεται επανασχεδιασμό περιλαμβάνει τα εξής στάδια: α) Καθορισμός Συστήματος / Υποσυστήματος (καθορισμός της μονάδας ανάλυσης), β) Αναγνώριση λειτουργικών και μη λειτουργικών απαιτήσεων του σχεδιασμού σύμφωνα και με τα διεθνή πρότυπα, γ) Εφαρμογή της μεθόδου FMEA (Εικόνα 1): γ_1) Πιθανοί Τρόποι Αστοχίας (Failure Modes), γ_2) Επιπτώσεις Αστοχίας (Effects of Failure), γ_3) Προσδιορισμός Αιτίων Αστοχίας (Causes of Failure), γ_4) Υπάρχοντα Μέτρα Ελέγχου (Current Controls) (προσομοίωση σε CAD, πραγματικές δοκιμές), γ_5) Υπολογισμός RPN (RPN = Severity × Occurrence × Detection), γ_6) Προτεινόμενες Ενέργειες / Βελτιώσεις (τι μπορεί να γίνει για να μειωθεί ο RPN), γ_7) Εκ νέου Αξιολόγηση (new RPN) (μετά τις βελτιώσεις) και δ) Τεκμηρίωση και Επικοινωνία Αποτελεσμάτων (καταγραφή σε τεχνικά έγγραφα) (AIAG & VDA, 2017).



Εικόνα 1. Διάγραμμα ροής μιας μελέτης FMEA.

3.1 Καταγραφή λειτουργικών απαιτήσεων (Functional Requirements - FRs)

Σε ένα γεωργικό ρομπότ πρέπει να γίνεται καταγραφή των χαρακτηριστικών του, ώστε να επιτελεί τον σκοπό για τον οποίο σχεδιάστηκε. Η καταγραφή των λειτουργικών απαιτήσεων πρέπει να αφορά εκείνα τα χαρακτηριστικά του γεωργικού ρομπότ που καθορίζουν τον τρόπο που πρέπει να επιτελέσει την εργασία του με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

- *Λειτουργία και προσαρμογή σε μεταβαλλόμενο έδαφος*: α) Στιβαρό πλαίσιο, β) Σύστημα ανάρτησης για σταθερότητα σε λασπώδες, ανώμαλο, επικλινές ή χαλαρό έδαφος, γ) Σωστή κατανομή βάρους και χαμηλό κέντρο βάρους, δ) Ικανότητα μεταφοράς φορτίου διατηρώντας σταθερή ροπή σε δύσκολες εδαφικές συνθήκες, ε) Αντοχή σε υγρασία, σκόνη, και υψηλές θερμοκρασίες.
- *Αυτόνομη ή ημιαυτόνομη λειτουργία*: α) Δυνατότητα πλήρως αυτόνομης λειτουργίας ή απομακρυσμένου ελέγχου, β) Ασφαλής επαναφορά σε περίπτωση απώλειας σήματος ελέγχου.
- *Ανίχνευση και αποφυγή εμποδίων*: Ενσωμάτωση αισθητήρων (LiDAR, ραντάρ, κάμερες)

για αναγνώριση στατικών/κινητών εμποδίων.
- *Ανατροφοδότηση και παρακολούθηση*: α) Τηλεμετρία και συνεχής παρακολούθηση λειτουργικών παραμέτρων (θέση, ταχύτητα, θερμοκρασία), β) Προειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο.
- *Επαναφόρτιση ή τροφοδοσία*: α) Μηχανισμός αντικατάστασης ή φόρτισης συσσωρευτών (ηλεκτροκίνηση), β) Πρόβλεψη για ασφαλή πλήρωση με καύσιμο του συστήματος τροφοδοσίας (θερμικός κινητήρας).
- *Ευκολία συντήρησης*: α) Εύκολη πρόσβαση σε κρίσιμα μέρη (π.χ. φίλτρα), β) Ύπαρξη ηλεκτρονικού συστήματος διάγνωσης βλαβών.

3.2 Καταγραφή των μη λειτουργικών απαιτήσεων (Non Functional Requirements - NFRs)

Σε ένα γεωργικό ρομπότ πρέπει να γίνεται επίσης καταγραφή εκείνων των χαρακτηριστικών του, που ικανοποιούν τις ανάγκες του χρήστη-γεωργού (User Requirements). Οι ανάγκες αυτές προκύπτουν από την καθημερινή ενασχόληση του χρήστη- γεωργού και αποτελούν βασικά κριτήρια αποδοχής ενός ρομπότ.

- *Ασφάλεια χειριστή και παρευρισκόμενων*: α) Το ρομπότ όταν συναντά κινητά εμπόδια (π.χ. ανθρώπους ή ζώα) πρέπει να διακόπτει τη λειτουργία του ή να τα αποφεύγει, β) Το ρομπότ να διαθέτει φυσικούς και λογικούς φραγμούς (π.χ. ασφαλιστικούς διακόπτες, περιορισμό ταχύτητας κοντά σε ανθρώπους).
- *Ευκολία στη χρήση*: α) Φιλικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη (GUI), β) Απλές εντολές ενεργοποίησης/διακοπής λειτουργίας/προγραμματισμού.
- *Ελαχιστοποίηση του χρόνου εκπαίδευσης*: α) Το σύστημα πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από μη ειδικούς, β) Παροχή οδηγιών από εικονογραφημένα εγχειρίδια ή βίντεο.
- *Ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες*: α) Προστασία IP65 ή μεγαλύτερη σε ηλεκτρονικές διατάξεις (αποτροπή εισόδου νερού, σκόνης, λάσπης), β) Λειτουργία ηλεκτρονικών διατάξεων σε θερμοκρασίες από -10°C έως +45°C.
- *Αξιοπιστία και διαθεσιμότητα*: α) Χαμηλά ποσοστά εμφάνισης βλαβών και υψηλή διαθεσιμότητα (>95%), β) Ελάχιστος χρόνος εκτός λειτουργίας.
- *Συμβατότητα με υπάρχουσες πρακτικές*: α) Συμβατότητα με το σύστημα καλλιέργειας ή τις διαστάσεις του αγρού, β) Δυνατότητα συνεργασίας με άλλα μηχανήματα (π.χ. ελκυστήρες, ψεκαστικά μηχανήματα).

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι λειτουργικές απαιτήσεις (Functional Requirements - FRs), οι μη λειτουργικές απαιτήσεις (Non-Functional Requirements - NFRs) καθώς και οι ανάγκες του γεωργού-χρήστη. Αυτές αφορούν την απόδοση, συντηρησιμότητα, οικονομία, αντοχή σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες, και άλλες κρίσιμες απαιτήσεις του ρομπότ που δεν αφορούν άμεσα "το τι κάνει", αλλά "πώς το κάνει" και "πόσο καλά το κάνει" καθώς και επιπλέον χαρακτηριστικά που αφορούν την ευκολία χρήσης του.

3.3 Εφαρμογή μεθόδου FMEA

Για κάθε κρίσιμο υποσύστημα, όπως το μεταλλικό πλαίσιο, εντοπίστηκαν οι πιθανές αστοχίες. Για κάθε αστοχία υπολογίστηκε ο αριθμός RPN (Risk Priority Number) ως εξής:

$$RPN = S \times O \times D$$

όπου S είναι ο δείκτης σοβαρότητας (Severity), O είναι ο δείκτης εμφάνισης (Occurrence) και D είναι ο δείκτης ανίχνευσης (Detection). Οι τρεις αυτοί δείκτες λαμβάνουν τιμές με βάση μία κλίμακα αξιολόγησης 1-10 (Πίνακας 2) για κάθε παράμετρο και ανάλογα με την τιμή του δίνονται προτεραιότητες και αποφασίζονται οι λεγόμενες διορθωτικές ενέργειες.

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικός πίνακας λειτουργικών και μη λειτουργικών απαιτήσεων.

Κωδικός	**Κατηγορία**	**Απαίτηση**	**Πρότυπο/κριτήριο**
FR-01	Λειτουργική	Αυτόνομη λειτουργία με ασφαλή διακοπή λειτουργίας στην περίπτωση σφάλματος	ISO 18497:2018, ISO 25119
FR-02	Λειτουργική	Ανίχνευση/αποφυγή εμποδίων (αντικείμενα, άνθρωποι, ζώα)	ISO 13849-1, ISO 18497:2018
FR-03	Λειτουργική	Σταθερότητα σε επικλινές/ανώμαλο έδαφος	ISO 18497:2018
FR-04	Λειτουργική	Προστασία από περιβαλλοντικές επιδράσεις (IP65+)	ISO 20653
FR-05	Λειτουργική	Τηλεμετρία και καταγραφή δεδομένων	ISO 25119
FR-06	Λειτουργική	Εύκολη πρόσβαση για εργασίες συντήρησης	ISO 12100
FR-07	Λειτουργική	Χαμηλό κέντρο βάρους για αυξημένη σταθερότητα	ISO 18497:2018
NFR-03	Μη Λειτουργική	Υγιεινή και μέτρα ασφάλειας (εκπομπές ρύπων, θόρυβος εντός επιτρεπόμενων ορίων)	ISO 21542, Machinery Directive 2006/42/EC
NFR-04	Μη Λειτουργική	Εύκολη αναβάθμιση λογισμικού και υλικού	Σχεδιαστική απαίτηση
UR-01	Χρήστη	Ευχρηστία (απλή διεπαφή, οδηγίες, ειδοποιήσεις)	ISO 9241-210
UR-03	Χρήστη	Συμβατότητα με υπάρχοντα γεωργικά μηχανήματα	ISO 18497:2018
UR-04	Χρήστη	Εύκολη μεταφορά και μετακίνηση	ISO 18497:2018

Πίνακας 2. Παράμετροι FMEA για τον υπολογισμό του RPN (Stamatis, 2019; Salah et al., 2023).

Σοβαρότητα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(S)	Καμμία								Πολύ επικίνδυνη	
Εμφάνιση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(O)	Ελάχιστη								Πολύ υψηλή	
Ανίχνευση	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(D)	Σχεδόν βέβαιη								Απίθανη	

Στην Εικόνα 2 φαίνεται το εικονικό μοντέλο της πλατφόρμας του ρομπότ, το οποίο δίνει τη δυνατότητα να μελετηθούν: η βελτιστοποίηση, συντηρησιμότητα, επεκτασιμότητα και προσαρμοστικότητά της σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Η πλατφόρμα συγκροτείται: α) το πλαίσιο, που αποτελείται από μεταλλικούς κοιλοδοκούς συγκολλημένους μεταξύ τους, και β) το σύστημα ηλεκτρομηχανικής ανάρτησης, που αποτελείται από τέσσερις ηλεκτρικούς γραμμικούς ενεργοποιητές. Οι τεχνικές απαιτήσεις για το μεταλλικό πλαίσιο είναι: στιβαρότητα, χαμηλό βάρος, συγκέντρωση του κέντρου βάρους στο χαμηλότερο δυνατό σημείο, απουσία διαβρώσεων, έλλειψη παραμόρφωσης, ρωγμών και θραύσης, εργονομικός σχεδιασμός, εύκολη εγκατάσταση διαφόρων εξαρτημάτων (π.χ. ηλεκτρονικών διατάξεων, καμερών). Οι τεχνικές απαιτήσεις για το σύστημα ηλεκτρομηχανικής ανάρτησης είναι: ακρίβεια θέσης εντός ανοχών, λειτουργία εντός παραμέτρων ταχύτητας, ευθυγράμμιση υπό φορτίο, γραμμική κίνηση με καθορισμένη δύναμη.

Εικόνα 2. Το εικονικό μοντέλο της πλατφόρμας του ρομπότ.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση FMEA, που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3, επιτρέπει την πρόβλεψη και τον μετριασμό των κινδύνων, ώστε να διασφαλιστεί ότι η πρωτότυπη ρομποτική πλατφόρμα θα λειτουργεί με υψηλή αξιοπιστία και ασφάλεια σε μεταβαλλόμενες συνθήκες πεδίου.

Για τον πρώτο δυνητικό τρόπο αστοχίας "Δομική Αστοχία", το αποτέλεσμα αυτής της αστοχίας προσδιορίστηκε ως "Ρωγμές, θραύση ή κάμψη λόγω τάσης ή φορτίου" και στη συνέχεια η αιτία προσδιορίστηκε ως "Κόπωση Υλικού". Αυτή η λειτουργία αστοχίας βαθμολογείται με βάση τρία κριτήρια: το κριτήριο σοβαρότητας αστοχίας (S), το κριτήριο πιθανότητας εμφάνισης (O) και το κριτήριο ανιχνευσιμότητας (D). Σε κάθε κριτήριο αποδίδεται μια βαθμολογία από 1 έως 10: πολύ χαμηλή (1), χαμηλή (2 έως 3), μέτρια (4 έως

5), συχνή (6 έως 7), υψηλή (8 έως 9) και πολύ υψηλή (10). Οι βαθμολογίες για τον δυνητικό τρόπο αστοχίας "Δομική Αστοχία" είναι S = 8, O = 5 και D = 5. Αυτή η βαθμολογία χρησιμοποιείται για να ληφθεί ο Αριθμός Προτεραιότητας Κινδύνου (RPN), S × O × D = RPN, όπου RPN είναι 200. Ένας RPN πάνω από 100 απαιτεί παρέμβαση για τη βελτίωση του πρωτοτύπου. Σε αυτήν την περίπτωση, οι συνιστώμενες ενέργειες είναι "Ενίσχυση του πλαισίου με χρήση ανθεκτικότερων κραμάτων".

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης FMEA παρουσιάζονται συνοπτικά στις Εικόνες 3 και 4, όπου φαίνεται ότι μετά τις απαιτούμενες διορθωτικές ενέργειες που προτείνει η μελέτη μειώθηκε σημαντικά ο RPN για κάθε δυνητική αστοχία και μάλιστα σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην χρειάζονται επιπρόσθετες διορθωτικές ενέργειες. Οι πορτοκαλί ράβδοι αντιπροσωπεύουν τον RPN μετά τις απαιτούμενες διορθωτικές ενέργειες που προτείνει η μελέτη, ενώ οι μπλε ράβδοι αναφέρονται στις αρχικές τιμές του RPN. Οι πιο κρίσιμες τιμές για το μεταλλικό πλαίσιο εντοπίζονται στη "Δομική Αστοχία" και στα "Ελαττώματα Υλικού", των οποίων ο RPN είναι 200 και 256 αντίστοιχα. Μέσω των βελτιωτικών ενεργειών στο εικονικό μοντέλο της πλατφόρμας, ο RPN μειώθηκε σε 80 και 48, καταδεικνύοντας μια αξιοσημείωτη πρόοδο στη βελτιστοποίηση και την ανθεκτικότητα του σχεδιασμού. Οι πιο κρίσιμες τιμές για τους ηλεκτρικούς γραμμικούς ενεργοποιητές της ηλεκτρομηχανικής ανάρτησης εντοπίζονται στις

"Μηχανικές Βλάβες Οδοντωτών Τροχών, Τριβέων και Κοχλία" καθώς και στην "Εσφαλμένη Εγκατάσταση", των οποίων ο RPN είναι 192 και 240 αντίστοιχα. Μέσω των βελτιωτικών ενεργειών στο εικονικό μοντέλο της πλατφόρμας, ο RPN μειώθηκε σε 72 και 72, καταδεικνύοντας επίσης μια σημαντική πρόοδο στη βελτιστοποίηση και την ανθεκτικότητα του σχεδιασμού.

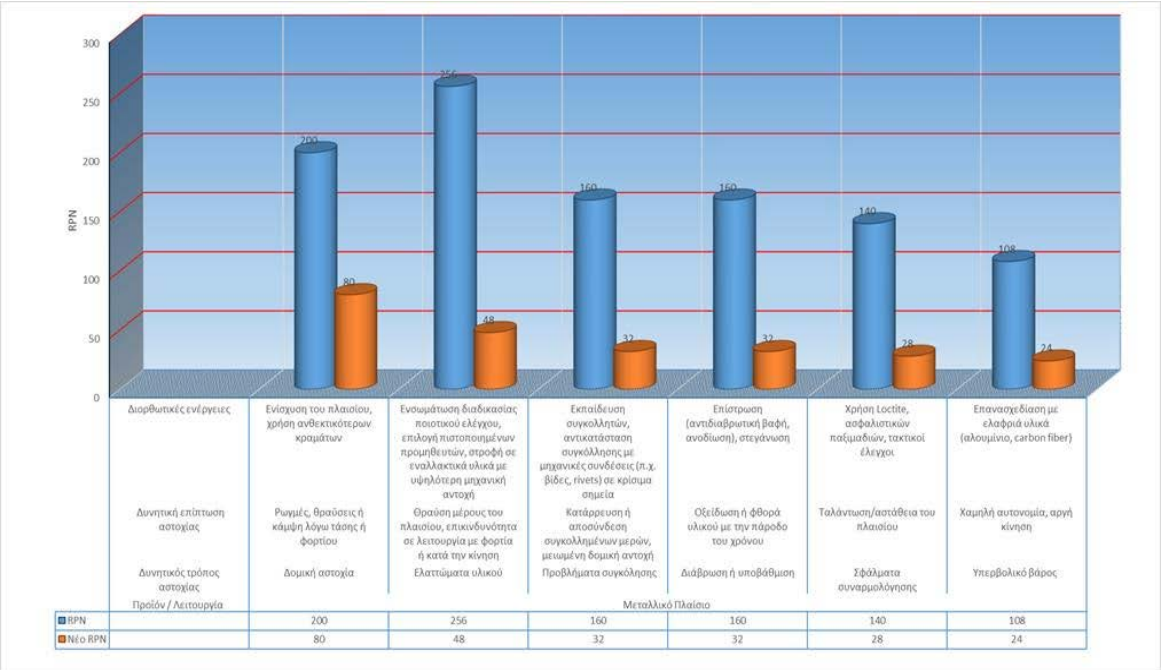
Πίνακας 3. Ανάλυση FMEA για την πλατφόρμα του ρομπότ.

Προϊόν / Λειτουργία	Δυνητικός τρόπος αστοχίας	Δυνητική επίπτωση αστοχίας	SEV	Δυνητική αιτία αστοχίας	OCC	Εργαλεία/τεχνικές για την ανίχνευση των αιτιών	DET	RPN	Διορθωτικές ενέργειες	Νέο SEV	Νέο OCC	Νέο DET	Νέο RPN
Μεταλλικό Πλαίσιο	Δομική αστοχία	Ρωγμές, θραύσεις ή κάμψη λόγω τάσης ή φορτίου	8	Κόπωση υλικού	5	Οπτικός έλεγχος	5	200	Ενίσχυση του πλαισίου, χρήση ανθεκτικότερων κραμάτων	8	2	5	80
	Ελαττώματα υλικού	Θραύση μέρους του πλαισίου, επικινδυνότητα σε λειτουργία με φορτία ή κατά την κίνηση	8	Ανεπαρκής έλεγχος υλικών, χρήση υποδεέστερης ποιότητας υλικών	8	Οπτικός έλεγχος, μη καταστροφικός έλεγχος, πιστοποίηση προμηθευτών	4	256	Ενσωμάτωση διαδικασίας ποιοτικού ελέγχου,επιλογή πιστοποιημένων προμηθευτών, στροφή σε εναλλακτικά υλικά με υψηλότερη μηχανική αντοχή	8	2	3	48
	Προβλήματα συγκόλλησης	Κατάρρευση ή αποσύνδεση συγκολλημένων μερών, μειωμένη δομική αντοχή	8	Κακή τεχνική συγκόλλησης, χρήση ακατάλληλων υλικών προς συγκόλληση	5	Οπτικός έλεγχος, δοκιμές αντοχής σε κόπωση ή στατική φόρτιση	4	160	Εκπαίδευση συγκολλητών, αντικατάσταση συγκόλλησης με μηχανικές συνδέσεις (π.χ. βίδες, rivets) σε κρίσιμα σημεία	8	2	2	32
	Διάβρωση ή υποβάθμιση	Οξείδωση ή φθορά υλικού με την πάροδο του χρόνου	8	Λειτουργία σε όξινο περιβάλλον με αυξημένα επίπεδα υγρασίας, ακατάλληλη προστασία	5	Επιθεώρηση επιφανειών, έλεγχος υγρασίας	4	160	Επίστρωση (αντιδιαβρωτική βαφή, ανοδίωση), στεγάνωση	8	2	2	32
	Σφάλματα συναρμολόγησης	Ταλάντωση/αστάθεια του πλαισίου	7	Εγκατάσταση λανθασμένων εξαρτημάτων ή χαλαρές συνδέσεις	5	Έλεγχος ροπής σύσφιξης, χρήση δείκτη ροπής	4	140	Χρήση Loctite, ασφαλιστικών παξιμαδιών, τακτικοί έλεγχοι	7	2	2	28
	Υπερβολικό βάρος	Χαμηλή αυτονομία, αργή κίνηση	6	Σχεδιασμός χωρίς βελτιστοποίηση βάρους	6	Ανάλυση CAD/CAE, ζύγισμα τελικού πλαισίου	3	108	Επανασχεδίαση με ελαφριά υλικά (αλουμίνιο, carbon fiber)	6	2	2	24
Γραμμικοί ηλεκτρικοί ενεργοποιητές συστήματος ανάρτησης	Μη λειτουργία (πλήρης αστοχία)	Ο ενεργοποιητής δεν επεκτείνεται/συρρικνώνεται – απώλεια κίνησης στο ρομπότ (π.χ. αδυναμία ανύψωσης)	9	Καμένη περιέλιξη κινητήρα, Βραχυκύκλωμα/ανοιχτό κύκλωμα, Εσωτερική φθορά ή κατάρρευση μηχανισμού	4	Μέτρηση ρεύματος, Έλεγχος τάσης, Οπτικός έλεγχος	3	108	Εγκατάσταση προστασίας ρεύματος (ασφάλειες), Χρήση ενεργοποιητή υψηλότερης αξιοπιστίας	9	2	2	36
	Υπερθέρμανση	Πρόωρη φθορά κινητήρα	8	Υπερφόρτωση (ανυψώνει μεγαλύτερο βάρος από το επιτρεπόμενο), Συνεχής λειτουργία	4	Θερμικός αισθητήρας, Μέτρηση κατανάλωσης ρεύματος	4	128	Χρήση κατάλληλου duty cycle (π.χ. 25%), Τοποθέτηση αισθητήρα θερμοκρασίας με auto-cutoff	8	2	2	32
	Μηχανικές βλάβες: οδοντωτών τροχών, τριβέων, κοχλία	Ακανόνιστη κίνηση ή απώλεια λειτουργίας ενεργοποιητή	8	Φθορά με την πάροδο του χρόνου, ειδικά λόγω συχνής χρήσης - Εφαρμογή υπερβολικών πλευρικών φορτίων	6	Μηνύματα σφάλματος ή προειδοποιήσεις από το σύστημα ελέγχου	4	192	Επιλογή ενεργοποιητών υψηλής ποιότητας - Προληπτική συντήρηση	8	3	3	72
	Βλάβες αισθητήρων ή συσκευών ανάδρασης	Οι αισθητήρες δεν παρέχουν ακριβή ανάδραση σχετικά με τη θέση του ενεργοποιητή. Η δυσλειτουργία των αισθητήρων μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή θέση	8	Βλάβη ποτενσιόμετρων ή κωδικοποιητών	5	Μηνύματα σφάλματος ή προειδοποιήσεις από το σύστημα ελέγχου	4	160	Επιλογή αισθητήρων υψηλής ποιότητας - Σύστημα διάγνωσης επί του οχήματος	8	4	2	64
	Εσφαλμένη εγκατάσταση	Αδυναμία κίνησης - Ο ενεργοποιητής ενδέχεται να μην κινείται καθόλου ή να κινείται ακανόνιστα.	8	Ανεπαρκής στήριξη ή χαλαρές συνδέσεις εμποδίζουν την κίνηση του ενεργοποιητή, προκαλώντας ενδεχομένως ζημιά ή καταπόνηση του κινητήρα	5	Έλεγχος για ορατά σημάδια ζημιάς, όπως χαλαρές συνδέσεις	6	240	Προληπτική συντήρηση	8	3	3	72

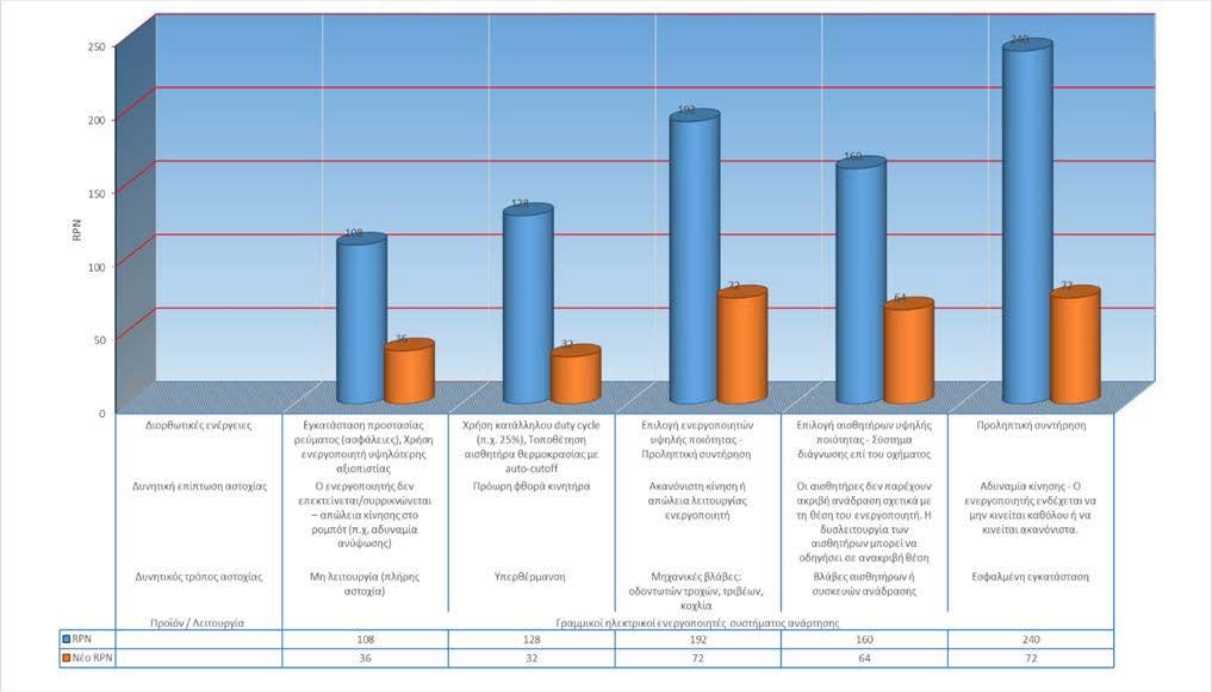
Έπειτα από τον επανασχεδιασμό της πλατφόρμας με τη συνδρομή λογισμικού CAD, επιτεύχθηκε μείωση του συνολικού βάρους κατά 55%, μέσω της αξιοποίησης κραμάτων αλουμινίου υψηλής αντοχής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, την αύξηση της αυτονομίας του ρομποτικού συστήματος και τον περιορισμό των απαιτήσεων ροπής κατά την κίνηση, επιτρέποντας την ενσωμάτωση μικρότερων και ενεργειακά αποδοτικότερων ηλεκτροκινητήρων.

Το κράμα αλουμινίου 6061-T6, το οποίο επιλέχθηκε ως υλικό κατασκευής, σχηματίζει φυσικά ένα προστατευτικό στρώμα οξειδίου στην επιφάνειά του. Ως εκ τούτου, δεν απαιτείται πρόσθετη επιφανειακή επεξεργασία, όπως βαφή ή γαλβανισμός, προσφέροντας αφενός υψηλή αντιδιαβρωτική προστασία και αφετέρου μείωση του κόστους παραγωγής λόγω της απουσίας

επιπρόσθετων διαδικασιών επικάλυψης. Παρά το γεγονός ότι το αλουμίνιο 6061-T6 παρουσιάζει χαμηλότερη ελαστική ακαμψία σε σύγκριση με τον χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στο αρχικό πρωτότυπο, ο νέος σχεδιασμός, βασισμένος στην αρχή της τριγωνικής ενίσχυσης (truss design), εξασφαλίζει βελτιωμένη κατανομή φορτίων και ενισχυμένη γεωμετρική ακαμψία. Κατά συνέπεια, επιτυγχάνεται αυξημένη συνολική δομική ακαμψία, παρά τη χρήση ελαφρύτερου υλικού (Zhang et al., 2014).



Εικόνα 3. Ανάλυση αποτελεσμάτων μελέτης FMEA στο μεταλλικό πλαίσιο με βάση τη βελτίωση του RPN.



Εικόνα 4. Ανάλυση αποτελεσμάτων μελέτης FMEA στους ηλεκτρικούς γραμμικούς ενεργοποιητές με βάση τη βελτίωση του RPN.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της μεθόδου σχεδιασμού FMEA για την ανάπτυξη της πρωτότυπης ρομποτικής πλατφόρμας αποδείχθηκε μια αποτελεσματική διαδικασία. Αυτή η προσέγγιση πέτυχε τον στόχο της ανάλυσης, εντοπίζοντας και ιεραρχώντας τις κατασκευαστικές ανάγκες ώστε να μεταφραστούν σε ακριβείς τεχνικές προδιαγραφές.

Οι προδιαγραφές-στόχοι επιτεύχθηκαν αποτελεσματικά μέσω της δημιουργίας ενός εικονικού τρισδιάστατου μοντέλου που αναπτύχθηκε με τη χρήση λογισμικού CAD, όπως: μειωμένο βάρος, στιβαρή κατασκευή, βελτιωμένη κατανομή φορτίων και ενισχυμένη γεωμετρική ακαμψία. Αυτά τα επιτεύγματα επικυρώνουν τη δημιουργία του εικονικού πρωτοτύπου και αντιμετωπίζουν άμεσα τις απαιτήσεις βάρους, ροπής και μεγαλύτερης αυτονομίας, ευθυγραμμιζόμενα με τους στόχους που έχουν τεθεί για τη βελτίωση της ποιότητας και της αξιοπιστίας του σχεδιασμού της ρομποτικής πλατφόρμας.

Η λύση, που ορίστηκε στη φάση της σύλληψης της ιδέας και αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας τον πίνακα ανάλυσης, ξεχωρίζει για την υψηλή αξιοπιστία της όσον αφορά το μεταλλικό πλαίσιο και το σύστημα ηλεκτρομηχανικής ανάρτησης της πλατφόρμας. Αυτή η λύση επιβεβαιώνει την εγκυρότητα της μεθοδολογίας για την πρόβλεψη και τον εντοπισμό σφαλμάτων μέσω της ανάλυσης FMEA.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AIAG & VDA, 2017. *Failure Mode and Effect Analysis- FMEA.* FMEA Handbook.

Bekker, M.G., 1969. *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*. University of Michigan Press.

Carlson, C.S., 2012. *Effective FMEAs: achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis*. John Wiley & Sons.

Salah, B., Alnahhal, M., Ali, M., 2023. *Risk prioritization using a modified FMEA analysis in industry 4.0*. Journal of Engineering Research, 11(4), 460-468.

Stamatis, D.H., 2019. *Risk management using failure mode and effect analysis (FMEA)*. Quality Press.

Zhang, D., Huang, Y., Zhao, Q., Li, F., Li, F., Gao, Y. (2014). *Structural Performance of a Hybrid FRP-Aluminum Modular Triangular Truss System Subjected to Various Loading Conditions*. The scientific world journal, 615927.

16. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΠΙΒΛΑΒΩΝ ΕΝΤΟΜΩΝ

Γ. Κατρανάς, Ι. Γράβαλος, Β. Λιάκος, Α. Μακρής, Ι. Γρηγοριάδης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας-Αγροτεχνολογίας, Γαιόπολις, 41500, Λάρισα, gekatranas@uth.gr

Περίληψη

Η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης (ΤΝ) για την αποτελεσματική διαχείριση των επιβλαβών εντόμων στις γεωργικές καλλιέργειες προϋποθέτει ελεγχόμενες και επαναλήψιμες συνθήκες αξιολόγησης των διαφόρων αλγορίθμων και μοντέλων. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε ένα καρτεσιανό ρομποτικό σύστημα, ειδικά σχεδιασμένο για εργαστηριακή χρήση. Το σύστημα επιτρέπει την ακριβή και ελεγχόμενη κίνηση οπτικής μονάδας κάμερας πάνω από τα φυτά, προσφέροντας ένα ελεγχόμενο περιβάλλον για δοκιμή και αξιολόγηση αλγορίθμων ΤΝ. Τα αρχικά πειράματα έδειξαν ότι το ρομποτικό σύστημα λειτουργεί με αξιοπιστία και σταθερότητα, παρέχοντας ακρίβεια και ταχύτητα που καλύπτουν τις ανάγκες ενός ευρέος φάσματος εφαρμογών. Πρόκειται για μια πρακτική και οικονομική λύση για την εργαστηριακή αξιολόγηση αλγορίθμων ΤΝ στον τομέα της γεωργίας, ενώ μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί και σε νέες ερευνητικές ανάγκες στο μέλλον.

Λέξεις κλειδιά: έξυπνη γεωργία, ρομπότ, τεχνητή νοημοσύνη, φυτοπροστασία.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A CARTESIAN ROBOTIC SYSTEM FOR THE LABORATORY EVALUATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS IN PEST MANAGEMENT

G. Katranas*, I. Gravalos, V. Liakos, A. Makris, I. Grigoriadis

University of Thessaly, Department of Agrotechnology, Gaiopolis, 41500, Larisa,
gekatranas@uth.gr

Abstract

The use of artificial intelligence (AI) for the effective management of pests in agricultural crops requires controlled and repeatable conditions for evaluating the various algorithms and models. In this context, a Cartesian robotic system was developed, specifically designed for laboratory use. The system allows for the precise and controlled movement of digital camera over plants, offering a controlled environment for testing and evaluating AI algorithms. Initial experiments showed that the robotic system operates reliably and stably, providing accuracy and speed that cover the needs of a wide range of applications. This is a practical and economical solution for the laboratory evaluation of AI algorithms in the agricultural sector, while it can easily be adapted to new research needs in the future.

Keywords: smart agriculture, robots, artificial intelligence, crop protection.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για τρόφιμα παγκοσμίως, σε συνδυασμό με τη μείωση των διαθέσιμων φυσικών πόρων και την επιτακτική ανάγκη υιοθέτησης βιώσιμων πρακτικών παραγωγής, καθιστούν επιβεβλημένη την ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογικών εργαλείων και μεθόδων στον γεωργικό τομέα. Η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών αποσκοπεί στη διασφάλιση της επάρκειας και της ποιότητας των παραγόμενων γεωργικών προϊόντων. Οι σύγχρονες τεχνολογίες στη γεωργία περιλαμβάνουν αισθητήρες, αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και ρομποτικά συστήματα, που επιτρέπουν την αυτόματη συλλογή και ανάλυση δεδομένων, την παρακολούθηση των καλλιεργειών και την εκτέλεση εργασιών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Αισθητήρες και κάμερες που συνδέονται στο διαδίκτυο παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση μιας καλλιέργειας, ενώ η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των δεδομένων και την έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών, επιβλαβών εντόμων ή άλλων προβλημάτων. Ρομποτικά συστήματα εφοδιασμένα με συστήματα μηχανικής όρασης και πλοήγησης είναι ικανά να εκτελούν εργασίες όπως η σπορά, η εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων και η συγκομιδή, μειώνοντας την ανάγκη για ανθρώπινη εργασία. Ο συνδυασμός όλων αυτών των τεχνολογιών οδηγεί στην ανάπτυξη "έξυπνων" γεωργικών λύσεων, οι οποίες αυξάνουν την αποδοτικότητα, μειώνουν τις απώλειες και συμβάλλουν στη βέλτιστη χρήση των φυσικών πόρων.

Τα επιβλαβή έντομα (παράσιτα) αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες μείωσης της παραγωγής και υποβάθμισης της ποιότητας των παραγόμενων γεωργικών προϊόντων, με άμεσες οικονομικές συνέπειες για τους παραγωγούς. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού προϋποθέτει την ακριβή αναγνώριση των εντόμων αυτών, για την εφαρμογή στοχευμένων και κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου. Ωστόσο, η αναγνώριση των επιβλαβών εντόμων δεν είναι μία εύκολη διαδικασία, δεδομένου ότι πολλά από αυτά τα είδη παρουσιάζουν μορφολογικές ομοιότητες.

Παραδοσιακά, η διαδικασία αυτή βασίζεται κυρίως στην εμπειρογνωμοσύνη των παραγωγών, οι οποίοι μπορούν να προσδιορίσουν με σχετική ακρίβεια το είδος και να αποφασίσουν για τις κατάλληλες μεθόδους αντιμετώπισης. Τα τελευταία χρόνια, η πρόοδος της τεχνητής νοημοσύνης στον γεωργικό τομέα έχει προσφέρει νέες δυνατότητες, διευκολύνοντας την αναγνώριση εντόμων με αυξημένη ταχύτητα και ακρίβεια. Η τεχνητή νοημοσύνη, αξιοποιώντας προηγμένες τεχνικές μηχανικής μάθησης και επεξεργασίας εικόνας, αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο για την υποστήριξη των παραγωγών και τη βελτιστοποίηση της φυτοπροστασίας.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός καρτεσιανού ρομποτικού συστήματος σταθερής βάσης, για εφαρμογές ανίχνευσης και αναγνώρισης εντόμων, που αξιοποιεί βηματικούς κινητήρες και συστήματα μετάδοσης της κίνησης σε τρεις ορθογώνιους άξονες για την ακριβή και επαναλαμβανόμενη μετακίνηση οπτικής μονάδας κάμερας. Η σταθερή βάση παρέχει αυξημένη μηχανική ακαμψία και σταθερότητα, επιτρέποντας τη λήψη υψηλής ποιότητας εικόνων χωρίς θόρυβο από κραδασμούς. Ενσωματωμένες μονάδες μηχανικής όρασης, σε συνδυασμό με αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης, επιτρέπουν την αυτόματη αναγνώριση των μορφολογικών χαρακτηριστικών διαφόρων ειδών εντόμων, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ελάχιστες οπτικές διαφορές μεταξύ τους. Το σύστημα μπορεί να λειτουργεί σε συνθήκες πεδίου ή εργαστηρίου, παρέχοντας γρήγορη, αξιόπιστη και μη καταστρεπτική μέθοδο ταυτοποίησης, η οποία υποστηρίζει στοχευμένες και αποτελεσματικές στρατηγικές φυτοπροστασίας.

2. ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η αναγνώριση και ταξινόμηση επιβλαβών εντόμων σε καλλιέργειες όπως είναι το καλαμπόκι, το σιτάρι, η σόγια, κ.ά. είναι πιο δύσκολη από την γενική ταξινόμηση αντικειμένων, λόγω της υψηλής ομοιότητας εμφάνισης μεταξύ των διαφόρων ειδών εντόμων. Οι Wang et al. (2012) σχεδίασαν ένα σύστημα αυτόματης αναγνώρισης και ταξινόμησης των εντόμων από ψηφιακές εικόνες. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN) και μια μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (SVM) ως μεθόδους για τις δοκιμές αναγνώρισης. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ταξινόμησης σε εννέα κοινές τάξεις και υποτάξεις με το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, το σύστημα λειτούργησε με καλή σταθερότητα και ακρίβεια που έφτασε το 93%. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που χρησιμοποίησαν τη μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης βελτιώθηκαν περαιτέρω ως προς την ακρίβεια.

Οι Xie et al. (2015) για να βελτιώσουν την ακρίβεια της ταξινόμησης, ανέπτυξαν ένα σύστημα αναγνώρισης εντόμων χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές αραιής αναπαράστασης πολλαπλών εργασιών (multiple-task sparse representation) και μάθησης πολλαπλών πυρήνων (multiple-kernel learning, MKL). Καθώς τα χαρακτηριστικά των εντόμων συμβάλλουν διαφορετικά στην ταξινόμησή τους, η τεχνική αραιής αναπαράστασης πολλαπλών εργασιών μπορεί να συνδυάσει πολλαπλά χαρακτηριστικά των εντόμων για να βελτιώσει την απόδοση αναγνώρισης. Αντί της χρήσης χειροποίητων περιγραφέων, υιοθετήθηκε η ιδέα για ιστογράμματα αραιής κωδικοποίησης για την αναπαράσταση των εντόμων, έτσι ώστε τα ακατέργαστα χαρακτηριστικά (π.χ. χρώμα, σχήμα και υφή) να μπορούν να ποσοτικοποιηθούν αποτελεσματικότερα. Επιπλέον, προτάθηκε η μέθοδος MKL για την καλύτερη συγχώνευση πολλαπλών χαρακτηριστικών. Το προτεινόμενο μοντέλο μάθησης μπορεί να βελτιστοποιηθεί αποτελεσματικά βελτιστοποιώντας από κοινού τα βάρη των πυρήνων. Πειραματικά αποτελέσματα σε 24 κοινά είδη επιβλαβών εντόμων των καλλιεργειών έδειξαν ότι η προτεινόμενη μέθοδος αποδίδει καλά όσον αφορά την ταξινόμησή τους.

Οι Deng et al. (2020) παρουσιάζουν έναν αλγόριθμο κατάτμησης εικόνων για τρεις κύριες ασθένειες και εχθρούς του αραβοσίτου, συγκεκριμένα τον άνθρακα του αραβοσίτου (maize smut), τον άνθρακα κεφαλής του αραβοσίτου (maize head smut) και τη σκωρίαση του αραβοσίτου (maize rust). Το υπόβαθρο κατά την επεξεργασία των εικόνων, αντικαταστάθηκε μέσω ενός βελτιωμένου αλγορίθμου μονοσταδίου αποκοπής (one-time cutting algorithm). Με την προσαρμοστική συνδυαστική στάθμιση, η πληροφορία βάθους και η πληροφορία προεξοχών (saliency information) ενσωματώνονται στο χρωματικό μοντέλο απομόνωσης (grabbing color model). Ο βελτιωμένος αλγόριθμος αυξάνει σημαντικά την αποδοτικότητα και την ακρίβεια της διαδικασίας κατάτμησης εικόνας, επιτυγχάνοντας τον αποτελεσματικό διαχωρισμό των προσβεβλημένων περιοχών σε εικόνες προσβολών και ασθενειών του αραβοσίτου, με υψηλό ποσοστό αναγνώρισης. Επιπλέον, παρουσιάζει ισχυρή προγνωστική ικανότητα, η οποία επιβεβαιώθηκε μέσω πρακτικών δοκιμών.

Οι Kasinathan et al. (2021) διεξήγαγαν πειράματα για την ταξινόμηση εντόμων σε κατηγορίες, χρησιμοποιώντας τα σύνολα δεδομένων των Wang και Xie με βάση τα χαρακτηριστικά του σχήματος και εφαρμόζοντας τεχνικές μηχανικής μάθησης όπως ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN), μία μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (SVM), k-πλησιέστερους γείτονες (KNN), τον ταξινομητή Naive Bayes (NB) και το μοντέλο ενός συνελικτικού νευρωνικού δικτύου (CNN). Το υψηλότερο ποσοστό ταξινόμησης 91,5% και 90% επιτεύχθηκε με το μοντέλο CNN.

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το ρομποτικό σύστημα αξιολόγησης αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης για τη διαχείριση επιβλαβών εντόμων υλοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Αρχικά πραγματοποιήθηκε η αναλυτική μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή του καρτεσιανού ρομποτικού βραχίονα και σε δεύτερο χρόνο πραγματοποιήθηκε η αξιολόγησή του. Για την αξιολόγησή του αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε ένα μοντέλο αναγνώρισης και ταξινόμησης των επιβλαβών εντόμων με βάση τα εξαγόμενα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους.

3.1 Περιγραφή καρτεσιανού ρομποτικού βραχίονα

Ολόκληρο το σύστημα του καρτεσιανού βραχίονα είναι τοποθετημένο σε μια σταθερή μεταλλική βάση όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Έχει τρεις γραμμικούς άξονες X, Y και Z. Ο άξονας Z καταλήγει σε ένα gimbal τριών αξόνων. Στο gimbal είναι τοποθετημένη μία οπτική μονάδα κάμερας, για να λαμβάνει ψηφιακές εικόνες καθώς κινείται πάνω από τα φυτά.

Εικόνα 1. Καρτεσιανό ρομποτικό σύστημα για την εργαστηριακή αξιολόγηση αλγορίθμων τεχνητής στη διαχείριση επιβλαβών εντόμων.

Κατά τον σχεδιασμό του καρτεσιανού βραχίονα, υιοθετήσαμε τις εξής τεχνικές προδιαγραφές: α) χώρος εργασίας 1,5×1,2×1,0 m, β) γραμμική ταχύτητα 5 mm/s κατά μήκος των τριών αξόνων X, Y και Z, γ) γωνιακή ταχύτητα 3°/s στους άξονες (roll, pitch και yaw), δ) ικανότητα φορτίου 2,5 kg, ε) έξι βαθμούς ελευθερίας (DoF), στ) εύκολη συναρμολόγηση/αποσυναρμολόγηση για τη μεταφορά σε οποιαδήποτε τοποθεσία.

Ο καρτεσιανός ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από τρία κύρια υποσυστήματα: κινητή γέφυρα (gantry), φορείο (carriage) και γραμμικό στάδιο στον άξονα Z (Z-axis linear stage). Η γέφυρα μετακινείται κατά την κατεύθυνση Y επί της μεταλλικής βάσης που εδράζεται πάνω από τα φυτά. Επάνω στη γέφυρα εδράζεται το φορείο, το οποίο εκτελεί κίνηση κατά την κατεύθυνση X. Στο φορείο προσαρμόζεται το γραμμικό στάδιο Z, υπεύθυνο για την κατακόρυφη μετατόπιση. Στο άκρο του σταδίου Z εγκαθίσταται το gimbal τριών αξόνων με την κάμερα.

Στα δομικά και κινηματικά στοιχεία περιλαμβάνονται γραμμικές ράγες οδήγησης (V-slot 2020), τροχοί τύπου V για κύλιση/ευθυγράμμιση, κοχλίες κίνησης, ιμάντες χρονισμού τύπου GT2, τροχαλίες, αδρανείς τροχοί, κλιπ αγκύρωσης, σύνδεσμοι αξόνων (shaft couplings) για τη σύζευξη κινητήρων – κοχλιών, καθώς και 3 βηματικοί κινητήρες. Το πλαίσιο της σταθερής βάσης αποτελείται από μεταλλικά στηρίγματα και δύο παράλληλες γραμμικές

ράγες οδήγησης με εγκοπή τύπου V. Η γέφυρα κινείται επί των ράγων μέσω διπλών σετ τροχών τύπου V, ενώ το φορείο κινείται εγκάρσια πάνω σε ανεξάρτητη γραμμική ράγα με τροχούς τύπου V.

Οι ιμάντες GT2 δρομολογούνται γύρω από τις τροχαλίες κίνησης και τους αδρανείς τροχούς, επιτυγχάνοντας θετική εμπλοκή δοντιών – τροχαλίας και υψηλή απόδοση μετάδοσης. Η τάση ρυθμίζεται ώστε το φορτίο στη γωνία του κάθε δοντιού να μην προκαλεί αποσύμπλεξη και ολίσθηση. Τα κλιπ αγκύρωσης στα άκρα των οδηγών εξασφαλίζουν σταθερή αγκύρωση των ιμάντων, διατηρώντας την εμπλοκή κατά την κίνηση της γέφυρας στον άξονα Y και του φορείου στον άξονα X. Η διάταξη αυτή παρέχει ομαλή και ακριβή μεταφορά κίνησης, με υψηλή επαναληψιμότητα και μηχανική σταθερότητα.

Η κίνηση του καρτεσιανού ρομποτικού βραχίονα επιτυγχάνεται μέσω τριών βηματικών κινητήρων τύπου 42BYGHW208, οι οποίοι ελέγχουν ανεξάρτητα τις μετατοπίσεις στους τρεις γραμμικούς άξονες (X, Y, Z). Η κεντρική μονάδα ελέγχου βασίζεται σε μικροελεγκτή Arduino Uno, επάνω στον οποίο έχει τοποθετηθεί πλακέτα επέκτασης (shield) για την ασφαλή και οργανωμένη διασύνδεση των επιμέρους ηλεκτρονικών υποσυστημάτων. Κάθε βηματικός κινητήρας οδηγείται από αυτόνομο οδηγό τύπου A4988, ο οποίος παρέχει δυνατότητες μικροβηματισμού (microstepping) και ακριβούς ελέγχου θέσης, επιτυγχάνοντας ομαλή κίνηση και βελτιωμένη ροπή σε χαμηλές ταχύτητες. Οι οδηγοί τροφοδοτούνται μέσω σταθεροποιημένης παροχής συνεχούς τάσης, ενώ ενσωματώνουν συστήματα προστασίας έναντι υπερθέρμανσης και υπερρεύματος.

Για τον προγραμματισμό και την εκτέλεση των κινήσεων, στον μικροελεγκτή έχει εγκατασταθεί η βιβλιοθήκη GRBL, η οποία επιτρέπει την απευθείας ερμηνεία εντολών G-code και τη μετατροπή τους σε σήματα ελέγχου των βηματικών κινητήρων. Η επικοινωνία με τον χειριστή γίνεται μέσω της πλατφόρμας Universal Gcode Sender (UGS), η οποία προσφέρει γραφικό περιβάλλον για τη φόρτωση, την επεξεργασία και την αποστολή αρχείων G-code, καθώς και για την παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Η καλωδίωση των οδηγών A4988 και των βηματικών κινητήρων έχει σχεδιαστεί ώστε να ελαχιστοποιεί την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI) και να διασφαλίζει σταθερή λειτουργία ακόμη και σε περιβάλλοντα με ηλεκτρικό θόρυβο. Έχουν ενσωματωθεί ασφαλειοδιακόπτες για την προστασία από υπερφόρτιση, καθώς και οπτοηλεκτρονικοί τερματικοί διακόπτες (limit switches) σε κάθε άξονα, οι οποίοι αποτρέπουν την υπέρβαση των μηχανικών ορίων και προστατεύουν την κατασκευή από μηχανικές βλάβες. Το σύστημα διαθέτει μηχανισμό γείωσης για την αποτροπή στατικών εκκενώσεων, καθώς και λογισμικό ασφαλείας που ανιχνεύει ανωμαλίες στην κίνηση και ενεργοποιεί λειτουργία άμεσης παύσης (emergency stop). Η συνολική αρχιτεκτονική ελέγχου συνδυάζει ακρίβεια, επεκτασιμότητα και αξιοπιστία, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές αυτοματισμού και ρομποτικής που απαιτούν υψηλό βαθμό ασφάλειας και ελέγχου.

3.2 Μοντελοποίηση καρτεσιανού ρομποτικού βραχίονα

Παρακάτω παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο της κινηματικής και δυναμικής των αξόνων για τον καρτεσιανό ρομποτικό βραχίονα που σαρώνει τα καλλιεργούμενα φυτά και στον άξονα Z φέρει μία κάμερα για την ανίχνευση/αναγνώριση επιβλαβών εντόμων. Το μοντέλο οργανώνεται ως εξής: i) συστήματα συντεταγμένων και μεταβλητές, ii) κινηματική (ιδανική καρτεσιανή γεωμετρία) και iii) δυναμική αξόνων (σε κάθε άξονα $i \in \{x,y,z\}$).

i) Συστήματα συντεταγμένων και μεταβλητές:
- Παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων W με άξονες (X, Y, Z) και την επιφάνεια των φυτών στο επίπεδο Z=0.
- Βάση άξονα X: F_X, θέση $x(t)$. Άξονας Y: F_Y, θέση $y(t)$. Στάδιο Z: F_Z, θέση $z(t)$.
- Κάμερα: κέντρο προβολής $C(t)$ με θέση $p_c(t)=[x(t),y(t),z(t)]^T$ και (προαιρετικά) μικρές γωνιακές αποκλίσεις $\varphi(t)=[\varphi_r,\varphi_p,\varphi_y]^T$ (όπου r:roll, p:pitch,y:yaw).

ii) Κινηματική (ιδανική καρτεσιανή γεωμετρία):
- Για άκαμπτη διάταξη και μικρές γωνιακές αποκλίσεις ισχύουν οι σχέσεις:

$$p_c(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix}, \dot{p}_c(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Οι αναφορές θέσης $r(t)=[r_x,r_y,r_z]^T$ παράγονται από τον σχεδιασμό τροχιάς (coverage path) και συγχρονίζονται με τις λήψεις.

iii) Δυναμική αξόνων (σε κάθε άξονα $i \in \{x, y, z\}$):
- Κάθε άξονας προσεγγίζεται ως μεταφορικός βαθμός ελευθερίας με ενεργοποίηση μέσω ιμάντα ή κοχλία και βηματικό κινητήρα με ισοδύναμη μάζα M_i, απόσβεση B_i και (προαιρετική) μη-γραμμικότητα τριβής $F_{f,i}(\dot{q}_i)$. Η είσοδος u_i είναι δύναμη/ισοδύναμη ώση στο φορτίο (ή ροπή στον κινητήρα πολλαπλασιασμένη με τον λόγο μετάδοσης). Με $q_i \in \{x, y, z\}$:

$$M_i\ddot{q}_i + B_i\dot{q}_i + K_iq_i + F_{f,i}(\dot{q}_i) = u_i + d_i(t) \quad (2)$$

όπου K_i προαιρετική σκληρότητα προφόρτισης/οδηγών (συνήθως K_i=0 για καθαρά μεταφορική κίνηση) και $d_i(t)$ είναι οι διαταραχές (π.χ. καλώδια, αέρας, μικροκρούσεις, κ.ά.).

3.3 Υποσύστημα λήψης και διαχείρισης ψηφιακών εικόνων

Για τη λήψη και επεξεργασία των οπτικών δεδομένων αναπτύχθηκε ένα μικροϋπολογιστικό σύστημα βασισμένο στο Raspberry Pi 5, το οποίο ενσωματώνει υψηλή υπολογιστική ισχύ, πολυπύρηνη αρχιτεκτονική επεξεργασίας και εγγενείς διεπαφές επικοινωνίας (Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth 5.0). Το Raspberry Pi 5 χρησιμοποιείται ως κεντρική πλατφόρμα ελέγχου του υποσυστήματος λήψης, παρέχοντας δυνατότητα εκτέλεσης αλγορίθμων μηχανικής όρασης και τεχνητής νοημοσύνης σε πραγματικό χρόνο.

Η λήψη των εικόνων πραγματοποιείται μέσω μικροκάμερας Arducam, συνδεδεμένης με τον Raspberry Pi 5 μέσω διαύλου MIPI CSI-2, ο οποίος εξασφαλίζει υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και μειωμένη καθυστέρηση κατά τη λήψη. Η κάμερα υποστηρίζει ρύθμιση παραμέτρων (έκθεση, εστίαση, ισορροπία λευκού, ρυθμό καρέ), προσφέροντας προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού και περιβάλλοντος.

Οι εικόνες που συλλέγονται αποθηκεύονται τοπικά σε μέσο αποθήκευσης υψηλής ταχύτητας όπως SD card, ενώ υποστηρίζεται και η ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω Wi-Fi ή Ethernet για υψηλό ρυθμό μεταφοράς, ενώ για εφαρμογές IoT αξιοποιούνται πρωτόκολλα χαμηλού κόστους επικοινωνίας όπως MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), τα οποία επιτρέπουν την αποδοτική μετάδοση μικρών πακέτων δεδομένων προς απομακρυσμένους εξυπηρετητές (servers) ή cloud platforms. Η αποστολή δεδομένων στο cloud δίνει τη δυνατότητα για κεντρική αποθήκευση, ανάλυση με πιο ισχυρούς αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και ενσωμάτωση σε συστήματα γεωργίας ακριβείας. Επιπλέον, η πλατφόρμα μπορεί να υλοποιεί μηχανισμούς edge computing, όπου οι πιο κρίσιμες διεργασίες (π.χ. εντοπισμός εντόμου) εκτελούνται τοπικά στον Raspberry Pi

5, ενώ τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα μεταδίδονται στο cloud για περαιτέρω ανάλυση ή μακροχρόνια αποθήκευση.

Για τη διασφάλιση της ακεραιότητας και εμπιστευτικότητας των δεδομένων εφαρμόζονται πρωτόκολλα κρυπτογράφησης (TLS/SSL) κατά τη μετάδοση, καθώς και μηχανισμοί authentication για τον έλεγχο πρόσβασης. Παράλληλα, η χρήση backup servers και redundant storage διασφαλίζει την αξιοπιστία και τη συνέχεια της λειτουργίας σε περίπτωση αστοχίας υλικού ή απώλειας συνδεσιμότητας.

3.4 Στρατηγική λήψης ποιοτικών ψηφιακών εικόνων

Στο καρτεσιανό ρομποτικό σύστημα σταθερής βάσης, το οποίο εκτελεί γραμμικές μετακινήσεις στους τρεις άξονες X, Y και Z για τη λήψη ψηφιακών εικόνων, οι κινηματικές παράμετροι καθορίζονται με βάση τις απαιτήσεις ακρίβειας, σταθερότητας και οπτικής ποιότητας. Η γραμμική ταχύτητα *v* κατά μήκος των τριών αξόνων επιλέχτηκε έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η θόλωση λόγω κίνησης (motion blur) κατά τον χρόνο έκθεσης t_{exp}, λαμβάνοντας υπόψη το εστιακό μήκος *f* του φακού, την απόσταση εργασίας *h*, το μέγεθος εικονοστοιχείου *p* του αισθητήρα, το μέγιστο ίχνος του αισθητήρα b_{max} και τον αποδεκτό βαθμό θολώματος. Επομένως, η γραμμική ταχύτητα υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$v_{max} = \frac{b_{max} \cdot p \cdot h}{f \cdot t_{exp}} \tag{3}$$

Επίσης, η γωνιακή ταχύτητα στους άξονες περιστροφής (roll), πρόνευσης (pitch) και γωνιακής απόκλισης (yaw), οι οποίοι υλοποιούνται μέσω του τρισδιάστατου αρθρωτού μηχανισμού (gimbal) τοποθετημένου στον άξονα Z, πρέπει να παραμένει εντός προκαθορισμένων ορίων ώστε να αποτρέπεται η αλλοίωση της εικόνας λόγω περιστροφικής κίνησης κατά την έκθεση. Η χρήση τεχνικών σταθεροποίησης, περιορισμού επιτάχυνσης και ακινητοποίησης πριν από τη λήψη (μέθοδος step-and- stare) συνεισφέρει στην επίτευξη μέγιστης ευκρίνειας. Το όριο της γωνιακής ταχύτητας *ω* δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_{max} = \frac{b_{max} \cdot p}{f \cdot t_{exp}} \tag{4}$$

Η ικανότητα φορτίου (payload) του συστήματος πρέπει να υπερκαλύπτει το συνολικό βάρος της κάμερας, του φακού, του συστήματος προσανατολισμού και της μονάδας φωτισμού, με κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας για την εξασφάλιση μηχανικής ακαμψίας και αντοχής σε δυναμικά φορτία. Η κατανομή της φέρουσας ικανότητας ανά άξονα επιτρέπει την ομαλή και ακριβή κίνηση χωρίς εκτροπές, ακόμη και σε υψηλές επιταχύνσεις.
Ο συγχρονισμός μεταξύ της κίνησης του καρτεσιανού ρομποτικού βραχίονα και της ενεργοποίησης της κάμερας αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη διασφάλιση της ποιότητας εικόνας. Σε λειτουργία "step-and-stare", η κάμερα ενεργοποιείται μόνο αφού το σύστημα ολοκληρώσει την κίνηση, σταθεροποιηθεί πλήρως και ελαχιστοποιηθούν οι μικροδονήσεις. Σε λειτουργία συνεχούς σάρωσης, ο χρόνος έκθεσης της κάμερας είναι επαρκώς μικρός ώστε η μετατόπιση της εικόνας στον αισθητήρα κατά την έκθεση να μην υπερβαίνει το αποδεκτό όριο. Ο ακριβής χρονισμός επιτυγχάνεται μέσω σήματος συγχρονισμού (trigger) που εκδίδεται από το σύστημα ελέγχου κίνησης, διασφαλίζοντας ότι κάθε λήψη αντιστοιχεί σε προκαθορισμένη θέση του βραχίονα. Η ενσωμάτωση παλμικού ή συγχρονισμένου φωτισμού ενισχύει περαιτέρω την ικανότητα "παγώματος" της κίνησης, επιτρέποντας υψηλής ακρίβειας καταγραφή. Ο συνδυασμός ελεγχόμενης γραμμικής και γωνιακής κίνησης,

κατάλληλου σχεδιασμού φορτίου και ακριβούς συγχρονισμού κάμερας – κίνησης εξασφαλίζει σταθερότητα, επαναληψιμότητα και υψηλή ποιότητα δεδομένων, καθιστώντας το σύστημα ιδανικό για εφαρμογές όπως η ανίχνευση και αναγνώριση εντόμων σε φυτά με υψηλή ακρίβεια.

3.5 Μοντέλο αναγνώρισης εντόμων με βάση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά

Για την αξιολόγηση του καρτεσιανού ρομποτικού βραχίονα αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε μεταξύ άλλων, ένα μοντέλο αναγνώρισης εντόμων με βάση τα εξαγόμενα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε μια πολυσταδιακή διαδικασία που στοχεύει στην εξαγωγή μορφολογικών χαρακτηριστικών και στη δημιουργία ψηφιακής υπογραφής, ικανής να χρησιμοποιηθεί για ταξινόμηση και ταυτοποίηση των διαφορετικών ειδών.

Η διαδικασία αρχίζει με την εισαγωγή των πηγαίων εικόνων, οι οποίες αποτελούν το πρωτογενές δεδομένο παρατήρησης. Στο πρώτο στάδιο εφαρμόζεται η κατάτμηση της RGB εικόνας με χρήση μάσκας, με σκοπό την απομόνωση του εντόμου από το υπόβαθρο, εξασφαλίζοντας βελτιωμένη ακρίβεια στην επεξεργασία. Στη συνέχεια, η εικόνα μετασχηματίζεται σε δυαδική αναπαράσταση, ώστε να επιτευχθεί καθαρός διαχωρισμός μεταξύ των περιοχών ενδιαφέροντος και μη. Ακολούθως, πραγματοποιείται ο εντοπισμός του ορθογώνιου περιγράμματος (bounding box) και του κέντρου βάρους του εντόμου, τα οποία λειτουργούν ως θεμελιώδη αναφορικά στοιχεία για την εξαγωγή των γεωμετρικών παραμέτρων. Στο επόμενο στάδιο, από το περίγραμμα του εντόμου εξάγονται σημεία-κλειδιά, και υπολογίζονται οι ακτινικές αποστάσεις τους από το κέντρο βάρους. Οι μετρήσεις αυτές επιτρέπουν την περιγραφική αποτύπωση της μορφολογίας του εντόμου με όρους χωρικής γεωμετρίας. Τέλος, οι καταγεγραμμένες αποστάσεις ενσωματώνονται στη διαδικασία δημιουργίας της ψηφιακής υπογραφής, η οποία αποτελεί ένα μοναδικό χαρακτηριστικό αποτύπωμα για κάθε άτομο ή είδος εντόμου. Η υπογραφή αυτή συνιστά ένα σταθερό και αξιόπιστο μέτρο αναγνώρισης, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί σε εφαρμογές γεωργίας ακριβείας, συμβάλλοντας στη βελτίωση των μεθόδων παρακολούθησης και ελέγχου επιβλαβών εντόμων.

Ακολουθεί η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου αναγνώρισης:

i) Κατάτμηση RGB Εικόνας με Μάσκα:
Η αρχική εικόνα $I(x,y)$ ορίζεται ως τρισδιάστατη συνάρτηση έντασης σε χωρικές συντεταγμένες:

$$I : \Omega \subset R^2 \rightarrow R^3, \qquad I(x, y) = [R(x, y), G(x, y), B(x, y)] \tag{5}$$

Η μάσκα $M(x,y)$ ορίζεται ως δυαδική συνάρτηση:

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{εάν το pixel ανήκει στο έντομο} \\ 0, & \text{εάν το pixel ανήκει στο υπόβαθρο} \end{cases} \tag{6}$$

Η κατετμημένη εικόνα δίνεται από τη σχέση:

$$I_M(x, y) = I(x, y) \cdot M(x, y) \tag{7}$$

ii) Μετατροπή σε Δυαδική Εικόνα:
Η μάσκα εφαρμόζεται ώστε να παραχθεί η δυαδική εικόνα:

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{εάν } I_M(x, y) \neq 0 \\ 0. & \text{διαφορετικά} \end{cases} \tag{8}$$

iii) Εύρεση του ορθογώνιου περιγράμματος (Bounding Box) και του Κέντρου Βάρους (centroid):

Το bounding box ορίζεται με βάση τις ακραίες συντεταγμένες:

$$x_{min} = min\{x|B(x,y) = 1\}, \qquad x_{max} = max\{x|B(x,y) = 1\} \tag{9}$$

$$y_{min} = min\{y|B(x,y) = 1\}, \qquad y_{max} = max\{y|B(x,y) = 1\} \tag{10}$$

Το κέντρο βάρους της δυαδικής εικόνας δίνεται από τη σχέση:

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{1}{N}\sum_{B(x,y)=1} x, \frac{1}{N}\sum_{B(x,y)=1} y\right) \tag{11}$$

όπου $N = \sum B(x,y)$ είναι το πλήθος των εικονοστοιχείων που ανήκουν στο αντικείμενο.

iv) Εξαγωγή Σημείων Κλειδιών από το Περίγραμμα:

Το περίγραμμα του εντόμου δίνεται από το σύνολο των εικονοστοιχείων στα όρια του αντικειμένου. Για κάθε σημείο περιγράμματος $(x_i, y_i) \in \partial B$, υπολογίζεται η ακτινική απόσταση από το κέντρο βάρους:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \tag{12}$$

v) Δημιουργία Ψηφιακής Υπογραφής:

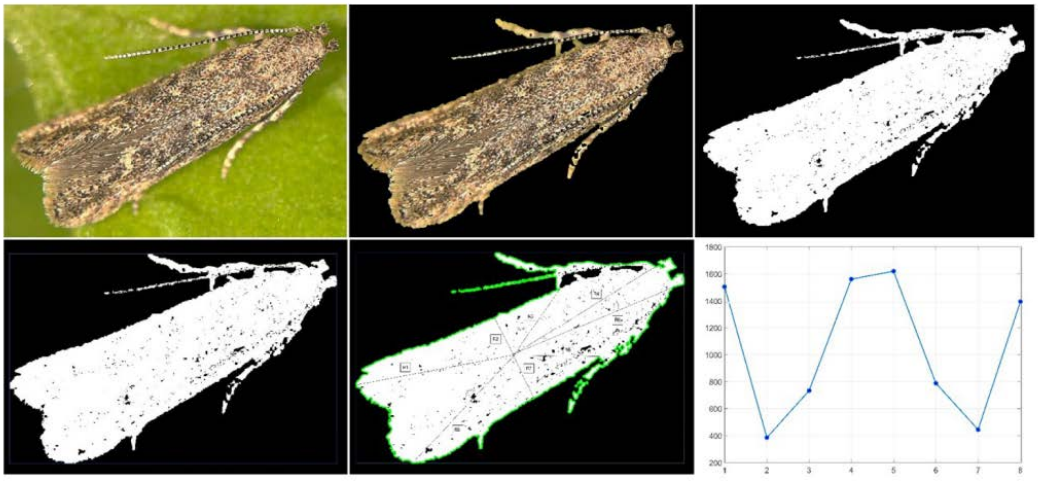
Η ψηφιακή υπογραφή S ορίζεται ως η ακολουθία των αποστάσεων d_i, ταξινομημένων γωνιακά γύρω από το κέντρο βάρους:

$$S(\theta) = d(\theta), \qquad \theta \in [0, 2\pi] \tag{13}$$

Η συνάρτηση $S(\theta)$ αποτελεί κυκλική αναπαράσταση του περιγράμματος του εντόμου και λειτουργεί ως μορφή χαρακτηριστικής υπογραφής.

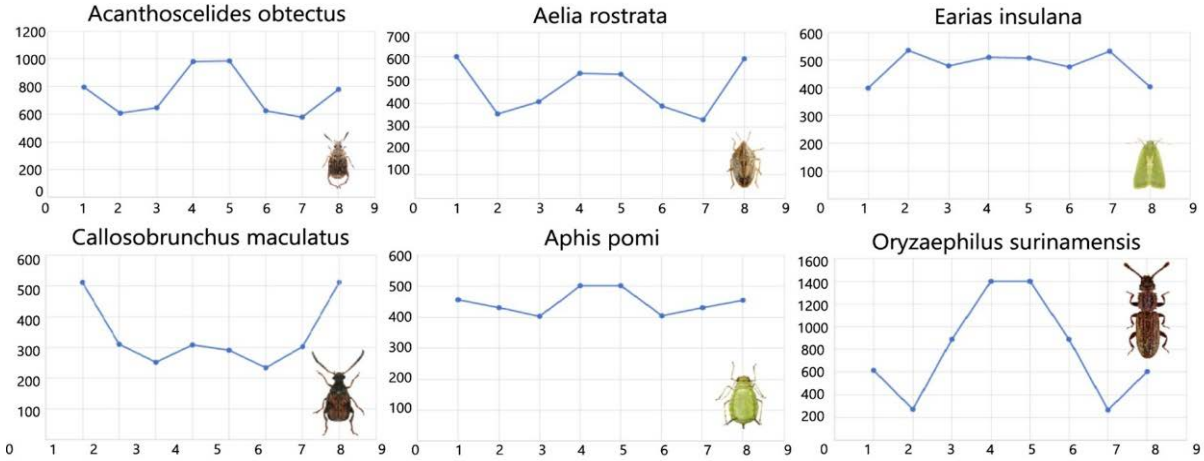
Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο εξασφαλίζει αποδοτική αναπαράσταση του σχήματος των εντόμων και επιτρέπει την ταυτοποίησή τους μέσω της συγκριτικής ανάλυσης των ψηφιακών υπογραφών.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Εικόνα 2. Τα στάδια εξαγωγής μοφολογικών χαρακτηριστικών του μοντέλου

Η απόδοση του μοντέλου αναγνώρισης διαφορετικών ειδών εντόμων με βάση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και τη δημιουργία ψηφιακών υπογραφών μελετήθηκε για 30 διαφορετικά είδη επιβλαβών εντόμων. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται τα κύρια στάδια εξαγωγής των μορφολογικών χαρακτηριστικών του εντόμου *Tuta Absoluta* (Φυλλορύκτης της τομάτας) για τη δημιουργία ψηφιακής υπογραφής του. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι ψηφιακές υπογραφές που ελήφθησαν από το μοντέλο για διαφορετικά είδη εντόμων, όπως *Acanthoscelides obtectus*, *Aphis pomi*, κ.ά.



Εικόνα 3. Οι ψηφιακές υπογραφές διαφορετικών ειδών εντόμων

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Το προτεινόμενο καρτεσιανό ρομποτικό σύστημα συνδυάζει την ευελιξία των μικροϋπολογιστικών συστημάτων με τις δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης και της υπολογιστικής νέφους, παρέχοντας ένα ισχυρό και επεκτάσιμο υπόβαθρο για εφαρμογές παρακολούθησης καλλιεργειών, ανίχνευσης εντόμων και πρόγνωσης ασθενειών στο πλαίσιο της "έξυπνης" γεωργίας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Deng, L., Wang, Z., Wang, C., He, Y., Huang, T., Dong, Y., & Zhang, X., 2020. Application of agricultural insect pest detection and control map based on image processing analysis. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **38**(1), 379-389.

Kasinathan, T., Singaraju, D., & Uyyala, S.R., 2021. Insect classification and detection in field crops using modern machine learning techniques. *Information Processing in Agriculture*, **8**(3), 446–457.

Wang, J., Lin, C., Ji, L., & Liang, A., 2012. A new automatic identification system of field crops images at the order level. *Knowledge-Based Systems*, **33**, 102–110.

Xie, C., Zhang, J., Li, R., Li, J., Hong, P., Xia, J., & Chen, P., 2015. Automatic classification for field crop insects via multiple-task sparse representation and multiple-kernel learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, **119**, 123–132.

17. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΑΡΠΑΓΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΞΥΛΙΝΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΝΑΡΡΙΧΩΜΕΝΕΣ ΠΟΙΚΙΛΙΕΣ ΚΗΠΕΥΤΙΚΩΝ

Δ. Καραμπούλα, Α. Μακρής, Ι. Ράπτης, & Ι. Γράβαλος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας-Αγροτεχνολογίας, Γαιόπολις, 41500, Λάρισα, dkarampoula@uth.gr

Περίληψη

Για την ανάπτυξη και την καθοδήγηση πολλών αναρριχώμενων κηπευτικών χρησιμοποιούνται υποστυλώματα. Η εργασία επικεντρώνεται στη σχεδίαση μιας αρπάγης που είναι κατάλληλη για την τοποθέτηση ξύλινων υποστυλωμάτων, με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών εργασίας και παραγωγικότητας σε αυτές τις καλλιέργειες. Η αρπάγη αυτή είναι το εργαλείο τελικής δράσης ενός ρομποτικού συστήματος αναρτώμενο σε γεωργικό ελκυστήρα. Αποτελείται από μία μεταλλική βάση πάνω στην οποία τοποθετήθηκε ένα σύστημα ατέρμονα κοχλία με οδοντωτούς τροχούς, ενώ σε κάθε οδοντωτό τροχό συνδέθηκε ένας βραχίονας μεταφοράς. Επίσης, σημαντικό στοιχείο του όλου μηχανισμού αποτελούν οι προσθήκες από πολυαμίδιο στα άκρα των βραχιόνων μεταφοράς για τη συγκράτηση των ξύλινων υποστυλωμάτων. Ένα μεταλλικό κάλυμμα στο άνω τμήμα της αρπάγης απομονώνει τα κινούμενα μέρη της, ενώ ένας μεταλλικός δακτύλιος διευκολύνει την προσαρμογή της στο ρομποτικό σύστημα. Η κίνηση του μηχανισμού της αρπάγης επιτυγχάνεται μέσω ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Λέξεις κλειδιά: κηπευτικά, υποστυλώματα, ρομπότ, αρπάγη, βραχίονες μεταφοράς.

DESIGN OF A ROBOTIC GRIPPER FOR INSTALLATION OF WOODEN SUPPORTS FOR CLIMBING GARDEN PLANTS

D. Karaboula, A. Makris, I. Raptis & I. Gravalos

University of Thessaly, Department of Agrotechnology, Gaiopolis, 41500, Larisa

dkarampoula@uth.gr

Abstract

Wooden supports are used for the development and guidance of many climbing horticultural plants. The work focuses on the design of a gripper that is suitable for the installation of wooden supports, with the aim of improving working conditions and productivity in these crops. The gripper is the end effector of a robotic system mounted on an agricultural tractor. It consists of a metal base on which a worm screw system with gears was placed, while a carrying arm was connected to each gear. Also, an important element of the whole mechanism is the polyamide gripping pads at the end of the carrying arms to hold the wooden supports. A metal cover on the upper part of the gripper isolates its moving parts, while a metal ring facilitates its adaptation to the robotic system. The movement of the gripper mechanism is achieved through a DC motor.

Keywords: horticultural, supports, robot, gripper, carrying arms.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφαρμογή των νέων τεχνολογιών και του αυτοματισμού στη γεωργία συμβάλει σημαντικά στην αύξηση της παραγωγικότητας εργασίας, την οποία οι άνθρωποι διά της χειρονακτικής εργασίας είναι δύσκολο να επιτύχουν. Στη σύγχρονη γεωργία χρησιμοποιούνται αυτόματα συστήματα και ρομπότ (π.χ. ρομπότ ελέγχου των ζιζανίων, συγκομιδής φρούτων και λαχανικών, κ.ά.), που μειώνουν το κόστος, τον χρόνο εργασίας και απελευθερώνουν τον άνθρωπο από την εξαντλητική και πολύωρη ενασχόλησή του με τις γεωργικές καλλιέργειες (Hitchmough & Fieldhouse, 2004).

Στη χώρα μας οι αναρριχώμενες ποικιλίες κηπευτικών καλλιεργειών αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της γεωργικής παραγωγής. Μία από τις εργασίες για την ανάπτυξη και την καθοδήγηση των αναρριχώμενων φυτών είναι και η εγκατάσταση ξύλινων υποστυλωμάτων. Οι αναρριχώμενες ποικιλίες φασολιών, που μπορούν να φθάσουν σε ύψος τα 2 m, χρειάζονται στήριξη για να αναπτυχθούν. Η στήριξή τους γίνεται σε πέργκολες ή σε πασσάλους και σύρματα. Ειδικότερα, σε αρκετές περιοχές της χώρας όπως είναι οι Πρέσπες και η Καστοριά, όταν το φυτό αναπτυχθεί στα 10 με 15 cm, οι παραγωγοί με τη χρήση γεωργικού ελκυστήρα και αυλακωτήρα κατεργάζονται το έδαφος ώστε να ακολουθήσει η τοποθέτηση των ξύλινων υποστυλωμάτων (καλαμιών). Η υποστύλωση γίνεται χειρονακτικά από τους παραγωγούς και απαιτεί επιδεξιότητα, δύναμη και τεχνική (Banfi & Consolino, 1994). Πρόκειται για μια ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία, που σήμερα αντιμετωπίζει ένα επιπλέον πρόβλημα, την έλλειψη εργατικών χεριών και το υψηλό κόστος εργασίας. Έτσι, ο κίνδυνος της εγκατάλειψης αυτής της τόσο σημαντικής καλλιέργειας, που εκτείνεται σε πολλές περιοχές της χώρας μας είναι μεγάλος.

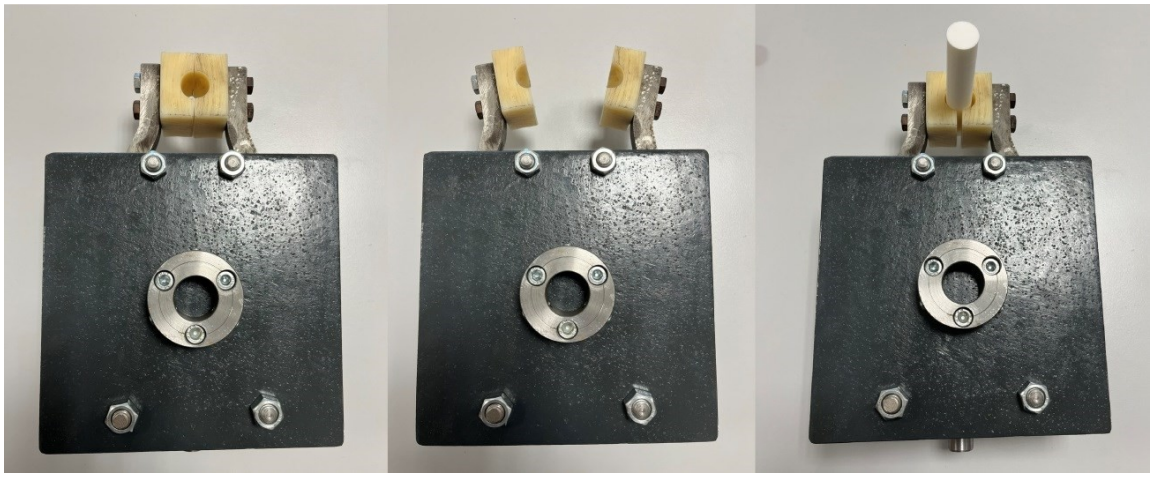
Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση του σχεδίου μιας ρομποτικής αρπάγης για την εγκατάσταση ξύλινων υποστυλωμάτων. Ειδικότερα, πρόκειται για ένα εργαλείο τελικής δράσης (end effector) ενός ρομποτικού συστήματος αναρτώμενο σε γεωργικό ελκυστήρα που θα αξιοποιηθεί σε γεωργικές εφαρμογές που έχουν να κάνουν με την αυτοματοποίηση της διαδικασίας εγκατάστασης ξύλινων αλλά και μεταλλικών πασσάλων. Στόχος αυτής της κατασκευής είναι η εξοικονόμηση χρόνου, η μείωση του εργατικού κόστους και η αντιμετώπιση της έλλειψης εργατικών χεριών στον αγροτικό τομέα.

Από τη μελέτη τεχνικών και εργαλείων που χρησιμοποιούνται στην τοποθέτηση υποστυλωμάτων στις γεωργικές καλλιέργειες, διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν διάφορα μηχανικά συστήματα υποστύλωσης. Όμως δεν βρέθηκε σύστημα αρπάγης ως εργαλείο τελικής δράσης ρομποτικού συστήματος αναρτώμενο σε γεωργικό ελκυστήρα (Ceccarelli et al., 2002). Η συλλογή πληροφοριών για την τεκμηρίωση του προτεινόμενου σχεδίου ρομποτικής αρπάγης πραγματοποιήθηκε τον Ιούνιο του 2024 σε καλλιέργειες αναρριχώμενων φασολιών στην ευρύτερη περιοχή των Πρεσπών.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΡΠΑΓΗΣ

Η ρομποτική αρπάγη έχει σχεδιαστεί για την αυτόματη και ασφαλή εγκατάσταση ξύλινων αλλά και μεταλλικών υποστυλωμάτων στο έδαφος. Τα υποστυλώματα είναι κυλινδρικού τύπου, με διάμετρο που κυμαίνεται από 12 έως 21 mm και μήκος από 1 έως 2,80 m, και χρησιμοποιούνται κυρίως για την υποστήριξη αναρριχώμενων φυτών. Το πρωτότυπο της αρπάγης παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Η διάταξη αυτή λειτουργεί μέσω ενός μηχανικού συστήματος μετάδοσης κίνησης που αποτελείται από έναν ατέρμονα κοχλία και δύο οδοντωτούς τροχούς. Ο ατέρμονας κοχλίας είναι μίας αρχής

(μονόσπειρος) και οι οδοντωτοί τροχοί φέρουν 40 δόντια. Πρόκειται για μία διάταξη υψηλής αναγωγής, κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ροπή εξόδου αλλά χαμηλή ταχύτητα κίνησης. Η διάταξη αυτή προσφέρει: μεγάλη μηχανική πλεονεκτικότητα, αυτοασφάλιση, ακριβή έλεγχο κίνησης, ισχυρή δύναμη επαφής (σύσφιξη), σταθερότητα θέσης, και ασφάλεια κατά την παύση λειτουργίας.



Εικόνα 1. Το πρωτότυπο της ρομποτικής αρπάγης για την εγκατάσταση υποστυλωμάτων σε καλλιέργειες αναρριχώμενων κηπευτικών.

Ένα σύστημα ατέρμονα κοχλία και οδοντωτού τροχού (κορώνα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία κινηματικής σύνδεσης και τη μεταφορά ισχύος μεταξύ ασύμβατων ατράκτων με γωνία συνήθως 90° (Radzevich, 2016). Ανάλογα με τη μορφή του ατέρμονα κοχλία (εισερχόμενο στοιχείο) και του οδοντωτού τροχού (εξερχόμενο στοιχείο), το σύστημα χαρακτηρίζεται ως: α) κυλινδρικό, όταν ο ατέρμονας κοχλίας και ο οδοντωτός τροχός έχουν σχήμα κυλινδρικό, β) σφαιρικό, όταν ο ατέρμονας κοχλίας και ο οδοντωτός τροχός έχουν σχήμα σφαιρικό και γ) μικτό, όταν ο ατέρμονας κοχλίας έχει σχήμα κυλινδρικό και ο οδοντωτός τροχός έχει σχήμα σφαιρικό. Από τα ανωτέρω συστήματα, το κυλινδρικό είναι ο συνηθέστερος τύπος μετάδοσης ισχύος με ατέρμονα κοχλία και οδοντωτό τροχό. Το σύστημα ατέρμονα κοχλία οδοντωτού τροχού μπορεί να μεταδώσει μεγάλη ισχύ, να επιτύχει υψηλές σχέσεις μετάδοσης, έχει μικρό βάρος, είναι δομικά συμπαγές και χαρακτηρίζεται από ομαλή και αθόρυβη λειτουργία. Επίσης, η κατεύθυνση μετάδοσης είναι συνήθως μονόδρομη, δηλαδή ο οδοντωτός τροχός δεν μπορεί να περιστρέψει τον κοχλία (αυτοασφάλιση), κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο για τους μηχανισμούς συγκράτησης (Dudás, 2005).

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία ενός ατέρμονα κοχλία είναι το βήμα και η γωνία κλίσης (Goldfarb et al., 2018). Ο αριθμός των αρχών (starts) του ατέρμονα κοχλία z_1 επιλέγεται ανάλογα με τη χρήση του συστήματος ατέρμονα κοχλία και οδοντωτού τροχού. Για να είναι οι απώλειες της ισχύος όσο το δυνατόν μικρότερες, επιλέγεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερος αριθμός αρχών. Η απόσταση που διανύει το σπείρωμα σε μία πλήρη περιστροφή του κοχλία ονομάζεται αξονικό βήμα (lead) L:

$$L = z_1 \cdot t_x \tag{1}$$

Η γωνία κλίσης (lead angle) γ του ατέρμονα κοχλία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$tg\gamma = \frac{L}{\pi \cdot D} = \frac{z_1 \cdot t_x}{\pi \cdot D_1} = \frac{z_1 \cdot m_x}{D_1} \tag{2}$$

όπου: t_x ($t_x=\pi \cdot m_x$) είναι το εγκάρσιο βήμα, m_x είναι το module ή μέτρο της εγκάρσιας τομής του κοχλία, D_1 είναι η διάμετρος αναφοράς του κοχλία.

Η περιφερειακή δύναμη (tangential force) F_o του κοχλία υπολογίζεται από τη σχέση (Crosher, 2002):

$$F_o = \frac{1000 \cdot P}{v_o} \quad (3)$$

όπου: P είναι η ισχύς του κινητήρα σε kW και v_o είναι η ταχύτητα στην περιφέρεια του οδοντωτού τροχού σε m/s.

Η ροπή στρέψης M (Nm) είναι το γινόμενο της περιφερειακής δύναμης F_o (N) που ασκεί ο κοχλίας στον οδοντωτό τροχό επί την απόσταση από τον άξονα περιστροφής r (m) (Crosher, 2002):

$$M = F_o \cdot r = F_o \cdot \frac{D_1}{2} \quad (4)$$

Η περιφερειακή ταχύτητα του οδοντωτού τροχού δίνεται από τη σχέση:

$$v_o = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n_2}{60} \quad (5)$$

όπου: D_2 είναι η διάμετρος αναφοράς του οδοντωτού τροχού σε m και n_2 είναι οι στροφές ανά λεπτό (rpm) του οδοντωτού τροχού.
Η περιφερειακή ταχύτητα του κοχλία, με διάμετρο αναφοράς D_1 και στροφές n_1, δίνεται αντίστοιχα από τη σχέση (Crosher, 2002):

$$v_o = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n_1}{60} \cdot sin\gamma \quad (6)$$

όπου: γ είναι η γωνία κλίσης του ατέρμονα κοχλία.

Η κινηματική ανάλυση εξαρτάται από το στοιχείο που οδηγεί το σύστημα. Εάν αυτό είναι ο κοχλίας (που αυτό συμβαίνει συνήθως) υπολογίζουμε την ταχύτητα με βάση τη σχέση (6). Στην περίπτωση που έχουμε δεδομένα για τον οδοντωτό τροχό (π.χ. όπως είναι το φορτίο) υπολογίζουμε την ταχύτητα με βάση τη σχέση (5). Και οι δύο σχέσεις δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα, επειδή πρόκειται για το ίδιο φυσικό μέγεθος, καθώς το σημείο επαφής κοχλία και οδοντωτού τροχού έχει την ίδια ταχύτητα.
Η σχέση μετάδοσης δίνεται από τον λόγο:

$$i = \frac{z_1}{z_2} \quad (7)$$

όπου: z_1 είναι ο αριθμός των αρχών του ατέρμονα κοχλία και z_2 είναι ο αριθμός των δοντιών του οδοντωτού τροχού.

Η ιδανική απόδοση (χωρίς τριβές) του συστήματος ατέρμονα κοχλία και οδοντωτού τροχού δίνεται από τη σχέση (Yaghoubi & Tavakoli, 2022)

$$\eta = \frac{tan\gamma}{\tan(\gamma + \varphi)} \quad (8)$$

όπου: φ είναι η γωνία τριβής (φ=σταθ.).

Όταν η γωνία κλίσης γ του ατέρμονα κοχλία είναι μικρότερη από τη γωνία τριβής

φ, τότε επιτυγχάνεται η αυτοασφάλιση του συστήματος (Yaghoubi & Tavakoli, 2022):

$$tan\gamma < tan\varphi \quad (9)$$

Το μηχανικό αυτό σύστημα μετάδοσης εδράζεται πάνω σε μία μεταλλική βάση. Τα δόντια των οδοντωτών τροχών είναι σχεδιασμένα να συνεργάζονται με το σπείρωμα του κοχλία. Ο ατέρμονας κοχλίας είναι κατασκευασμένος από σκληρότερο υλικό (ατσάλι) και οι οδοντωτοί τροχοί από πιο μαλακό υλικό (μπρούτζο) για μειωμένη φθορά. Ο ατέρμονας κοχλίας κινείται μέσω ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC), μεταδίδοντας την περιστροφική κίνηση στους οδοντωτούς τροχούς. Στους τροχούς εδράζονται δύο συμμετρικά διατεταγμένοι βραχίονες (σιαγόνες), οι οποίοι περιστρέφονται αντίρροπα και επιτρέπουν το ελεγχόμενο άνοιγμα και κλείσιμο του μηχανισμού. Στα άκρα των βραχιόνων προσαρμόζονται προσθήκες κατασκευασμένες από πολυαμίδιο, οι οποίες αγκαλιάζουν το υποστύλωμα και αναπτύσσουν δυνάμεις επαφής, εξασφαλίζοντας σταθερό κράτημα. Η κατανομή των δυνάμεων επαφής είναι επιφανειακή, γεγονός που αυξάνει την αποτελεσματικότητα της σύσφιξης χωρίς να προκαλεί τοπική καταπόνηση στο υποστύλωμα (Hugo et al., 2012). Ένα μεταλλικό κάλυμμα στο άνω τμήμα της αρπάγης απομονώνει τα κινούμενα μέρη της, ενώ ένας μεταλλικός δακτύλιος διευκολύνει την προσαρμογή της στο ρομποτικό σύστημα.

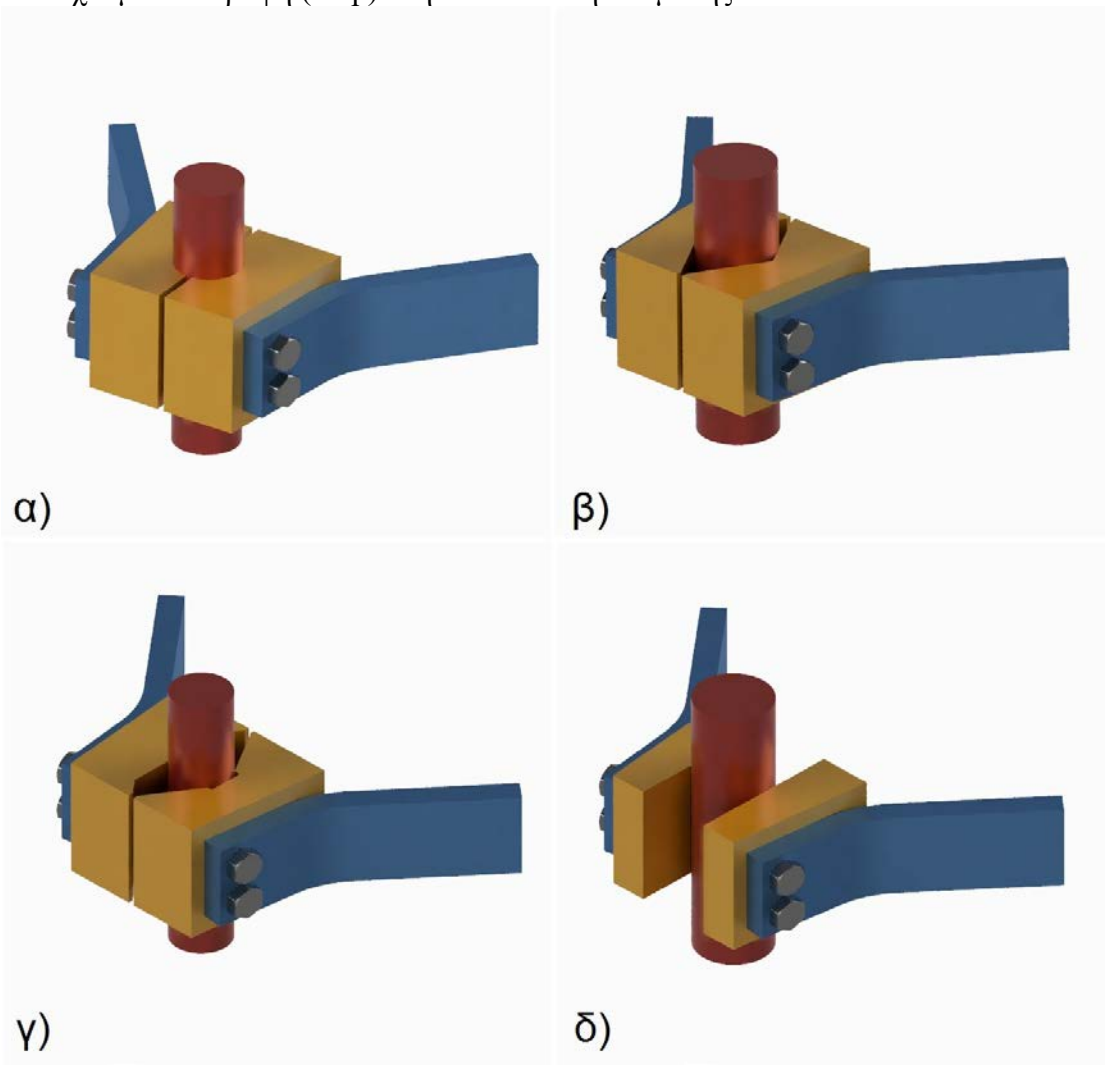
Συνολικά, η αρπάγη αποτελεί μία στιβαρή κατασκευή, που προσφέρει γρήγορη, σταθερή και ασφαλή συγκράτηση των υποστυλωμάτων για εφαρμογές στήριξης αναρριχώμενων φυτών ή μικρών κατασκευών.

Στην Εικόνα 2 φαίνονται τέσσερις διαφορετικές διαμορφώσεις του ζεύγους των προσθηκών πολυαμιδίου. Στη διαμόρφωση (α) οι προσθήκες πολυαμιδίου εφάπτονται με μία καμπύλη επιφάνεια πάνω στο υποστύλωμα, δηλαδή κατά κάποιο τρόπο "αγκαλιάζουν" το υποστύλωμα. Επομένως, η επαφή δεν είναι σημειακή αλλά επιφανειακή. Έτσι, η επαφή κατανέμεται σε πολλά μικρά σημεία (άρα έχουμε πολλές μικρές κανονικές δυνάμεις $F^{\rightarrow}_N$) (Dong et al., 2018). Η διαμόρφωση αυτή έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να συγκρατήσει υποστυλώματα με μεγαλύτερη ή μικρότερη διάμετρο παρά μόνο μίας τυποποιημένης διαμέτρου. Στη διαμόρφωση (β) ενεργούν τέσσερις δυνάμεις επαφής, στη διαμόρφωση (γ) ενεργούν τρεις, ενώ στη διαμόρφωση (δ) μόνο δύο. Από αυτές τις διαμορφώσεις καλύτερες θεωρούνται οι δύο πρώτες. Η διαμόρφωση (δ) είναι η λιγότερο επιτυχημένη όσον αφορά τη συγκράτηση του υποστυλώματος με ασφάλεια. Μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία λόγω εκτροπής ή συγκέντρωσης τάσεων στο υποστύλωμα. Είναι κατάλληλη μόνο για χαμηλά φορτία ή προσωρινή στήριξη.

Για την αυτόματη λειτουργία της ρομποτικής αρπάγης αναπτύχθηκε ένα σύστημα ελέγχου, βασισμένο στη λογική του «εντόπισε – σύσφιξε – απελευθέρωσε». Το σύστημα δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τεχνολογίες και μεθόδους ανοιχτού κώδικα. Αποτελείται από έναν μικροελεγκτή (Arduino Uno), έναν ηλεκτρικό κινητήρα DC, μία γέφυρα "Η" (L298N), έναν αισθητήρα απόστασης υπερήχων (HC-SR04) και έναν αισθητήρα δύναμης (strain gauge).

Στην κατάσταση αναμονής, ο μικροελεγκτής διαβάζει τον αισθητήρα απόστασης υπερήχων. Όταν εντοπιστεί το υποστύλωμα σε απόσταση μικρότερη των 5 cm, ξεκινά ο κύκλος. Ο μικροελεγκτής ενεργοποιεί με τη βοήθεια της γέφυρας "Η" τον κινητήρα DC και αρχίζει το κλείσιμο των συμμετρικά διατεταγμένων βραχιόνων ή σιαγόνων (κατάσταση σύσφιξης). Στη συνέχεια, ο αισθητήρας δύναμης δίνει σήμα στον μικροελεγκτή ότι έχει επιτευχθεί η απαιτούμενη δύναμη επαφής και αυτός σταματά τον κινητήρα DC. Τέλος, ο μικροελεγκτής αντιστρέφει την πολικότητα στον κινητήρα DC

πάλι μέσω της γέφυρας "Η", ανοίγουν οι βραχίονες και απελευθερώνεται το υποστύλωμα, ενώ έχουμε επιστροφή (loop) στην κατάσταση αναμονής.



Εικόνα 2. Τέσσερις διαφορετικές διαμορφώσεις του ζεύγους των προσθηκών πολυαμιδίου: α) πολλαπλών δυνάμεων επαφής, β) τεσσάρων δυνάμεων επαφής, γ) τριών δυνάμεων επαφής, και δ) δύο δυνάμεων επαφής.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΠΑΓΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ

Παράλληλα, στα σημεία που το υποστύλωμα έρχεται σε επαφή με τις προσθήκες πολυαμιδίου της αρπάγης, αναπτύσσονται δυνάμεις επαφής ($\vec{F}_o$), οι οποίες έχουν λοξή διεύθυνση, καθώς οι προσθήκες πολυαμιδίου έχουν γωνιακή επιφάνεια επαφής (δηλαδή, η επίπεδη επιφάνεια επαφής είναι αποτέλεσμα μακροσκοπικής θεώρησης). Ο αριθμός των δυνάμεων αυτών εξαρτάται από τη διαμόρφωση του ζεύγους των προσθηκών πολυαμιδίου. Κάθε δύναμη επαφής ($\vec{F}_o$) αναλύεται σε δύο επιμέρους δυνάμεις: i) την κανονική συνιστώσα ($\vec{F}_N$), η οποία είναι κάθετη στην επιφάνεια του υποστυλώματος και είναι υπεύθυνη για την πίεση που γεννά την τριβή και ii) την συνιστώσα ($\vec{F}_V$) η οποία είναι παράλληλη με τον άξονα του υποστυλώματος, δεν δημιουργεί τριβή, αλλά συμμετέχει στη συνολική ώθηση.

Επίσης, αναπτύσσονται οι δυνάμεις: αντίδρασης ($\vec{F}_R$) και τριβής ($\vec{F}_T$). Η δύναμη αντίδρασης ($\vec{F}_R$) που αναπτύσσεται από το υποστύλωμα προς την προσθήκη

πολυαμιδίου, είναι η αντίδραση στην κανονική δύναμη ($\vec{F}_N$), έχει την ίδια τιμή και αντίθετη φορά, είναι αναγκαία για την ισορροπία των δυνάμεων και την κατανόηση των καταπονήσεων (μηχανική αντοχή) του υλικού της προσθήκης. Η δύναμη ($\vec{F}_T$) προέρχεται από την τριβή μεταξύ των επιφανειών του υποστυλώματος και της προσθήκης πολυαμιδίου. Αποτελεί μία από τις κύριες δυνάμεις συγκράτησης του υποστυλώματος, αναπτύσσεται λόγω των δυνάμεων επαφής και αντιστέκεται στην κίνηση του υποστυλώματος, δηλαδή έχει κατεύθυνση προς τα πάνω. Στην περίπτωση εξαγωγής του υποστυλώματος από το έδαφος, η δύναμη τριβής ($\vec{F}_T$) θα είχε αντίθετη κατεύθυνση.
Η κανονική συνιστώσα δίνεται από τη σχέση:

$$F_N = F_o \cdot \cos(\theta) \tag{10}$$

Η κατακόρυφη συνιστώσα δίνεται από τη σχέση:

$$F_V = F_o \cdot \sin(\theta) \tag{11}$$

Η δύναμη τριβής μεταξύ προσθήκης πολυαμιδίου και υποστυλώματος είναι:

$$F_T = \mu \cdot F_N = \mu \cdot F_o \cdot cos(\theta) \tag{12}$$

όπου: μ είναι ο συντελεστής τριβής προσθήκης πολυαμιδίου-υποστυλώματος.

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ

Σε ένα κυλινδρικό υποστύλωμα ή πάσσαλο, καθώς αυτό εισέρχεται στο έδαφος, ενεργούν στον κύριο άξονά του αντίρροπες δυνάμεις: η δύναμη φορτίου *P* και η αντίδραση R_x που προκαλείται από το έδαφος. Το υποστύλωμα υπόκειται είτε σε θλίψη (compression) είτε σε λυγισμό (buckling), ανάλογα με τη σχέση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υποστυλώματος (μήκος *L*, διάμετρος *D*) και του ασκούμενου φορτίου. Όταν το υποστύλωμα είναι μικρού μήκους και μεγάλης ακαμψίας, τότε υπό τη δράση του φορτίου απλώς συμπιέζεται. Συγκεκριμένα, μπορεί να θεωρηθεί ως θλίψη και το υποστύλωμα ως άκαμπτο μόνο εάν ο λόγος μήκους προς διάμετρο (*L/D*) είναι μικρός. Στην περίπτωση που το υποστύλωμα είναι μεγάλου μήκους, λεπτό, και οι άκρες του δεν είναι τέλεια στηριγμένες τότε αυτό κάμπτεται (εκτρέπεται πλευρικά) υπό τη δράση του κατακόρυφου φορτίου. Προφανώς, στην περίπτωση αυτή, το υποστύλωμα θα πρέπει να μελετηθεί για κίνδυνο λυγισμού ακόμη και αν αυτός δεν έχει ακόμη εκδηλωθεί.

Αρχικά, εξετάζουμε το υποστύλωμα σε ολόκληρη τη δομή του (Εικόνα 3):

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow R_x = P \tag{13}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow R_y = -N \tag{14}$$

και, επομένως,

$$\sum M = 0 \Rightarrow -M + N \cdot L = 0 \tag{15}$$

$$M = N \cdot L \quad \text{και} \quad R_y =$$

όπου: *P* είναι το ασκούμενο εξωτερικό φορτίο, *N* είναι η κανονική δύναμη και *M* είναι η ροπή κάμψης,

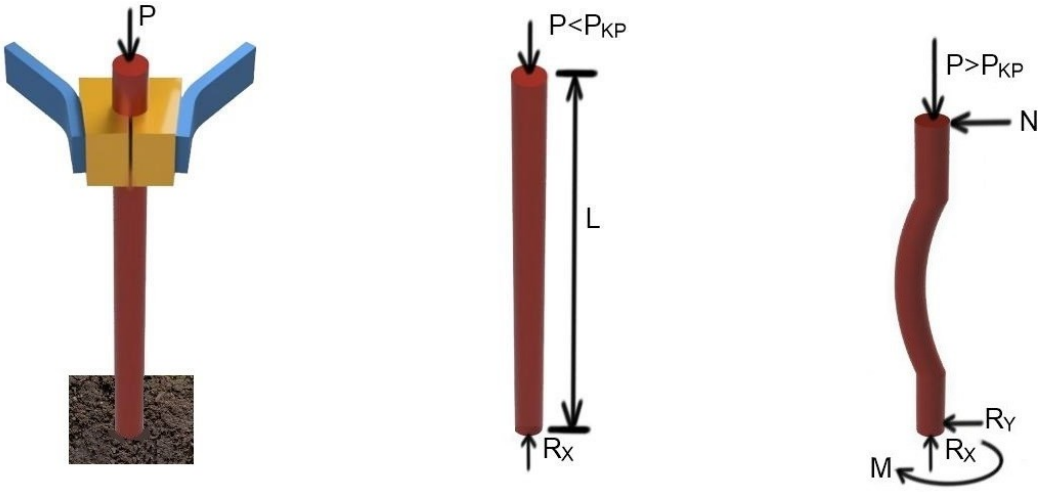
Στη συνέχεια εξετάζουμε το υποστύλωμα σε ένα τμήμα του (x):

$$\sum F_x = 0 \ \rightarrow f = -P) \tag{17}$$

$$\sum F_x = 0 \ \rightarrow \frac{M}{L} - V = 0 \ \rightarrow V = -\frac{M}{L} \tag{18}$$

$$\sum M = 0 \ \rightarrow T = M - \frac{M}{L} \cdot x - P \cdot v(x) \tag{19}$$

όπου: *f* είναι η εσωτερική δύναμη (σε θλίψη) στο σημείο τομής (ισορροπεί με το –*P*), *V* είναι η τέμνουσα δύναμη (προκύπτει από τη μεταβολή της ροπής στον άξονα), *T* είναι η εσωτερική ροπή κάμψης στο σημείο τομής, *ν(x)* είναι η εκτροπή του υποστυλώματος στο σημείο τομής, *P·ν(x)* είναι η πρόσθετη ροπή λόγω θλιπτικής δύναμης και εκτροπής (εμφανίζεται μόνο στον λυγισμό).



Εικόνα 3. Μελέτη δυνάμεων υποστυλώματος σε ολόκληρη τη δομή του. Στη

συνέχεια, από τη γραμμικοποιημένη σχέση ροπής-καμπυλότητας, έχουμε:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^2v}{dx^2} = -P \cdot v + M \cdot (1 - \frac{x}{L}) \tag{20}$$

Αναλύοντας περεταίρω την ανωτέρω σχέση, καταλήγουμε στη σχέση υπολογισμού του κρίσιμου φορτίου λογισμού ($P_{κρ}$) για κυλινδρικό υποστύλωμα (η ανάλυση παραλείπεται, επειδή είναι εκτός πλαισίου αυτής της εργασίας):

$$P_{\kappa\rho} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(kL)^2} \approx \frac{2{,}05 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \tag{21}$$

όπου: *E* είναι το μέτρο ελαστικότητας και *I* είναι η ροπή αδράνειας. Ο λυγισμός εξαρτάται από τη λυγηρότητα ή λόγο λυγισμού (λ):

$$\lambda = \frac{L}{K} \tag{22}$$

όπου: K είναι η ακτίνα αδράνειας. Εάν λ<50-60, τότε κυριαρχεί η θλίψη και πιθανόν να είναι αποδεκτή η παραδοχή ότι το υποστύλωμα είναι άκαμπτο. Εάν λ>80-100, τότε κυριαρχεί ο κίνδυνος λυγισμού. Εάν ο λόγος λ λαμβάνει τιμές μεταξύ 60-80, τότε απαιτείται πιο σύνθετη μελέτη (π.χ. θεωρία Engesser ή Johnson).

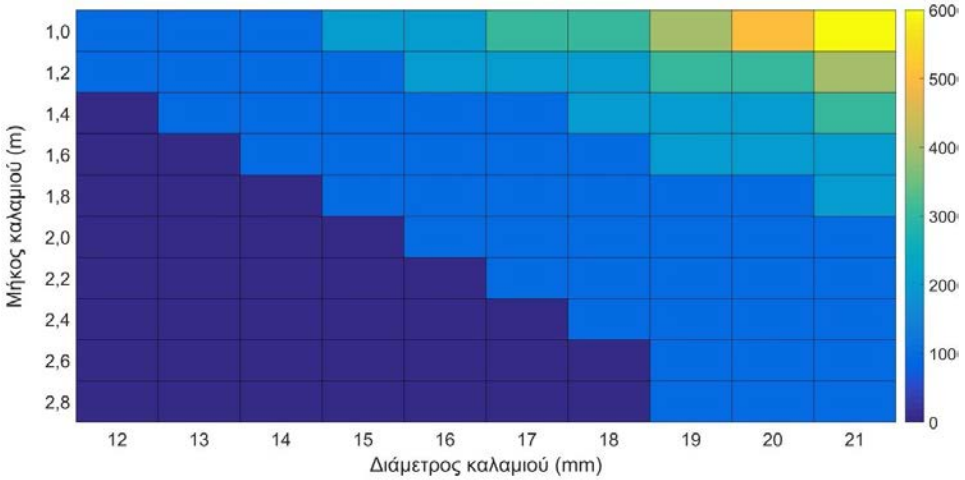
Η ροπή αδράνειας για το κυλινδρικό υποστύλωμα δίνεται από τη σχέση:

$$l = \frac{\pi \cdot D^2}{64} \tag{23}$$

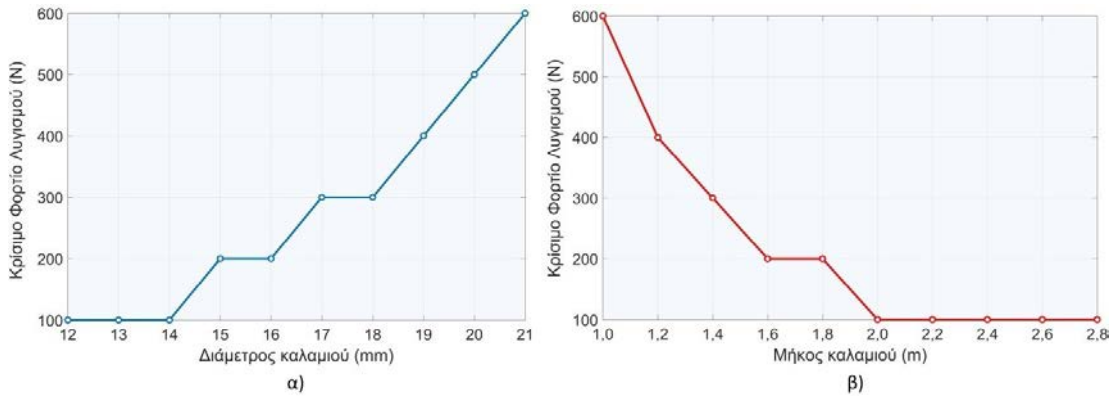
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά από έναν χρόνο ανάπτυξης της αρπάγης, πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών τόσο στο εργαστήριο όσο και στον αγρό για να ελεγχθούν η αξιοπιστία και η ασφαλής λειτουργία του συνολικού εξοπλισμού. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε το κοινό καλάμι (*Phragmites australis*).

Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται ο χάρτης με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για καλάμια με διαφορετική διάμετρο και μήκος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που επιλεγεί ως υποστύλωμα ένα καλάμι διαμέτρου 15 mm, και μήκους 1,6 m, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού θα είναι περίπου 100 N. Είναι προφανές ότι πρόκειται για ένα λεπτό και μακρύ καλάμι που θα λυγίσει σχετικά εύκολα. Αντιθέτως, εάν επιλεγεί ένα καλάμι διαμέτρου 21 mm, και μήκους 1,2 m, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού υπολογίζεται ότι θα είναι περίπου 400 N. Άρα, πρόκειται για ένα πιο ανθεκτικό καλάμι.



Εικόνα 4. Χάρτης κρίσιμου φορτίου λυγισμού για καλάμια με διαφορετική διάμετρο και μήκος.



Εικόνα 5. Κρίσιμο φορτίο λυγισμού: α) για καλάμια μήκους 1m και διαμέτρου 12÷21 mm και β) για καλάμια διαμέτρου 21 mm και μήκους 1÷2,8 m*

Στην Εικόνα 5(α) απεικονίζεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού ($P_{κρ}$) σε [N] για καλάμια μήκους 1 m και διαμέτρου από 12 mm έως 21 mm. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των καλαμιών, τόσο το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυξάνεται. Στην Εικόνα 5(β) απεικονίζεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού ($P_{κρ}$) σε [N] για καλάμια διαμέτρου 21 mm και μήκους από 1 m έως 2,8 m. Είναι φανερό ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μειώνεται ανάλογα με το μήκος των καλαμιών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται το σχέδιο μιας ρομποτικής αρπάγης με δύο συμμετρικά διατεταγμένους βραχίονες, για την αυτόματη εγκατάσταση ξύλινων υποστυλωμάτων, όπως είναι τα κοινά καλάμια, με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών εργασίας και παραγωγικότητας στις καλλιέργειες των αναρριχώμενων κηπευτικών.
Αναλύθηκαν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ της αρπάγης και των ξύλινων υποστυλωμάτων. Επίσης, μελετήθηκε η διαδικασία υπολογισμού του κρίσιμου φορτίου λυγισμού σε ένα κυλινδρικό υποστύλωμα καθώς αυτό εισέρχεται στο έδαφος. Τέλος, συζητήθηκε το πώς η διάμετρος και το μήκος των καλαμιών μπορούν να επηρεάσουν το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Γενικά τα καλάμια με μεγαλύτερη διάμετρο και με μικρότερο μήκος είναι πιο ανθεκτικά στον λυγισμό

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Banfi, E., Consolino, F., 1994. *The Simon & Schuster Guide to Climbing Plants*. Simon and Schuster.

Ceccarelli, M., Cuadrado, J., Dopico, D., 2002. An optimum synthesis for gripping mechanisms by using natural coordinates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 216*(6), 643-653.

Crosher, W.P., 2002. *Design and application of the worm gear*. The American Society of Mechanical Engineers.

Hitchmough, J., Fieldhouse, K., 2004. *Plant User Handbook: A Guide to Effective Specifying*. Blackwell Science.

Dong, H., Asadi, E., Qiu, C., Dai, J., Chen, I.M., 2018. *Grasp analysis and optimal design of robotic fingertip for two tendon-driven fingers*. Mechanism and Machine Theory, 130, 447-462.

Dudás, I., 2005. *The theory and practice of worm gear drives*. Butterworth- Heinemann.

Goldfarb, V., Trubachev, E., Barmina, N., 2018. *Advanced gear engineering*. Springer International Publishing.

Hugo, P.O., 2012. Industrial grippers: State-of-the-art and main design characteristics. In *Grasping in Robotics* (pp. 107-131). Springer London.

Radzevich, S.P., 2016. *Dudley's handbook of practical gear design and manufacture*. CRC press.

Yaghoubi, M., Tavakoli, H., 2022. *Mechanical Design of Machine Elements by Graphical Methods*. Springer.

18. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΕΝΕΡΓΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (PAR) ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΕΤΑΙ ΑΠΟ ΚΙΝΗΤΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

Α. Μακρής, Ι. Γράβαλος, Ι. Καβασίδης & Ζ. Τσιρόπουλος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας-Αγροτεχνολογίας, Γαιόπολις, 41500, Λάρισα athanmakris@uth.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην αξιολόγηση ενός συστήματος εκπομπής φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) που είναι ενσωματωμένο σε μία κινητή ρομποτική πλατφόρμα, με στόχο την επιμήκυνση της φωτοπεριόδου των φυτών μακράς ημέρας ακτινοβολώντας τα κατά τις νυχτερινές ώρες ή τις ημέρες με νεφοκάλυψη. Η κινητή ρομποτική πλατφόρμα είναι ρυθμιζόμενη ως προς το ύψος, ενώ το σύστημα PAR είναι ρυθμιζόμενης ισχύος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε επιφάνεια 1,35 m², η οποία χωρίστηκε σε 15 ίσα χωρία (30×30 cm). Σε κάθε χωρίο καταγράφηκαν οι τιμές PAR για διαφορετικά σενάρια λειτουργικής ισχύος του συστήματος τεχνητού φωτισμού (36÷299 W) και για διαφορετικά ύψη από την επιφάνεια μέτρησης. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται με τη μορφή χαρτών θερμότητας (heat maps), παρουσιάζοντας την κατανομή της PAR και τις ζώνες ακτινοβολίας υψηλής/χαμηλής έντασης. Η εργασία αυτή συμβάλει στη βελτιστοποίηση των συστημάτων φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας και μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για μελλοντικές εφαρμογές γεωργίας ακριβείας.

Λέξεις κλειδιά: φυτά, φωτοπερίοδος, φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, ρομποτική.

EVALUATION OF THE DISTRIBUTION AND INTENSITY OF PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION (PAR) EMITTED BY A MOBIL ROBOTIC PLATFORM TO IMPROVE PLANT GROWTH CONDITIONS

A.Makris✉, I. Gravalos, I. Kavasidis & Z. Tsiropoulos

University of Thessaly, Department of Agrotechnology, Gaiopolis, 41500, Larisa

✉*athanmakris@uth.gr*

ABSTRACT

This work focuses on the evaluation of a photosynthetically active radiation (PAR) emission system integrated into a mobile robotic platform, aiming to extend the photoperiod of long-day plants by irradiating them during night hours or on cloudy days. The mobile robotic platform is height-adjustable, while the PAR system is power-adjustable. The measurements were carried out on a 1.35 m² area, which was divided into 15 equal sections (30×30 cm). In each section, PAR values were recorded for different operating power scenarios of the artificial lighting system (36÷299 W) and for different height levels from the measurement surface. The results are displayed in the form of 2D heat maps, presenting the PAR distribution and the zones of high/low radiation intensity. This work contributes to the optimization of photosynthetically active radiation systems and can be a tool for future precision agriculture applications.

Keywords: plants, photoperiod, photosynthetically active radiation, robotics.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζει την φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών είναι η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (Photosynthetically Active Radiation, PAR), που ορίζεται ως το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταξύ 400 και 700 nm, υπεύθυνο για τη διέγερση των φωτοσυνθετικών μηχανισμών των φυτών (Ouzounis et al., 2015). Στα σύγχρονα συστήματα καλλιεργειών υπό ελεγχόμενες συνθήκες, ιδιαίτερα σε θερμοκήπια ή σε καλλιέργειες εσωτερικών χώρων, η χρήση πηγών τεχνητού φωτός έχει καταστεί απαραίτητη για τη διατήρηση σταθερών και εκτεταμένων φωτοπεριόδων (Adams & Langton, 2005; Kozai et al., 2016; Lozano-Castellanos et al., 2025), ώστε να διασφαλιστεί η βέλτιστη φωτοσυνθετική δραστηριότητα καθ' όλη τη διάρκεια του καλλιεργητικού κύκλου. Η τεχνολογία των διόδων εκπομπής φωτός (Light-Emitting Diodes, LED) έχει επικρατήσει ως η πλέον αποτελεσματική λύση προσφέροντας υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, αυξημένη διάρκεια ζωής και δυνατότητα φασματικής προσαρμογής στις απαιτήσεις των φυτών (Zou et al., 2025).

Η φωτοπερίοδος – δηλαδή η διάρκεια έκθεσης στο φως εντός 24ώρου – επηρεάζει τα κύρια στάδια ανάπτυξης των φυτών, όπως η άνθηση, η ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας και συνολικά η παραγωγική απόδοση (Adams & Langton, 2005). Τα φυτά μακράς ημέρας, σε αντίθεση με τα φυτά βραχείας ή τα ουδέτερα, απαιτούν παρατεταμένες ώρες φωτός για να ξεκινήσουν το αναπαραγωγικό τους στάδιο. Στις υπαίθριες καλλιέργειες, η συνολική ηλιακή ακτινοβολία ενδέχεται να μην είναι αρκετή για την κάλυψη των αναγκών σε φως των φυτών κατά την καλλιεργητική περίοδο. Για τον λόγο αυτό, χρειάζεται τεχνητή παροχή συμπληρωματικού φωτισμού, είτε για την επέκταση της φωτοπεριόδου είτε για την αντιστάθμιση της μειωμένης ακτινοβολίας κατά τις νεφελώδεις ημέρες (Kuniga, 2020). Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος τεχνητού φωτισμού δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Η ομοιόμορφη κατανομή της PAR στην επιφάνεια του φυλλώματος των φυτών είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς συμβάλλει στην αποφυγή φαινομένων υπερφωτισμού ή σκίασης, ενώ περιορίζει τις ενεργειακές απώλειες. Η ανομοιόμορφη κατανομή του φωτός έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών και κατά συνέπεια στη μείωση της παραγωγής (Wenxiong & Chengwei, 2019).

Σήμερα είναι διαθέσιμα αρκετά συστήματα τεχνητού φωτισμού που ρυθμίζουν την ένταση της PAR (αφομοιωτικός φωτισμός), χωρίς όμως να υπάρχει η σκοπιμότητα ελέγχου της φωτοπεριόδου (Kozai et al., 2016; Serrano-Bueno et al., 2017). Ωστόσο, οι μελέτες αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας αυτών των συστημάτων, όσον αφορά την ομοιόμορφη κατανομή και την απαιτούμενη ένταση της PAR κάτω από διαφορετικές συνθήκες, είναι ελάχιστες. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την αξιολόγηση ενός συστήματος τεχνητού φωτισμού ενσωματωμένο σε μια κινητή ρομποτική πλατφόρμα, η οποία έχει τη δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής του ελεύθερου ύψους της καθώς και της λειτουργικής ισχύος του συστήματος φωτισμού. Επίσης, η εργασία αυτή συνεισφέρει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ένα σύστημα τεχνητού φωτισμού, όταν ενσωματωθεί σε μία κινητή ρομποτική πλατφόρμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την ενίσχυση της παραγωγικότητας μιας καλλιέργειας. Έτσι, μέσω της ανάλυσης της χωρικής κατανομής της PAR υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, επιδιώκεται η επιλογή βελτιωμένων πρακτικών διαχείρισης του συστήματος τεχνητού φωτισμού, για την εφαρμογή του στις υπαίθριες καλλιέργειες αλλά και στην αστική και κάθετη γεωργία.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1. Φωτοσυνθετικά Ενεργή Ακτινοβολία (PAR) και Ανάπτυξη των Φυτών

Φωτοσυνθετικά Ενεργή Ακτινοβολία (PAR) ορίζεται η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ 400÷700 nm, η οποία χρησιμοποιείται από τα φυτά στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Kozai et al., 2016; Budavári et al., 2024). Αυτό το φάσμα απορροφάται από τη χλωροφύλλη και άλλα φωτοσυνθετικά χρωστικά, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών. Η ένταση και η διάρκεια έκθεσης στην PAR επηρεάζουν όχι μόνο τους ρυθμούς φωτοσύνθεσης αλλά και φυσιολογικές αποκρίσεις που εξαρτώνται από τη φωτοπερίοδο, όπως η άνθηση και η καρποφορία, ειδικά σε φυτά μακράς ημέρας (Adams & Langton, 2005).

2.2. Πυκνότητα Ροής Φωτοσυνθετικών Φωτονίων (PPFD)

Η Πυκνότητα Ροής Φωτοσυνθετικών Φωτονίων (Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD) αποτελεί βασική μετρούμενη παράμετρο για την αξιολόγηση της έντασης της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) που φτάνει στην επιφάνεια των φυτών. Εκφράζεται σε μονάδες μmol/m^2/s και αναφέρεται στον αριθμό των φωτονίων εντός του φάσματος 400-700nm που προσπίπτουν ανά δευτερόλεπτο σε μια μονάδα επιφάνειας (Ge et al., 2011; Nelson & Bugbee, 2014a; Ritchie, 2010).

Η PPFD είναι κρίσιμη για την κατανόηση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, καθώς τα φυτά ανταποκρίνονται κυρίως στην ποσότητα των φωτονίων και όχι στην ενέργεια του φωτός. Σε εφαρμογές ελεγχόμενης γεωργίας, η PPFD χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της έντασης του τεχνητού φωτισμού, ώστε να διασφαλιστεί η βέλτιστη φωτοσυνθετική αποδοτικότητα ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης του φυτού (Kozai et al., 2016).

Η μέτρηση της PPFD πραγματοποιείται με κβαντικούς αισθητήρες (quantum sensors), οι οποίοι έχουν φασματική απόκριση προσαρμοσμένη στο φάσμα της PAR. Οι τιμές PPFD ποικίλλουν ανάλογα με το είδος του φυτού και το στάδιο ανάπτυξης, με τυπικές τιμές να κυμαίνονται από 100–300 μmol/m²/s για σπορόφυτα και έως 600–1000 μmol/m²/s για φυτά σε πλήρη ανάπτυξη (Ouzounis et al., 2015).

2.3. Συντελεστής Ομοιομορφίας (C_U)

Η αξιολόγηση της ομοιόμορφης κατανομής της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) είναι κρίσιμη για την αποδοτική ανάπτυξη των φυτών, καθώς η ανομοιόμορφη κατανομή μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα υπερφωτισμού ή σκίασης, επηρεάζοντας αρνητικά τη φωτοσυνθετική αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα (Wanxiang & Chenglei, 2019).

Ο Συντελεστής Ομοιομορφίας (C_U) χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της ομοιομορφίας φωτισμού και ορίζεται ως:

$$C_U = \frac{Emin}{Eavg} \quad (1)$$

όπου: $Emin$ η ελάχιστη τιμή της PPFD ($\mu mol/m^2/s$), $Eavg$ η μέση τιμή της PPFD στην επιφάνεια μέτρησης. Αν και υπάρχουν διάφορες εξισώσεις υπολογισμού της ομοιομορφίας (Hung, 2024; Yao et al., 2016) , στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (1) που ακολουθεί τα πρότυπα EN 12464-1 (Ashdown & Descoteaux, 2022). Υψηλότερες τιμές Cu υποδηλώνουν πιο ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας, γεγονός που είναι

επιθυμητό για την ανάπτυξη όλων των φυτών σε μια καλλιέργεια. Τιμές C_U κάτω του 70% υποδεικνύουν σημαντική μεταβλητότητα η οποία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση μιας καλλιέργειας (Zou et al., 2025).

2.4. Αποδοτικότητα σε Φωτοσυνθετικά Ενεργά Φωτόνια ανά μονάδα ισχύος

Η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος τεχνητού φωτισμού αξιολογείται μέσω του δείκτη Photosynthetic Photon Efficacy (PPE), ο οποίος εκφράζει την ποσότητα των φωτοσυνθετικά ενεργών φωτονίων (PPF) που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο προς την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος από το σύστημα τεχνητού φωτισμού (Kosai et al., 2016; Nelson & Bugbee, 2014). Ο δείκτης PPE υπολογίζεται ως:

$$PPE = \frac{PPF\ (\mu mol/s)}{Ηλεκτρική\ Ισχύς\ (W)} \quad (2)$$

Η μονάδα μmol/J (ή ισοδύναμα μmol/W·s) επιτρέπει τη σύγκριση της φωτοσυνθετικής αποδοτικότητας διαφορετικών συστημάτων φωτισμού, ανεξαρτήτως της συνολικής ισχύος τους. Υψηλότερες τιμές PPE υποδηλώνουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα της παραγωγής χρήσιμης ακτινοβολίας για φωτοσύνθεση.

2.5. Έλεγχος Φωτοπεριόδου και Φυτά Μακράς Ημέρας

Πολλές καλλιέργειες, ειδικά εκείνες που ανήκουν στην κατηγορία των φυτών μακράς ημέρας (Long-Day Plants), εκτός σειράς άλλων παραγόντων (όπως, η θερμοκρασία, η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών, κ.ά.), βασίζονται επίσης σε παρατεταμένες περιόδους έκθεσης στο φως για την έναρξη κρίσιμων σταδίων που καθορίζουν την παραγωγή, όπως η άνθηση και η καρπόδεση (Serrano-Bueno et al., 2017). Η σκοπιμότητα ελέγχου της φωτοπεριόδου στα φυτά μακράς ημέρας καθίσταται σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη των φυτών και την αύξηση της παραγωγής.

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιείται αξιολόγηση της κατανομής και της έντασης της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) που εκπέμπεται από ένα σύστημα τεχνητού φωτισμού που είναι ενσωματωμένο σε μία κινητή ρομποτική πλατφόρμα (Εικόνα 1), κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Για τη διερεύνηση της αποδοτικότητας του συστήματος πραγματοποιήθηκε σειρά μετρήσεων έντασης της PAR σε μία επιφάνεια 1,35 m^2, η οποία χωρίστηκε σε 15 ίσα χωρία διαστάσεων 30x30 cm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θέσεις της ρομποτικής πλατφόρμας, συγκεκριμένα σε ύψος 53, 68 και 83 cm από την επιφάνεια μέτρησης, και για διάφορες τιμές ρύθμισης της ισχύος. Η ρύθμιση της ισχύος άρχιζε από τα 36 W (που αντιστοιχεί στο 10% της ονομαστικής ισχύος του συστήματος τεχνητού φωτισμού) και αυξάνονταν σταδιακά κατά την διάρκεια των μετρήσεων έως τα 299 W (100% της ονομαστικής ισχύος του συστήματος φωτισμού). Η κινητή ρομποτική πλατφόρμα, στην οποία είναι ενσωματωμένο το σύστημα φωτισμού, παρέμενε ακίνητη καθ’ όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων.

Το σύστημα τεχνητού φωτισμού είναι πλήρους φάσματος (full-spectrum) και καλύπτει το φάσμα των 400÷700 nm, το οποίο αντιστοιχεί στο εύρος της PAR. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει τη δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της ισχύος (10÷100%) και έχει σχεδιαστεί για να καλύπτει όλα τα στάδια ανάπτυξης των φυτών, από τη βλάστηση έως την ανθοφορία

και την καρποφορία: α) λευκό φως ευρείας φασματικής κάλυψης , β) μπλε φως (400÷500 nm) για την ενίσχυση της ανάπτυξης του φυλλώματος και των ριζών (Terfa et al., 2012), γ) πράσινο φως (500÷600 nm) για να διεισδύει βαθύτερα στο φύλλωμα των φυτών, βελτιώνοντας τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, όπως αναφέρεται στην εργασία των Shafiq et al. (2021) δ) κόκκινο φως (635÷665 nm) το οποίο είναι κρίσιμο για την ανθοφορία και την παραγωγή καρπών (Aliniaeifard et al., 2018).

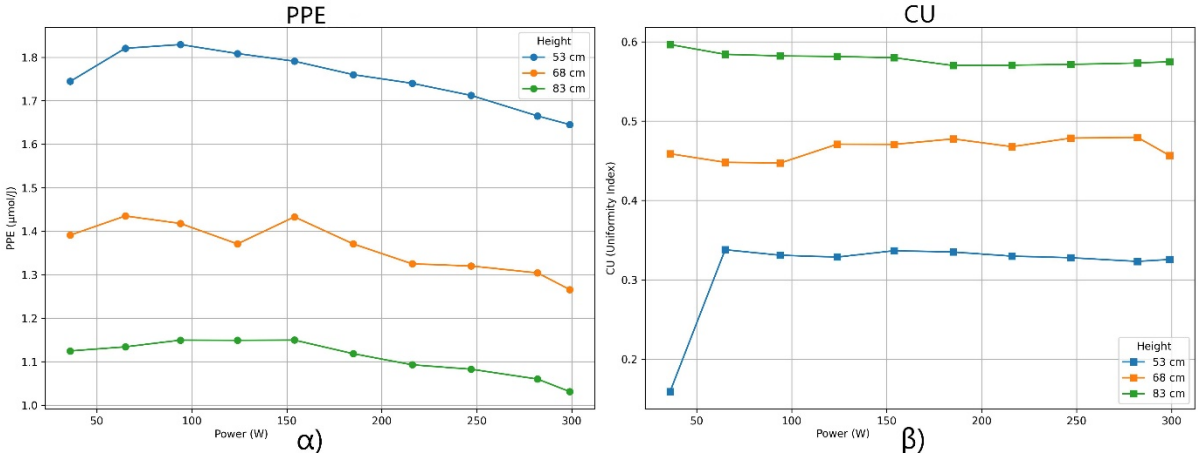
Για τη μέτρηση και καταγραφή της PAR, χρησιμοποιήθηκε μία συσκευή του ιταλικού οίκου Senseca, η οποία αποτελείται από: α) τον κβαντικό ραδιομετρικό ανιχνευτή **(Quantum Radiometric Probe) LP471PAR02** με φασματική περιοχή απόκρισης 400÷700 nm, ακρίβειας ±5%, ενώ η διακριτική του ικανότητα είναι 0,1 μmol/m²/s και β) τον καταγραφέα δεδομένων **(Data Logger)** HD2102.1. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρόνο σταθεροποίησης του ανιχνευτή, 2 λεπτών ανά σημείο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα λόγω μεταβατικότητας, και κάθε μέτρηση επαναλήφθηκε τρεις φορές. Η επιλογή του εξοπλισμού βασίστηκε στην υψηλή του ακρίβεια, την ευρεία επιστημονική χρήση του και τη συμβατότητά του με συστήματα LED φωτισμού, όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη.

Για την ομοιόμορφη καταγραφή των δεδομένων, ο κβαντικός ραδιομετρικός ανιχνευτής τοποθετούνταν στο κεντρικό σημείο του κάθε χωρίου. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος, χωρίς την παρουσία εξωτερικών πηγών φωτισμού, προκειμένου να διασφαλιστεί η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν σε ένα αρχείο Excel και στη συνέχεια η επεξεργασία τους έγινε με Python, χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες Pandas, Matplotlib και Seaborn.

Εικόνα 1. Κινητή ρομποτική πλατφόρμα με ενσωματωμένο σύστημα τεχνητού φωτισμού.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος τεχνητού φωτισμού, όπως εκφράζεται μέσω του δείκτη PPE (μmol/J), εξαρτάται έντονα τόσο από την ηλεκτρική ισχύ όσο και από την απόσταση της φωτεινής πηγής από την επιφάνεια. Από τα αποτελέσματα όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 2(α), προκύπτει ότι η μέγιστη αποδοτικότητα επιτυγχάνεται στο ύψος των 53 cm όταν η ισχύς είναι 94 W, με PPE ίσο με 1.83 μmol/J. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες τιμές ισχύος (>150 W) και ανεξαρτήτως ύψους, παρατηρήθηκε συστηματική μείωση του PPE. Επιπλέον, η αύξηση του ύψους της φωτεινής πηγής από 53 cm σε 68 cm και στη συνέχεια σε 83 cm συνοδεύεται από συστηματική μείωση της PPE, επιβεβαιώνοντας την επίδραση της απόστασης σύμφωνα με τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου. Στη μελέτη των Sheibani et al. (2023), η μείωση της απόστασης μεταξύ της LED πηγής και του φυλλώματος από 45 cm σε 15 cm, με σταθερό PPFD, οδήγησε σε σημαντική αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας, καθώς η ανάπτυξη των φυτών επιτεύχθηκε με σημαντικά μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η αύξηση της απόστασης οδηγεί σε μείωση της ενεργειακής αξιοποίησης, όπως αυτή εκφράζεται μέσω του δείκτη Energy Utilization Efficiency (EUE) που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη. Αν και ο δείκτης EUE διαφέρει εννοιολογικά από τον δείκτη PPE, αμφότεροι σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε χρήσιμη φωτοσυνθετική ακτινοβολία, ενισχύοντας τη θέση ότι η απομάκρυνση της φωτεινής πηγής επιφέρει μείωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Επιπλέον, στη συγκεκριμένη μελέτη των Sheibani et al. (2023) επισημαίνονται απώλειες φωτός που σχετίζονται με την ευρεία γωνία εκπομπής των LED, οι οποίες ακολουθούν κατανομή Lambertian, οδηγώντας σε διαρροή σημαντικού ποσοστού φωτονίων εκτός της ζώνης καλλιέργειας.



Εικόνα 2. Διαγράμματα: α) Δείκτη PPE και β) Δείκτη C_U.

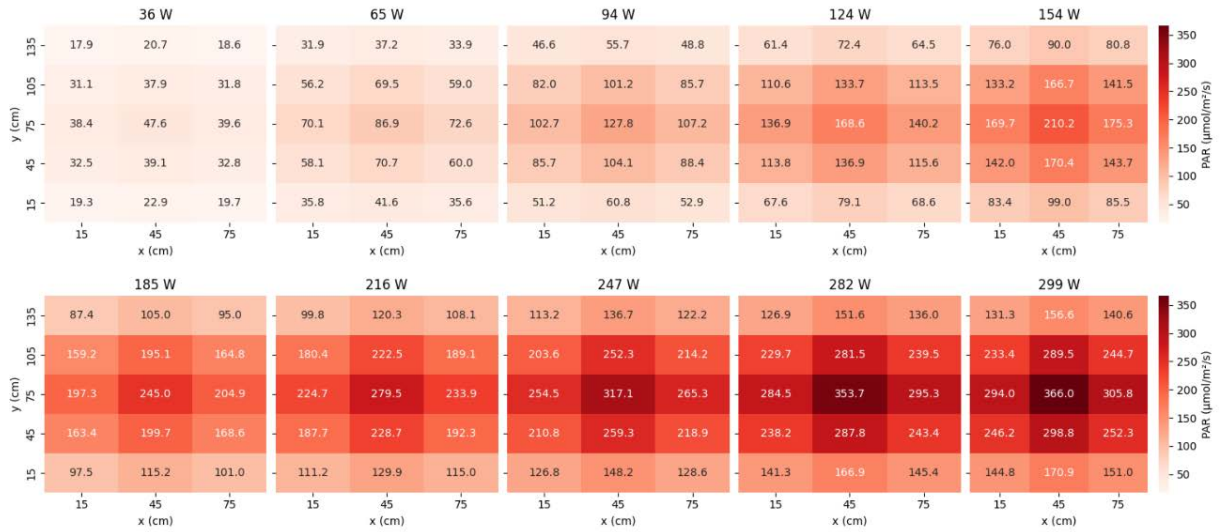
Παράλληλα, η ομοιόμορφη κατανομή φωτός, όπως εκφράζεται μέσω του δείκτη C_U, αυξάνεται σταθερά με την αύξηση του ύψους. Όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 2(β), σε χαμηλό ύψος 53 cm, η C_U παραμένει χαμηλή 0.33, υποδηλώνοντας έντονη ανομοιομορφία. Σε μεσαίο ύψος 68 cm, η C_U φτάνει περίπου 0.47, προσφέροντας ισορροπία μεταξύ έντασης και κατανομής φωτός. Στο μεγαλύτερο ύψος 83 cm, η C_U αγγίζει τις υψηλότερες τιμές 0.59, υποδεικνύοντας πολύ καλή ομοιομορφία, ανεξαρτήτως ισχύος. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου ύψους και της ισχύος του συστήματος τεχνητού φωτισμού εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής: αν προτεραιότητα είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, προτιμάται το ύψος των 53 cm με ισχύ 94 W, ενώ για ομοιόμορφη κατανομή φωτός προτείνεται το ύψος των 83 cm. Για συνδυασμό αποδοτικότητας και

ομοιομορφίας, το ύψος των 68 cm με ισχύ 154 W αποτελεί την πιο ισορροπημένη επιλογή. Τα παραπάνω ευρήματα ενισχύονται και από τη μελέτη των Hwa-Soo et al. (2014), στην οποία η βελτιστοποίηση παραμέτρων της διάταξης φωτισμού – συμπεριλαμβανομένου του ύψους τοποθέτησης των πηγών- οδήγησε σε αύξηση της ομοιομορφίας φωτισμού κατά 15%. Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του ύψους συνοδευόταν από βελτίωση της ομοιομορφίας, παρά τη μείωση της μέσης φωτεινής έντασης στην επιφάνεια μέτρησης.

Για την καλύτερη κατανόηση της χωρικής κατανομής της ακτινοβολίας στην υπό μελέτη επιφάνεια, χρησιμοποιήθηκαν θερμικοί χάρτες και τρισδιάστατα διαγράμματα για κάθε συνδυασμό ύψους και ισχύος του συστήματος τεχνητού φωτισμού. Στις Εικόνες 3, 4 και 5 παρουσιάζονται οι θερμικοί χάρτες της χωρικής κατανομής της PPFD για τα ύψη τοποθέτησης της φωτεινής πηγής στα 53 cm, 68 cm και 83 cm αντίστοιχα, και για όλες τις τιμές ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος τεχνητού φωτισμού (36-299W). Σε όλους τους χάρτες παρατηρείται συγκέντρωση υψηλών τιμών PPFD στο κέντρο, οι οποίες απεικονίζονται με έντονες κόκκινες και πορτοκαλί αποχρώσεις. Καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο, οι αποχρώσεις γίνονται σταδιακά πιο ανοιχτές, αντανακλώντας τη μείωση της φωτονικής ροής.

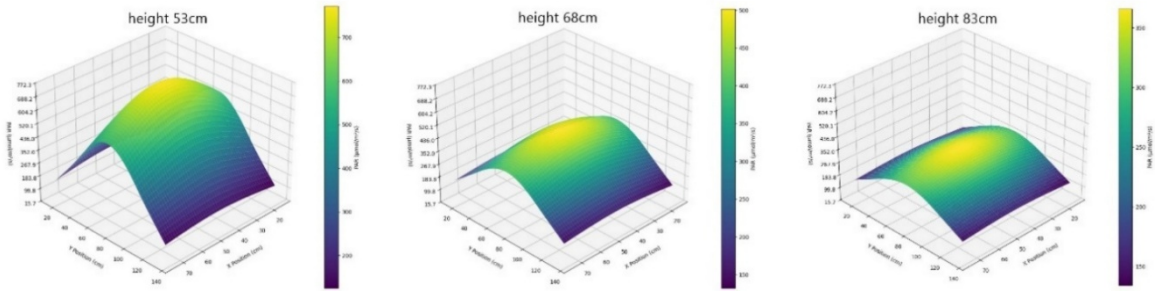
Εικόνα 3. Θερμικός χάρτης κατανομής PPFD για ύψος της ρομποτικής πλατφόρμας 53cm.

Εικόνα 4. Θερμικός χάρτης κατανομής PPFD για ύψος της ρομποτικής πλατφόρμας 68cm.



Εικόνα 5. Θερμικός χάρτης κατανομής PPFD για ύψος της ρομποτικής πλατφόρμας 83cm.

Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται η τρισδιάστατη κατανομή του PPFD. Στο ύψος των 53 cm, κυριαρχούν έντονες κίτρινες κορυφές στο κέντρο, οι οποίες υποδηλώνουν υψηλή ένταση ακτινοβολίας αλλά με έντονη ανομοιομορφία, καθώς παρατηρείται απότομη μετάβαση σε πράσινες και μπλε αποχρώσεις προς τις άκρες. Στο ύψος των 83 cm, οι ήπιες πράσινες και μπλε αποχρώσεις επικρατούν σε όλη την επιφάνεια, αντανακλώντας μειωμένη ένταση αλλά βελτιωμένη κατανομή φωτισμού. Το ενδιάμεσο ύψος των 68 cm παρουσιάζει πιο ισορροπημένη κατανομή, με σταδιακές χρωματικές μεταβάσεις που αντανακλούν έναν συμβιβασμό μεταξύ έντασης και ομοιομορφίας. Η χρήση τέτοιων γραφικών εργαλείων έχει αναγνωριστεί ως πολύτιμη μεθοδολογία σε μελέτες τεχνητού φωτισμού καλλιεργειών, καθώς προσφέρει κατανόηση της διάχυσης του φωτός με τρόπο άμεσο και ποιοτικά συγκρίσιμο σύμφωνα και με το άρθρο των Hwa-Soo et al. (2014).



Εικόνα 6. 3D χάρτης κατανομής PPFD για ισχύ 299W και διαφορετικά ύψη.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη τεκμηριώνει την τεχνική και επιχειρησιακή αξιοπιστία της κινητής ρομποτικής πλατφόρμας με ενσωματωμένο το σύστημα τεχνητού φωτισμού πλήρους φάσματος. Η μέγιστη τιμή του δείκτη PPE (1,83μmol/J) επιτεύχθηκε σε ύψος 53cm και ισχύ 94W, υποδεικνύοντας ότι η βέλτιστη αποδοτικότητα επιτυγχάνεται σε ενδιάμεσες τιμές ισχύος και μικρές αποστάσεις από την επιφάνεια. Η αύξηση του ύψους της φωτεινής πηγής από την επιφάνεια μέτρησης οδήγησε σε προοδευτική βελτίωση της ομοιομορφίας φωτισμού (C_U), με την υψηλότερη τιμή 0,59 να καταγράφεται στα 83 cm. Το εύρημα αυτό αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο της γεωμετρικής διάταξης της ρομποτικής πλατφόρμας

στην επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής της PAR στην επιφάνεια μέτρησης. Η δυνατότητα προσαρμογής ύψους και μεταβολής της ηλεκτρικής ισχύος παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στην επέκταση της φωτοπεριόδου για φυτά μακράς ημέρας, ενώ η τεχνική ανάλυση που εφαρμόστηκε μπορεί να αποτελέσει οδηγό για την αξιοποίηση τέτοιων τεχνολογιών σε εφαρμογές γεωργίας ακριβείας και ελεγχόμενου περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Adams, S. R., & Langton, F. A. (2005). Photoperiod and plant growth: A review. In Journal of Horticultural Science and Biotechnology (Vol. 80, Issue 1, pp. 2–10). Headley Brothers Ltd. https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511882.

Aliniaeifard, S., Seif, M., Arab, M., Mehrjerdi, M. Z., Li, T., & Lastochkina, O. (2018). Growth and Photosynthetic Performance of Calendula Officinalis under Monochromatic Red Light. International Journal of Horticultural Science and Technology, 5(1), 123–132. https://doi.org/10.22059/ijhst.2018.261042.248.

Ashdown, I., & Descoteaux, M. (2022, June 23). *Lighting uniformity in horticulture*. All Things Lighting® Association. https://www.allthingslighting.org/lighting-uniformity-in-horticulture/

Budavári, N., Pék, Z., Helyes, L., Takács, S., & Nemeskéri, E. (2024). An Overview on the Use of Artificial Lighting for Sustainable Lettuce and Microgreens Production in an Indoor Vertical Farming System. Horticulturae, 10(9), 938. https://doi.org/10.3390/horticulturae10090938.

Ge, S., Smith, R. G., Jacovides, C. P., Kramer, M. G., & Carruthers, R. I. (2011). Dynamics of photosynthetic photon flux density (PPFD) and estimates in coastal northern California. Theoretical and Applied Climatology, 105(1), 107–118. https://doi.org/10.1007/s00704-010-0368-6.

Hung, C. C., Lin, H. H., & Chen, C. H. (2024). Design of LED Lighting System with Improved Color Mixing Uniformity. Sensors & Materials, 36.Ian Ashdown. (2002, August 3). Light Uniformity in Agriculture.

Hwa-Soo, L., Sook-Youn, K., & Jae-Hyun, L. (2014). Improvement of light uniformity by lighting arrangement for standardized crop production. Journal of Central South University, 21(11), 4311-4319.

Kozai, T., Fujiwara, K., & Runkle, E. S. (2016). LED lighting for Urban agriculture. In LED Lighting for Urban Agriculture. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0.

Kuniga, T. (2020). Modification of the Light Environment Influences the Production of Horticultural Crops. https://doi.org/10.6090/jarq.54.285.

Lozano-Castellanos, L. F., Navas-Gracia, L. M., Lozano-Castellanos, I. C., & Correa-Guimaraes, A. (2025). Technologies Applied to Artificial Lighting in Indoor Agriculture: A Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 17, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/su17073196

Nelson, J. A., & Bugbee, B. (2014). Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. PLoS ONE, 9(6). https://doi.org/10.1371/ journal.pone.0099010.

Ouzounis, T., Rosenqvist, E., & Ottosen, C. O. (2015). Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: A review. In HortScience (Vol. 50, Issue 8). https://doi.org/10.21273/hortsci.50.8.1128.

Qi Yao, Q., Zhong, B., Shi, Y., & Ju, J. (2016). Evaluation of several different types of uniformity metrics and their correlation with subjective perceptions. Leukos, 13(1), 33-45. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/15502724.2016.1172488.

Ritchie, R. J. (2010). Modelling photosynthetic photon flux density and maximum potential gross photosynthesis. In PHOTOSYNTHETICA (Vol. 48, Issue 4). http://www.nrel.gov/rrdc/ smarts/.

Serrano-Bueno, G., Romero-Campero, F. J., Lucas-Reina, E., Romero, J. M., & Valverde, F. (2017). Evolution of photoperiod sensing in plants and algae. In Current Opinion in Plant Biology (Vol. 37, pp. 10–17). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.03.007.

Shafiq, I., Hussain, S., Raza, M. A., Iqbal, N., Asghar, M. A., Raza, A., ... & YANG, F. (2021). Crop photosynthetic response to light quality and light intensity. Journal of Integrative Agriculture, 20(1), 4-23. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63227-0.

Sheibani, F., Bourget, M., Morrow, R. C., & Mitchell, C. A. (2023). Close-canopy lighting, an effective energy-saving strategy for overhead sole-source LED lighting in indoor farming. Frontiers in Plant Science, 14, 1215919.

Terfa, M., Poudel, M., Roro, A., Gislerød, H., Olsen, J., & Torre, S. (n.d.). Light Emitting Diodes with a High Proportion of Blue Light Affects External and Internal Quality Parameters of Pot Roses Differently than the Traditional High Pressure Sodium Lamp.

Wenxiong, Y., & Chengwei, M. (2019). Design and Development of Light Radiation Testing Equipment for Solar Greenhouse. In E3S Web of Conferences (Vol. 136, p. 02042). EDP Sciences. Zhang, X., Zhang,

Zou, J., Wang, Z., Huang, H., Huang, X., & Shi, M. (2025). A Low-Energy Lighting Strategy for High-Yield Strawberry Cultivation Under Controlled Environments. Agronomy, 15(5). https://doi.org/10.3390/agronomy15051130

19. IN SITU ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΡΙΖΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΜΠΕΛΟΥ ΜΕ MINIRHIZOTRON & ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ROOTFLY: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ & ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Βασίλειος Σωτηρίου[1], Δημήτριος Κοντραφούρης[1], Γεώργιος Δούπης[2], Σοφία Μπελιά[1], Μαρία Παπαδάκη[1], Γεώργιος Σαλάχας[1] & Ευάγγελος Γιαννακόπουλος[1]

[1] *Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωπονίας, Νέα Κτίρια, 30200,Μεσολόγγι, E-mail: vgiann@upatras.gr*
[2] *Ινστιτούτο Ελιάς, Υποτροπικών Φυτών & Αμπέλου, ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ, Ηράκλειο, doupis@elgo.gr*

Περίληψη

Σήμερα, η παρακολούθηση της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος ενός φυτού δύναται να γίνει μέσω μη καταστροφικών τεχνικών, όπως με τη χρήση ενός minirhizotron συστήματος. Οι εικόνες που λαμβάνονται επεξεργάζονται και αναλύονται με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού, επιτρέποντας την καταγραφή της δομής, της λειτουργίας του ριζικού συστήματος και την απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του ριζικού θόλου υπό διαφορετικές συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας. Η παρούσα εργασία αξιολογεί, μέσω ενός minirhizotron συστήματος ιδιοκατασκευής και με χρήση λογισμικού ανοικτού κώδικα-Rootfly, το ριζικό σύστημα αμπέλου ποικιλίας μελαγουζιάς εμβολιασμένης σε υποκείμενο 110 Richter σε ώριμο (25-ετίας) και νέο (2- ετίας) αμπελώνα στον αγρό (ανοικτό σύστημα) καθώς και τη ριζοβολία του υποκειμένου σε γλάστρες (κλειστό σύστημα) με ή χωρίς την προσθήκη οργανικών εδαφοβελτιωτικών, Οι *In Situ* παρατηρήσεις αποκάλυψαν ότι η προσθήκη θερμοδυναμικά σταθεροποιημένου χούμο, όπως ορυκτού λεοναρδίτη, αυξάνει την ανάπτυξη των πρωτογενών και δευτερογενών ριζών, προάγοντας τη δημιουργία ενός πιο εκτεταμένου αρχιτεκτονικά αποδοτικού ριζικού δικτύου, ενώ αντίθετα η χρήση φρέσκου χούμο (compost από στέμφυλα) προάγει την επιφανειακή ανάπτυξη πλευρικών ριζών και τριχιδίων που σχετίζονται με την απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών. Επίσης, η εδαφική ρύπανση από υπολειμματικά χαλκούχα φυτοπροστατευτικά, φαίνεται να συσσωρεύεται ισχυρά γύρω από τα ριζικά τριχίδια προκαλώντας στρες στο φυτό και επηρεάζοντας αρνητικά τη φυσιολογία και την αρχιτεκτονική των ριζών καθώς και τη γενικότερη υγεία του φυτού. Συμπερασματικά, η τεχνολογία minirhizotron μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της γεωργικής παραγωγής, στην ενίσχυση της βιωσιμότητας των καλλιεργειών, στην παρακολούθηση της εδαφικής ρύπανσης και στην προσαρμογή της γεωργίας στις προκλήσεις ενός συνεχώς μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος.

1. Εισαγωγή

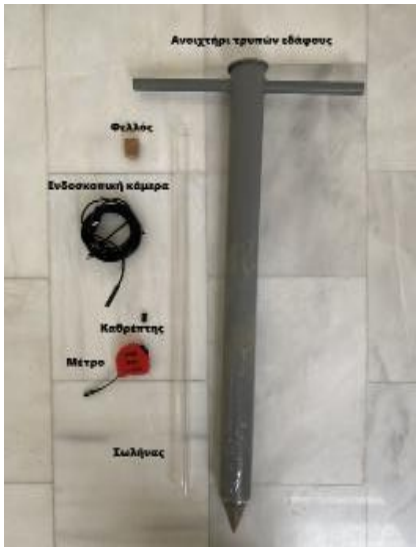
Το ριζικό σύστημα των φυτών είναι ένα από τα πιο κρίσιμα μέρη του φυτού που επιτελεί ζωτικές λειτουργίες αλληλοεπιδρώντας με όλες τις αβιοτικές και βιοτικές συνιστώσες του εδάφους. Η κατανόηση και παρακολούθηση της ανάπτυξης, της λειτουργίας και της αρχιτεκτονικής του ριζικού θόλου αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο για τη βελτίωση της υγείας και της παραγωγικότητας των φυτών[1]. Το ριζικό σύστημα των φυτών αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά και ταυτόχρονα δυσπρόσιτα τμήματα της φυσιολογίας των φυτών, καθώς η κατανόηση της δυναμικής και της λειτουργίας του είναι κρίσιμη για την γεωργική παραγωγή και την βιωσιμότητα των καλλιεργειών [1].

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη του ριζικού συστήματος της αμπέλου (Vitis vinifera) [2-3] μέσω της χρήσης σύγχρονης τεχνολογίας απεικόνισης, minirhizotron[4-6]. Η άμπελος, ως ένα από τα πλέον σημαντικά καλλιεργούμενα φυτά στην Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως, απαιτεί συνεχή έρευνα για τη βελτίωση της απόδοσης και της ανθεκτικότητάς της στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η χρήση του συστήματος minirhizotron παρέχει τη δυνατότητα απεικόνισης και παρακολούθησης του ριζικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να διαταράσσεται η φυσική του κατάσταση. Μέσω αυτής της τεχνολογίας, είναι δυνατή η λεπτομερής ανάλυση της ανάπτυξης, της μορφολογίας και της δυναμικής των ριζών κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας. Η μελέτη αυτή παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτίωση των καλλιεργητικών πρακτικών και την προσαρμογή των φυτών σε συνθήκες στρες, όπως ξηρασία, αλατότητα και υψηλές θερμοκρασίες [4]. Η διαδικασία περιλαμβάνει την κατασκευή και παραμετροποίηση ενός συστήματος minirhizotron, το οποίο αποτελείται από διάφανους σωλήνες και ενδοσκοπική κάμερα [5-6]. Οι σωλήνες τοποθετούνται στρατηγικά σε διαφορετικά βάθη και γωνίες για την καταγραφή της κατανομής και της ανάπτυξης των ριζών. Οι εικόνες που λαμβάνονται επεξεργάζονται και αναλύονται με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού[5-6], επιτρέποντας την καταγραφή της δομής και της λειτουργίας του ριζικού συστήματος.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την κατασκευή και παραμετροποίηση ενός συστήματος minirhizotron για την περίπτωση εφαρμογής του σε αμπέλι που εγκαθίσταται είτε σε αγρό είτε σε γλάστρες στοχευοντας να συμβάλει στην κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την ανάπτυξη των ριζών της αμπέλου υπό συνθήκες λίπανσης με χούμο και υπό αβιοτικό στρες βελτιστοποιώντας τις γεωργικές πρακτικές.

2. Υλικά και Μέθοδοι

Η κατασκευή, εγκατάσταση και παραμετροποίηση του συστήματος minirhizotron περιλαμβάνει την επιλογή υλικών, όπως διαφανείς σωλήνες ID 24mm και ενδοσκοπική κάμερα, καθώς και τη συναρμολόγηση του συστήματος (Εικ.1). Η εγκατάσταση του συστήματος έγινε σε πειραματικούς ώριμους και νέους αμπελώνες στον αγρό καθώς και σε γλάστρες. Η παραμετροποίηση περιλαμβάνει τη ρύθμιση της γωνίας και της θέσης των σωλήνων για την καλύτερη δυνατή απεικόνιση των ριζών (Εικ.2). Για την περίπτωση του αγρού επιλέχθηκε η πλάγια βύθιση του σωλήνα πλησίον του πρέμνου υπό γωνία 53.1^{o}, ενώ για την ριζοβολία πρέμνων σε γλάστρες επιλέχθηκε κατακόρυφη βύθιση του σωλήνα (Εικ.2).



Εικ.1. Μέρη του Συστήματος

Εικ.2. Εγκατάσταση συστήματος Minirhizotron στον αγρό και σε γλάστρες

Η συλλογή και ανάλυση δεδομένων έγινε με τη χρήση του λογισμικού ανοικτού κώδικα, Rootfly, το οποίο χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των εικόνων ριζών και την εξαγωγή ποιοτικών αλλά και ποσοτικών δεδομένων σχετικά με το μήκος, τη διάμετρο, και τη μορφολογία των ριζών (Εικ.3).

Εικ.3. Το περιβάλλον του προγράμματος RootFly

3. Αποτελέσματα και συζήτηση

Οι ρίζες σε ώριμο αμπελώνα (25-ετών) εγκατεστημένο στην περιοχή Λεσίνι με την προσθήκη λεοναρδίτη (200kg/στρ) εμφάνισαν μεγάλη διάμετρο σε σύγκριση με το δείγμα αναφοράς (control) και άλλες προσθήκες όπως κομπόστ από στέμφυλα (Εικ. 4). Ο ριζικός μηχανισμός έδειξε να κατευθύνεται προς τα βαθύτερα εδαφικά στρώματα πιθανόν για αναζήτηση απαραίτητων θρεπτικών συστατικών και νερού (Εικ. 4). Αντίθετα, το δίκτυο των ριζών, ώριμου αμπελώνα στην προσθήκη κομπόστ από στέμφυλα δημιούργησε πιο λεπτές(μικρότερης διαμέτρου) και πιο πυκνό δίκτυο ριζών που εντοπίζονται σε επιφανειακά στρώματα του εδάφους(Εικ. 4). Στον νέο αμπελώνα (2-ετών) στο Campus του Πανεπιστημίου Πατρών στο Μεσολόγγι η προσθήκη λεοναρδίτη δημιούργησε

περισσότερο αριθμό ριζιδίων σε αντίθεση με τον ώριμο αμπελώνα, όπου το ριζικό σύστημα είχε ήδη δημιουργηθεί αποκαλύπτοντας ότι η παρουσία λεοναρδίτη λειτουργεί ως βιοδιεγέρτης. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από την παρουσία λεοναρδίτη σε ριζοβολία αμπέλου, που αναπτύχθηκε σε γλάστρες όπου διαπιστώθηκε η δημιουργία λεπτών ριζιδίων μεγάλης πυκνότητας που κατευθύνονται προς βαθύτερα στρώματα (Εικ. 4). Επιπλέον, η παρουσία χαλκού στο έδαφος αποκάλυψε, μέσω της χρωστικής που φέρουν τα χαλκούχα φυτοπροστατευτικά σκευάσματα, ότι ο χαλκός συσσωρεύεται γύρω από τα ριζίδια αλλάζοντας το χρώμα της ρίζας σε καφέ, γεγονός ένδειξης στρες [7].

Εικ.4 Απεικόνιση ριζικού θόλου των επεμβάσεων με χούμο

4. Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολήθηκε με την απεικόνιση του ριζικού συστήματος της αμπέλου χρησιμοποιώντας την τεχνολογία minirhizotron. Αυτή η μέθοδος παρείχε σημαντικές πληροφορίες για τη ριζική ανάπτυξη και τη διαχείριση της καλλιέργειας αμπέλου, προσφέροντας νέες προοπτικές στη μελέτη των υπόγειων δομών του φυτού. Ακόμη ή έρευνα αποκάλυψε ότι η κατασκευή και η παραμετροποίηση ενός συστήματος minirhizotron, καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του σε πειραματικές συνθήκες εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη χούμο τύπου λεοναρδίτη μπορεί να αυξήσει την ανάπτυξη των πρωτογενών και δευτερογενών ριζών, προάγοντας τη δημιουργία ενός πιο εκτεταμένου και αποδοτικού ριζικού συστήματος. Αντίθετα, η υπερβολική συσσώρευση χαλκού στην εδαφική μήτρα αποκάλυψε ότι μπορεί να προκαλέσει τοξικότητα, επηρεάζοντας αρνητικά τη φυσιολογία των ριζών και τη γενικότερη υγεία του φυτού. Η χρήση κομπόστ ως οργανικού λιπάσματος φάνηκε να προάγει την επιφανειακή ανάπτυξη των ριζών. Οι ρίζες που αναπτύχθηκαν σε έδαφος εμπλουτισμένο με κομπόστ από στέμφυλα είχαν μεγαλύτερη πυκνότητα ριζικού

δικτύου, υποδεικνύοντας ότι το κομπόστ μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση για τη βελτίωση της υγείας και της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Συμπερασματικά, η τεχνολογία minirhizotron μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της γεωργικής παραγωγικότητας, στην ενίσχυση της βιωσιμότητας των καλλιεργειών και στην προσαρμογή της γεωργίας στις προκλήσεις ενός συνεχώς μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος

5. Βιβλιογραφία

[1] Pagès, L., Bécel, C., & Mancuso, S. (2019). The architecture of root systems: A new synthesis. Annals of Botany, 124(4), σσ. 717-730.

[2] Morlat, R., & Jacquet, A. (2003). Grapevine root system and soil characteristics in a vineyard maintained long-term with or without interrow sward. Agricultural Water Management, 60(1), 1- 13.

[3] Bell, J., Roe, R., & Smith, G. (2021). Root Morphology and Adaptation in Vitis vinifera: Responses to Environmental Stress. Frontiers in Plant Science, 12, 637-649.

[4] Lobet, G., Pagès, L., & Draye, X. (2011). A novel image-analysis toolbox enabling quantitative analysis of root system architecture. Annals of Botany, 108(6), 1143-1152.

[5] Jeudy, C., Adrian, M., Baussard, C., Bernard, C., Bernaud, E., & Bourion, V. (2016). RhizoTubes as a new tool for high throughput imaging of plant root development and architecture: test, comparison with pot grown plants and validation. Plant Methods, 12.

[6] Arnaud, M., Baird, A.J., Morris, P.J., Harris, A. and Huck, J.J. (2019). EnRoot: a narrow- diameter, Ryan, P.R., Delhaize, E., Watt, M. and Richardson, A.E. (2016). Plant roots: understanding structure and function in an ocean of complexity. Annals of Botany, 118(4), pp.555–559. doi:https://doi.org/10.1093/aob/mcw192.

[7] Rasool, A., Pichtel, J., & Hayat, S. (2021, 8). Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. Biometals, 34(4), 737-759.

20. SPRAYING DRONES FOR VINEYARDS FROM THE PERSPECTIVE OF AGROECOLOGY: RESULTS FROM THE D4AGECOL WORKSHOP IN GREECE

E. Anastasiou[1,2], M.-Z.Papantonatou[1], K. Reimand[3], A. Niedermayr[3], J. Kantelhardt[3], A. Gabriel[4], F. Schwierz[5], A. Meyer-Aurich[5] & S. Fountas[1]

[1] *Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece, evangelos_anastasiou@aua.gr*
[2] *Lab. of Agricultural Engineering, School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 54634, Greece*
[3] *Institute of Agricultural and Forestry Economics, Department of Economics and Social Sciences, Vienna, Austria*
[4] *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Arbeitsgruppe Digital Farming, Kleeberg 14,94099 Ruhstorf a. d. Rott*
[3] *Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469, Potsdam, Germany*

ABSTRACT

Over-reliance on high-input, mechanized farming is driving climate change, biodiversity loss, land degradation, and rural inequality. Agroecology offers a holistic alternative by addressing these challenges together. Spraying drones are emerging as labor-saving tools that can reduce drift and soil compaction, but their alignment with agroecological principles and adoption prospects are still unclear. The Digitalisation for Agroecology (D4AgEcol) project aims to evaluate such technologies. This study focused on spraying drones in vineyards, using the FAO's Ten Elements of Agroecology and the ADOPT tool to assess their contribution and adoption potential. A 2024 workshop at the Agricultural University of Athens engaged 27 participants in this dual assessment. Efficiency was rated highest, with scores of 3.75 (local) and 4.00 (EU-wide), driven by perceived cost savings and quality improvements. ADOPT results showed a 19-year path to near-peak adoption, with an estimated peak at 42% and 8.5 years to reach half of that. Spraying drones show promise for agroecology, but realizing their potential will require better training, risk management, and standardized protocols.

Keywords: agroecology, spraying drones, adoption, 10 elements of agroecology, workshop results, D4AgEcol

ΨΕΚΑΣΤΙΚΑ DRONES ΓΙΑ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΗΣ ΑΓΡΟΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ D4AGECOL ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Ε. Αναστασίου[1,2,*], Μ.-Ζ. Παπαντωνάτου[1], K. Reimand[3], A. Niedermayr[3], J. Kantelhardt[3], A. Gabriel[4], F. Schwierz[5], A. Meyer-Aurich[5] & Σ. Φουντάς[1]

[1]*Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, ΓΠΑ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, evangelos_anastasiou@aua.gr*
[2]*Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας, Τμήμα Γεωπονίας, ΑΠΘ, 54634, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα*
[3]*Institute of Agricultural and Forestry Economics, Department of Economics and Social Sciences, Vienna, Austria*
[4]*Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Arbeitsgruppe Digital Farming, Kleeberg 14,94099 Ruhstorf a. d. Rott*
[5]*Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469, Potsdam, Germany*

*

Περίληψη

Η υπερβολική εξάρτηση από εντατικές, μηχανοποιημένες γεωργικές πρακτικές εντείνει την κλιματική αλλαγή, την απώλεια βιοποικιλότητας, την υποβάθμιση των εδαφών και τις κοινωνικές ανισότητες στην ύπαιθρο. Η αγροοικολογία προτείνεται ως μια ολιστική προσέγγιση που αντιμετωπίζει όλα αυτά τα προβλήματα ταυτόχρονα. Τα ψεκαστικά drones κερδίζουν έδαφος ως εργαλεία εξοικονόμησης εργασίας που μειώνουν την παρέκκλιση των ψεκασμών και τη συμπίεση του εδάφους, αλλά η συμβατότητά τους με τις αρχές της αγροοικολογίας και οι προοπτικές υιοθέτησής τους παραμένουν ασαφείς. Το έργο "Ψηφιοποίηση για την Αγροοικολογία" (D4AgEcol) στοχεύει στην αξιολόγηση τέτοιων τεχνολογιών. Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε στα ψεκαστικά drones σε αμπελώνες, χρησιμοποιώντας τα Δέκα Στοιχεία της Αγροοικολογίας του FAO και το εργαλείο ADOPT για την αξιολόγηση της συνεισφοράς και του δυναμικού υιοθέτησής τους. Ένα εργαστήριο πραγματοποιήθηκε το 2024 στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών με τη συμμετοχή 27 ατόμων. Η αποδοτικότητα αξιολογήθηκε ως το σημαντικότερο πλεονέκτημα, με βαθμολογίες 3,75 (σε τοπικό επίπεδο) και 4,00 (σε ευρωπαϊκό), λόγω της μείωσης του κόστους και της βελτίωσης της ποιότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ADOPT, ο χρόνος για την επίτευξη σχεδόν της μέγιστης υιοθέτησης υπολογίστηκε σε 19 έτη, με μέγιστο ποσοστό υιοθέτησης 42% και 8,5 έτη για την επίτευξη του 50% αυτού. Τα ψεκαστικά drones παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες για την αγροοικολογία, αλλά η πλήρης αξιοποίησή τους απαιτεί ενίσχυση της κατάρτισης, στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου και καθιέρωση πρότυπων πρωτοκόλλων και σκευασμάτων.

Λέξεις κλειδιά: αγροοικολογία, ψεκαστικά ΣΜηΕΑ, 10 στοιχεία αγροοικολογίας, αποτελέσματα διαδραστικού εργαστηρίου, D4AgEcol

1. INTRODUCTION

Agroecology is an integrative approach to sustainable agricultural systems, focusing on the dynamics between biophysical and socioeconomic processes. Its importance lies in delivering sustainable food production, enhancing biodiversity, recycling nutrients, improving soil fertility, and supporting livelihoods for billions of people, particularly smallholder farmers (Ewert et al., 2023). However, the complexity of interactions in agroecological systems demands comprehensive management strategies.

Digital tools, such as terrestrial robots, UAVs, Farm Management Information Systems, IoT systems, and multispectral cameras, have revolutionized agriculture by enabling real-time data collection and decision-making. These systems have significantly enhanced crop production efficiency by improving monitoring and targeting of inputs (Balafoutis et al., 2017; Burns et al., 2022; Anastasiou et al., 2023). Thus, the use of digital technologies in agriculture and specifically in vineyards is critical for enabling agroecology. They offer the data and models required to guide sustainable practice and policy, create resilience in food systems, and, ultimately, contribute to the health of the world and its inhabitants. By using the potential of digital technologies, agroecology may grow to tackle the global issues of food security, environmental sustainability, and climate adaption (Burns et al., 2022).

Nowadays, the use of UAVs for pest and fertilizer spraying is growing rapidly globally (García-Munguía et al., 2024). According to Maritan et al. (2025), UAV spraying can save €278- 377 ha^{-1} on flat vineyards and €367-538 ha^{-1} on steep-slope vineyards depending

on disease pressure, but the high costs of custom-hiring UAVs in Greece make it less profitable, except in situations of extreme labor scarcity and high disease pressure. Gaadhe et al. (2025) concluded that a drone spraying system outperformed a knapsack system in terms of application rate and effective field capacity, with an average application rate of 26.96 l/ha and effective field capacity of 4 ha/h, compared to the knapsack system's 490.28 l/ha and 0.082 ha/h, respectively, under average wind conditions.

Although many studies like the aforementioned have indicated clear benefits of the use of spraying drones for the environment and the economy, farmers are reluctant on adopting them. The reasons may vary and do not depend solely on farmer characteristics but also on the food systems and structures in which farmers operate, as well as the interactions with other value chain actors (Gemtou et al., 2024).

Thus, the main aim of the study was to evaluate the use of spraying drones for vineyards, through the lens of the FAO's Ten Elements of Agroecology and identify the main drivers and barriers that will shape their uptake in European farming systems.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Workshop location and time

A workshop was conducted in 4 April 2024 at the premises of Agricultural University of Athens. In total, 27 stakeholders from academia, research, agriculture and policy making participated in the workshop. The audience was split into two groups to participate in the adoption rate and the agroecological assessments, respectively lasting one hour each.

2.2 ADOPT model assessment

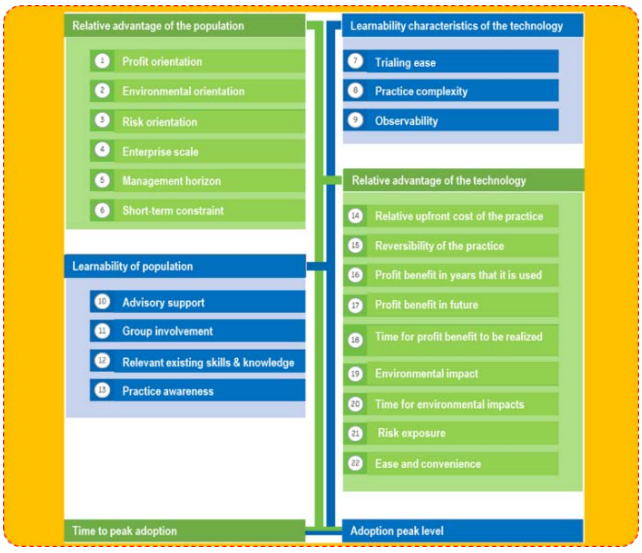


Figure 1. The topics of the 22 questions of the ADOPT model

The ADOPT model created by CSIRO was used for assessment of adoption rate of spraying drones for vineyards. ADOPT is a predictive quantitative model designed to assess the adoption of innovations in agricultural and natural resource management systems (Kuehne et al., 2017). ADOPT stands for 'Adoption and Diffusion Outcome Prediction Tool'. This model and software application help academics, extension workers,

and policymakers understand the variables influencing the adoption of agricultural innovations, practices, and technology. The model is simple and combines several factors, including variables relating to economics, risk, environmental effects, farmer networks, farm and farmer characteristics, as well as the simplicity and comfort of applying new techniques. The model consists of a set of 22 questions which are used for assessing the time to peak adoption and adoption peak level (Figure 1).

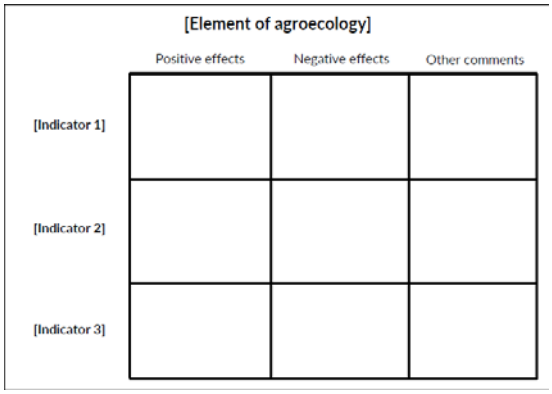
For the purposes of the workshop, an individual account was purchased by the corresponding website (https://adopt.csiro.au/). The web app has the ability to calculate the adoption peak level and time to peak adoption level automatically and provide the results through a detailed report.

2.3 Agroecological Assessment

The agroecological assessment of spraying drones for vineyards was structured into two main stages, combining both creative exploration and evaluative thinking according to Rustler (2018). Initially, participants engaged in a modified world café approach (The World Café Community Foundation, 2023), discussing a predefined set of indicators related to the FAO's 10 elements of agroecology. This process involved small groups rotating between tables, remaining consistent to foster deeper exchanges and knowledge sharing (Baumann & Gordalla, 2020). Using structured indicator sheets (Döring et al., 2016), participants highlighted potential positive and negative impacts of spraying drones (Figure 2).

Element of agroecology	Indicator
Diversity	Habitat and landscape diversity
	Crop, tree and livestock diversity on the farm
	Diversity of activities, products and services
Co-creation and sharing of knowledge	Access to data collected by the technology
	Connections among farmers or between farmers and other stakeholders
	Participation of farmers or other end-users in the development of the technology
Synergies	Compatibility with other digital and non-digital technologies
	Compatibility with polyculture fields or non-crop plants
	Habitat and landscape connectivity
Efficiency	Farm profitability
	Pesticide use
	Fertiliser use
Recycling	Reusability and reparability of the technology
	Water saving or recycling
	Reduction or recycling of waste
Resilience	Protection against extreme weather events
	Protection of farmers against income fluctuations
	Protection against pest and disease attacks
Human and social values	Working conditions and wages
	Young people's empowerment and involvement in agriculture
	Data ownership
Culture and food traditions	Compatibility with local varieties and breeds
	Preservation of farmers' knowledge, skills and identity
	Integration of local culture into the technology
Circular and solidarity economy	Connecting producers and consumers via local markets and short value chains
	Consumer benefits and fair prices
	Shareability of the technology with other farmers
Responsible governance	Infrastructure readiness
	Sufficiency of risk assessment related to the use of the technology
	Supporting of policymaking and regulation by data provision

(a)



(b)

Figure 2. (a) The assessed indicators per element of agroecology; and (b) A3 template sheet for the assessment of the selected indicators per element

Following this, participants completed an evaluative survey to rate the overall impacts of the technology on each agroecological element, assess their confidence in these evaluations, and indicate whether their assessments could be generalized from regional to broader European contexts, given that the impacts of digital technologies on agroecology are often context-specific (Finger, 2023) (Figure 3). Finally, targeted discussions deepened insights into the most positively and negatively affected agroecological elements, identifying areas for improvement and potential research priorities.

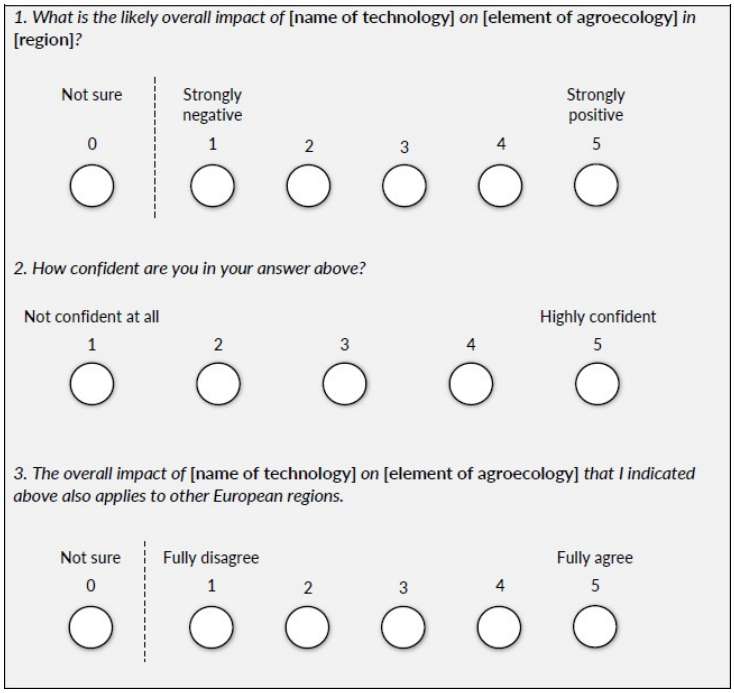


Figure 3. Template of the evaluative survey per element.

3. RESULTS

3.1 ADOPT

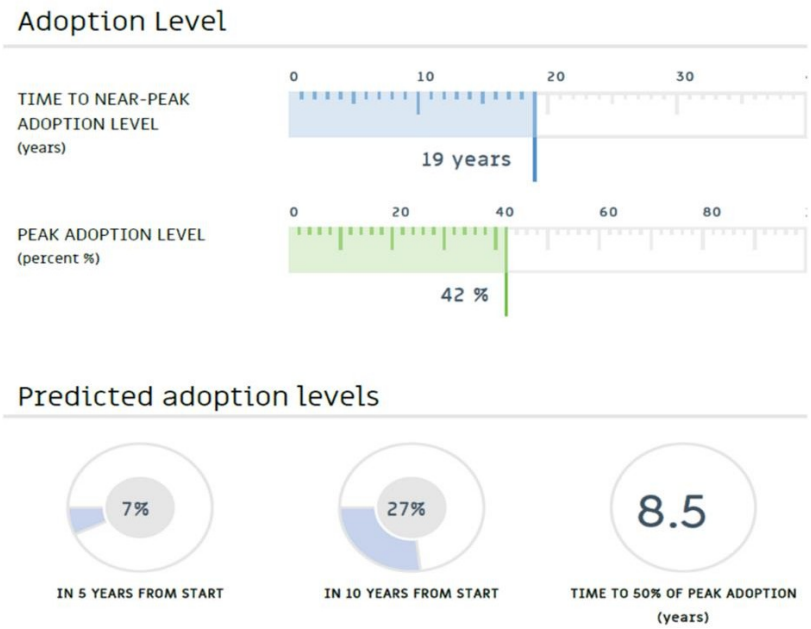


Figure 4. Results of the ADOPT model assessment on the adoption rate of spraying drones for vineyards as provided by the report feature of the web platform.

As presented in Figure 4, the anticipated adoption of spraying drones in Greek vineyards is projected to develop gradually over the coming years. It is expected that it will take

approximately 19 years for the technology to approach its near-peak adoption level. This relatively extended timeframe highlights the cautious and measured pace at which vineyard operators are expected to integrate drone technology into their management practices. At its peak, the adoption level is estimated to reach about 42%. This suggests that less than half of the vineyards in Greece will eventually adopt drone-based spraying technologies, reflecting potential constraints such as cost, regulatory hurdles, technological readiness, and cultural acceptance among vineyard managers. In terms of specific adoption milestones, initial uptake will be modest, with just 7% adoption anticipated within the first five years. However, adoption is projected to accelerate somewhat, reaching approximately 27% within a decade. Furthermore, achieving half of the peak adoption rate—around 21% adoption—is expected within roughly 8.5 years from the introduction of the technology

This suggests a cautious yet consistent increase in adoption rates as vineyard operators gradually recognize and embrace the advantages of drone technology in vineyard management. This can be justified by the fact that although there are promising results, important limitations like lack of standardized testing protocols for assessment (García-Munguía et al., 2024) and variable return on investment due to the different topographic, climate and regional characteristics of each field (Maritan et al., 2025) make farmers reluctant on adopting and investing in spraying drones.

3.2 Agroecological Assessment

As presented in Figure 5a, participants perceived spraying drones to have varying impacts on agroecological elements in Greek vineyards. The highest perceived positive impacts were on "Efficiency" (3.75), "Diversity" (3.57), and "Synergies" (3.50), suggesting that spraying drones could significantly enhance operational efficiency and foster beneficial ecological interactions. In contrast, the lowest score was given to "Recycling" (2.17), indicating limited or negative perceptions about how drones influence material recycling or waste management practices. Other areas like "Circular and solidarity economy" (2.88) and "Culture and food traditions" (2.71) received relatively moderate to low scores, reflecting mixed or uncertain outcomes related to cultural and economic sustainability.

Regarding mean confidence in the impact of spraying drones in Greece, participants showed varying levels of confidence in their assessments. High confidence scores were noted particularly in "Synergies," "Culture and food traditions," and "Circular and solidarity economy" (each rated 4.25), signifying strong confidence in their understanding of how drones affect these elements. "Efficiency" also rated highly at 4.13, highlighting consistent confidence about drones improving operational performance. Lower confidence levels were seen in the assessment of "Co-creation and sharing of knowledge" (3.25) and "Recycling" (3.63), suggesting some uncertainty about drones' impacts or a lack of clear evidence or experience in these areas (Figure 5b).

Participants generally felt their assessments for Greece had good applicability at a broader European level, with "Efficiency" scoring highest (4.00). This suggests broad agreement that the efficiency-related benefits of spraying drones can likely be generalized beyond Greece. "Recycling" and "Circular and solidarity economy" had lower scores (3.29), indicating participants' perception that these elements are more context-dependent and less easily generalizable across different European vineyard systems (Figure 5c).

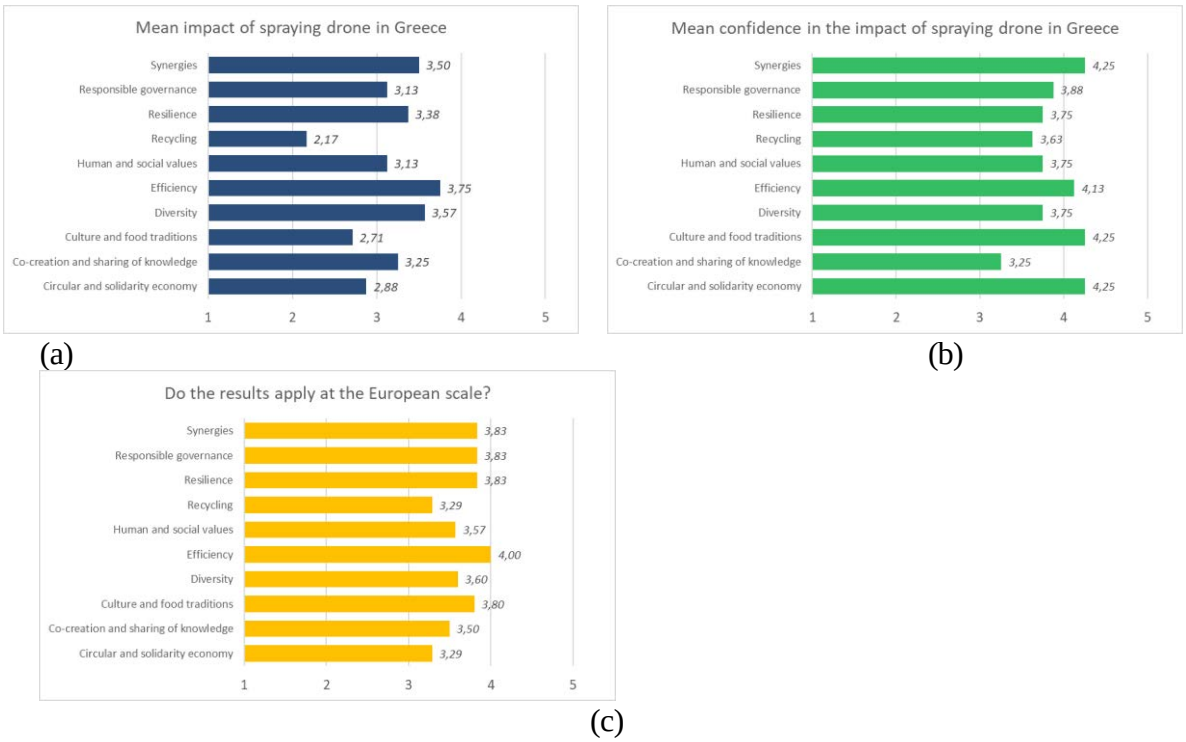


Figure 5. Results of the evaluative survey of the agroecological assessment on (a) the mean impact of spraying drone in Greece; (b) the mean confidence in the impact of spraying drone in Greece; and (c) the applicability of spraying drones at the European scale.

Regarding the results from the targeted discussion, participants concluded for the element of efficiency that spraying drone technology can enhance agricultural efficiency by reducing costs and improving product quality. Through precise and targeted spraying, drones streamline tasks and optimize resource use. Their potential can be further amplified by robust training programs and effective risk management strategies. However, standardized protocols and compatible formulations are needed to help minimize adoption and application challenges, ensuring smoother integration into farming systems. Accordingly for the element of resilience, the participants highlighted that spraying drones can contribute to farm resilience by protecting crops and stabilizing farmers' incomes. Their ability to predict threats and apply pesticides accurately safeguards yields. However, long-term resilience can be strengthened through sustained research, farmer education, and equitable income planning while to prevent over-reliance, a cautious approach to adoption and diversification of farming strategies is required. Similarly, the participants stated for the human and social values element, that the adoption of spraying drones in agriculture can reduce the physical burden on farmers, while increasing safety, and improving decision-making through data access. This technological integration can make farming more attractive to younger generations and empower producers with greater control. However, for maximizing these benefits legal frameworks and comprehensive training are essential. At the same time, addressing concerns like job displacement and ensuring widespread knowledge sharing will support social acceptance. Finally, for the element of culture and food traditions, it was concluded by the participants that spraying drones can help maintain traditional farming practices and protect local crop varieties by enabling precise and minimal-impact applications. Their use can support sustainable agriculture while allowing for the documentation and preservation of cultural heritage.

Strengthening efforts to protect cultural identity and promoting sustainable methods can boost the aforementioned benefits. Meanwhile, safeguards must be in place to prevent the homogenization of farming systems and the loss of traditional knowledge.

The aforementioned statements can be supported by other relevant studies referring to the increased application efficiency and farm resilience while decreasing labor and helping adopting more sustainable farming practices (OECD, 2021; Calderone et al., 2024; Aliloo et al., 2024; García-Munguía et al., 2024; Maritan et al., 2025).

4. CONCLUSIONS

Spraying drones can contribute significantly to the objectives of agroecology. In this study, the results of the workshop showed that participants rated spraying drones highest for the element of Efficiency for both local impact (3.75 out of 5.00) and applicability to other European regions (4.00 out of 5.00). The main reason was that they demonstrated cost reduction and quality improvement. Moreover, participants concluded that spraying drones can significantly enhance agricultural efficiency by reducing costs and improving quality through targeted applications. They also stated that spraying drones can contribute to the element of Resilience by protecting crops and stabilizing income, though long-term impact depends on continued research and cautious adoption. Regarding the element of Human and Social Values, spraying drones can reduce physical labor, increase safety, and attract younger generations, but require strong legal frameworks and training to ensure inclusive benefits. Additionally, while spraying drones can support cultural preservation by enabling sustainable practices and safeguarding local varieties, measures are needed to avoid the loss of traditional knowledge and farming identities. Regarding the ADOPT model results for adoption of spraying drones by winegrape growers , the time to near-peak adoption level was calculated at 19 years and the peak adoption level at 42%, while the time to 50% of peak adoption was calculated at 8.5 years. Finally, enhanced training programs, risk management strategies, and establishment of standardized protocols and formulations must be addressed to realise the full potential of spraying drones.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by UK Research and Innovation (UKRI Reference No.10037994) and by the EU's Horizon Europe Research and Innovation Programme (Grant Agreement No.101060759) as part of the Digitalisation for Agroecology project (https://d4agecol.eu/).

6. REFERENCES

Aliloo, J., Abbasi, E., Karamidehkordi, E., Parmehr, E. G., & Canavari, M., 2024. *Dos and don'ts of using drone technology in crop fields.* Technology in Society, 76, 102456.

Anastasiou, E., Fountas, S., Voulgaraki, M., Psiroukis, V., Koutsiaras, M., Kriezi, O., Lazarou, E., Vatsanidou, A., Fu, L., Bartolo, F D., Barreiro-Hurle, J., & Gómez-Barbero, M., 2023. *Precision farming technologies for crop protection: a meta-analysis.* Smart Agricultural Technology, 5, 100323.

Balafoutis, A T., Beck, B., Fountas, S., Tsiropoulos, Z., Vangeyte, J., van der Wal, T., Soto-Embodas, I., Gómez-Barbero, M., & Pedersen, S M., 2017. *Smart farming technologies – description, taxonomy and economic impact.* In: S M. Pedersen & K

M. Lind (eds), Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives, pp. 21–77. Springer International Publishing.

Baumann, M., & Gordalla, C., 2020. *Gruppenarbeit: Methoden – Techniken – Anwendungen*, 2nd ed. München: UVK Verlag.

Burns, S A., Dittmer, K M., Shelton, S W., & Wollenberg, E K., 2022. *Exemplary features of digital tools for agroecology: a global review*. [online] Available at: <hdl.handle.net/10568/126016>.

Calderone, G., Ferro, M V., & Catania, P., 2024. *A systematic literature review on recent unmanned aerial spraying systems applications in orchards*. Smart Agricultural Technology, 100708.

Döring, N., Bortz, J., & Pöschl-Günther, S., 2016. *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*, 5th ed. Springer-Verlag.

Ewert, F., Baatz, R., & Finger, R., 2023. *Agroecology for a sustainable agriculture and food system: from local solutions to large-scale adoption.* Annual Review of Resource Economics, 15, 351–381.

Finger, R., 2023. *Digital innovations for sustainable and resilient agricultural systems.*

European Review of Agricultural Economics, 50(4), 1277-1309.

Gaadhe, S K., Chavda, D B., Mehta, T D., Chavda, S K., Gojiya, K M., & Bandhiya, R D., 2025. *A comparative study of drone spraying and conventional spraying for precision agriculture.* Plant Archives, 25 (Special Issue ICTPAIRS-JAU), pp. 771-778.

García-Munguía, A., Guerra-Ávila, P L., Islas-Ojeda, E., Flores-Sánchez, J L., Vázquez-Martínez, O., García-Munguía, A M., & García-Munguía, O., 2024. *A review of drone technology and operation processes in agricultural crop spraying.* Drones, 8(11), 674.

Gemtou, M., Kakkavou, K., Anastasiou, E., Fountas, S., Pedersen, S M., Isakhanyan, G., Erekalo Tarekegn, K., & Pazos-Vidal, S., 2024. *Farmers' transition to climate-smart agriculture: a systematic review of decision-making factors affecting adoption*. Sustainability, 16(7), 2828.

Kuehne, G., Llewellyn, R., Pannell, D J., Wilkinson, R., Dolling, P., Ouzman, J., & Ewing, M., 2017. *Predicting farmer uptake of new agricultural practices: a tool for research, extension and policy*. Agricultural Systems, 156, 115–125.

Maritan, E., Anastasiou, E., Psiroukis, V., Lowenberg-DeBoer, J., Fountas, S., & Behrendt, K., 2025. *An agroecological assessment of uncrewed aerial vehicle spraying in Greek viticulture.* Smart Agricultural Technology, 10, 100837.

Rustler, F., 2018. *Denkwerkzeuge der Kreativität und Innovation: Das kleine Handbuch der Innovationsmethoden*. Zürich: Midas Management Verlag AG.

OECD, 2021. *Report on the state of the knowledge: literature review on unmanned aerial spray systems in agriculture.* OECD Publishing.

The World Café Community Foundation, 2025. The World Cafe. Available at:<https://theworldcafe.com/> [Accessed 12 June 2025].

21. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΘΟΥΣ ΤΟΥ ΚΡΟΚΟΥ

Χρήστος Ι. Δημητριάδης[1], Αναστάσιος Ι. Δάρρας[2]

[1] *Διεθνές Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωπονίας , 57400, Θεσσαλονίκη, dimchri@ihu.gr.*
[2] *Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τμήμα Γεωπονίας, 24100, Καλαμάτα, tassosdarras@yahoo.co.uk. dimchri@ihu.gr*

Περίληψη

Οι μηχανικοί σχεδιασμού και κατασκευής γεωργικών μηχανημάτων που εργάζονται με φυτά πρέπει να γνωρίζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά τους για να κατανοήσουν τη συμπεριφορά τους για πιο ολοκληρωμένα σχέδια. Υπάρχει περιορισμένη δημοσιευμένη έρευνα σχετικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά των ανθέων του κρόκου. Η παρούσα εργασία κατέγραψε τα φυσικά και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του άνθους του κρόκου (*Crocus sativus L.*). Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων. Το πρώτο σε συνθήκες αγρού, ενώ το δεύτερο σε εργαστηριακό περιβάλλον. Στα πειράματα διερευνήθηκε η δύναμη απόσπασης του άνθους από το στέλεχος, η δύναμη απόσπασης του στίγματος και των στημόνων από το άνθος και οι διαστάσεις του ανθούς και του στελέχους του κρόκου. Στα πειράματα του αγρού για την εύρεση της μέσης δύναμη απόσπασης του λουλουδιού από το στέλεχος, αυτή βρέθηκε να είναι 3,50 N, ενώ η μέση δύναμη που απαιτούνταν για να αποσπαστούν τα στίγματα και οι στήμονες από το άνθος ήταν 1,13 N. Τα εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι η μέση δύναμη που απαιτούνταν για την απόσπαση του λουλουδιού από το στέλεχος ήταν 2,02 N, ενώ η δύναμη για να αποσπαστούν τα στίγματα και οι στήμονες από το λουλούδι ήταν 0,60 N. Αυτά τα ευρήματα, τόσο για τα πειράματα του αγρού όσο και για εργαστηριακά πειράματα, κατέδειξαν ότι το λουλούδι μπορεί να αποσπαστεί από το στέλεχος και το στίγμα και οι στήμονες από το άνθος. Στα πειράματα του αγρού καταγραφής των διαστάσεων του ανθούς και του στελέχους του κρόκου, τα πειράματα έδειξαν ότι το μέσο βάρος της κεφαλής του άνθους, η μέση διάμετρος λουλουδιών, το μέσο ύψος από το έδαφος και το μέσο πλάτος του στελέχους ήταν 0,64 g, 68,51 mm, 65,95 mm και 2,10 mm, αντίστοιχα. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία ήταν 89,62% w.b. Στα εργαστηριακά πειράματα, το μέσο βάρος της κεφαλής του άνθους, η μέση μετρούμενη διάμετρος λουλουδιών, το μέσο ύψος από το έδαφος και το μέσο πλάτος του στελέχους ήταν 0,31 g, 67,16 mm, 66,37 mm και 1,91 mm, αντίστοιχα. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία ήταν 84,99% w.b.

Λέξεις κλειδιά: Φυσικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά κρόκου, δύναμη απόσπασης λουλουδιών, δύναμη απόσπασης στημόνων και στίγματος του κρόκου.

INVESTIGATION OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE CROCUS FLOWER

Christos I. Dimitriadis[1*],, Anastasios I. Darras[2]

[1] Department of Agriculture, International Hellenic University, 57400, Thessaloniki, Greece, *dimchri@ihu.gr.*
[2] Department of Agriculture, University of Peloponnese, 24100, Kalamata, Greece, *tassosdarras@yahoo.co.uk.*
**dimchri@ihu.gr*

ABSTRACT

Agricultural design engineers working with plants need to know their physical and dimensional characteristics to understand their behavior for more comprehensive designs. Unfortunately, there is limited published research on the factors affecting the physical properties of saffron plants. For instance, the detachment force required to separate the flower from the stem and the stigma and stamens from the flower are not well studied. To bridge this knowledge gap, two sets of experiments were conducted, in the current study, to measure the physical and dimensional properties of the Greek saffron flower, *Crocus sativus L.*. The first set of experiments was conducted under field conditions, while the second took place in a laboratory environment. In the field experiments, the mean detachment force required to separate the flower from the stem was found to be 3.50 N, while the mean force needed to detach the stigmas and stamens from the flower was 1.13 N. In contrast, the laboratory experiments showed that the mean force required to separate the flower from the stem was 2.02 N, while the force needed to detach the stigmas and stamens from the flower was 0.60 N. These findings, for both field and laboratory sets of experiments and in all cases examined, suggest that the flower can be removed from the stem and the stigma and stamen from the flower. In terms of dimensional properties, the field experiments showed that the mean weight of the flower head was 0.64 g. The mean flower diameter, height from the ground, and stem width were 68.51 mm, 65.95 mm, and 2.10 mm, respectively. The average moisture content was 89.62% w.b. In the laboratory experiments, the mean weight of the flower head was 0.31 g. The mean measured flower diameter, height from the ground, and stem width were 67.16 mm, 66.37 mm, and 1.91 mm, respectively. The mean moisture content was 84.99% w.b.

Key words: Saffron physical and dimensional characteristics, flower detachment force, stamen and stigma detachment force.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέση απόδοση αποξηραμένου κρόκου κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15 κιλών ανά εκτάριο, που λαμβάνονται από περίπου 1,0 - 1,5 εκατομμύρια άνθη και συλλέγονται σε διάστημα 30 έως 35 ημερών (Perez-Vidal, 2020). Η πυκνότητα των κόρμων του κρόκου κυμαίνεται μεταξύ 200.000 και 550.000 ανά εκτάριο, ανάλογα με το σύστημα διαχείρισης της καλλιέργειας (Perez-Vidal, 2020; Dimitriadis, 2009). Αναμένεται αύξηση της ζήτησης τα επόμενα χρόνια λόγω των θρεπτικών και φαρμακευτικών ιδιοτήτων που ανακαλύφθηκαν στα στίγματα του άνθους του και για την αντιμετώπιση αυτής της ζήτησης, η ανάπτυξη μηχανοποιημένης παραγωγής κρόκου είναι επιτακτική (Begoña et al., 2021). Στις μέρες μας η καλλιέργεια του κρόκου απαιτεί αρκετές ώρες εργασίας λόγω της περιορισμένης μηχανοποίησης της (Alonso Diaz-Marta et al., 2006). Σε ένα σύστημα διαχείρισης της συγκομιδής με το χέρι, απαιτούνται τουλάχιστον 1300 ανθρωποώρες ανά εκτάριο. Αυτό περιλαμβάνει τη συλλογή των λουλουδιών και τον διαχωρισμό του στίγματος, που αποτελούν περίπου το 70% των συνολικών ωρών εργασίας (Moayedishahraki et al., 2010). Η μηχανοποίηση της διαδικασίας συγκομιδής του άνθους του κρόκου, συμπεριλαμβανομένου και του διαχωρισμού των στιγμάτων, έχει τη δυνατότητα να μειώσει τη μικροβιακή μόλυνση των στιγμάτων, να ελαττώσει τον χρόνο συγκομιδής μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το κόστος παραγωγής (Saeidirad, 2020).

Για την ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδιασμού, οι μηχανικοί γεωργικών μηχανημάτων χρειάζονται πληροφορίες όχι μόνο στη μηχανική αλλά και στις ιδιότητες και τις δομές των φυτών. Τέτοιες πληροφορίες εμπεριέχουν τις δυνάμεις κοπής, κάμψης, εφελκυσμού,

αποκόλλησης και συμπίεσης των φυτων. Αυτή η κατανόηση είναι ζωτικής σημασίας για την επιλογή υλικών, τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της αποδοτικότητας των μηχανημάτων (Stephens και Rabe, 1978). Επομένως, είναι απαραίτητο ένας σχεδιαστής γεωργικών μηχανήματων να είναι καλά καταρτισμένος και στις φυσικές και μορφολογικές ιδιότητες του υπό έρευνα φυτού.

Η έρευνα στον σχεδιασμό εξοπλισμού επεξεργασίας κρόκου μετά τη συγκομιδή έχει εντοπίσει ιδιότητες που περιλαμβάνουν τις διαστάσεις του φυτού, τη μάζα, το πορώδες και την τελική του ταχύτητα (Emadi, 2009; Emadi, 2011; Sama et al., 2000). Ωστόσο, υπάρχει περιορισμένη δημοσιευμένη έρευνα για τα φυτά του κρόκου σχετικά με παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες του όπως για παράδειγμα, τις δυνάμεις αποκόλλησης που απαιτούνται για τον διαχωρισμό του άνθους από το στέλεχος και το στίγμα και τους στήμονες από το άνθος κατά τη συγκομιδή. Για το λόγο αυτό, ο στόχος της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός των φυσικών και μορφολογικών ιδιοτήτων του ελληνικού φυτού κρόκου, *Crocus sativus L*. Συγκεκριμένα η εργασία μεταξύ άλλων εστιάστηκε στον προσδιορισμό της δύναμης που απαιτείται για την αποκόλληση του άνθους από το στέλεχος και τους στήμονες από το άνθος.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Δύο σειρές πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες αγρού και στο εργαστήριο. Τόσο για τα πειράματα στον αγρό όσο και για τα εργαστηριακά πειράματα, επιλέχθηκαν τα αυθεντικά φυτά Crocus sativus L. Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία, μετρήθηκε χρησιμοποιώντας το Πρότυπο ASAE 358.2.

2.1 Πειράματα αγρού

2.1.1 Συνθήκες φύτευσης και καλλιέργειας του κρόκου

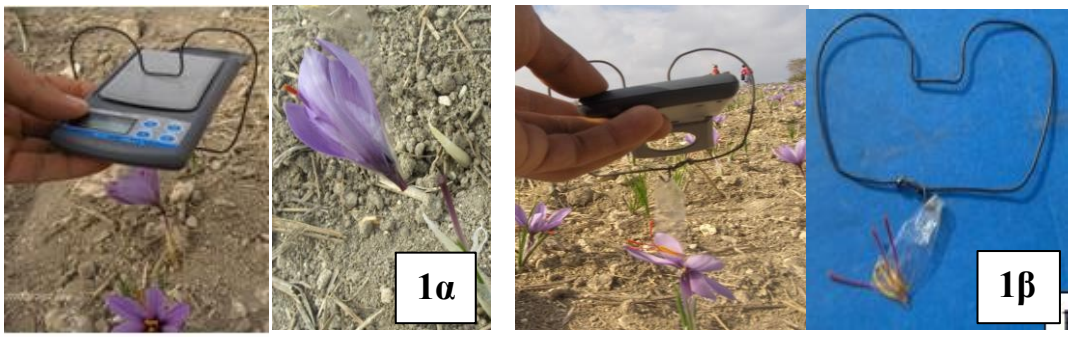
Δύο διαφορετικά χωράφια, το Α και το Β, επιλέχθηκαν στο χωριό Κρόκος Κοζάνης, στη Βόρεια Ελλάδα. Το πρώτο χωράφι (Α) (σε υψόμετρο 616 m) είχε εγκατεστημένα φυτά στο τέταρτο έτος καλλιέργειας τους, ενώ το δεύτερο χωράφι Β (σε υψόμετρο 567 m) είχε φυτά στο δεύτερο έτος ανάπτυξής τους. Οι αποστάσεις φύτευσης των βολβών και για τα δύο χωράφια ήταν 0,22 m σειρά από σειρά και 0,08 m βολβός από βολβό σε κάθε γραμμή, με αποτέλεσμα μια πυκνότητα της τάξης των 560.000 βολβών ανά εκτάριο. Το βάθος των βολβών ήταν 0,20 m.

2.1.2 Μετρήσεις χαρακτηριστικών του άνθους

Μετρήσεις στις φυσικές ιδιότητες και στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των ανθέων του φυτού του κρόκου πραγματοποιηθήκαν. Οι φυσικές ιδιότητες του φυτού που μετρήθηκαν ήταν οι δυνάμεις που απαιτούνται για τον διαχωρισμό του άνθους από το στέλεχος και του στίγματος και των στημόνων από το άνθος. Εκατόν είκοσι δείγματα (εξήντα από κάθε αγρό) επιλέχθηκαν τυχαία για τη μέτρηση των φυσικών χαρακτηριστικών. Από κάθε αγρό χρησιμοποιήθηκαν τριάντα δείγματα για τις μετρήσεις των δυνάμεων της αποκόλλησης άνθους από το στέλεχος και τριάντα δείγματα για την αναγνώριση της αποκόλλησης στίγματος και στημόνων. Λόγω ελλιπούς βιβλιογραφίας σχεδιάστηκε μια πειραματική διαδικασία από την αρχή για την ποσοτικοποίηση όσον αφορά την αρχή της αποκόλλησης του άνθους του κρόκου.

Για να ποσοτικοποιηθεί η δύναμη που απαιτούνταν για την αποκόλληση του άνθους,

διαφανής ταινία προσαρτήθηκε από τη βάση του άνθους σε ένα ειδικά σχεδιασμένο μεταλλικό κυρτό έλασμα τοποθετημένο στην κορυφή ενός ψηφιακού ζυγού μέτρησης μάζας (Εικόνα 1α). Στη συνέχεια, από το σταθερό μέρος του ζυγού ασκούνταν χειροκίνητα και κάθετα ανοδικά δύναμη μέχρι η κεφαλή του άνθους να αποκολληθεί πλήρως από το στέλεχος. Η μέγιστη δύναμη αποκόλλησης καταγράφονταν. Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και για τη μέτρηση της δύναμης αποκόλλησης του στίγματος και των στημόνων από το άνθος (Εικόνα 1β). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.



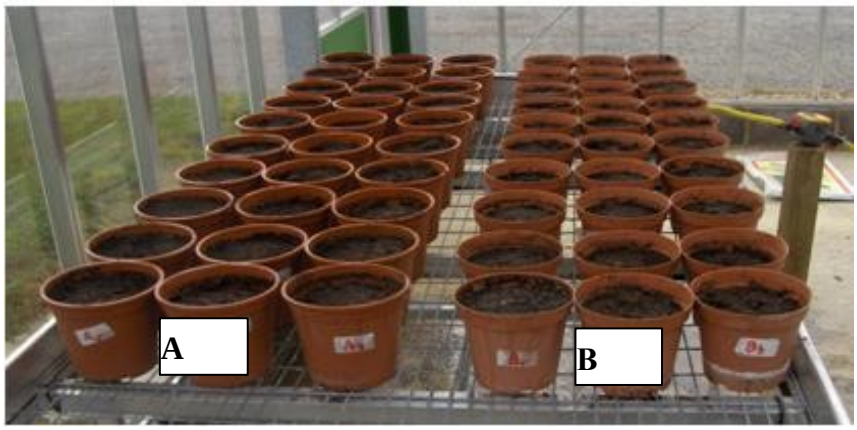
Εικόνα 1: Μέτρηση φυσικών ιδιοτήτων του άνθους του κρόκου *Crocus sativus* L. **1α**) Δύναμη απόσπασης του άνθους. **1β**) Δύναμη απόσπασης του στίγματος και των στημόνων.

Για τον προσδιορισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών του άνθους του κρόκου εξήντα δείγματα λουλουδιών (τριάντα από κάθε χωράφι) συλλέχθηκαν. Τα φυτά επιλέχθηκαν τυχαία και από τα δύο χωράφια. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν, το ύψος του λουλουδιού από το έδαφος, τη διάμετρο του λουλουδιού, το πλάτος του στελέχους του λουλουδιού καθώς και το βάρος του κάθε μετρούμενου μέρους του φυτού. Οι παράμετροι μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας έναν ψηφιακό ζυγό βάρους (0-500 g ± 0,1 g), ένα παχύμετρο και έναν μετρητικό κανόνα.

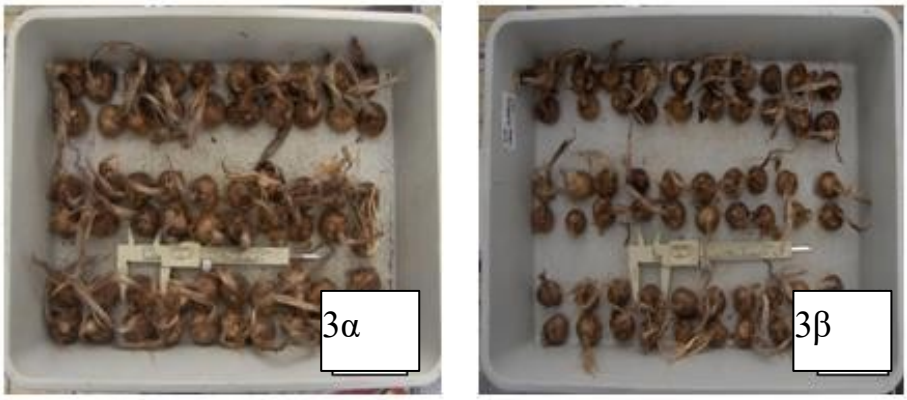
2.2 Εργαστηριακά πειράματα

2.2.1.Συνθήκες φύτευσης και ανάπτυξης

Στα εργαστηριακά πειράματα, τα φυτά *Crocus sativus L* καλλιεργήθηκαν σε θερμοκήπιο. Το θερμοκήπιο βρισκόταν σε υψόμετρο 105 μέτρων πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας. Τα φυτά καλλιεργήθηκαν από κόρμους που συλλέχθηκαν κατά το έκτο έτος μετά τη φύτευση τους. Τα φυτά καλλιεργήθηκαν σε πλαστικά δοχεία. Ο κάθε κόρμος τοποθετήθηκε σε βάθος 0,10 m και σε κάθε δοχείο τοποθετήθηκαν δυο κόρμοι. Τα δοχεία χωρίστηκαν σε δύο ομάδες, Α και Β (Εικόνα 2), με εμβαδόν 1 m^2 η καθεμία (0,5 m πλάτος επί 2 m μήκος). Οι ομάδες Α και Β περιείχαν από 30 δοχεία η καθεμία. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μεγέθη κόρμων. Η ομάδα Α περιείχε κόρμους με μέση διάμετρο 35 mm (Εικόνα 3α), ενώ η ομάδα Β περιείχε κόρμους με μέση διάμετρο 25 mm (Εικόνα 3β). Πριν από τη φύτευση, οι κόρμοι καθαρίστηκαν από τα εξωτερικά φύλλα. Η απόσταση μεταξύ κάθε φυτού ήταν 15 mm επί 15 mm, με αποτέλεσμα η πυκνότητα φύτευσης να ανέρχεται στις 880.000 ανά εκτάριο. Οι φύτευση πραγματοποιήθηκε στις 13 Ιουλίου του έτους διεξαγωγής του πειράματος και η άνθιση ξεκίνησε την ίδια χρονιά μετά από 61 ημέρες.



Εικόνα 2: Διάταξη δοχείων φύτευσης των κόρμων.



Εικόνα 3: Δοχεία κόρμων πριν την φύτευση. **3α)** κόρμοι διαμέτρου 35 mm, . **3β)** κόρμοι διαμέτρου 25 mm

Για τα πειράματα, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 180 άνθη (Εικόνα 4). Εξήντα (60) άνθη από κάθε ομάδα χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση των φυσικών ιδιοτήτων, ενώ 30 άνθη από κάθε ομάδα χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη των μορφολογικών χαρακτηριστικών.

Εικόνα 4: Ανθοφορία κόρμων στα πειραματικά δοχεία.

2.2.2.Μετρήσεις χαρακτηριστικών του άνθους

Η εξέταση των φυσικών ιδιοτήτων των ανθέων του κρόκου περιελάβανε δύο μέρη: το ένα για τη μέτρηση της δύναμης που απαιτείται για την απόσπαση του άνθους από το στέλεχος και το άλλο για τη μέτρηση της δύναμης που απαιτείται για την απόσπαση του στίγματος και των στημόνων από το άνθος. Για την ακριβή μέτρηση των εξεταζόμενων δυνάμεων, κάθε πειραματικό δοχείο μετακινούνταν στη βάση μιας τράπεζας δοκιμής ενός οργάνου Instron 1122 (Εικόνα 5α), το οποίο και εφάρμοζε ανοδική δύναμη (Dimitriadis et al., 2014), ενώ η ηλεκτρονική κονσόλα ελέγχου (Εικόνα 5β) κατέγραφε το μέγεθος αυτής της δύναμης.

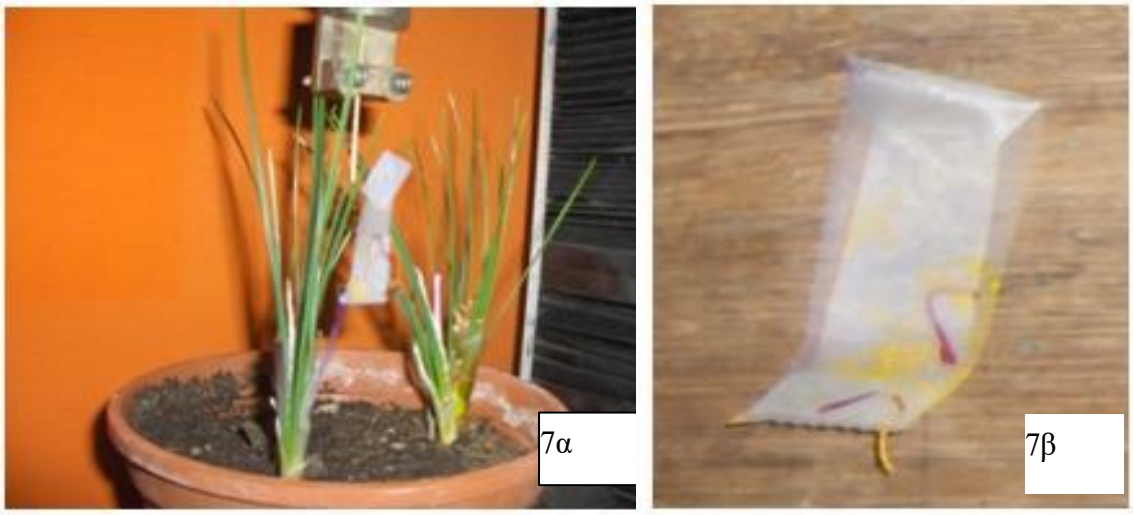
Εικόνα 5: Όργανο Instron 1122. **5α)** Τράπεζα δοκιμής οργάνου, . **5β)** καταγραφική μονάδα οργάνου.

Εικόνα 6: Διαδικασία μέτρησης δύναμης απόσπασης του άνθους με το όργανο Instron 1122. **6α)** Στιγμή διαχωρισμού άνθους από το στέλεχος, . **6β)** Δείγματα ανθέων μετά την απόσπαση.

Για την ποσοτικοποίηση της δύναμης που απαιτούνταν για τον διαχωρισμό του άνθους από το στέλεχος, επιλέχθηκαν τυχαία 30 δείγματα από κάθε ομάδα. Κάθε δείγμα, μαζί με το αντίστοιχο δοχείο του, τοποθετούνταν στη βάση της τράπεζας δοκιμής του οργάνου Instron 1122. Διαφανής ταινία στερεωνόταν στην κεφαλή του άνθους στο σημείο εκείνο όπου συναντιόταν το στέλεχος με το άνθος. Το άκρο της ταινίας στερεωνόταν στην υποδοχή της δυναμοκυψέλης μέτρησης σε ένα ειδικά σχεδιασμένο μεταλλικό έλασμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6α. Η διαδικασία διαχωρισμού ξεκινούσε καθώς το τμήμα

της εγκάρσιας κεφαλής κινούνταν κάθετα προς τα πάνω. Το πείραμα ολοκληρωνόταν όταν το στέλεχος διαχωριζόταν πλήρως από το άνθος (Εικόνα 6β). Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για όλα τα δείγματα. Οι μετρήσεις της δύναμης απόσπασης του άνθους καταγραφόταν στην καταγραφική μονάδα του οργάνου Instron 1122 αναλογικά. Το καταγραφικό ήταν εξοπλισμένο με μονάδα κίνησης γραφήματος με ρολό χαρτιού μελιμετρέ, με ταχύτητα κίνησης 200 mm min^{-1}.

Για την ποσοτικοποίηση της δύναμης που απαιτείται για τον διαχωρισμό του στίγματος και των στημόνων από το άνθος, χρησιμοποιήθηκε μια διαδικασία παρόμοια με αυτήν που περιεγράφηκε προηγουμένως. Αντί να στερεωθεί η διαφανής ταινία στη βάση του άνθους, στερεωνόταν στο στίγμα και τον στήμονας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7α. Καθώς το τμήμα της εγκάρσιας κεφαλής κινούνταν μηχανικά προς τα πάνω, πραγματοποιούνταν η διαδικασία διαχωρισμού. Η δοκιμή ολοκληρωνόταν όταν ο στήμονας και το στίγμα διαχωριζόταν πλήρως από το άνθος (Εικόνα 7β). Για την διεξαγωγή αυτού του σκέλους του πειράματος επιλέχθηκαν τυχαία 30 δείγματα από κάθε ομάδα των δοχείων Α και Β αντίστοιχα. Μετά την ολοκλήρωση μιας μέτρησης ενός δείγματος, η ίδια διαδικασία επαναλαμβανόταν για τα επόμενα δείγματα άνθους.



Εικόνα 7: Διαδικασία μέτρησης δύναμης απόσπασης των στιγμάτων και των στημόνων με το όργανο Instron 1122. **6α)** Στιγμή διαχωρισμού των στιγμάτων και των στημόνων, . **6β)** Δείγματα των στιγμάτων και των στημόνων μετά την απόσπαση.

Οι μετρήσεις της δύναμης απόσπασης του στίγματος και των στημόνων από το άνθος καταγραφόταν στην καταγραφική μονάδα του οργάνου Instron 1122 αναλογικά όπως και προηγουμένως.

Για την μέτρηση της σχετικής υγρασίας διεξήχθησαν μετρήσεις για κάθε εξεταζόμενο δείγμα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε διάστημα 9 ημερών, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των ανθέων.

2.2.3.Στατιστική ανάλυση

Πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση χρησιμοποιώντας t-test στο SPSS (έκδοση 25), με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Αποτελέσματα από τα πειράματα αγρού

Οι Πίνακες 1 και 2 παρουσιάζουν τις μέσες τιμές των φυσικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών του κρόκου που προέκυψαν από τα πειράματα του αγρού. Από αυτούς τους δυο πίνακες, φαίνεται ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις φυσικές και μορφολογικά χαρακτηριστικά μεταξύ των αγρών Α και Β.

Πίνακας 1: Μέσες τιμές για τα φυσικά χαρακτηριστικά του *Crocus sativus* L. στον αγρό.

	Μετρήσεις		
Αριθμός αγρού	Δύναμη απόσπασης άνθους (N)	Δυνάμεις απόσπασης στιγμάτων και στημόνων (N)	** m/c (% w.b.)
A	3.74 ± 0.05	1.19 ± 0.04	89.56
B	3.26 ± 0.06	1.08 ± 0.03	89.69

Μέσες τιμές από 60 δείγματα ανά αγρό.
m/c = σχετική υγρασίας, w.b = υγρής βάσης, ± = Τυπική απόκλιση
** Πηγή: Dimitriadis (2009).

Πίνακας 2: Μέσες τιμές για τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του *Crocus sativus* L. στον αγρό.

		Μετρήσεις			
Αριθμός αγρού		Βάρος του άνθους (g)	Διάμετρος ανοιχτού άνθους (mm)	Ύψος άνθους από το έδαφος (mm)	Πάχος στελέχους (mm)
A	**Μέσος Ορος**	0.62	67.36 ± 1.08	62.76 ± 1.41	2.02 ± 0.05
B	**Μέσος Ορος**	0.65	69.66 ± 1.15	69.13 ± 1.59	2.25 ± 0.06

Μέσες τιμές από 30 δείγματα ανά αγρό.
± = Τυπική απόκλιση

3.2 Αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές

3.2.1.Ποσότητα λουλουδιών που παρήχθησαν

Συλλέχθηκαν συνολικά 282 άνθη. Η ομάδα Α παρήγαγε 158 άνθη που αντιστοιχεί, κατά μέσο, όρο σε 2,63 λουλούδια ανά φυτό. Η ομάδα Β παρήγαγε 124 άνθη που κατά μέσο, αντιστοιχεί σε 2,06 λουλούδια ανά φυτό. Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τα δεδομένα από τους Ordoudi και Tsimidou (2004), οι οποίοι ανέφεραν ότι ο αριθμός των λουλουδιών που παράγει το φυτό του κρόκου κυμαίνεται από 1-4.

3.2.2.Αποτελέσματα από τα πειράματα στο θερμοκήπιο

Οι Πίνακες 3 και 4 παρουσιάζουν τις μέσες τιμές των φυσικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών του κρόκου που προέκυψαν από τα πειράματα του θερμοκηπίου. Από αυτούς τους δυο πίνακες, φαίνεται ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις φυσικές και μορφολογικά χαρακτηριστικά μεταξύ των ομάδων Α και Β που καλλιεργήθηκαν στο θερμοκήπιο.

Πίνακας 3: Μέσες τιμές για τα φυσικά χαρακτηριστικά του *Crocus sativus* L. στο θερμοκήπιο.

	Μετρήσεις		
Αριθμός αγρού	Δύναμη απόσπασης άνθους (N)	Δυνάμεις απόσπασης στιγμάτων και στημόνων (N)	** m/c (% w.b.)
A	2.34 ± 0.06)	0.64 ± 0.01	85.37
B	1.70 ± 0.07	0.56 ± 0.01	84.61

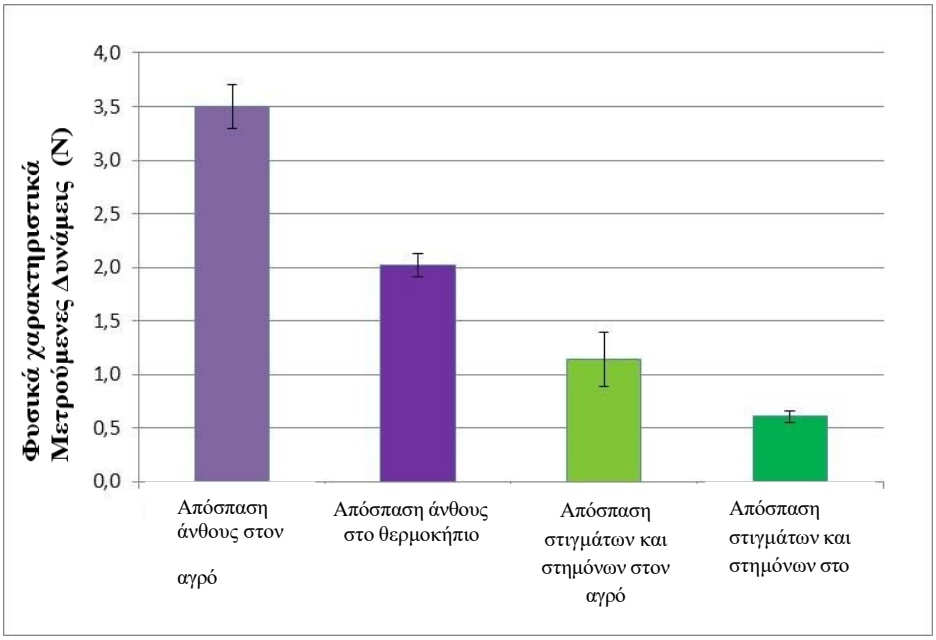
Μέσες τιμές από 10 δείγματα ανά ομάδα στο θερμοκήπιο.
m/c = σχετική υγρασίας, w.b = υγρής βάσης, ± = Τυπική απόκλιση

Πίνακας 4: Μέσες τιμές για τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του *Crocus sativus* L. στο θερμοκήπιο.

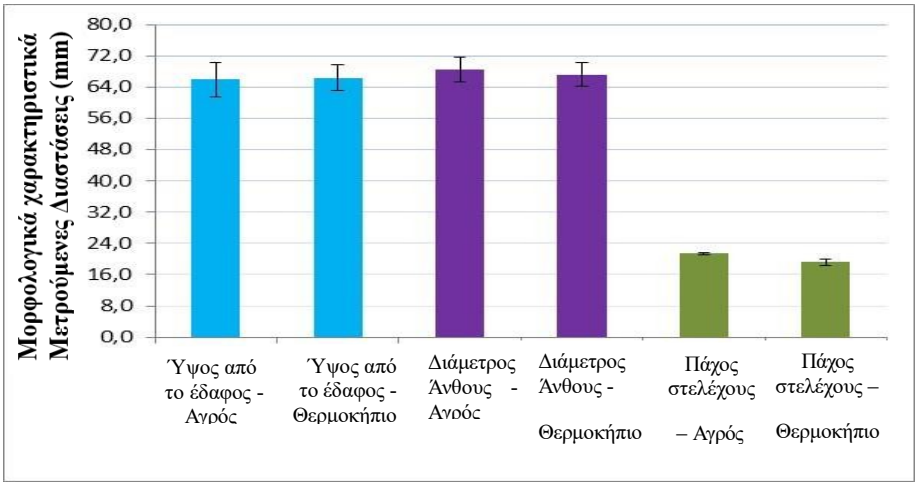
		Μετρήσεις			
Αριθμός αγρού		Βάρος του άνθους (g)	Διάμετρος ανοιχτού άνθους (mm)	Ύψος άνθους από το έδαφος (mm)	Πάχος στελέχους (mm)
A	**Μέσος Ορος**	0.31	69.93 ± 0.89	67.30 ± 1.31	2.01 ± 0.02
B	**Μέσος Ορος**	0.30	64.4 ± 1.03	65.43 ± 1.09	1.82 ± 0.01

Μέσες τιμές από 30 δείγματα ανά αγρό.
± = Τυπική απόκλιση

Τα Σχήματα 1 και 2 απεικονίζουν τις συνολικές μέσες τιμές των φυσικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών του *Crocus sativus L.* για το σύνολο των πειραμάτων στον αγρό και στο θερμοκήπιο.



Σχήμα 1: Συνολικές μέσες τιμές για τα φυσικά χαρακτηριστικά



Σχήμα 2: Συνολικές μέσες τιμές για τα μορφολογικά χαρακτηριστικά

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Κατά τη σύγκριση των πειραμάτων αγρού και θερμοκηπίου, για το ίδιο μέρος του φυτού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, δεν υπήρχαν εμφανείς στατιστικές διαφορές μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης αποκάλυψαν ότι η μέση δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση του άνθους από το στέλεχος ήταν 2,76 N. Αυτό το αποτέλεσμα έρχεται σε σημαντική αντίθεση με τις τιμές που αναφέρθηκαν από τους Mazloumzadeh (2017) και Hassan-Beygi et al. (2010), οι οποίοι ανέφεραν ότι η μέση δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση του άνθους από το στέλεχος ήταν 0,8 N και 0,45 N, αντίστοιχα.

Αυτές οι αποκλίσεις μπορούν να αποδοθούν στις διαφορετικές συνθήκες καλλιέργειας και περιβάλλοντος που επικρατούν στο Ιράν και την Ελλάδα. Η δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση των στιγμάτων και των στημόνων από το άνθος έχει αποδειχθεί σταθερά χαμηλότερη από αυτήν που απαιτείται για την αποκόλληση του άνθους από το στέλεχος σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με αποτέλεσμα την ανεξάρτητη συλλογή τους. Η διαπίστωση αυτή θα μπορούσε να είναι σημαντική για την μελλοντική εφαρμογή των αρχών μηχανικής απόσπασης στη διαδικασία συγκομιδής.

4.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Κατά τη σύγκριση των πειραμάτων αγρού και θερμοκηπίου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2, παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες στατιστικές διαφορές μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων. Τα ευρήματα αποκάλυψαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στο μέσο ύψος των λουλουδιών από το έδαφος και στη διάμετρο του στελέχους, ενώ δεν παρατηρήθηκε διακύμανση στη διάμετρο των λουλουδιών.

Επιπλέον, στο πείραμα του θερμοκηπίου, οι βολβοί της Ομάδας Α είχαν μεγαλύτερη διάμετρο σε σύγκριση με αυτούς της Ομάδας Β (βλ. Εικόνα 3). Αυτή η διαφορά στο μέγεθος των βολβών επηρέασε σημαντικά την ποσότητα της παραγωγής λουλουδιών, με αποτέλεσμα μια αξιοσημείωτη αύξηση 10% στα άνθη στην Ομάδα Α σε σύγκριση με την Ομάδα Β.

Το βάθος στο οποίο φυτεύτηκε ο κόρμος επηρέασε το ύψος του άνθους του φυτού. Η διαφορά στο βάθος μεταξύ των φυτών αγρού και θερμοκηπίου ήταν 0,10 m, με τα φυτά αγρού να φυτεύονται σε βάθος 0,20 m και τα φυτά θερμοκηπίου στα 0,10 m. Αυτά τα ευρήματα συσχετίζονται με προηγούμενη έρευνα που διεξήχθη από τους Nazir et al. (2000), η οποία υποστήριξε ότι η καλλιέργεια κρόκου σε βάθος από 0,075 έως 0,175 m, είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή ψηλότερων φυτών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τρέχουσα έρευνα έδωσε πληροφορίες που βοηθούν στον εντοπισμό πολύτιμων πληροφοριών σχετικά με τα φυσικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά του φυτού κρόκου.

Η σύγκριση των δοκιμών πεδίου και των πειραμάτων στο εργαστήριο έδειξε σημαντικές στατιστικές διαφορές σε διάφορες παραμέτρους, ενώ παράλληλα τόνισε την επίδραση του βάθους φύτευσης στα χαρακτηριστικά των λουλουδιών, χωρίς ωστόσο να αποκαλύψει αξιοσημείωτη διακύμανση στη διάμετρο των λουλουδιών. Τα ευρήματα σχετικά με τη δύναμη αποκόλλησης των λουλουδιών, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη σε συνθήκες ανοιχτού αγρού από ό,τι σε προστατευμένο περιβάλλον, όπως ένα θερμοκήπιο, διέφεραν σημαντικά από προηγούμενες έρευνες, υποδηλώνοντας την πιθανότητα διαχωρισμού των στιγμάτων και των στημόνων από την κεφαλή του λουλουδιού, προσφέροντας πληροφορίες για μελλοντικές τεχνικές συγκομιδής.

Τα ευρήματα της παρούσας έρευνας υποδεικνύουν ότι το άνθος μπορεί να αφαιρεθεί από το στέλεχος σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Ως εκ τούτου, μπορεί να εφαρμοστεί η αρχή της απόσπασης για τη συγκομιδή του άνθους του κρόκου. Επιπλέον, η μέση δύναμη αποκόλλησης για τα στίγματα και τους στήμονες από το άνθος ήταν περίπου 3,09 και 3,36 φορές μικρότερη από τη δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση του άνθους από το στέλεχος, για συνθήκες αγρού και θερμοκηπίου αντίστοιχα. Επομένως, μπορεί να ειπωθεί ότι, για τα φυτά που εξετάστηκαν, η αρχή της απόσπασης μπορεί να εφαρμοστεί. Αυτές οι πληροφορίες θα μπορούσαν να είναι πολύτιμες για τους γεωργομηχανικούς για την ανάπτυξη μιας μηχανής συγκομιδής κρόκου.

Συγκρίνοντας την περιεκτικότητα σε υγρασία τόσο για τα πειράματα πεδίου όσο και για τα εργαστηριακά πειράματα, διαπιστώθηκε 5% λιγότερη στα εργαστηριακά πειράματα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ελεγχόμενο σύστημα άρδευσης που χρησιμοποιήθηκε, σε αντίθεση με τις συνθήκες ανοιχτού πεδίου, οι οποίες επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

American Society of Agricultural and Biological Engineers, Moisture measurement: Forages, Standard ASAE 358.2

Agrifood Statistics Yearbook, 2019. Yearbook of agricultural statistics of the Spanish Government. URL: <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/forestal_estadistica_agraria.aspx>. (accessed July 4, 2019).

Alonso Diaz-Marta, G.L., Arghittu, A., Astrka, K., Betza, T., Camba, E., Canadas Sanchez, W., et al., 2006. Saffron in Europe (Problems and Strategies for Improving the Quality and Strengthen Competitiveness). http://www.europeansaffron.eu/archivos/White%20book%20english.pdf.

Begoña Renau-Morata, Sergio G. Nebauer, Víctor García-Carpintero, Joaquín Cañizares, Eugenio Gómez Minguet, Marcelino de los Mozos, Rosa V. Molina, 2021. Flower

induction and development in saffron: Timing and hormone signalling pathways. Industrial Crops and Products, Volume 164. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113370.

C.I.Dimitridis, 2009, The design of a mechanical system for the harvest of saffron flower in Greece. MSc Thesis, Cranfield University, UK - DOI:10.1016/B978-0-12- 818638-1.00011-3, In book: Saffron, p187-204.

Dimitriadis C, James L. Brighton, Mike O'Dogherty, Anastasios I. Darras, Maria I., Kokkora (2014). Physical and aerodynamic properties of lavender in relation to harvest mechanisation. International Journal of Agronomy, Volume 2014, Article ID 276926, 8 pages. (Weblink: http://dx.doi.org/10.1155/2014/276926)

Emadi, B. (2009). Separating Saffron Flower Parts Using Vertical Air Column. International journal of Biological and Life Sciences, 1:1,p41-44.

Emadi, B and M. H. Saiedirad, (2011), Moisture-Dependent Physical Properties of Saffron Flower, Journal Agr. Sci. Tech. Vol. 13: p387-398.

Hassan-Beygi S. , Ghozhdi H. , Khazaei J. 2010. Picking Force of Saffron Flower and Shear Strength of Saffron Stalk, EJPAU 13(1). http://www.ejpau.media.pl/volume13/issue1/art-09.html

M. H. Saeidirad, (2020), Mechanization of saffron production, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Chapter 11 p 188.

Mazloumzadeh, M. (2017). Evaluation and Determination of Tensile Force of Saffron Flower for Mechanical Harvesting. IRA International Journal of Applied Sciences (ISSN 2455-4499), 9(1), 13-17. doi:http://dx.doi.org/10.21013/jas.v9.n1.p3

Moayedishahraki, E., Jamialahmadi, M., Behdani, M.A., 2010. Efficiency evaluation of saffron cultivation energy In South Khorasan province. Agroecology 2 (1), 55-62 (in Persian).

Ordoudi, S.A., Tsimidou, M.Z. (2004). Saffron Quality: Effect of Agricultural Practices, Processing and Storage. In: Dris, R., Jain, S.M. (eds) Production Practices and Quality Assessment of Food Crops Volume 1, pp 209–260. https://doi.org/10.1007/1-4020-2533-5_8

Perez-Vidal C, Gracia L (2020) Computer based production of Saffron (Crocus sativus L.): from mechanical design to electronic control. Computers and Electronics in Agriculture, 169. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105198

Nazir, M.M.; Nasir, M.A.; Allah- Bakhsh, Khan, M.N.; Summrah, M.A.; Nawaj, M.Z. Effect of different planting depth of corms on the yield of saffron under Soan valley climatic conditions. Sarhad J. Agric. 2000, 16, 485–487.

Rakesh Kumar , Virendra Singh , Kiran Devi , Madhu Sharma , M.K. Singh &P.S. Ahuja (2008) State of Art of Saffron (Crocus sativus L.) Agronomy: A Comprehensive Review, Food Reviews International, 25:1, 44-85, DOI: 10.1080/87559120802458503

Rubio Terrado, P., 2007. El azafrán. aspectos socioeconómicos y culturales. Studium: Revista de humanidades, pp. 199–228.

Sama, J.K., Raina, B.L., and Bhatia, A.K. (2000). Design and Development of Saffron (Crocus Sativus L.) Processing Equipment. Journal of Food Science and Technology, 37 (4): 357-362

Sampathu, S., Shivashankar, S., Lewis, Y., Wood, A., 2009. Saffron (crocus sativus linn.) - cultivation, processing, chemistry and standardization. CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 20, 123–157.

Stephens, L.E. & Rabe, D.L. (1978). Crop properties data for harvesting research. In ASAE, Grain and forage harvesting. Proccedings 1st Internationa Grain and forage harvesting conference. Ames IO, p25-29.

22. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΟΡΗΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΨΕΚΑΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ

Σ. Κούκου[1], Χ. Καραμούτης[1], Β. Γιουβάνης[1], Γ. Βλόντζος[1], Λ.Σ. Κυργιάκος[1], Δ. Μπόχτης[2], Δ. Κατέρης[2] & Χ. Καβαλάρης[1]

[1] *Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας*
[2] *Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης/ Ινστιτούτο Βιο-οικονομίας και Αγρο-Τεχνολογίας, Δημάρχου Γεωργιάδου 118, 38333, Βόλος, Ελλάδα*

Περίληψη

Η εκτεταμένη μη ορθολογική χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων, σε συνδυασμό με την ελλιπή εφαρμογή σωστών πρακτικών καθαρισμού και διαχείρισης των υπολειμμάτων τους, αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα, καθώς οδηγεί στην δημιουργία σημειακών αλλά και διάχυτων πηγών ρύπανσης, τόσο στο έδαφος όσο και στο υδάτινο περιβάλλον. Με στόχο την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αναπτύχθηκε ένας φορητός σταθμός διαχείρισης των εκπλυμάτων καθαρισμού των ψεκαστικών μηχανημάτων. Ο σταθμός αποτελείται από σύμπλεγμα συγκοινωνούντων δεξαμενών πολυαιθυλενίου, ανοικτού τύπου στις οποίες διοχετεύονται τα εκπλύματα καθαρισμού. Στην ελεύθερη επιφάνεια των δεξαμενών τοποθετείται πλωτή κατασκευή από αφρώδες υλικό και ανοξείδωτο χάλυβα. Η κατασκευή δημιουργεί μια οριζόντια τράπεζα σε μορφή πλέγματος και σε ύψος περίπου 30cm από την επιφάνεια του υδατικού διαλύματος. Στο πλέγμα αναρτώνται κατακόρυφες λωρίδες από ύφασμα μικροϊνών των οποίων, τα κατώτερα τμήματα βρίσκονται μόνιμα βυθισμένα στο υγρό διάλυμα. Οι υφασμάτινες λωρίδες προσροφούν το υγρό των δεξαμενών και με τον τρόπο αυτό, πολλαπλασιάζουν την επιφάνεια εξάτμισης του νερού με αποτέλεσμα να πολλαπλασιάζεται και ο ρυθμός εκκένωσης του σταθμού διαχείρισης των εκπλυμάτων. Καθώς το νερό εξατμίζεται, το πλωτό πλαίσιο ακολουθεί την ελεύθερη στάθμη του υγρού, διασφαλίζοντας την συνεχή εμβάπτιση των υφασμάτων στο υγρό. Μετά την εξάτμιση του νερού, απομένουν στις δεξαμενές τα στερεά υπολείμματα των φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων τα οποία είναι εύκολα διαχειρίσιμα εξαιτίας του μικρού απομένοντος όγκου ΄έπειτα από την εξάτμιση του νερού. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μεθοδολογία διαστασιολόγησης του φορητού σταθμού διαχείρισης των εκπλυμάτων. Για το σκοπό αυτό συγκεντρώθηκαν στατιστικά δεδομένα για τη συχνότητα των ψεκασμών σε δενδροκομικές και αροτριαίες καλλιέργειες στις περιφέρειες της Κεντρικής Μακεδονίας και της Θεσσαλίας. Λήφθηκαν επίσης υπόψιν τα δεκαετή μετεωρολογικά δεδομένα στις δύο περιοχές, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, τα οποία επηρεάζουν τόσο το ρυθμό εξάτμισης όσο και την στάθμη των δεξαμενών οι οποίες - ως ανοικτού τύπου – πρέπει να διαχειριστούν και τα μετεωρολογικά κατακρημνίσματα.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PORTABLE STATION FOR MANAGING FARM SPRAYER EFFLUENTS

S. Koukou[1], C. Karamoutis[1], V. Giouvanis[1], G. Vlontzos,[1], L.S Kyrgiakos[1], D. Bochris[2], D. Kateris[2] & C. Cavalaris

[1]Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446

[2]Centre for Research and Technology Hellas, Institute for Bio-Economy and Agri-Technology, Dimarchou Georgiadou 118, 38333, Volos, Greece

ABSTRACT

The extensive and irrational use of plant protection products, combined with the insufficient application of proper cleaning practices and residue management, constitutes a significant environmental issue, as it leads to the creation of both point-source and diffuse pollution in soil and water ecosystems. Aiming to reduce these environmental impacts, a portable station for managing sprayer-cleaning effluents was developed. The station consists of a system of interconnected, open-top polyethylene tanks into which the cleaning effluents are discharged. On the free surface of the tanks, a floating structure made of foam material and stainless steel is placed. This structure forms a horizontal grid-like platform approximately 30 cm above the surface of the liquid. Vertical microfiber fabric strips are suspended from the grid, with their lower ends permanently immersed in the liquid solution. These fabric strips absorb the liquid from the tanks and, in doing so, greatly increase the effective evaporation surface, thereby significantly accelerating the rate at which the effluent management station is emptied. As the water evaporates, the floating frame follows the liquid level, ensuring continuous immersion of the fabric strips. After the water has evaporated, the solid residues of the plant protection products remain in the tanks, which are easy to handle due to the very small volume left after evaporation. This study presents the methodology for dimensioning the portable effluent management station. To this end, statistical data were collected regarding the frequency of spraying operations in orchards and arable crops in the regions of Central Macedonia and Thessaly. Ten-year meteorological data from both areas were also taken into account, as they influence both the evaporation rate and the liquid level in the tanks, which, being open-top, must also accommodate meteorological precipitation.

1. Εισαγωγή

Η χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων έχει καταστεί αναπόσπαστο στοιχείο της σύγχρονης γεωργίας. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί η ορθολογική τους χρήση, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Η ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από προϊόντα φυτοπροστασίας αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα περιβαλλοντικά ζητήματα της εποχής [1].

Σύμφωνα με τον οργανισμό TOPPS [2], στη γεωργία διακρίνονται δύο βασικές πηγές ρύπανσης από φυτοπροστατευτικά προϊόντα: οι διάχυτες και οι σημειακές. Οι διάχυτες πηγές σχετίζονται με τη διασπορά του ψεκαστικού νέφους και την επιφανειακή απορροή των χημικών, ενώ οι σημειακές πηγές προκύπτουν από δραστηριότητες όπως η πλήρωση, η εκκένωση και ο καθαρισμός του εξοπλισμού εφαρμογής φυτοπροστατευτικών προϊόντων (ψεκαστικά μηχανήματα, γεωργικοί ελκυστήρες, συσκευασίες κ.ά.). Από τις δύο κατηγορίες, οι σημειακές πηγές αποτελούν το σημαντικότερο πρόβλημα, καθώς το μερίδιό τους στη ρύπανση των υδάτων είναι συχνά πάνω από 50%.

Η Οδηγία 2009/128/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης [3] επιβάλει στα κράτη μέλη να εφαρμόζουν βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης (Best Management Practices – BMPs) των υπολειμμάτων εφαρμογής φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Οι πρακτικές αυτές περιλαμβάνουν μεθόδους ασφαλούς καθαρισμού, όπως το τριπλό ξέπλυμα των κενών συσκευασιών, την ελεγχόμενη πλήρωση, εκκένωση και καθαρισμό του εξοπλισμού, καθώς και τη σύνδεση των συλλεγόμενων αποβλήτων με κατάλληλα συστήματα επεξεργασίας, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 22368.

Για τη διαχείριση των εκπλυμάτων πλήρωσης και καθαρισμού των ψεκαστικών μηχανημάτων διατίθενται σήμερα διάφορες εμπορικές λύσεις [4]. Οι απλούστερες περιλαμβάνουν σταθερούς σταθμούς περιορισμού του όγκου των εκπλυμάτων μέσω φυσικής εξάτμισης του νερού, όπως το σύστημα Heliosec της Syngenta [5]. Πιο σύνθετες λύσεις, όπως τα Biobed της Veolia [6] και Phytobac της Bayer [7], ενσωματώνουν βιοφίλτρα και άλλες τεχνολογίες βιοαποδόμησης των χημικών αποβλήτων. Οι λύσεις αυτές προϋποθέτουν μόνιμες υποδομές με τη δεύτερη κατηγορία να είναι πιο ολοκληρωμένη, αλλά και πιο δαπανηρή, και ως εκ τούτου να απευθύνεται κυρίως σε μεγάλες γεωργικές εκμεταλλεύσεις, συλλογικά σχήματα ή γεωργικές επιχειρήσεις.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η αξιολόγηση ενός πρότυπου φορητού σταθμού μείωσης του όγκου των εκπλυμάτων πλήρωσης και καθαρισμού των ψεκαστικών μηχανημάτων, χαμηλού κόστους και μικρών διαστάσεων, ώστε να μεταφέρεται και να εγκαθίσταται εύκολα, προσαρμοζόμενος στις ανάγκες των Ελλήνων παραγωγών. Η ελληνική γεωργία χαρακτηρίζεται από δύο βασικές δομικές ιδιαιτερότητες: το μικρό μέγεθος των εκμεταλλεύσεων και τον έντονο κατακερματισμό των αγροτεμαχίων. Επομένως, οι μόνιμες εγκαταστάσεις δεν αποτελούν πρακτική λύση για το μεγαλύτερο μέρος των παραγωγών. Η μελέτη εστιάζει σε δύο χαρακτηριστικές περιοχές της Ελλάδας: την Κεντρική Μακεδονία, όπου κυριαρχούν οι δενδροκομικές καλλιέργειες και οι εντατικοί ψεκασμοί, και τη Θεσσαλία, όπου επικρατούν αροτριαίες καλλιέργειες με λιγότερο συχνές, αλλά και πάλι εντατικές εφαρμογές φυτοπροστασίας.

Βασική προϋπόθεση για τη μείωση του απαιτούμενου όγκου του συστήματος είναι η αύξηση του ρυθμού εξάτμισης των εκπλυμάτων από τις δεξαμενές συγκέντρωσης. Μια μικρότερη δεξαμενή μεταφέρεται και εγκαθίσταται ευκολότερα στα περιθώρια των αγρών, χωρίς ανάγκη μόνιμης υποδομής. Η κεντρική ιδέα βασίζεται στην ανάπτυξη ενός συστήματος επιτάχυνσης της εξάτμισης του νερού, με εμβάπτιση υφασμάτινων στοιχείων σε υδατικό λουτρό, ώστε μέσω της τριχοειδούς ανόδου να αυξηθεί η ενεργός επιφάνεια ανταλλαγής υδρατμών με το περιβάλλον.

Η εργασία διαρθρώνεται σε τρία επιμέρους κεφάλαια: (i) δοκιμές επιλογής των κατάλληλων υλικών, (ii) ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων και στοιχείων από τις γεωργικές δραστηριότητες φυτοπροστασίας στις περιοχές εστίασης για τη διαστασιολόγηση της κατασκευής, και (iii) ανάπτυξη και αξιολόγηση του πρωτοτύπου. Για λόγους συνοχής, υλικά και μέθοδοι και αποτελέσματα παρουσιάζονται ενσωματωμένα στα επιμέρους κεφάλαια.

2. Επιλογή υλικών και διαμόρφωσης

Οι αρχικές δοκιμές είχαν ως στόχο τον προσδιορισμό των προδιαγραφών για το σύστημα ταχείας εξάτμισης του νερού. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της απορροφητικότητας και της ικανότητας εξάτμισης του νερού από διαφορετικούς τύπους υφασμάτινων υλικών. Για τον σκοπό αυτό δοκιμάστηκαν υφάσματα βαμβακερού τύπου καθώς και υφάσματα μικροϊνών προερχόμενα από προϊόντα οικιακού καθαρισμού. Τα δείγματα είχαν μορφή λωρίδων. Χρησιμοποιήθηκαν πεπλατυσμένες λωρίδες πάχους 1–3 mm και πλάτους 40 mm, καθώς και λωρίδες κυκλικής διατομής διαμέτρου περίπου 8 mm.

Σε πρώτο στάδιο διερευνήθηκε το βέλτιστο μήκος των λωρίδων, με στόχο να διασφαλίζεται το μέγιστο δυνατό ύψος εφύγρανσης μέσω της τριχοειδούς δράσης. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με κατακόρυφη ανάρτηση των λωρίδων σε μεταλλικό πλαίσιο, τη στιγμή που το κατώτερο τμήμα τους παρέμενε μόνιμα εμβαπτισμένο σε ογκομετρικά δοχεία ζέσεως με καθαρό νερό (Εικόνα 1). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανύψωση του νερού μέσω τριχοειδούς προσρόφησης έφθανε τουλάχιστον τα 20 cm. Δεδομένου ότι τα 5

κατώτερα εκατοστά της λωρίδας έπρεπε να βρίσκονται μόνιμα εμβαπτισμένα στο υδατικό λουτρό, το μήκος των λωρίδων αποφασίστηκε να διαμορφωθεί στα 30 cm.

Στο επόμενο στάδιο μετρήθηκε η ικανότητα απορρόφησης νερού. Τμήματα διαφορετικών υλικών ζυγίστηκαν στεγνά και στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν σε δεξαμενή με νερό για μισό λεπτό, ώστε να φτάσουν σε κορεσμό. Τα τεμάχια στην συνέχεια αναρτήθηκαν αιωρούμενα σε μια μεταλλική ράβδο έως ότου στραγγίξει όλο το πρόσθετο νερό, με την βαρύτητα, μέχρι την υδατοϊκανότητα. Ως σημείο υδατοϊκανότητας θεωρήθηκε το στάδιο όπου για την απορροή σταγόνας από το υλικό μεσολαβούσε διάστημα μεγαλύτερο του 1 min. Στο στάδιο αυτό το υλικό ζυγίστηκε υγρό. Η διαφορά βάρους του υγρού μείον του στεγνού υλικού ήταν η ποσότητα του νερού που κάθε υλικό συγκρατεί στην υδατοϊκανότητα.

Στο τρίτο στάδιο ελέγχθηκε ο ρυθμός εξάτμισης του νερού για τα διαφορετικά υλικά (Εικόνα 1a). Η σύγκριση των πεπλατυσμένων με των κυλινδρικών τύπων λωρίδων έδειξε σαφή υπεροχή υπέρ των πρώτων – προφανώς εξαιτίας της μεγαλύτερης ελεύθερης επιφάνειας για την ανταλλαγή υδρατμών. Διαπιστώθηκε επίσης ότι το ύφασμα μικροϊνών (80% πολυεστέρας, 20% πολυαμίδιο), αποτελεί το βέλτιστο υλικό, καθώς παρουσιάζει υψηλή ικανότητα απορρόφησης του νερού, επιτρέποντας παράλληλα την ταχεία εξάτμισή.

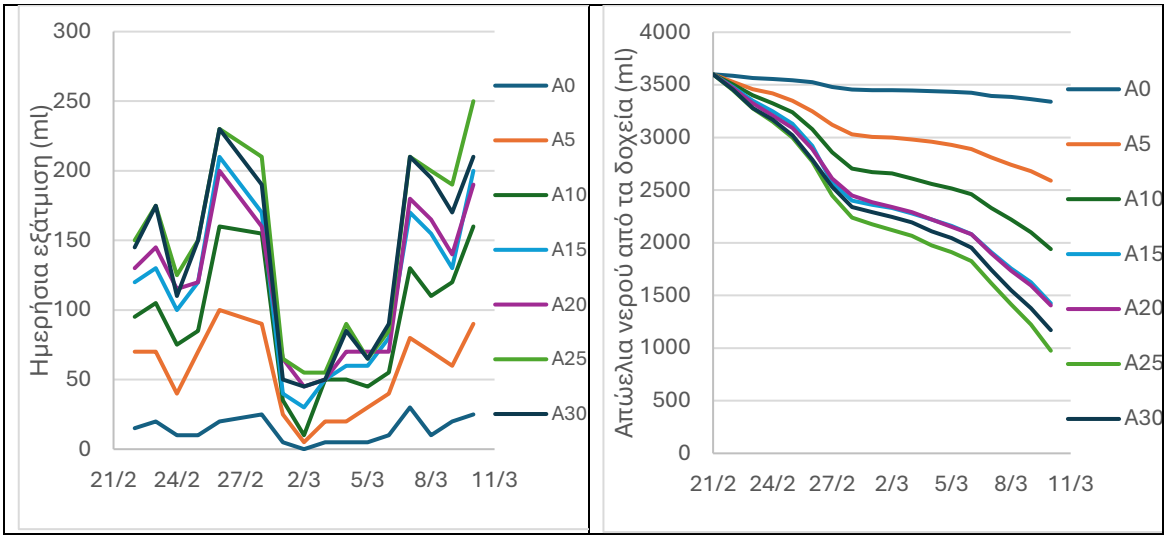
Στο τρίτο στάδιο των δοκιμών ελέγχθηκε η βέλτιστη πυκνότητα των κατακόρυφων λωρίδων (Εικόνα 1b & 1c). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικό χώρο, στη Σχολή Γεωπονικών Επιστημών του ΠΘ, το διάστημα 21/2 – 27/3/2023, με τις πεπλατυσμένες υφασμάτινες λωρίδες μικροινών που εμφάνισαν τη καλύτερη συμπεριφορά. Ελέγχθηκαν οι διαμορφώσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Εικόνα 1: Προκαταρκτικές δοκιμές σε γυάλινα δοχεία με διαφορετικό τύπο υλικού (α) και διαφορετική πυκνότητα υφασμάτινων λωρίδων (b & c)

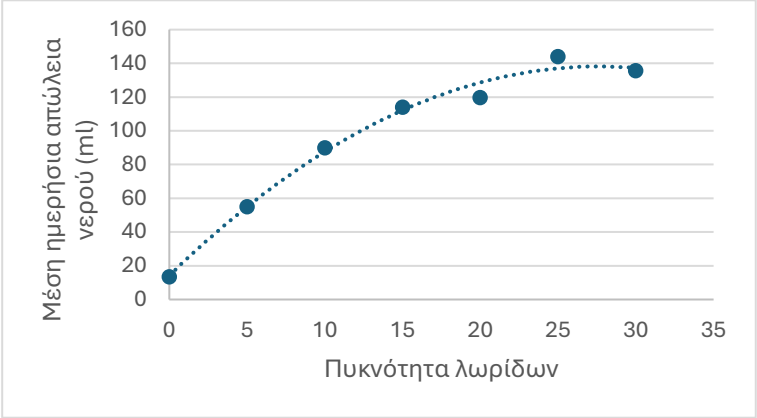
Πίνακας 4:Μεταχειρίσεις πειράματος ως προς την πυκνότητα των υφασμάτινων λωρίδων

Μεταχείριση	Αριθμός λωρίδων ανά δοχείο	Αριθμός λωρίδων ανά m^2
A0 (μάρτυρας)	0	0
A5	5	635
A10	10	1270
A15	15	1905
A20	20	2540
A25	25	3175
A30	30	3810

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ρυθμός εξάτμισης του νερού στα δοχεία με τις υφασμάτινες λωρίδες ήταν κατά 4-10 φορές υψηλότερος σε σύγκριση με τον μάρτυρα (Διάγραμμα 1) με την βέλτιστη συμπεριφορά να εντοπίζεται στο δοχείο των 25 λωρίδων (Διάγραμμα 2) που αντιστοιχεί στη μεταχείριση Α6 = 3175 λωρίδες / m^2.



Διάγραμμα 1: Μεταβολή του ρυθμού εξάτμιση σε σχέση με τη πυκνότητα των λωρίδων



Διάγραμμα 2: Συσχέτιση του ημερήσιου βαθμού εξάτμισης με την πυκνότητα των λωρίδων

Σε λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες το σύστημα των υφασμάτινων λωρίδων δεν θα προσφορά καθαρό νερό αλλά διάλειμμά από διάφορα φυτοπροστατευτικά προϊόντα τα οποία θα συσσωρεύονται στη δεξαμενή κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Ο σκοπός των επόμενων δοκιμών ήταν να ελεγχθεί αν τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα επηρεάζουν την απορροφητικότητα και την εξάτμιση του νερού από τα υφάσματα. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα με την χρήση της καλύτερης μεταχείρισης Α25 (25 τεμάχια), στο οποίο αντί για καθαρό νερό, χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα από διάφορα σκευάσματα φυτοπροστασίας. Δημιουργήθηκαν διαλύματα ενός σκευάσματος καθώς και μείγματα από τα εξής φυτοπροστατευτικά: Stomp Aqua 455 CS (ζιζανιοκτόνο - Εναιώρημα Μικροκαψυλίων), Equation Pro WG (μυκητοκτόνο - Εναιωρηματοποιήσιμοι Κόκκοι), ένα προσκολλητικό λάδι και ένας μάρτυρας με νερό. Οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων ήταν υψηλές (10%) για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά σε ακραίες συνθήκες. Τα διαλύματα συγκρίθηκαν με ένα μάρτυρα με καθαρό νερό. Το πείραμα περιλάμβανε τρεις επαναλήψεις. Από τις δοκιμές διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχε στατιστική διαφορά στον

ρυθμό εξάτμισης μεταξύ των διαφορετικών διαλυμάτων και του μάρτυρα. Ως εκ τούτου, τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα δεν επηρέασαν την συμπεριφορά των υφασμάτων

Από το σύνολο των παραπάνω δοκιμών διαπιστώθηκε ότι το σύστημα ταχείας εξάτμισης του νερού στην μονάδα διαχείρισης των εκπλυμάτων θα πρέπει να αποτελείται από κατακόρυφες λωρίδες υφάσματος μικροινών (80% πολυεστέρας, 20% πολυαμίδιο) πλάτους περίπου 4cm και ύψους 30cm με πυκνότητα 3175 λωρίδες ανά τετραγωνικό μέτρο.

3. Συλλογή στοιχείων ψεκασμών, μετεωρολογικών δεδομένων και διαστασιολόγηση του συστήματος

Για τον υπολογισμό των απαιτούμενων διαστάσεων ενός σταθμού διαχείρισης εκπλυμάτων, λαμβάνονται υπόψη δύο βασικές παράμετροι. Πρώτον, ο όγκος των δυνητικών εκπλυμάτων (Rp) και των υπολειμμάτων που πρέπει να διαχειριστεί ο σταθμός κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου. Δεύτερον, οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή την ίδια περίοδο, οι οποίες επηρεάζουν:

(α) την εξάτμιση του νερού (Ep), και
(β) τον όγκο του νερού (P) που προστίθεται μέσω του υετού, δεδομένου ότι τα υπό εξέταση συστήματα είναι ανοικτού τύπου.

Κύριος στόχος του υπολογισμού ήταν ο καθορισμός του ελάχιστου απαιτούμενου όγκου των δεξαμενών, ώστε να εξασφαλίζεται η επαρκής χωρητικότητα για τη διαχείριση τόσο του συνολικού όγκου των υπολειμμάτων και των εκπλυμάτων όσο και του πρόσθετου όγκου νερού που προκύπτει από πιθανούς υετούς. Δηλαδή:

$$Ep \geq Rp + P \quad (1)$$

Για τα υπολείμματα και τα εκπλύματα συγκεντρώθηκαν στατιστικά στοιχεία από τις κύριες καλλιέργειες των περιοχών της Κεντρικής Μακεδονίας και Θεσσαλίας. Τα στοιχεία συγκεντρώθηκαν από Περιφερειακές μελέτες και από ερωτηματολόγια παραγωγών. Από τις μελέτες συγκεντρώθηκαν πληροφορίες για την διάρθρωση των καλλιεργειών για τη χρήση φυτοπροστατευτικών ουσιών και για την παρουσία ευαίσθητων περιοχών στις περιοχές εστίασης. Στα ερωτηματολόγια περιέχονταν ερωτήματα για τα είδη των καλλιεργειών, το πλήθος και τη συχνότητα των ψεκασμών, των όγκων εφαρμογής, τον τύπο και τη χωρητικότητα του ψεκαστικού μηχανήματος και τις πρακτικές πλήρωσης και καθαρισμού των ψεκαστικών μηχανημάτων.

Σύμφωνα με τις Βέλτιστες Πρακτικές Διαχείρισης του Οργανισμού TOPPS [2], τα ψεκαστικά μηχανήματα πρέπει να καθαρίζονται αμέσως μετά την ολοκλήρωση του ψεκασμού, πριν προλάβουν να στεγνώσουν και να στερεοποιηθούν τα υπολείμματα στα διάφορα μέρη τους, καθώς σε αυτή την περίπτωση η απομάκρυνσή τους καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη. Τα εκπλύματα που προκύπτουν από τη διαδικασία καθαρισμού περιλαμβάνουν τόσο τον υπολειμματικό όγκο του ψεκαστικού διαλύματος που παραμένει στο βυτίο και στον ιστό, όσο και τον όγκο του καθαρού νερού που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του εσωτερικού και του εξωτερικού των μηχανημάτων. Ο υπολειμματικός όγκος αντιστοιχεί περίπου στο 5% της συνολικής χωρητικότητας του βυτίου, ενώ στον ιστό παραμένουν κατά μέσο όρο περίπου 2 L ανά μέτρο μήκους. Για τον εσωτερικό καθαρισμό απαιτούνται δύο επιπλέον ξεπλύματα μετά την απομάκρυνση του υπολειμματικού όγκου, ενώ για τον εξωτερικό καθαρισμό απαιτείται ποσότητα καθαρού νερού ίση με περίπου 2,5% της χωρητικότητας του βυτίου. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει ενδεικτικούς όγκους εκπλυμάτων για δύο τύπους ψεκαστικών μηχανημάτων, έναν με ιστό και έναν νεφελοψεκαστήρα, με χωρητικότητα βυτίου 1000 L.

Πίνακας 2: Τυπικοί όγκοι εκπλυμάτων για δυο τύπους ψεκαστικών μηχανημάτων με χωρητικότητα βυτίου 1000l.

	Με ιστό	Νεφελο-ψεκαστήρες
Χωρητικότητα βυτείου (l)	1000	1000
Μήκος ιστού (m)	16	
Υπολειμματικός όγκος στον ιστό (l)	32	
Υπολειμματικός όγκος στο βυτίο (l)	50	50
Εσωτερικός καθαρισμός (l)	100	100
Εξωτερικός καθαρισμός (l)	25	25
Σύνολο εκπλυμάτων (l)	207	175

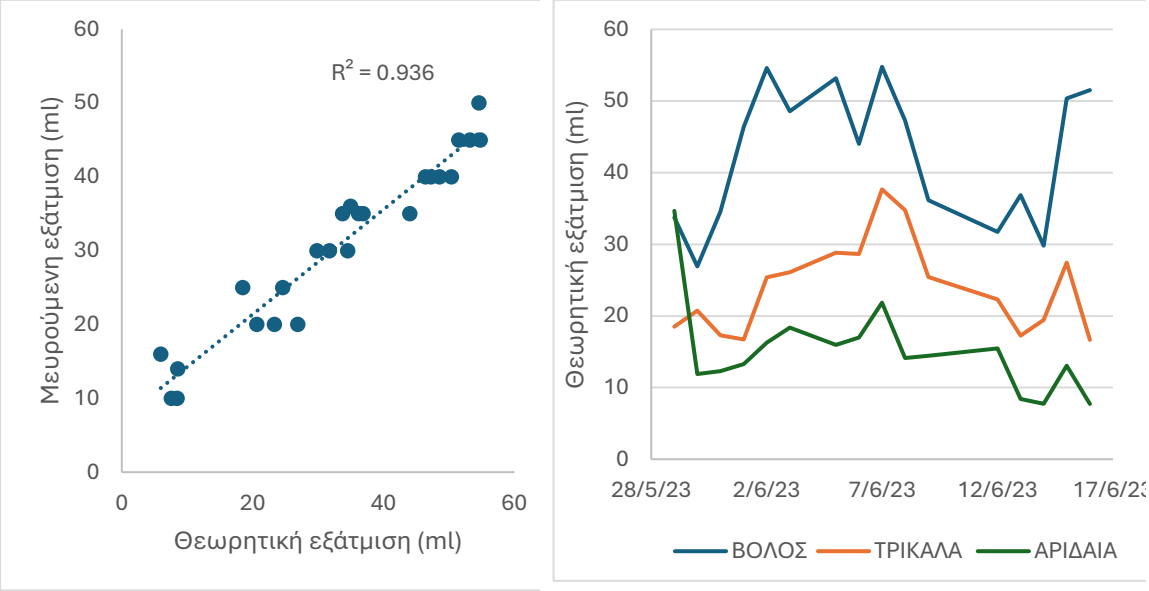
Από τα παραπάνω υπολογίστηκε η δυνητική ποσότητα εκπλυμάτων (Rp) σε lt ανά μήνα για τυπικές γεωργικές εκμεταλλεύσεις στις διάφορες περιοχές μελέτης στη Κεντρική Μακεδονία και τη Θεσσαλίας. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται αποτελέσματα για τις δύο αγροτικές περιοχές με τις υψηλότερες απαιτήσεις την Αριδαία στη Κεντρική Μακεδονία που επικρατεί η καλλιέργεια του ροδάκινου και τα Τρίκαλα στη Θεσσαλία όπου επικρατούν διάφορες αροτριαίες καλλιέργειες (βαμβάκι, αραβόσιτος, κτηνοτροφικά, σιτηρά).

Για τη συλλογή των μετεωρολογικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία της τελευταίας δεκαετίας από τις βάσεις δεδομένων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) από τους σταθμούς Αριδαίας (Πέλλα), Μακρυχώρι (Βέροια), Δίον (Πιερίας), Χαλάστρα & Θεσσαλονίκη (Θεσσαλονίκη), Κιλκίς, Πολύγυρος (Χαλκιδική) και Σέρρες για τη Κεντρική Μακεδονία και Τρικάλων, Καρδίτσας, Βόλου, & Αγιάς (Λάρισα) για τη Θεσσαλία. Τα δεδομένα ήταν σε μηνιαία βάση και περιλάμβαναν τη μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης.

Παράλληλα, κατά το στάδιο των πειραματικών δοκιμών για την επιλογή του καταλληλότερου υλικού και της βέλτιστης διαμόρφωσης του συστήματος, συλλέχθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από σταθμό εγκατεστημένο στη Σχολή Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (ΠΘ). Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην εξίσωση Penman [8] μια μέθοδος υπολογισμού της εξάτμισης από ελεύθερη υδάτινη επιφάνεια (Σχέση 2). Τα μετεωρολογικά στοιχεία που χρησιμοποιεί η μέθοδος Penman είναι μετρήσεις θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, σχετικής ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους. Τα αποτελέσματα του θεωρητικού υπολογισμού είχαν καλή συσχέτιση με τις πραγματικά μετρούμενες τιμές (Διάγραμμα 3a).

$$E = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}F(u)D \quad [kg/(m^2d)] \tag{2}$$

Όπου :
γ = ο ψυχρομετρικός συντελεστής [hPa/^{o}C] (Τυπική τιμή = 0.67 hPa/^{o}C)
Δ = η κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών [hPa/^{o}C]
Rn = η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας [kJ/(m^{2}d)]
λ = η λανθάνουσα θερμότητας εξάτμισης [kJ/kg]
F(u) = η συνάρτηση ταχύτητας του ανέμου [kg/(hPa m2d)]
D = το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών [hPa]



Διάγραμμα 3. Συσχέτιση θεωρητικής και μετρούμενης εξάτμισης (αριστερά) και σύγκριση της θεωρητικής εξάτμισης σε τρεις ενδεικτικές περιοχές μελέτης (δεξιά).

Από τα μετεωρολογικά δεδομένα των υπόλοιπων σταθμών της ΕΜΥ υπολογίστηκε η θεωρητική εξάτμιση στις αντίστοιχες περιοχές της Κεντρικής Μακεδονίας και της Θεσσαλίας (ενδεικτικό Διάγραμμα 2β). Δεδομένου ότι ο λόγος εξάτμισης στα δοχεία με τις 25 λωρίδες (3175 λωρίδες / m2) σε σχέση με το δοχείο του μάρτυρα ήταν τουλάχιστον 10/1, αντίστοιχα υψηλότερη θεωρήθηκε η εξάτμιση για τις άλλες περιοχές ώστε να υπολογιστεί η δυνητική εξάτμιση (Ep) ανά m^2 για το σύστημα διαχείρισης των εκπλυμάτων.

Στο επόμενο βήμα με βάση την δυνητική ποσότητα εκπλυμάτων (Rp) (λαμβάνοντας υπόψιν την ακραία περίπτωση των μέγιστων ψεκασμών στη κάθε περιοχή - Πίνακας 3), τον υετό (P) και την αντίστοιχη δυνητική εξάτμιση (Ep) υπολογίστηκε από τη Σχέση [3] το ελάχιστο απαραίτητο εμβαδόν της δεξαμενής (E_{min}, σε m^2) που διασφαλίζει την ισορροπία εισροών και εκροών από τις δεξαμενές,:

$$E_{min} = (Rp + P) / Ep \quad (3)$$

με τις παραμέτρους Rp, P και Ep σε εκφρασμένες mm στήλης νερού εμβαδού $1m^2$ / μήνα

Με βάση τις παραπάνω εκτιμήσεις διαπιστώθηκε ότι μια τυπική εκμετάλλευση με δενδρώδεις καλλιέργειες στην Κεντρική Μακεδονία εφαρμόζει 9-13 ψεκασμούς σε μια καλλιεργητική περίοδο 8 μηνών κατά την οποία μπορεί να χρειαστεί να διαχειρίζεται 2600 lt εκπλυμάτων συν 571 lt κατακρημνισμάτων και γι΄αυτό η ελάχιστη χωρητικότητα του συστήματος θα πρέπει να είναι 576 lt, με ελεύθερη επιφάνεια 0.743 m^2 (Πίνακας 3). Αντίστοιχα, στην περιοχή της Θεσσαλίας, μια τυπική εκμετάλλευση με μείγμα εαρινών και χειμερινών ετήσιων καλλιέργειών εφαρμόζει 7-12 ψεκασμούς το χρόνο κατά την οποία μπορεί να χρειαστεί να διαχειρίζεται περίπου 2700 lt εκπλυμάτων συν 650 lt κατακρημνισμάτων και γι΄αυτό χρειάζεται ένα σύστημα με χωρητικότητα 496 lt με ελεύθερη επιφάνεια 0.885 m^2.

Πίνακας 3. Στατιστικά συχνότητας ψεκασμών και στοιχεία εισροών – εκροών ύδατος από τις δεξαμενές διαχείρισης των εκπλυμάτων για δύο περιοχές με αυξημένες απαιτήσεις (Τρίκαλα – Θεσσαλία και Αριδαία – Κεντρική Μακεδονία). Στις τελευταίες στήλες υπολογίζονται οι απαραίτητες διαστάσεις του συστήματος.

	Πλήθος ψεκασμών		Μέγιστοι όγκοι εκπλυμάτων Rp (lt ή mm στήλης 1m²)*		Υετός P (mm)		Δυνητική εξάτμιση (Ep) (mm)		Ελάχιστο εμβαδό δεξαμενής E_{min} (m²)		Ελάχιστος όγκος δεξαμενής (lt)	
	Τρίκ.	Αριδ.	Τρίκ.	Αριδ.	Τρίκ.	Αριδ.	Τρίκ.	Αριδ.	Τρίκ.	Αριδ.	Τρίκ.	Αριδ.
Ιαν	0	0	0	0	38.3	52	509	900	0.113	0.087	34	39
Φεβ	0	1-2	0	350	11.4	38	628	783	0.027	**0.743**	10	378
Μαρ	0-1	1	207	175	45.2	76.2	738	820	0.512	0.460	247	232
Απρ	0-2	1-2	414	350	63.9	48.4	927	1065	0.773	0.561	471	386
Μαι	0-2	1-2	414	350	68.1	74	1004	988	0.720	0.644	474	405
Ιουν	0-2	1-3	414	525	74.0	68.2	1307	1572	0.560	0.566	479	**576**
Ιουλ	1-2	1-3	414	525	93.0	65.8	1790	2280	0.425	0.389	496	574
Αυγ	1-2	0-1	414	175	93.1	52.2	1945	1757	0.391	0.194	**496**	214
Σεπ	0-1	0-1	207	175	42.1	65.8	1113	1175	0.336	0.307	244	224
Οκτ	0	0	0	0	73.4	38.4	672	847	0.164	0.068	65	29
Νοε	0-1	0	207	0	63.6	104.2	459	469	**0.885**	0.333	263	77
Δεκ	0	0	0	0	71.0	85.6	441	333	0.241	0.386	63	64

** 1 lt ισοδυναμεί με 1mm στήλης νερού εμβαδού 1m²*

4. Πρότυπη κατασκευή

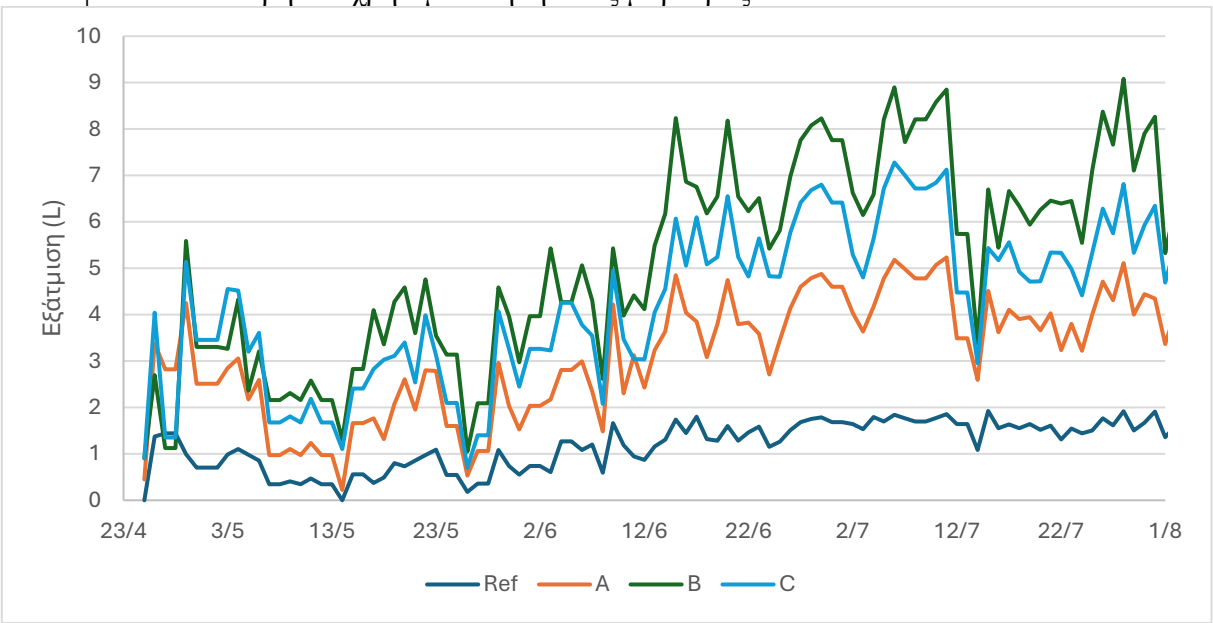
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, η παρούσα έρευνα προχώρησε στον σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας πρότυπης μονάδας διαχείρισης των εκπλυμάτων που προκύπτουν κατά τη πλήρωση και τον καθαρισμό των ψεκαστικών μηχανημάτων. Η μονάδα διαθέτει αρθρωτή δομή και αποτελείται από ορθογωνικές δεξαμενές πολυαιθυλενίου μαύρου χρώματος, όγκου 80 L η καθεμία, με άνω επιφάνεια 60 × 40 cm (0,24 m²) και ύψος 40 cm. Οι δεξαμενές συνδέονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας δίκτυο συγκοινωνούντων δοχείων για την ομοιόμορφη κατανομή και συλλογή των εκπλυμάτων.

Πάνω από κάθε δεξαμενή, τοποθετήθηκε πλωτή πλατφόρμα από μεταλλικό πλέγμα και πλαίσιο από ανοξείδωτο χάλυβα στρογγυλής διατομής διαμέτρου 6mm, στο οποίο τοποθετήθηκαν λωρίδες υφάσματος από μικροΐνες. Το πλαίσιο στηρίζεται σε 4 κατακόρυφα πόδια από το ίδιο ανοξείδωτο υλικό και πακτώθηκε σε τμήματα μονωτικού υλικού διαστάσεων 50x5x8cm που χρησιμεύουν ως πλωτήρες του πλαισίου. Η επιλογή της πλωτής κατασκευής αποφασίστηκε για να μειωθεί το απαραίτητο ύψος των υφασμάτινων λωρίδων και να περιοριστεί το κόστος της κατασκευής. Οι λωρίδες είχαν ύψος 30 cm εκ των οποίων τα κατώτερα 5 cm βρίσκονται μόνιμα εμβαπτισμένα στο νερό. Η πυκνότητα των λωρίδων ήταν 3200 / m².

Η αρθρωτή διάταξη της κατασκευής επιτρέπει την εύκολη μεταφορά της και την προσαρμογή στις ιδιαίτερες ανάγκες διαφορετικών γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Εικόνα 3). Για τις συνθήκες της περιοχής της Αριδαίας, ο απαιτούμενος αριθμός δεξαμενών εκτιμάται σε τρεις, ενώ για την περιοχή των Τρικάλων σε τέσσερις.

Εικόνα 3: Πρότυπο σύστημα συλλογής και εξάτμισης εκπλυμάτων

Για τον έλεγχο και την επαλήθευση των αρχικών εκτιμήσεων, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις δεξαμενές σε ανεξάρτητη διάταξη (χωρίς υδραυλική επικοινωνία). Στις τρεις τοποθετήθηκαν πλωτές πλατφόρμες με υφασμάτινες λωρίδες ενώ η τέταρτη είχε την επιφάνεια ελεύθερη και χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας.



Διάγραμμα 1: Εξέλιξη της εξάτμισης των δοχείων με διαφορετική πυκνότητα και διάταξη λωρίδων

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ρυθμός εξάτμισης του νερού στις δεξαμενές με τις υφασμάτινες λωρίδες ήταν περίπου 3 φορές υψηλότερος από τον μάρτυρα και όχι πάνω από 10 φορές που είχε διαπιστωθεί κατά τις αντίστοιχες πρώιμες δοκιμές στα δοχεία ζέσεως. Ως πιθανή αιτία για αυτή τη διαφοροποίηση θεωρήθηκε ο συμπαγής όγκος των κατακόρυφων λωρίδων. Ενώ στα δοχεία ζέσεως χρησιμοποιήθηκαν 25 λωρίδες, στις δεξαμενές τοποθετήθηκαν 760. Αυτές δημιουργούσαν έναν συμπαγή όγκο στον οποίο η διακίνηση του αέρα στο εσωτερικό ήταν περιορισμένη με αποτέλεσμα η εξάτμιση του νερού να περιορίζεται σημαντικά. Η σκίαση στο εσωτερικό της κατασκευής ενδεχομένως έπαιξε επίσης ρόλο. Για το λόγο αυτό δοκιμάστηκαν οι εξής διαφοροποιήσεις

- A: Παράλληλη διάταξη λωρίδων
- B: Δικτυωτή διάταξη με μειωμένο αριθμό λωρίδων (50% της κανονικής πυκνότητας)
- C: Δικτυωτή διάταξη λωρίδων
- Ref: Μάρτυρας.

Από τις δοκιμές αυτές διαπιστώθηκε ότι η μεταχείριση B ήταν η αποδοτικότερη με 4.2 φορές υψηλότερο ρυθμό εξάτμισης από τον μάρτυρα. Τούτο οφείλονταν στην αραιότερη διάταξη των λωρίδων που διευκόλυνε την κίνηση του αέρα. Η απόδοση βέβαια ήταν 2.5 φορές μικρότερη σε σχέση με αυτή που διαπιστώθηκε στις αρχικές δοκιμές στα δοχεία ζέσεως με αποτέλεσμα να απαιτείται 2,5 φορές μεγαλύτερο μέγεθος δεξαμενών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις προκαταρκτικές δοκιμές, διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν σημαντικές προοπτικές για την ανάπτυξη ενός καινοτόμου σταθμού διαχείρισης των εκπλυμάτων πλήρωσης και καθαρισμού των ψεκαστικών μηχανημάτων. Το πρότυπο που κατασκευάστηκε είχε πάνω από 4 φορές μεγαλύτερο ρυθμό αποβολής του καθαρού νερού των εκπλυμάτων μέσω της εξάτμισης σε σχέση με ένα απλό σύστημα εξάτμισης επιφανείας. Οι δοκιμές έδειξαν επίσης ότι ο ρυθμός εξάτμισης μπορεί αυξηθεί πάνω από 10 φορές.

Το ύφασμα μικροϊνών, αποτελεί το βέλτιστο υλικό για το σκοπό αυτό, καθώς παρουσιάζει υψηλή ικανότητα απορρόφησης, επιτρέποντας ταυτόχρονα την ταχεία εξάτμισή του. Η όλη κατασκευή είναι απλή, χαμηλού κόστους και πλήρως και προσαρμόζεται εύκολα στις ανάγκες των παραγωγών. Το κόστος για ένα σύστημα με 8 δεξαμενές για την περιοχή της Αριδαίας (2,5 περισσότερες από την αρχική εκτίμηση που έδινε 3) ανέρχεται στα 800€ τη στιγμή που αντίστοιχης δυναμικότητας συστήματα του εμπορίου στοιχίζουν πάνω από 5000€. Η βελτίωση της αποδοτικότητας αναμένεται να περιορίσει περεταίρω το κόστος.

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα πρώτα ευρήματα των δοκιμών οι οποίες προβλέπεται να συνεχιστούν δοκιμάζοντας περισσότερες εναλλακτικές διαμορφώσεις καθώς και το ενδεχόμενο το σύστημα να είναι σκεπασμένο με διάφανο υλικό για να αποφευχθεί η είσοδος των κατακρημνισμάτων.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Acharya, L. K., Paramaguru, P. K., Tripathi, K., Bhoi, T. K., Seth, P., & Birah, A. (2025). Pesticide contamination in groundwater: Processes, risks, and mitigation strategies. *Discover Agriculture*, *3*(1), 152. https://doi.org/10.1007/s44279-025-00337-x

https://www.topps-life.org/)

Οδηγία 2009/128/ΕΚ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0128&from=PT

Beltrán-Flores, E., Sarrà, M., & Blánquez, P. (2024). A review on the management of rinse wastewater in the agricultural sector. *Chemosphere*, *352*, 141283. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141283

Heliosec https://www.syngenta.gr/stewardship/heliosec).

Biobed https://www.veoliawatertechnologies.com/en/technologies/biobed-ebs-egsb

Phytobac https://phytobac.com/en/

Penman, H.L. (1948) Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London, 193, 120-145. https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037

ΕΝΟΤΗΤΑ 3η

Αγροτικές κατασκευές – θερμοκήπια

23. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΟΜΗΣ ΣΕ ΚΑΘΕΤΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Χρήστος Βατίστας , Δάφνη Δέσποινα Αυγουστάκη & Θωμάς Μπαρτζάνας

Αξιοποίηση Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά οδός 75, 118 55, Αθήνα, Ελλάδα. vatistasx@aua.gr

Περίληψη

Στα συστήματα κάθετης γεωργίας, ο τεχνητός φωτισμός (κυρίως LED) αντικαθιστά το ηλιακό φως, παρέχοντας στα φυτά την απαιτούμενη ενέργεια για τη φωτοσύνθεση. Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε κατά πόσο η χρήση πλευρικών ανακλαστικών ή διαχυτικών επιφανειών, σε συνδυασμό με πλευρικό φωτισμό χαμηλής έντασης, μπορεί να βελτιώσει την κατανομή του φωτός στην κόμη των φυτών και να συμβάλει στην αύξηση της τελικής παραγωγής. Δοκιμάστηκαν πέντε συνδυασμοί φωτισμού σε υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού (*Lactuca sativa*), με συνολική ένταση φωτισμού 125 μmol·m^{-2}·s^{-1}. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ανακλαστικές και διαχυτικές επιφάνειες αύξησαν τη νωπή βιομάζα του βλαστού κατά 17.6% και 28.7%, αντίστοιχα, ενώ με την προσθήκη πλευρικού φωτισμού οι αντίστοιχες αυξήσεις έφτασαν το 45.1% και 50.6%. Παράλληλα, καταγράφηκαν βελτιώσεις στην αποδοτικότητα χρήσης νερού, φωτός και ενέργειας – κρίσιμων παραμέτρων για τη βιωσιμότητα των συστημάτων κάθετης γεωργίας.

Λέξεις κλειδιά: κάθετη καλλιέργεια, κατανομή φωτός, αποδοτικότητα χρήσης πόρων, παραγωγή βιομάζας, μαρούλι

CANOPY LIGHTING IMPROVEMENT IN VERTICAL FARMS USING SIDE LIGHTING AND REFLECTIVE MATERIALS

Christos Vatistas✉, Dafni Despoina Avgoustaki & Thomas Bartzanas

Department of Natural Resources and Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 118 55 Athens, Greece. ✉ *vatistasx@aua.gr*

ABSTRACT

In vertical farming systems (VFs), artificial lighting (mainly LED) replaces sunlight, providing plants with the energy required for photosynthesis. This study examined whether the use of lateral reflective or diffusive surfaces, in combination with low- intensity side lighting, can improve light distribution within the plant canopy and contribute to increased final yield. Five lighting combinations were tested in a hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa*), with a total light intensity of 125 μmol·m^{-2}·s^{-1}. The results showed that reflective and diffusive surfaces increased shoot fresh biomass by 17.6% and 28.7%, respectively, while the addition of side lighting raised these increases to 45.1% and 50.6%. Furthermore, improvements were recorded in water use efficiency (WUE), light use efficiency (LUE), and energy use efficiency (EUE) — critical parameters for the sustainability of VFs.

Keywords: vertical farming, light distribution, resource use efficiency, biomass production, lettuce

4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για βιώσιμη παραγωγή τροφίμων, σε συνδυασμό με την έντονη αστικοποίηση, έχει επιταχύνει την ανάπτυξη των συστημάτων ελεγχόμενης καλλιέργειας (Control Environmental Agriculture – CEA), όπως είναι τα θερμοκήπια, οι θάλαμοι ανάπτυξης, οι κάθετες φάρμες (Vertical Farm – VFs) και τα εργοστάσια παραγωγής φυτών με τεχνητό φωτισμό (ο όρος: Plant Factories with Artificial Lighting – PFALs, χρησιμοποιείται κυρίως στην Ιαπωνία, και αναφέρονται σε μεγάλες μονάδες κάθετης καλλιέργειας όπου είναι πολύ ανεπτυγμένες τεχνολογικά) (Zhang et al., 2018). Ανάμεσά τους, οι VFs και PFALs έχουν αναδειχθεί σε υποσχόμενες λύσεις που επιτρέπουν την παραγωγή τροφίμων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, υπό πλήρως ρυθμιζόμενες συνθήκες, όπως το φως, η θερμοκρασία, η υγρασία και η συγκέντρωση CO_2 (Kozai, 2013; Joshi et al., 2017). Τα συστήματα αυτά προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως μειωμένη χρήση φυτοφαρμάκων, αυξημένη ασφάλεια τροφίμων και αποδοτική χρήση πόρων, ιδιαίτερα όσον αφορά το νερό, τα θρεπτικά στοιχεία και τη γη (Marzec & Hensel, 2020). Επιπλέον, επιτρέπουν την καλλιέργεια εντός αστικού περιβάλλοντος όπου ο χώρος είναι περιορισμένος, ενώ παρέχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης προηγμένων τεχνολογιών, όπως η τεχνητή νοημοσύνη, οι αισθητήρες και ο αυτοματισμός, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ποιότητας των καλλιεργειών (Arcel et al., 2023). Ωστόσο, η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση που σχετίζεται με τον τεχνητό φωτισμό εξακολουθεί να αποτελεί μία από τις κυριότερες προκλήσεις των συστημάτων αυτών, ιδίως σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο φωτισμός μπορεί να αντιπροσωπεύει έως και το 80% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που έχει οδηγήσει σε εντατική ερευνητική δραστηριότητα με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης φωτός και τη μείωση του λειτουργικού κόστους (Ibaraki & Shigemoto, 2013; Ouzounis et al., 2015; Choubchilangroudi & Zarei, 2022). Συνεπώς, η αύξηση της απόδοσης των λαμπτήρων και η βελτιστοποίηση της κατανομής του φωτός στο εσωτερικό της καλλιέργειας, είναι παράγοντες κρίσιμοι για τη βιωσιμότητα των συστημάτων CEA (Yang et al., 2022).

Η περιοχή του ορατού φάσματος που χρησιμοποιείται από τα φυτά για την ανάπτυξη και τη φωτοσύνθεση κυμαίνεται από 400 έως 700 νανόμετρα και ονομάζεται φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία (Photosynthetically Active Radiation – PAR). Η ποσότητα φωτονίων, σε αυτό το εύρος, που φθάνει στην επιφάνεια του φυτού αναφέρεται ως φωτοσυνθετική πυκνότητα ροής φωτονίων (Photosynthetic Photon Flux Density – PPFD), και συνήθως μετριέται σε μmol m^{-2} s^{-1} (Ouzounis et al., 2015; Jin et al., 2023). Ωστόσο, η ομοιόμορφη κατανομή του φωτός σε όλη τη καλλιέργεια αποτελεί πρόκληση για όλα τα συστήματα CEA. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές σε συστήματα με τεχνητό φωτισμό, όπου η πυκνή φύτευση σε συνδυασμό με σταθερά τοποθετημένα φωτιστικά συστήματα, οδηγεί σε άνιση κατανομή του φωτός εντός της κόμης των φυτών. Καθώς τα φυλλώδη λαχανικά, όπως το μαρούλι, αναπτύσσονται, τα άνω φύλλα τείνουν να σκιάζουν τα κατώτερα, μειώνοντας τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και επιταχύνοντας τη γήρανση των φυτών (Joshi et al., 2017; Arcel et al., 2023). Επιπλέον, η μεταβλητότητα της τιμής PPFD στα ράφια καλλιέργειας – συνήθως υψηλότερη στο κέντρο και χαμηλότερη στα άκρα – μπορεί να οδηγήσει σε ασυνέπειες στο μέγεθος και την ποιότητα των φυτών, επηρεάζοντας αρνητικά τη συνολική απόδοση και την εμπορική τους αξία. (Chen et al., 2023).

Σκοπός του πειράματος είναι η βελτίωση της κατανομής του φωτός στο εσωτερικό της καλλιέργειας, χρησιμοποιώντας πλευρικές ανακλαστικές επιφάνειας και επιφάνειες με ιδιότητες διάχυσης του φωτός. Ακόμη, μελετήθηκε ο συνδυασμός του κάθετου τεχνητού φωτισμού με πλευρικό φωτισμό χαμηλής έντασης και την ταυτόχρονη χρήση των

ανακλαστικών επιφανειών. Μέσω συν-καλλιέργειας σποροφύτων μαρουλιού στο ίδιο γλαστράκι ανάπτυξης, προσομοιώθηκε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον φυλλώματος, ώστε να μελετηθεί η επίδραση διαφορετικών διαμορφώσεων φωτισμού στη δυναμική ανάπτυξης των φυτών, την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και την αποδοτικότητα χρήσης πόρων. Τα αποτελέσματα αποσκοπούν στην παροχή πρακτικών λύσεων για την ενεργειακά αποδοτική διαχείριση του τεχνητού φωτισμού, με στόχο τη βελτίωση της παραγωγικότητας σε καλλιεργητικά συστήματα κάθετης καλλιέργειας (VFs).

5. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Πειραματική διάταξη και συνθήκες καλλιέργειας

Το φυτό μελέτης που επιλέχθηκε ήταν το μαρούλι (*Lactuca sativa*). Για κάθε διαφορετική μέθοδο φωτισμού που μελετήθηκε, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα σπορόφυτα ηλικίας 20 ημερών, τα οποία τοποθετήθηκαν σε κοινό γλαστρίδιο, διαμέτρου 12 cm και ύψους 5.5 cm. Σαν υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε ελαφρόπετρα. Το γλαστρίδιο τοποθετήθηκε σε πλαστικό δοχείο διαστάσεων 12 × 12 × 5 cm, το οποίο λειτουργούσε ως δεξαμενή του θρεπτικού διαλύματος. Αυτή η διάταξη αποσκοπούσε στη δημιουργία πυκνής φύτευσης σε κάθε γλαστρίδιο, ώστε να προσομοιωθεί ανταγωνιστικό περιβάλλον ανάπτυξης. Χρησιμοποιήθηκε σύστημα υδροπονίας τύπου βαθιάς καλλιέργειας σε νερό (Deep-Water Culture - DWC). Σε κάθε δεξαμενή τοποθετήθηκε σύστημα οξυγόνωσης, αποτελούμενο από αερόπετρα συνδεδεμένη με αεραντλία, για την παροχή οξυγόνου στο ριζικό σύστημα. Το πείραμα διεξήχθη σε τρεις πανομοιότυπους θαλάμους ανάπτυξης (μοντέλο CL 600, ELVEM), στους οποίους υπήρχαν πέντε ξεχωριστά ράφια. Οι εσωτερικές διαστάσεις των θαλάμων ήταν 155 cm × 60 cm × 67 cm. Σε κάθε ράφι εφαρμόστηκε μία από τις πέντε διαφορετικές μεθόδους φωτισμού, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Η θερμοκρασία εντός των θαλάμων κυμαινόταν μεταξύ 22–25 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας και 20–22 °C κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ η σχετική υγρασία κυμαινόταν μεταξύ 57–72 %. Το θρεπτικό διάλυμα προερχόταν από υδατοδιαλυτό λίπασμα με ισόποση αναλογία αζώτου (N), φωσφόρου (P) και καλίου (K) (7-7-7), με pH 6,0 και ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) 1.8 $mS \cdot cm^{-1}$. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

2.2 Συνθήκες φωτισμού

Η παροχή φωτισμού έγινε με χρήση λαμπτήρα LED, φασματικής αναλογίας κόκκινου προς μπλε 2:1. Μελετήθηκαν πέντε διαφορετικές μέθοδοι φωτισμού. Στην πρώτη μέθοδο, οι συνθήκες φωτισμού περιλάμβαναν αποκλειστικά κατακόρυφο φωτισμό, ενώ στις πλάγιες επιφάνειες του θαλάμου τοποθετήθηκαν σκουρόχρωμα πάνελ ώστε να περιοριστεί η ανάκλαση του φωτός. Στη δεύτερη περίπτωση, εκτός από τον κατακόρυφο φωτισμό, τοποθετήθηκε ανακλαστική επιφάνεια στα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου. Στην τρίτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ανάγλυφη ανακλαστική επιφάνεια, η οποία έχει την ιδιότητα να διαχέει το φως προς πολλαπλές κατευθύνσεις, σε σύγκριση με μια λεία επιφάνεια ανάκλασης, όπου το φως ανακλάται προς μία κατεύθυνση. Στις τρεις πρώτες μεθόδους, η ένταση φωτός ρυθμίστηκε στα 125 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Στην τέταρτη μέθοδο, η λεία ανακλαστική επιφάνεια συνδυάστηκε με πλευρικό φωτισμό χαμηλής έντασης, ο οποίος προερχόταν από ταινία LED τοποθετημένη περιμετρικά και σε μικρή απόσταση από τα φυτά. Στην πέμπτη μέθοδο, εφαρμόστηκε ανάγλυφη επιφάνεια διάχυσης στις πλευρές του θαλάμου, επίσης σε συνδυασμό με πρόσθετο πλευρικό φωτισμό. Στις δύο τελευταίες μεθόδους, ο πλευρικός φωτισμός είχε την ίδια φασματική σύνθεση με τον κατακόρυφο φωτισμό (αναλογία κόκκινο:μπλε = 2:1), με ένταση 25

μmol·m^{-2}·s^{-1}. Από τη συνολική ένταση φωτισμού των 125 μmol·m^{-2}·s^{-1}, το 20% προερχόταν από τον πλευρικό φωτισμό, ενώ το υπόλοιπο 80% μέσω κατακόρυφου φωτισμού. Η φωτοπερίοδος που εφαρμόστηκε ήταν 16 ώρες και η διάρκεια του πειράματος ήταν 20 ημέρες. Το ημερήσιο ολοκλήρωμα φωτός (Daily Light Integral – DLI) ήταν ίδιο σε όλες τις εφαρμογές, και ισοδυναμούσε με 7.2 mol·m^{-2}·day^{-1}. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι συντομογραφίες των 5 διαφορετικών μεθόδων φωτισμού.

Πίνακας 1. Συντομογραφίες των μεθόδων φωτισμού που χρησιμοποιήθηκαν

Συντομογραφία	Περιγραφή
1. Top	Φωτισμός μόνο από το πάνω μέρος των φυτών
2. Top+R	Φωτισμός από πάνω + ανακλαστική επιφάνεια πλευρικά
3. Top+S	Φωτισμός από πάνω + ανάγλυφη επιφάνεια πλευρικά για διάχυση του φωτός
4. Top+R+Side	Φωτισμός από πάνω + ανακλαστική επιφάνεια πλευρικά + συμπληρωματικός πλευρικός φωτισμός
5. Top+S+Side	Φωτισμός από πάνω + ανάγλυφη επιφάνεια πλευρικά για διάχυση του φωτός + συμπληρωματικός πλευρικός φωτισμός

2.3 Μετρήσεις βιομάζας και χλωροφύλλης

Οι ζυγίσεις της βιομάζας έγιναν σε ζυγαριά ακριβείας (Luna Precision Balance LTB 3602i) (σφάλμα ± 0,03 g). Στο τέλος του πειράματος, τα φύλλα και οι βλαστοί συλλέχθηκαν και ζυγίστηκαν για τον προσδιορισμό της νωπής βιομάζας (Fresh Weight- FW). Κατόπιν αποξηράθηκαν σε φούρνο στους 80 °C για 24 ώρες, ώστε να μετρηθεί η ξηρή βιομάζα (Dry Weight - DW). Από τις τιμές FW και DW υπολογίστηκε η αναλογία ξηρής προς νωπης βιομάζας (DW:FW).

Η μέτρηση της περιεκτικότητας χλωροφύλλης στα φύλλα των φυτών, έγινε στο τέλος του πειράματος (20ή ημέρα), με τη χρήση του αισθητήρα CCM-200 Plus (Opti Sciences). Για καθεμία από τις πέντε μεταχειρίσεις φωτισμού, η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη εκτιμήθηκε μετρώντας πέντε φύλλα ανά φυτό, από τα τέσσερα φυτά της κάθε πειραματικής μονάδας. Συνολικά ελήφθησαν είκοσι μετρήσεις για κάθε μεταχείριση φωτισμού, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως ο μέσος όρος των είκοσι μετρήσεων ανά πειραματική μονάδα.

2.4 Μετρήσεις αποδοτικότητας χρήσης πόρων

Ο προσδιορισμός της αποδοτικότητας χρήσης πόρων αφορούσε: την αποδοτικότητα χρήσης νερού (Water Use Efficiency – WUE), την αποδοτικότητα χρήσης φωτός (Light Use Efficiency – LUE) και την αποδοτικότητα χρήσης ενέργειας (Energy Use Efficiency - EUE). Τα τέσσερα φυτά σε κάθε μεταχείριση θεωρήθηκαν ως ένα ενιαίο σύστημα και η αποδοτικότητα χρήσης νερού υπολογίστηκε ως ο λόγος της συνολικής νωπής βιομάζας του υπέργειου τμήματος προς τη συνολική ποσότητα νερού που καταναλώθηκε. Ο λόγος αυτός εκφράστηκε ως gFW L^{-1} H_2O. Η φωτοσυνθετική αποδοτικότητα χρήσης φωτός υπολογίστηκε ως ο λόγος της συνολικής ξηρής βιομάζας των υπέργειων τμημάτων προς τη συνολική προσπίπτουσα PAR (Photosynthetic Active Radiation) (gDW mol^{-1}PAR) (Jin et al., 2023). Η εκτίμηση της συνολικής ποσότητας φωτονίων που δέχτηκαν τα φυτά κατά τη διάρκεια του πειράματος εκτιμήθηκε ως εξής: Καταγραφή της κάτοψης των φυτών, μέσω φωτογράφισης ανά 2 ημέρες, και με την βοήθεια

του προγράμματος ImageJ (έκδοση 1.53t· NIH, Bethesda, MD, USA), υπολογίστηκε η εκάστοτε επιφάνεια κάτοψης της κόμης των φυτών (Projected Canopy Size – PCS), σε μονάδες m^2. Η επιφάνεια της κόμης των φυτών για τις ενδιάμεσες μέρες προσδιορίστηκε ως ο μέσος όρος της προηγούμενης και επόμενης μέτρησης. Η ημερήσια τιμή της δέσμευσης φωτός εκτιμήθηκε πολλαπλασιάζοντας την ημερήσια τιμή κάτοψης του φυτού με την ημερήσια προσλαμβανόμενη ακτινοβολία (DLI) ανά μεταχείριση (7.2 mol m^{-2}·ημέρα^{-1}). Η συνολική ποσότητα προσλαμβανόμενων φωτονίων ανά κύκλο καλλιέργειας υπολογίστηκε ως το άθροισμα των ημερήσιων τιμών δέσμευσης φωτός και εκφράστηκε σε mol.

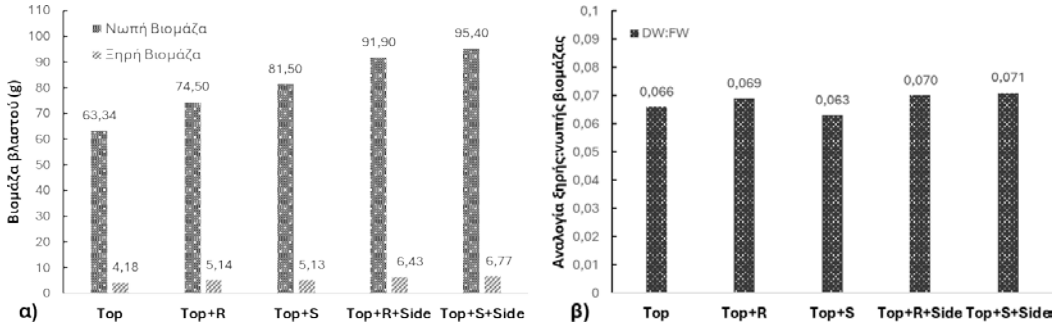
Για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας χρήσης ενέργειας, έγινε μέτρηση της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης ρεύματος ανά μέθοδο φωτισμού, για το διάστημα των 20 ημερών του πειράματος. Στην περίπτωση του κάθετου φωτισμού, η συνολική κατανάλωση ενέργειας ήταν 5.15 kWh, ενώ στην περίπτωση του συνδυασμένου κάθετου και πλευρικού φωτισμού ήταν 5.5 kWh. Η EUE υπολογίστηκε ως ο λόγος της νωπής βιομάζας των παραγόμενων βλαστών (g) προς τη συνολική καταναλωθείσα ηλεκτρική ενέργεια (kWh), για κάθε πειραματική μέθοδο. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε γραμμάρια νωπής βιομάζας ανά κιλοβατώρα (g FW kWh^{-1}).

2.5 Στατιστική Ανάλυση

Για τις μετρήσεις της χλωροφύλλης, πραγματοποιήθηκε μονοπαραγοντική ανάλυση διακύμανσης (one-way ANOVA). Οι στατιστικές διαφορές των τιμών της χλωροφύλλης μεταξύ των διαφορετικών μεταχειρίσεων φωτισμού, αξιολογήθηκαν μετά την ανάλυση διακύμανσης, με το Tukey's τεστ και την μέθοδο Honestly Significant Difference (HSD), με επίπεδο σημαντικότητας $p < 0.05$.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Παραγόμενη Βιομάζα



Γράφημα 1. α) Παραγόμενη νωπή και ξηρή βιομάζα ανά μέθοδο φωτισμού, β) αναλογία ξηρής προς νωπής βιομάζας ανά μέθοδο φωτισμού.

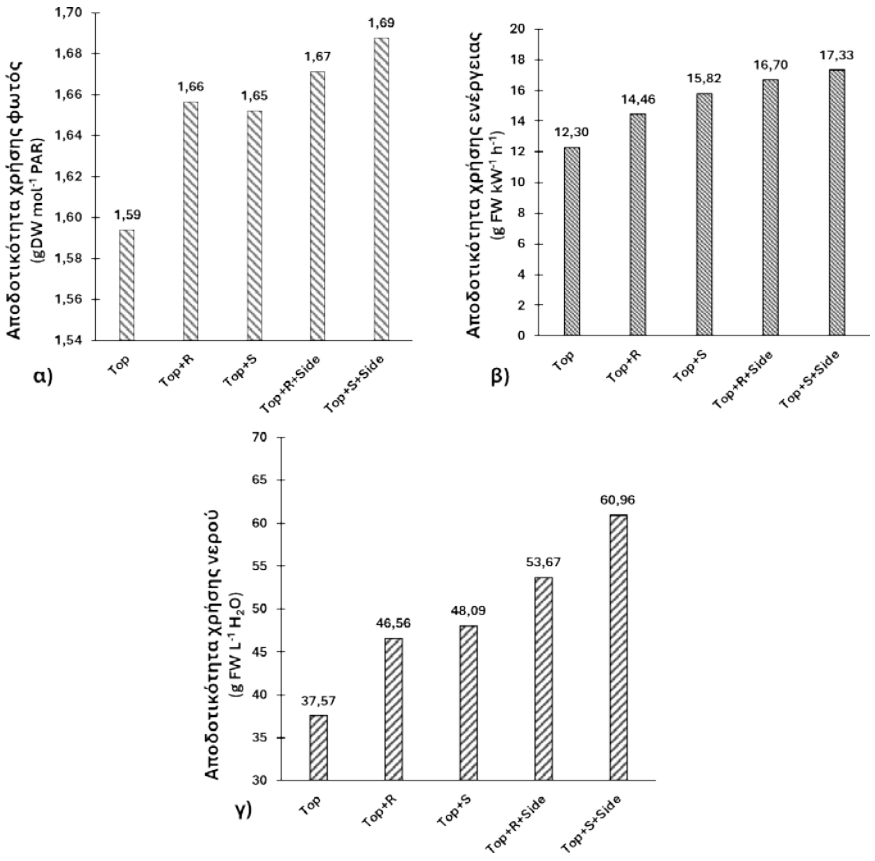
Στο Γράφημα 1 παρουσιάζονται οι τιμές της νωπής και ξηρής βιομάζας του υπέργειου τμήματος των φυτών για κάθε μέθοδο φωτισμού που εφαρμόστηκε. Αφορούν τη συνολική βιομάζα και των τεσσάρων φυτών που ήταν τοποθετημένα σε κάθε γλαστρίδιο. Ακόμη, παρουσιάζεται η αναλογία της ξηρής προς τη νωπή βιομάζα (DW:FW).Η χαμηλότερη τιμή νωπής βιομάζας καταγράφηκε στην πρώτη μέθοδο (Top), με 63.34 g, και αντίστοιχη ξηρή βιομάζα = 4.18 g. Οι μέθοδοι Top+R+Side και Top+S+Side έδωσαν τα υψηλότερα αποτελέσματα, με τιμές νωπής βιομάζας 91.9 g και 95.4 g αντίστοιχα, και τιμές ξηρής βιομάζας 6.43 g και 6.77 g, αντίστοιχα. Στις άλλες δύο μεθόδους χωρίς πλευρικό φωτισμό, οι παραγόμενες νωπές βιομάζες ήταν 74.5 g για τη μέθοδο Top+R και 81.5 g για τη μέθοδο Top+S. Οι αντίστοιχες τιμές ξηρού βάρους ήταν 5.14 g για τη μέθοδο Top+R και 5.13 g για τη μέθοδο Top+S. Ο υπολογισμός της αναλογίας ξηρής: νωπής βιομάζας (DW:FW) έδειξε ότι σε όλες τις

μεθόδους που μελετήθηκαν, η αναλογία παρέμεινε παρόμοια και κοντά στο 0,07, εκτός από την τρίτη μέθοδο (Top+S), που είχε τιμή 0,063. Η υψηλότερη αναλογία καταγράφηκε στην πέμπτη μέθοδο (Top+S+Side), με τιμή 0,071.

Οι διαφορές μεταξύ των τιμών της νωπής βιομάζας για κάθε μέθοδο φωτισμού, γίνονται εμφανής και μέσω της Εικόνας 1, όπου παρουσιάζεται η κάτοψη της κόμης των φυτών, την τελευταία μέρα του πειράματος.

Εικόνα 1. Κάτοψη κόμης φυτών για κάθε μέθοδο φωτισμού.

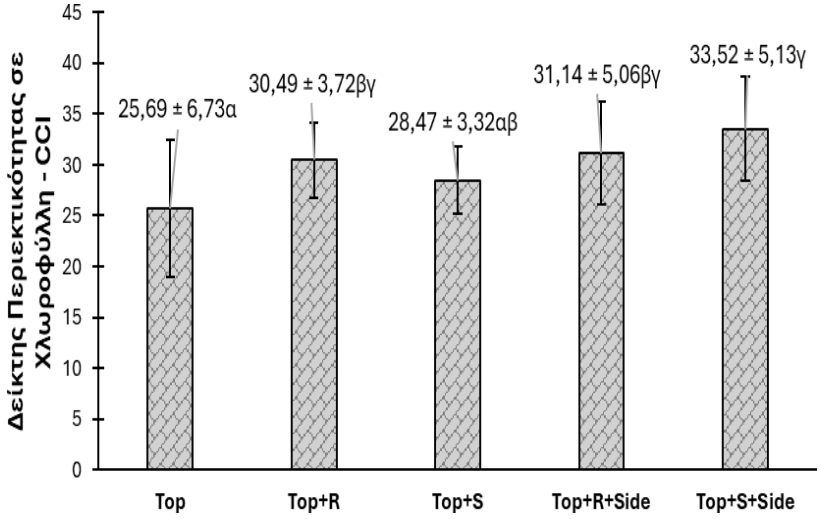
3.2 Αποδοτικότητα χρήσης πόρων



Γράφημα 2. Αποδοτικότητα χρήσης πόρων: α) φωτός, β) ενέργειας και γ) νερού.

Η μέθοδος Top+S+Side παρουσίασε καλύτερη αποδοτικότητα χρήσης πόρων από όλες τις άλλες μεθόδους, ενώ η μέθοδος Top είχε τις χαμηλότερες τιμές. Συγκεκριμένα, η αποδοτικότητα χρήσης φωτός για τη μέθοδο Top+S+Side ήταν ίση με 1.69 g DW mol^{-1} PAR, ενώ στη μέθοδο Top ήταν ίση με 1.59 g DW mol^{-1} PAR. Ομοίως, στην περίπτωση της αποδοτικότητας χρήσης ενέργειας, καλύτερη αξιοποίηση έγινε στη μέθοδο Top+S+Side, με τιμή 17.33 g FW kWh^{-1}, ενώ στη περίπτωση της μεθόδου Top, η τιμή ήταν ίση με 12.3 g FW kWh^{-1}. Ακόμη μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται στην αξιοποίηση χρήσης νερού, όπου για τη μέθοδο Top+S+Side, η τιμή της παραγόμενης νωπής βιομάζας προς τη συνολική ποσότητα νερού που χρησιμοποιήθηκε, ήταν ίση με 60.96 (g FW L^{-1} H_2O), ενώ στη μέθοδο Top ήταν μόλις 37.57 g FW L^{-1} H_2O.

3.3 Περιεκτικότητα χλωροφύλλης



Γράφημα 3. Δείκτες περιεκτικότητας χλωροφύλλης (Chlorophyll Content Index - CCI) των παραγόμενων φυτών για τις μεθόδους φωτισμού που μελετήθηκαν. Τα γράμματα α- γ παρουσιάζουν τις στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεθόδων φωτισμού, $p<0.05$.

Η υψηλότερη μέση τιμή CCI (33.52 ± 5.13) παρατηρήθηκε στη μέθοδο φωτισμού Top+S+Side, ενώ η χαμηλότερη στη μέθοδο Top (25.69 ± 6.73). Οι άλλες τρεις μέθοδοι παρουσίασαν παρόμοιες μέσες τιμές, ίσες με 30.49 (Top+R), 28.47 (Top+S) και 31.14 (Top+R+Side). Η δεύτερη (Top+R) και η τρίτη (Top+S) μέθοδος εμφάνισαν τις χαμηλότερες τυπικές αποκλίσεις στις μετρήσεις, με τιμές 3.72 και 3.32 αντίστοιχα, ενώ η πρώτη μέθοδος (Top) παρουσίασε τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση, ίση με 6.73. Η τέταρτη (Top+R+Side) και η πέμπτη (Top+S+Side) μέθοδος εμφάνισαν συγκρίσιμες τυπικές αποκλίσεις, με τιμές 5.06 και 5.13 αντίστοιχα.

4. ΣΥΖΥΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανάπτυξη των φυτών μπορεί να βελτιωθεί από 17.6% έως και 50.6% χωρίς αύξηση της έντασης του φωτός ή της διάρκειας της φωτοπεριόδου, απλά βελτιστοποιώντας την κατανομή του φωτός. Η χρήση ανακλαστικών επιφανειών που διαχέουν το φως σε πολλαπλές κατευθύνσεις επέφερε αποτελεσματική ανακατανομή των φωτονίων εντός της κόμης, μειώνοντας τις σκιασμένες περιοχές και υποστηρίζοντας ομοιόμορφη ανάπτυξη των φύλλων. Η προσθήκη πλευρικού φωτισμού χαμηλής έντασης ενίσχυσε

περαιτέρω την κατανομή του φωτός, προωθώντας την ανάπτυξη των φύλλων στο κατώτερο τμήμα της κόμης και διατηρώντας υψηλές τιμές νωπής βιομάζας. Επιπλέον, η αύξηση της βιομάζας που επιτεύχθηκε χωρίς αύξηση της έντασης φωτισμού, συνέβαλε σε σημαντική βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης πόρων σε σύγκριση με τον κλασικό φωτισμό μόνο από πάνω. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στην εύρεση της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ φωτισμού από την πάνω πλευρά της καλλιέργειας και πλευρικά αυτής. Η σωστή κατανομή του φωτός μπορεί να βελτιώσει τη βιωσιμότητα των συστημάτων ελεγχόμενου περιβάλλοντος γεωργίας, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και αυξάνοντας την τελική απόδοση βιομάζας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Arcel, M. M., Yousef, A. F., Shen, Z. H., Nyimbo, W. J., and Zheng, S. H., 2023. *Optimizing lettuce yields and quality by incorporating movable downward lighting with a supplemental adjustable sideward lighting system in a plant factory*. PeerJ, 11, e15401.

Chen, R., Wang, Z., Liu, W., Ding, Y., Zhang, Q., and Wang, S., 2023. *Side Lighting of Red, Blue and Green Spectral Combinations Altered the Growth, Yield and Quality of Lettuce (Lactuca sativa L. cv."Yidali") in Plant Factory*. Plants, 12(24), 4147.

Choubchilangroudi, A., and Zarei, A., 2022. *Investigation the effectiveness of light reflectors in transmitting sunlight into the vertical farm depth to reduce electricity consumption*. Cleaner Engineering and Technology, 7, 100421.

Ibaraki, Y., and Shigemoto, C., 2013. *Estimation of supplemental lighting efficiency based on PPFD distribution on the canopy surface.* Journal of Agricultural Meteorology, 69(2), 47-54.

Jin, W., Formiga Lopez, D., Heuvelink, E., and Marcelis, L. F., 2023. *Light use efficiency of lettuce cultivation in vertical farms compared with greenhouse and field*. Food and Energy Security, 12(1), e391.

Joshi, J., Zhang, G., Shen, S., Supaibulwatana, K., Watanabe, C. K., and Yamori, W., 2017. *A combination of downward lighting and supplemental upward lighting improves plant growth in a closed plant factory with artificial lighting*. HortScience, 52(6), 831- 835.

Kozai, T., 2013. *Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory*. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 89(10), 447-461.

Marzec, M., and Hensel, G., 2020. *Prime editing: game changer for modifying plant genomes*. Trends in Plant Science, 25(8), 722-724.

Ouzounis, T., Rosenqvist, E., and Ottosen, C. O., 2015. *Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: A review*. HortScience, 50(8), 1128- 1135.

Yang, J., Song, J., and Jeong, B. R., 2022. *Lighting from top and side enhances photosynthesis and plant performance by improving light usage efficiency*. International Journal of Molecular Sciences, 23(5), 2448.

Zhang, X., He, D., Niu, G., Yan, Z., and Song, J., 2018. *Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory*. International Journal of Agricultural and Biological

24. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΑΝΕΛ ΟΡΟΦΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΓΓΟΥΡΙΟΥ

I. Ναουνούλης, Χ. Παπαϊωάννου, Σ. Φαλιάγκα, Ε. Σκαντζού, Μ. Ασλανίδου, Α. Σαπουνάς, Δ. Φείδαρος, Α. Μπαξεβάνου, Ν. Κατσούλας

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, 38446 Βόλος Μαγνησίας, Ελλάδα, nkatsoul@uth.gr

Περίληψη

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) σε θερμοκήπια αποτελούν μια καινοτόμο λύση συνδυασμένης παραγωγής τροφίμων και ηλεκτρικής ενέργειας. Η αρνητική επίδραση της σκίασης που προκαλούν δύναται να μετριαστεί με εμπλουτισμό του αέρα με διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), προάγοντας τη φωτοσύνθεση. Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε η επίδραση σκίασης από Φ/Β συστήματος solar tracking και της εφαρμογής CO_2 σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού. Δοκιμάστηκαν τέσσερις μεταχειρίσεις: (α) μάρτυρας (T_0), (β) μόνο CO_2, (T_{CO2}), (γ) μόνο Φ/Β, ($T_{Φ/Β}$), και (δ) συνδυασμός Φ/Β και CO_2, ($T_{Φ/Β\ \&\ CO2}$). Ο συνδυασμός Φ/Β και CO_2 βελτίωσε την ανάπτυξη και αύξησε την παραγωγικότητα κατά 9,8% σε σχέση με τον μάρτυρα, ενώ μόνο του το CO_2 είχε περιορισμένα οφέλη. Συνεπώς, η συνέργεια των δύο τεχνολογιών μπορεί να ενισχύσει την αποδοτικότητα θερμοκηπίων ακόμη και σε συνθήκες μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας.

Λέξεις-κλειδιά: φωτοβολταϊκά πάνελ, διπλή χρήση γης, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

IMPACT OF SHADING FROM ROOF PHOTOVOLTAIC PANELS ON THE GROWTH AND PRODUCTIVITY OF A HYDROPONIC CUCUMBER CROP

I. Naounoulis, C. Papaioannou, S. Faliagka, E. Skantzou, M. Aslanidou, A. Sapounas, D. Feidaros, A. Baxevanou, N. Katsoulas*

Lab. of Agricultural Constructions and Environmental Control, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446,

*Volos, Magnesia, Greece, *nkatsoul@uth.gr*

Abstract

Photovoltaic (PV) systems in greenhouses are an innovative solution for the combined production of food and electricity. The negative effect of shading can be mitigated through CO_2 enrichment, which enhances photosynthesis. In this study, the impact of shading from a solar-tracking PV system and CO_2 enrichment was investigated in a hydroponic cucumber crop. Four treatments were tested: (a) control (T_0), (b) CO_2 only (T_{CO2}), (c) PV only (T_{PV}), and (d) combined PV & CO_2 ($T_{PV\&CO2}$). The combination of PV and CO_2 improved crop growth and increased yield by 9.8% compared to the control, whereas CO_2 alone showed limited benefits. Therefore, the synergy of these two technologies can enhance greenhouse efficiency even under conditions of reduced solar radiation.

Keywords: photovoltaic panels, dual land use, renewable energy sources

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πάνελ σε θερμοκήπια αποσκοπεί στην αξιοποίηση του ίδιου εδαφικού χώρου για ταυτόχρονη συμπαραγωγή τροφίμων και ενέργειας (Dupraz et al., 2011; Weselek et al., 2019). Ωστόσο, μια από τις βασικότερες προκλήσεις αυτής της διπλής χρήσης γης είναι η μερική σκίαση που προκαλούν τα Φ/Β πάνελ, γεγονός που μειώνει σημαντικά τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ειδικότερα, τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (Photosyntheticaly Active Radiation- PAR), επηρεάζοντας άμεσα την ανάπτυξη και την απόδοση των καλλιεργειών (Elamri et al., 2018).

Η PAR αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη φωτοσύνθεση και την παραγωγή βιομάζας από τα φυτά και κάθε μείωση λόγω σκίασης μπορεί να περιορίσει την ανάπτυξη και τις τελικές αποδόσεις (Ravishankar et al., 2022). Ο βαθμός της επίδρασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της καλλιέργειας, τη διαμόρφωση των πάνελ (αδιαφανή, ημιδιαφανή κ.α.), καθώς και από τις κλιματικές συνθήκες και ιδιαίτερα τα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας (Marrou et al., 2013).

Σε περιοχές με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, μια μέτρια σκίαση (20–40%) μπορεί να βελτιώσει τη ανάπτυξη των φυτών, μειώνοντας τη θερμοκρασία των φύλλων, βελτιώνοντας το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών και αυξάνοντας τη διάχυση του φωτός εντός του θερμοκηπίου (Elamri et al., 2018). Η βελτίωση του μικροκλίματος εντός του θερμοκηπίου μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη αποδοτικότητα χρήσης νερού και σε ορισμένες περιπτώσεις, σε διατήρηση ή και αύξηση της απόδοσης, κυρίως σε θερμά κλίματα όπου η υπερβολική ακτινοβολία και η θερμική καταπόνηση θα περιόριζαν την παραγωγικότητα (Allali et al., 2025).

Αντιθέτως, η καλλιέργεια υπό Φ/Β πάνελ είναι πιο απαιτητική κατά την περίοδο χαμηλής ακτινοβολίας (π.χ. χειμερινή περίοδος). Σύμφωνα με τους Kitta et al. (2012), η απόδοση αγγουριών κατά τους χειμερινούς μήνες μπορεί να μειωθεί έως και 25% σε συνθήκες έντονης σκίασης, κυρίως λόγω ανεπαρκούς φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας κατά τα κρίσιμα στάδια ανάπτυξης των φυτών. Μελέτη των Ravishankar et al. (2022), έδειξε ότι πάνελ με διαπερατότητα 30–40% μπορούν να διασφαλίσουν επαρκή φωτισμό για την ανάπτυξη φυτών, ιδίως όταν συνδυάζονται με κατάλληλη απόσταση γραμμών φύτευσης και δυναμικά συστήματα ελέγχου της κλίσης τους. Σε αυτό το πλαίσιο, τα ημιδιαφανή ή διπλής όψης Φ/Β πάνελ αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογική λύση, επιτρέποντας την μερική μετάδοση της PAR, ενώ συνεχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Συνολικά, η επίδραση της σκίασης από Φ/Β πάνελ στην απόδοση της καλλιέργειας εξαρτάται τόσο από τη διαθεσιμότητα φωτός όσο και από την φυσιολογική ανταπόκριση στο φωτισμό της εκάστοτε καλλιέργειας. Η σκίαση είναι πιο επιβαρυντική κατά τη χειμερινή περίοδο ή σε περιοχές με περιορισμένη ηλιοφάνεια, ενώ σε ηλιόλουστα περιβάλλοντα μπορεί να λειτουργήσει ως προστατευτικός παράγοντας, ειδικά όταν υιοθετούνται στρατηγικές κλιματικού ελέγχου (Kujawa et al., 2025).

Τα αγροβολταϊκά συστήματα συγκεντρώνουν ολοένα και μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, λόγω της δυνατότητάς τους να συνδυάζουν την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας με τη καλλιέργεια φυτών. Η μελέτη τους είναι σύνθετη, καθώς οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας, εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας με CO_2 και φυσιολογικών αποκρίσεων των φυτών παρουσιάζουν έναν πολυπαραγοντικό χαρακτήρα. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα έρευνα εστιάζει στη διερεύνηση των επιδράσεων ενός καινοτόμου θερμοκηπιακού συστήματος, το οποίο συνδυάζει φωτοβολταϊκό σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς (solar tracking) με τεχνολογία εμπλουτισμού διοξειδίου του άνθρακα. Αντικείμενο της μελέτης αποτελεί η αξιολόγηση τόσο των μεμονωμένων όσο και των

συνδυασμένων επιδράσεων των δύο αυτών τεχνολογιών στην ανάπτυξη και την παραγωγικότητα μιας υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού. Η έρευνα πραγματοποιείται υπό φθινοπωρινές και χειμερινές συνθήκες φωτισμού, χαρακτηριστικές του μεσογειακού κλίματος.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Πειραματικός σχεδιασμός

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο θερμοκηπιακό πάρκο του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βελεστίνο, Ελλάδα (39° 22', 22° 44', 85 m υψόμετρο). Η συνολική επιφάνεια του θερμοκηπίου ανερχόταν σε 1500 m^2 και ήταν διαιρεμένο σε έξι θαλάμους (240 m^2 ο κάθε ένας). Η καλλιεργούμενη έκταση ωστόσο ήταν 190 m^2. Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις από τους έξι θαλάμους. Ο κάθε ένας από αυτούς διέθετε έξι υδροπονικά κανάλια πάνω στα οποία ήταν τοποθετημένοι σάκοι πετροβάμβακα (Grodan International, Roermond, Ολλανδία).

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετήθηκαν πάνω από το ύψος της υδρορροής σε δύο από τους τέσσερις θαλάμους καλλιέργειας. Ο εμπλουτισμός με CO_2 εφαρμόστηκε επίσης σε δύο θαλάμους, έναν με Φ/Β πάνελ και έναν χωρίς, με σκοπό την αξιολόγηση τόσο των μεμονωμένων όσο και των συνδυαστικών επιδράσεων της σκίασης από Φ/Β πάνελ αλλά και του εμπλουτισμού με CO_2 στην απόδοση της καλλιέργειας. Οι θάλαμοι με Φ/Β πάνελ εξοπλίστηκαν με πάνελ διπλής όψης, επενδυμένα με πλεξιγκλάς (Trisolar, Murcia, Ισπανία), επιφάνειας 60 m^2 ανά θάλαμο. Τα πάνελ ήταν τοποθετημένα σε σύστημα παρακολούθησης της κατεύθυνσης του ήλιου και παρείχαν σκίαση σε ποσοστό περίπου 30%. Στους θαλάμους με εμπλουτισμό CO_2, το διοξείδιο του άνθρακα παρεχόταν μέσω διάτρητων σωλήνων τοποθετημένων κάτω από κάθε υδροπονικό κανάλι.

Τα φυτά αγγουριού (*Cucumis sativus* cv. Columbia) μεταφυτεύτηκαν στις 12 Σεπτεμβρίου 2024 σε κύβους πετροβάμβακα (7,5 × 7,5 cm), με πυκνότητα φύτευσης 1,8 φυτά m^{-2}. Η καλλιέργεια πραγματοποιήθηκε σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα, με συνολική διάρκεια 91 ημερών.

Ο πειραματικός σχεδιασμός περιλάμβανε τέσσερις μεταχειρίσεις, η καθεμία εφαρμοσμένη σε ξεχωριστό θάλαμο:

(α) Μάρτυρας, χωρίς φωτοβολταϊκά και χωρίς εμπλουτισμό CO_2, (T_0)
(β) Μόνο εμπλουτισμός με CO_2, (T_{CO2})
(γ) Μόνο φωτοβολταϊκά πάνελ, ($T_{Φ/B}$)
(δ) Συνδυασμός με φωτοβολταϊκά πάνελ και εμπλουτισμός με CO_2, ($T_{Φ/B\ \&\ CO2}$)

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες εντός του θερμοκηπίου ρυθμίζονταν αυτόματα και καταγράφονταν συνεχώς μέσω ενός ολοκληρωμένου υπολογιστικού συστήματος κλιματικού ελέγχου (SERCOM, Automation SL, Lisse, Ολλανδία).

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά (ύψος φυτών, αριθμός φύλλων), καθώς και η απόδοση της καλλιέργειας (αριθμός και βάρος καρπών), παρακολουθούνταν σε εβδομαδιαία βάση. Μηνιαίως πραγματοποιούνταν καταστροφικές μετρήσεις για την εκτίμηση της παραγωγής βιομάζας. Η αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού (Water Use Efficiency, WUE, kg m^{-3}) υπολογίστηκε ως ο λόγος της συνολικής παραγωγής (kg) ανά m^2 καλλιέργειας προς το συνολικό όγκο νερού (m^3) που εφαρμόστηκε ανά m^2 καλλιέργειας.

2.2 Στατιστική Ανάλυση

Η σύγκριση των μέσων όρων πραγματοποιήθηκε με ανάλυση One Way ANOVA σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($p \leq 0,05$), με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS (Statistical Package for Social Sciences, IBM, Armonk, NY, ΗΠΑ). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος LSD (Least Significant Difference) στο επίπεδο σημαντικότητας 5%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1, τα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από τα φωτοβολταϊκά πάνελ εμφάνισαν σημαντικά μεγαλύτερο συνολικό ύψος σε σύγκριση με εκείνα του μάρτυρα και της μεταχείρισης T_{CO2}. Πιο συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ύψος καταγράφηκε στη μεταχείριση $T_{Φ/B\ \&\ CO2}$ (523 cm), ακολουθούμενο από τη μεταχείριση $T_{Φ/B}$ (513 cm). Αντίθετα, η μεταχείριση του μάρτυρα (T_0) και η T_{CO2} κατέγραψαν χαμηλότερες τιμές ύψους 476 cm και 481 cm, αντίστοιχα.

Η επιμήκυνση του βλαστού υπό συνθήκες σκίασης αποτελεί συνήθη προσαρμοστική στρατηγική των φυτών με στόχο τη βελτίωση της πρόσληψης φωτός (Weselek et al., 2019). Ωστόσο, σύμφωνα με τους Cockshull et al. (1992), σε περιβάλλοντα με ήπια σκίαση (<24%) δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές ως προς την επιμήκυνση.

Παρόμοιο πρότυπο καταγράφηκε και στον αριθμό φύλλων ανά φυτό. Οι μεταχειρίσεις $T_{Φ/B}$ και $T_{Φ/B\&CO2}$ οδήγησαν σε σημαντικά υψηλότερες τιμές (46,8 και 48,6 φύλλα ανά φυτό, αντίστοιχα), σε σύγκριση με τον μάρτυρα και τη μεταχείριση T_{CO_2}, οι οποίες κατέγραψαν 45,6 φύλλα/φυτό. Οι διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων κρίθηκαν στατιστικά σημαντικές, με τη μεταχείριση $T_{Φ/B\&CO_2}$ να παρουσιάζει την μεγαλύτερη ανάπτυξη.

Πίνακας 1. Μέσο συνολικό ύψος φυτών (cm) και μέσος αριθμός φύλλων υπό διαφορετικές πειραματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

	T_0	T_{CO2}	$T_{Φ/B}$	$T_{Φ/B\ \&\ CO2}$
Ύψος φυτών (cm)	$476,0\pm21,3^{\beta}$	$481,0\pm28,2^{\beta}$	$513,8\pm20,1^{\alpha}$	$522,8\pm25,12^{\alpha}$
Αριθμός φύλλων	$45,6\pm1,14^{\beta}$	$45,6\pm1,67^{\beta}$	$46,8\pm2,05^{\alpha\beta}$	$48,6\pm1,52^{\alpha}$

Διαφορετικά γράμματα (α, β) στην ίδια γραμμή υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$).

Η σκίαση που προκλήθηκε από τα φωτοβολταϊκά πάνελ φαίνεται ότι λειτούργησε ως ερέθισμα για τον σχηματισμό νέων φύλλων, πιθανότατα ως αντισταθμιστικός μηχανισμός στην περιορισμένη διαθεσιμότητα φωτός. Με τον τρόπο αυτό τα φυτά ενίσχυσαν τη φυλλική τους επιφάνεια, βελτιστοποιώντας την αξιοποίηση της διαθέσιμης ακτινοβολίας (Marrou et al., 2013; Elamri et al., 2018). Παράλληλα, ο εμπλουτισμός με CO_2 συνέβαλε στην αύξηση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας και της αφομοίωσης άνθρακα, γεγονός που υποστηρίζει τόσο την έκπτυξη όσο και την επιμήκυνση των φύλλων (Ainsworth & Rogers, 2007). Στην παρούσα μελέτη, ο συνδυασμός σκίασης και εμπλουτισμού CO_2 παρουσίασε συνεργιστικό αποτέλεσμα, το οποίο εκφράστηκε με αυξημένη φυλλική ανάπτυξη.

3.2 Απόδοση καλλιέργειας

Η συνολική απόδοση, ο αριθμός καρπών και η παραγόμενη βιομάζας δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων (Πίνακας 2), αν και παρατηρήθηκαν μικρές αποκλίσεις. Παρά το γεγονός ότι η μεταχείριση $T_{Φ/B}$ παρουσίασε τη χαμηλότερη παραγωγή (8,4 kg m^{-2}), ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών πάνελ και ο

εμπλουτισμός με CO_2 φάνηκε να μετριάζει αυτήν τη μείωση, οδηγώντας στις υψηλότερες τιμές απόδοσης. Συγκεκριμένα, μόνο οι μεταχειρίσεις $T_{Φ/B\ \&\ CO2}$ και T_{CO2} παρουσίασαν παρόμοιες αποδόσεις (περίπου 9,0 kg m^{-2}) υπερβαίνοντας τόσο τη μεταχείριση $T_{Φ/B}$ όσο και του μάρτυρα (T_0).

Πίνακας 2. Συνολική απόδοση (kg m^{-2}), αριθμός καρπών (m^{-2}) και νωπή βιομάζα (g m^{-2}) υπό διαφορετικές πειραματικές συνθήκες.

	T_0	T_{CO2}	$T_{Φ/B}$	$T_{Φ/B\ \&\ CO2}$
Απόδοση (kg m^{-2})	8,72±0,30^{α}	9,02±0,42^{α}	8,39±0,19^{α}	9,00±0,68^{α}
Αριθμός καρπών (m^{-2})	27,45±0,77^{α}	28,01±1,42^{α}	27,48±0,47^{α}	28,57±1,87^{α}
Νωπή βιομάζα (g m^{-2})	1778,40±35,74^{α}	1965,60±35,74^{α}	1815,60±26,23^{α}	1850,40±49,62^{α}

Διαφορετικά γράμματα (α, β) στην ίδια γραμμή υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$).

Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι ο εμπλουτισμός με CO_2 μπορεί να αντισταθμίσει τις επιπτώσεις της μειωμένης εισερχόμενης ακτινοβολίας, ενισχύοντας τη φωτοσυνθετική απόδοση και την παραγωγή καρπών (Marcelis et al., 1998). Στην παρούσα μελέτη, αν και η παρουσία φωτοβολταϊκών πάνελ συσχετίστηκε με ελαφρώς μειωμένη απόδοση σε σύγκριση με τον μάρτυρα, η συνολική παραγόμενη βιομάζα παρέμεινε αμετάβλητη μεταξύ των μεταχειρίσεων, υποδεικνύοντας ότι πιθανόν μεταβλήθηκε η κατανομή της βιομάζας στα διάφορα φυτικά όργανα, χωρίς ωστόσο να επηρεαστεί η συνολική ανάπτυξη.

Παρόμοια τάση παρατηρήθηκε και στον συνολικό αριθμό καρπών. Ο εμπλουτισμός με CO_2 φαίνεται να έχει πολυδιάστατο ρόλο στη φυσιολογία των φυτών, επηρεάζοντας βασικές διεργασίες όπως η φωτοσύνθεση, η ανάπτυξη οργάνων και η ανθεκτικότητα σε βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες (Zhang et al., 2014; Ahammed & Li, 2022). Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες, ο εμπλουτισμός με CO_2 αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική για τη διατήρηση της παραγωγικότητας υπό συνθήκες σκίασης από φωτοβολταϊκά πάνελ, υπογραμμίζοντας τη δυναμική των αγροβολταϊκών συστημάτων να επιτυγχάνουν ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και γεωργικής παραγωγής.

3.3 Διαπνοή της καλλιέργειας

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 3, τόσο η σκίαση από τα Φ/Β πάνελ όσο και ο εμπλουτισμός με CO_2 επηρέασαν σημαντικά τον ρυθμό διαπνοής μεταξύ των μεταχειρίσεων. Η μεταχείριση T_{CO2} παρουσίασε τη μεγαλύτερη απορρόφηση νερού (94,9 L m^{-2}), ακολουθούμενη από τον μάρτυρα (88,8 L m^{-2}), ενώ οι μεταχειρίσεις $T_{Φ/B}$ και $T_{Φ/B\&CO2}$ παρουσίασαν παρόμοιες αλλά σημαντικά χαμηλότερες τιμές από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις (82,6 και 83,1 L m^{-2}, αντίστοιχα).

Η αύξηση της διαπνοής που παρατηρήθηκε στη μεταχείριση T_{CO2} μπορεί να αποδοθεί σε μέτρια αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας λόγω του εμπλουτισμού με CO_2, όπως έχει αναφερθεί σε σχετικές έρευνες (Porras et al., 2017; Villagran et al., 2025). Ωστόσο, η μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία στους θαλάμους με τα φωτοβολταϊκά πάνελ οδήγησε σε σημαντική μείωση της συνολικής διαπνοής, σε σύγκριση με τις μη σκιασμένες μεταχειρίσεις. Η μείωση αυτή μπορεί να οφείλεται στη χαμηλότερη προσπίπτουσα PAR, η οποία μειώνει τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και, συνακόλουθα τον ρυθμό διαπνοής.

Ο εμπλουτισμός με CO_2 δεν οδήγησε σε περεταίρω αύξηση της διαπνοής της μεταχείρισης $T_{Φ/B\&CO2}$, γεγονός που υπογραμμίζει τον καθοριστικό ρόλο της διαθεσιμότητας φωτός έναντι της συγκέντρωσης CO_2 όσον αφορά τον έλεγχο της διαπνοής. Σχετικές έρευνες υποστηρίζουν ότι η επίδραση του αυξημένου CO_2 στη διαπνοή είναι συχνά δευτερεύουσας σημασίας σε σχέση με τις στοματικές λειτουργίες που επηρεάζονται από τη

διαθεσιμότητα του φωτός, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα περιορισμένες συνθήκες ακτινοβολίας (Tremblay & Gosselin, 1998; Hemming et al., 2007). Συνεπώς, η απόκριση των φυτών είναι κυρίως εξαρτώμενη από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, με την μειωμένη PAR να περιορίζει τον ρυθμό διαπνοής ακόμη και σε συνθήκες αυξημένης συγκέντρωσης CO_2.

Πίνακας 3. Συνολική διαπνοή (L m^{-2}) κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου υπό διαφορετικές πειραματικές συνθήκες.

	T_0	**T_{CO2}**	**$T_{Φ/B}$**	**$T_{Φ/B\ \&\ CO2}$**
Διαπνοή (L m^{-2})	88,8±1,9 ^{β}	94,9±0,2 ^{α}	82,6±1,15 ^{γ}	83,1±4,1 ^{γ}

Διαφορετικά γράμματα (α, β) στην ίδια γραμμή υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (p < 0,05).

3.4 Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τις τιμές της αποτελεσματικότητας χρήσης του νερού (WUE) μεταξύ των τεσσάρων μεταχειρίσεων. Οι τιμές κυμάνθηκαν μεταξύ 50,4 και 52,0 kg m^{-3}, χωρίς να προκύπτουν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Η υψηλότερη μέση τιμή καταγράφηκε για τη μεταχείριση $T_{Φ/B\&CO_2}$, γεγονός που αποδίδεται στην υψηλή παραγωγικότητα και στη μειωμένη διαπνοή των φυτών.

Η μεταχείριση $T_{Φ/B}$, παρότι σημείωσε τη χαμηλότερη μέση τιμή WUE (50,0 kg m^{-3}), δεν ήταν σημαντικά μειωμένη έναντι των υπολοίπων μεταχειρίσεων. Το αποτέλεσμα αυτό συνδέεται με τη μείωση της διαπνοής λόγω περιορισμένης ακτινοβολίας και, κατ' επέκταση, με χαμηλότερες απώλειες νερού μέσω των στομάτων (Elamri et al., 2018; Weselek et al., 2019).

Σύμφωνα με τους Marrou et al. (2013), σε συνθήκες μέτριας σκίασης η μείωση της διαπνοής, σε συνδυασμό με σταθερή ή ελαφρώς μειωμένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού, ιδιαίτερα σε θερμές και ξηρές περιοχές. Αντίστοιχα, οι Ravishankar et al. (2022) αναφέρουν ότι σε αγροβολταϊκά συστήματα, η βελτίωση του μικροκλίματος μέσω σκίασης (χαμηλότερες θερμοκρασίες και VPD) μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποδοτική χρήση του διαθέσιμου νερού από τα φυτά. Τέλος, ο εμπλουτισμός με CO_2 φαίνεται να ενίσχυσε περαιτέρω την παραγωγή, επηρεάζοντας θετικά την WUE στις δύο μεταχειρίσεις όπου εφαρμόστηκε.

Πίνακας 4.. Αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού (WUE, kg m^{-3}) υπό διαφορετικές πειραματικές συνθήκες.

	T_0	**T_{CO2}**	**$T_{Φ/B}$**	**$T_{Φ/B\ \&\ CO2}$**
WUE (kg m^{-3})	51,21±1,75^{α}	51,42±2,49^{α}	50,39±1,10^{α}	52,02±4,33^{α}

Διαφορετικά γράμματα (α, β) στην ίδια γραμμή υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές (p < 0,05).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρά τη μείωση της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας λόγω της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών πάνελ, δεν παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στην απόδοση της καλλιέργειας καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Ο αριθμός των φύλλων αυξήθηκε σημαντικά στη μεταχείριση $T_{Φ/B\&CO2}$, ενώ το συνολικό ύψος των φυτών δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντική αύξηση. Η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων με παρακολούθηση της ηλιακής τροχιάς αποδείχθηκε ως μια πολλά υποσχόμενη αγροβολταϊκή στρατηγική, διατηρώντας σταθερή παραγωγικότητα ακόμα και σε περιόδους μειωμένης ακτινοβολίας, όπως ο χειμώνας. Αυτό υποδηλώνει το δυναμικό τους για

βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης γης χωρίς να μειώνεται η απόδοση της καλλιέργειας.

Ο εμπλουτισμός με CO_2 υπό συνθήκες σκίασης από Φ/Β πάνελ συνέβαλε στην εξομάλυνση της διαφοράς στην παραγωγικότητα μεταξύ σκιασμένων και μη σκιασμένων μεταχειρίσεων. Παράλληλα, η αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την παρουσία των Φ/Β πάνελ ή τον εμπλουτισμό με CO_2, επιβεβαιώνοντας την υδατική αποδοτικότητα του συστήματος. Συνολικά, τα αποτελέσματα αυτά υποστηρίζουν την δυνατότητα της ενσωμάτωσης συστημάτων φωτοβολταϊκών με ηλιακή παρακολούθηση σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες, προάγοντας την πιο αποδοτική χρήση της γης και τη βιωσιμότητα των θερμοκηπιακών καλλιεργειών.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο αυτό αποτελεί μέρος του έργου REGACE, το οποίο έχει λάβει χρηματοδότηση από το Πρόγραμμα Έρευνας και Καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο της Συμφωνίας Επιχορήγησης αριθ. 101096056.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahammed, G. J., Li, X., 2022. *Elevated carbon dioxide-induced regulation of ethylene in plants.* Environ. Exp. Bot. 202, 105025.

Ainsworth, E. A., & Rogers, A., 2007. *The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO2]: mechanisms and environmental interactions.* Plant, cell & environment, 30(3), 258-270.

Allali, F. E., Fatnassi, H., Demrati, H., Errais, R., Wifaya, A., Aharoune, A., 2025. *Greenhouse Cooling Systems: A Systematic Review of Research Trends, Challenges, and Recommendations for Improving Sustainability.* Cleaner Engineering and Technology, 100973.

Amaducci, S., Yin, X., Colauzzi, M., 2018. *Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production.* Applied energy, 220, 545-561.

Cockshull, K. E., Graves, C. J., Cave, C. R., 1992. *The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes*. Journal of Horticultural Science, 67(1), 11-24.

Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J. M., Dejean, C., Belaud, G., 2018. *Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces.* Agricultural water management, 208, 440-453.

Hemming, S., Dueck, T., Janse, J., van Noort, F.,2007. *The effect of diffuse light on crops.* In International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007 801 (pp. 1293-1300).

Kitta, E., Katsoulas, N., Savvas, D., 2012. *Shading effects on greenhouse microclimate and crop transpiration in a cucumber crop grown under Mediterranean conditions.* Applied Engineering in Agriculture, 28(1), 129-140.

Kittas, C., Rigakis, N., Katsoulas, N., Bartzanas, T., 2008. *Influence of shading screens on microclimate, growth and productivity of tomato.* In International Symposium on Strategies Towards Sustainability of Protected Cultivation in Mild Winter Climate 807 (pp. 97-102).

Kujawa. A., Kornas. J., Hanrieder. N., González Rodríguez. S., Hristov. L., Fernández Solas, Á., Wilbert, S., Blanco, MJ., Berzosa Álvarez, L., Martínez Gallardo, A., et al., 2025. *Tomato Yield Under Different Shading Levels in an Agrivoltaic Greenhouse in Southern Spain.* AgriEngineering; 7(6):178.

Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E., Goudriaan, J., 1998. *Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review.* Scientia Horticulturae, 74(1-2), 83-111.

Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., Wery, J., 2013. *Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?* Agricultural and Forest Meteorology, 177, 117-132.

Porras, M. E., Lorenzo, P., Medrano, E., Sánchez-González, M. J., Otálora-Alcón, G., Piñero, M. C., ... & Sánchez-Guerrero, M. C., 2017. *Photosynthetic acclimation to elevated CO2 concentration in a sweet pepper (Capsicum annuum) crop under Mediterranean greenhouse conditions: influence of the nitrogen source and salinity.* Functional Plant Biology, 44(6), 573-586.

Ravishankar, E., Booth, R. E., Hollingsworth, J. A., Ade, H., Sederoff, H., DeCarolis, J. F., O'Connor, B. T.,2022. *Organic solar-powered greenhouse performance optimization and global economic opportunity.* Energy & Environmental Science, 15(4), 1659-1671.

Tremblay, N., Gosselin, A., 1998. *Effect of carbon dioxide enrichment and light.* HortTechnology, 8(4), 524-528.

Villagran, E., Espitia, J. J., Amado, G., Rodriguez, J., Gomez, L., Velasquez, J. F., ... & Arias, L.A., 2025. *CO_2 Enrichment in Protected Agriculture: A Systematic Review of Greenhouses, Controlled Environment Systems, and Vertical Farms—Part 2.* Sustainability, 17(7), 2809.

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P., 2019. *Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review.* Agronomy for sustainable development, 39, 1-20.

Zhang, Z., Liu, L., Zhang, M., Zhang, Y., Wang, Q., 2014. *Effect of carbon dioxide enrichment on health-promoting compounds and organoleptic properties of tomato fruits grown in greenhouse.* Food Chem. 153, 157–163.

25. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΒ ΕΝΤΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Δημήτριος Φείδαρος[1] , Αικατερίνη Μπαξεβάνου[2] , Χρυσούλα Παπαιωάννου[2] & Νικόλαος Κατσούλας[1]

[1] Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, e-mail: nkatsoul@uth.gr
[2] Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας - Αγροτεχνολογίας, Γαιόπολις, 41500 Λάρισα, e-mail: chpapa@uth.gr

Περίληψη

Η χρήση αγροβολταϊκών επιτρέπει παραγωγή ενέργειας χωρίς κατάληψη παραγωγικής γης. Η εγκατάσταση ΦΒ μέσα σε θερμοκήπια μειώνει το κόστος εγκατάστασης εφόσον αυτά τοποθετούνται σε υπάρχουσα υποδομή. Ωστόσο το βασικό ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί σε μια τέτοια εγκατάσταση είναι η επίδραση της ύπαρξης των ΦΒ στη διαθέσιμη PAR ακτινοβολία στο επίπεδο των φυτών στη διάρκεια της παραγωγής. Μια λύση μπορεί να είναι η χρήση μηχανισμού μεταβολής της κλίσης των ΦΒ. Στην παρούσα εργασία το ζήτημα αυτό εξετάζεται με προσομοίωση της διάδοσης της ακτινοβολίας μέσα σε πολλαπλό θερμοκήπιο, του οποίου 2 εσωτερικοί θάλαμοι είναι εξοπλισμένοι με ΦΒ με τη χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Κατά τους θερινούς μήνες, παρά τη σκίαση, η διαθέσιμη PAR ακτινοβολία στο επίπεδο των φυτών είναι επαρκής είτε τα ΦΒ είναι οριζόντια είτε είναι κεκλιμένα. Ωστόσο κατά τους χειμερινούς μήνες ο αλγόριθμος μεταβολής της κλίσης είναι κρίσιμης σημασίας για τη διατήρηση ικανοποιητικής ακτινοβολίας στο επίπεδο των φυτών.

Λέξεις κλειδιά: Αγροβολταικά, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Θερμοκήπια, Ακτινοβολία

IMPACT OF PV INSIDE A GREENHOUSE ON AVAILABLE RADIATION AT THE CROP LEVEL

Dimitrios Fidaros[1], Catherine Baxevanou[2], Chryssoula Papaioannou[2], Nikolaos Katsoulas[1]

[1]Dept. of Agric. Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446 Volos, Greece, e-mail: nkatsoul@uth.gr
[2]Dept. of Agrotechnology, Univ. of Thessaly, Gaiopolis, 41500 Larisa, Greece, chpapa@uth.gr

ABSTRACT

The use of agrivoltaics allows energy production without occupying productive land. The installation of PV inside greenhouses has the advantage of reducing installation costs since they are placed in existing infrastructure. However, the main question that needs to be answered in such an installation is the effect of the presence of PV on the available PAR radiation at the plant level during cultivation. One solution may be to use a mechanism to change the inclination angle of the PVs. In the present work, this issue is examined by simulating the propagation of radiation inside a multiple greenhouse, whose 2 internal chambers are equipped with PV, using Computational Fluid Dynamics. During the summer months, despite shading, the available radiation at the plant level is sufficient whether the PVs remain horizontal or inclined. However, during the winter months the inclination angle variation algorithm is crucial for maintaining satisfactory radiation at the plant level.

Keywords: Agrivoltaics, Computational Fluid Dynamics, greenhouses, radiation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση αγροβολταϊκών επιτρέπει παραγωγή ενέργειας χωρίς κατάληψη παραγωγικής γης. Η εγκατάσταση ΦΒ μέσα σε θερμοκήπια παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι μειώνεται το κόστος εγκατάστασης εφόσον αυτά τοποθετούνται σε υπάρχουσα υποδομή. Ωστόσο το βασικό ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί σε μια τέτοια εγκατάσταση είναι η επίδραση της ύπαρξης των ΦΒ στη διαθέσιμη PAR ακτινοβολία στο επίπεδο των φυτών στη διάρκεια της παραγωγής. Συνεπώς είναι απαραίτητο να μελετηθεί η μεταβολή της PAR ακτινοβολίας στο επίπεδο της καλλιέργειας λόγω της λειτουργίας των ΦΒ πάνω από αυτά.

Μια από τις λύσεις που έχει προταθεί για την αντιμετώπιση της σκίασης της καλλιέργειας είναι η χρήση ημι-διάφανων οργανικών ΦΒ στοιχείων με μικρό βάρος πάνω στην επιφάνεια της οροφής τα οποία επιτρέπουν τη μερική διέλευση της ακτινοβολίας, χωρίς να επιβαρύνουν στατικά την κατασκευή. Ωστόσο, ενώ τα ημι-διάφανα οργανικά ΦΒ επιτρέπουν σημαντικές ποσότητες PAR ακτινοβολίας να εισέλθουν μέσα στο θερμοκήπιο (Baxevanou et al. 2020), ο μικρός χρόνος ζωής τους και ο μικρός βαθμός απόδοσης που έχουν δυσκολεύουν την υιοθέτησή τους (Baxevanou et al. 2023). Μια άλλη επιλογή μπορεί να είναι η τοποθέτηση συμβατικών ΦΒ μέσα στο θερμοκήπιο, κάτω από τη διάφανη οροφή χρησιμοποιώντας για την έδρασή τους το σκελετό του θερμοκηπίου και αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της σκίασης με σύστημα μεταβολής της κλίσης τους.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικης η κατανομή της διαθέσιμης PAR στο επίπεδο των φυτών σε πολλαπλό θερμοκήπιο 6 θαλάμων, σε δύο εκ των οποίων υπάρχουν μονοκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία διπλής όψης εντός του θερμοκηπίου κάτω από το κάλυμμα αυτού τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλουν την κλίση τους, λαμβάνοντας υπόψη τη σκίαση που προκαλεί η οροφή κάθε θαλάμου στους διπλανούς του και την εξάρτηση των οπτικών ιδιοτήτων του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο από τη σχετική υγρασία.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Γενική μεθοδολογία

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται υπολογιστική ρευστομηχανική για να υπολογιστεί η ακτινοβολία στο επίπεδο των φυτών σε θαλάμους θερμοκηπίων στους οποίους κάτω από την οροφή έχουν τοποθετηθεί ΦΒ στοιχεία. Δεδομένου ότι οι θάλαμοι στους οποίους τοποθετήθηκαν τα ΦΒ είναι εσωτερικοί, σε ένα πολλαπλό θερμοκήπιο το βασικό πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί ήταν το ζήτημα των οριακών συνθηκών στις πλαϊνές πλευρές των θαλάμων που ήταν σε επαφή με άλλους θαλάμους του θερμοκηπίου. Για το λόγο αυτό η εργασία ξεκίνησε με προσομοιώσεις όλων των θαλάμων, έξι (6) στην προκειμένη περίπτωση, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή οριακών συνθηκών ακτινοβολίας στις εξωτερικές πλευρές των εξωτερικών θαλάμων. Αποτέλεσμα αυτών των προσομοιώσεων ήταν ο υπολογισμός της ακτινοβολίας στις πλευρές των εσωτερικών θαλάμων. Θεωρώντας ανεξάρτητες μεταβλητές την εξωτερική ακτινοβολία και το ηλιακό ύψος αναπτύχθηκε μια συνάρτηση ‘μεταφοράς’ των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών, σε ότι αφορά την ακτινοβολία, στις εσωτερικές πλευρικέ επιφάνειες, με τη μέθοδο cross-correlation, η οποία επιτρέπει κάθε φορά τον προσδιορισμό της διαθέσιμης ακτινοβολίας στις πλευρές χωρίς να χρειάζεται προσομοίωση της όλης γεωμετρίας

Το επόμενο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η σκίαση της οροφής του ενός θαλάμου από το διπλανό του. Συνεπώς έπρεπε να εξεταστεί αν έχει σημαντική επίπτωση στην ακτινοβολία μέσα στο θάλαμο. Αρχικά έγινε προσομοίωση των 6 θαλάμων σε διάφορες ημέρες της Άνοιξης, του Καλοκαιριού και του Χειμώνα χωρίς να ληφθεί υπόψη η σκίαση που προξενεί ο ένας θάλαμος στον άλλο. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η σκίαση, δηλ. το μήκος της οροφής του κάθε

θαλάμου που κάθε χρονική στιγμή σκιάζεται από το διπλανό θάλαμο έτσι ώστε στην περιοχή εκείνη η άμεση ακτινοβολία να μηδενίζεται και να μένει μόνο η διάχυτη ακτινοβολία. Για να γίνει αυτό σε κάθε χρονική στιγμή: α) προσδιορίζεται το επίπεδο που καθορίζει το ηλιακό αζιμούθιο και είναι κάθετο στο οριζόντιο επίπεδο, β) στη συνέχεια προσδιορίζεται η έλλειψη που προκύπτει από την τομή του επιπέδου αυτού με κύλινδρο που αντιστοιχεί στη γειτονική οροφή, γ) έπειτα σε κάθε σημείο της οροφής υπολογίζεται η γωνία της ευθείας που διέρχεται από το σημείο αυτό και είναι εφαπτόμενη στην έλλειψη αυτή, και δ) αν η γωνία αυτή είναι μικρότερη από το ηλιακό ύψος θεωρούμε ότι το σημείο αυτό τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή σκιάζεται.

2.2 Υπολογιστικό μοντέλο και λεπτομέρειες αριθμητικού μοντέλου

Η ροή μέσα στο θερμοκήπιο θεωρείται διδιάστατη, μόνιμη, ασυμπίεστη και τυρβώδης. Τα φαινόμενα μεταφοράς περιγράφονται από τις Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) εξισώσεις (Launder & Spalding, 1974; Ferziger & Peric, 1996). Η εξίσωση της ενέργειας επιλύεται και μέσα στις περιοχές των στερεών όπου η γενική της μορφή λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης Fourier. Η μετάδοση της ακτινοβολίας μέσω της διάφανης οροφής και των διάφανων πλευρικών επιφανειών, η διάδοσή της μέσα στο θερμοκήπιο, η ανάκλαση, η απορρόφηση και η εκπομπή ακτινοβολίας μέσα στο υπολογιστικό πεδίο προσομοιώνονται με το μοντέλο DO (Raithby & Chui, 1990; Chui & Raithby, 1993; Raithby, 1999; Kim & Huh, 2000). Το μοντέλο DO επιλύεται για τέσσερα (4) φάσματα (UV 0.01-0.4, PAR 0.4 – 0.76, NIR 0.76 – 1.1 και IR 1.1 -1000). Για την προσομοίωση της τύρβης χρησιμοποιείται το standard μοντέλο k-ε (Launder and Spalding, '74) με συναρτήσεις τοίχου. Η θερμική άνωση προσομοιώνεται με την προσέγγιση Boussinesq.

Η επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων RANS έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων και η σύζευξη πίεσης – συνέχειας με το μοντέλο SIMPLEC. Σε όλες τις εξισώσεις μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε ανάντι $2^{ης}$ τάξης (SOU) σχήμα διακριτοποίησης και όριο σύγκλισης 10^{-4} εκτός από τις εξισώσεις του DO όπου το όριο σύγκλισης τέθηκε στο 10^{-5} και την εξίσωση της ενέργειας όπου χρησιμοποιήθηκε το σχήμα MUSCL και όριο σύγκλισης 10^{-8}. Οι εξωτερικές διαφανείς επιφάνειες της οροφής και των πλαινών πλευρών θεωρήθηκαν ημι-διαφανείς τοίχοι με επιβολή μικτής οριακής συνθήκης με γνωστή τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και την κάθετη στην επιφάνεια συνιστώσα της ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας εξεταζόμενο φάσμα. Οι επιφάνειες αυτές είναι θερμικά και οπτικά συζευγμένες με ημιδιάφανο στερεό. Το στερεό αυτό είναι επίσης εσωτερικά συζευγμένο με ημιδιάφανη εσωτερική επιφάνεια η ο οποία από τη μια πλευρά συζευγνύεται με το στερεό και από την άλλη πλευρά με τον εσωτερικό αέρα. Το έδαφος θεωρείται αδιάφανος τοίχος ισοθερμικός. Οι πάγκοι υδροπονίας και τα ΦΒ αποτελούνται από ημιδιάφανες επιφάνειες συζευγμένες με τον αέρα του θερμοκηπίου και ημιδιάφανο στερεό υλικό με κατάλληλες θερμικές και οπτικές ιδιότητες (Baxevanou et al. 2018).

2.3 Υπομοντέλα

Κάποια επιπλέον υπομοντέλα χρειάστηκε να αναπτυχθούν με τη μορφή User Defined Functios (UDFs). Το ένα αφορά τον υπολογισμό της συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία είναι κάθετη σε κάθε σημείο της γοτθικού τύπου οροφής καθώς και των εξωτερικών πλευρών συναρτήσει της εξωτερικής ακτινοβολίας κάθετης στο οριζόντιο επίπεδο, της γεωγραφικής θέσης του θερμοκηπίου, της γεωμετρίας της οροφής του θερμοκηπίου, της ημέρας και της ώρας της προσομοίωσης. Μια άλλη UDF αφορά τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του εδάφους μέσω ενός μοντέλου energy balance συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας, της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, της ημέρας του έτους, των τυπικών κλιματικών συνθηκών του τόπου και των

θερμοφυσικών και οπτικών ιδιοτήτων του εδάφους. Τέλος μια Τρίτη UDF αφορά τον υπολογισμό συντελεστή συναγωγής των εξωτερικών κάθετων επιφανειών συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ένα επιπλέον υπομοντέλο αναπτύχθηκε εκτός του κώδικα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για τον προσδιορισμό των οπτικών ιδιοτήτων του αέρα συναρτήσει της σχετικής υγρασίας του θερμοκηπίου.

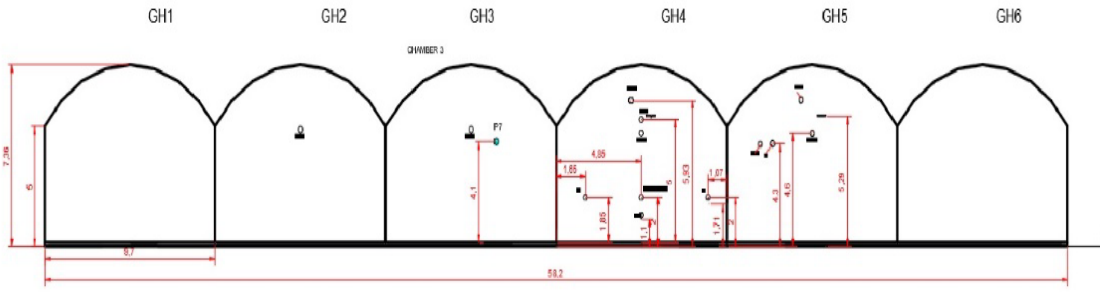
3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Εξετάστηκε η 2Δ τομή ενός πολλαπλού θερμοκήπιου με οροφή γοτθικού τύπου αποτελούμενο από 6 θαλάμους, καθένας από τους οποίους έχει διαστάσεις πλάτος 9.7 με ύψος υδρορροής 5 m και ύψος κορφιά 7.36 m (Σχήμα 1). Βρίσκεται στο Βελεστίνο Μαγνησίας με συντεταγμένες 39^{o} 23’ 41.14’’ N και 22^{o} 45’ 29.16’’ E σε υψόμετρο 120 m. Ο άξονας του θερμοκηπίου έχει προσανατολισμό Ανατολή – Δύση αλλά με απόκλιση -36^{o} Ανατολικά. Η εξεταζόμενη τομή δίνεται στο Σχήμα 1. Χρησιμοποιήθηκαν δύο πλέγματα. Ένα για τους 6 θαλάμους μαζί χωρίς ΦΒ αποτελούμενο από 75000 κελιά και ένα για τους δύο μόνο θαλάμους στους οποίους τοποθετήθηκαν ΦΒ μετά το Σεπτέμβριο του 2024 αποτελούμενο από 45000 κελιά. Στον πίνακα 1 που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικά στοιχεία αυτής της εξωτερικής ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας για κάποιες μέρες και ώρες που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρόν για την πιστοποίηση του μοντέλου. Η θερινή ημέρα είχε χαμηλή για την εποχή ακτινοβολία, ενώ η χειμερινή είχε υψηλή για την εποχή ακτινοβολία.

Πίνακας 1. Εξωτερική ακτινοβολία

Ημέρα	Ώρα ζώνης	Ολική ακτινοβολία [W/m^2]	Διάχυτη ακτινοβολία [W/m^2]
9/6/24	10.00	596.38	79
	12.00	825.29	120
	16.00	656.53	100
	18.00	340.98	100
17/12/24	10.00	694	296
	12.00	822	54
	14.00	532	45
	16.00	28	22

Για την πιστοποίηση των μοντέλων υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις σε επίπεδο κάθετο στο κέντρο των θερμοκηπίων σε όλα τους θαλάμους, στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 4, ονομαστικά τα PAR8, PAR9, PAR10, PAR11 και P5, P35 για τη μέτρηση της PAR ακτινοβολίας και τα I2, I3, I4s, I4t και I7 για τη μέτρηση της PAR+IR ακτινοβολίας

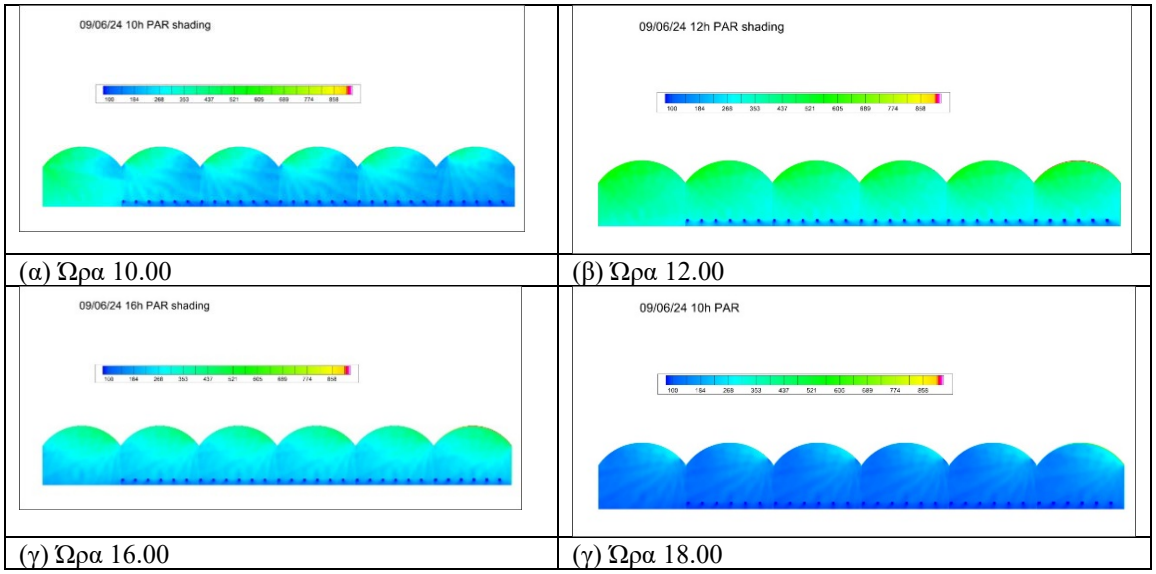


Σχήμα 1. Τομή θερμοκηπίων και θέσεις πυρανομέτρων

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Διερεύνηση της επίδρασης της σκίασης όμορων οροφών

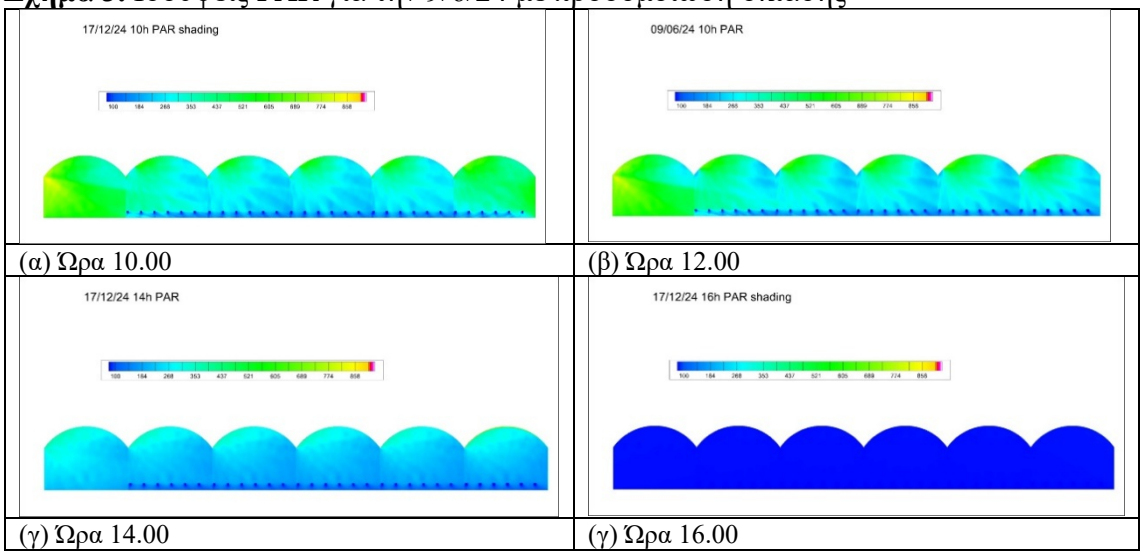
Στα Σχήματα 2.α έως 2.δ δίνονται οι ισουψείς της PAR ακτινοβολίας για 4 ώρες της 9/6/24 και στα Σχήματα 3.α έως 3.β δίνονται οι αντίστοιχες ισοϋψείς για την 17/12/24 προσομοιώνοντας την επίδραση της σκίασης των γειτονικών θαλάμων στις οροφές των θαλάμων του θερμοκηπίου.



(α) Ώρα 10.00 (β) Ώρα 12.00

(γ) Ώρα 16.00 (γ) Ώρα 18.00

Σχήμα 3. Ισοϋψείς PAR για την 9/6/24 με προσομοίωση σκίασης

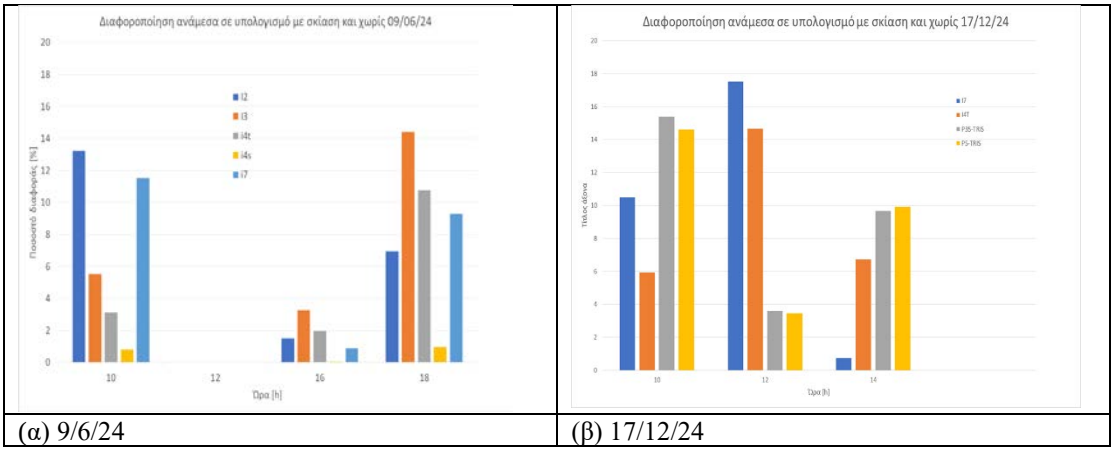


(α) Ώρα 10.00 (β) Ώρα 12.00

(γ) Ώρα 14.00 (γ) Ώρα 16.00

Σχήμα 4. Ισοϋψείς PAR για την 17/12/24 με προσομοίωση σκίασης

Από την ποιοτική σύγκριση των δύο προσομοιώσεων προκύπτουν διαφορές στο πεδίο ακτινοβολίας που αναπτύσσεται μέσα στους θαλάμους. Ωστόσο προκειμένου να εξαχθούν συγκεκριμένα ποσοτικά συμπεράσματα εξετάστηκε η τιμή της προλεγόμενης ακτινοβολίας σε συγκεκριμένες θέσεις του υπολογιστικού πεδίου και στις οποίες υπάρχουν τα μετρητικά ακτινοβολίας I2, I3, I4t, I4s και I7. Στα Σχήμα 5.α και 5.β δίνεται το ποσοστό διαφοροποίησης που προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου υπολογισμού της σκίασης για τις ημέρες 9/6/24 και 17/12/24 στην πρόλεξη της PAR ακτινοβολίας.



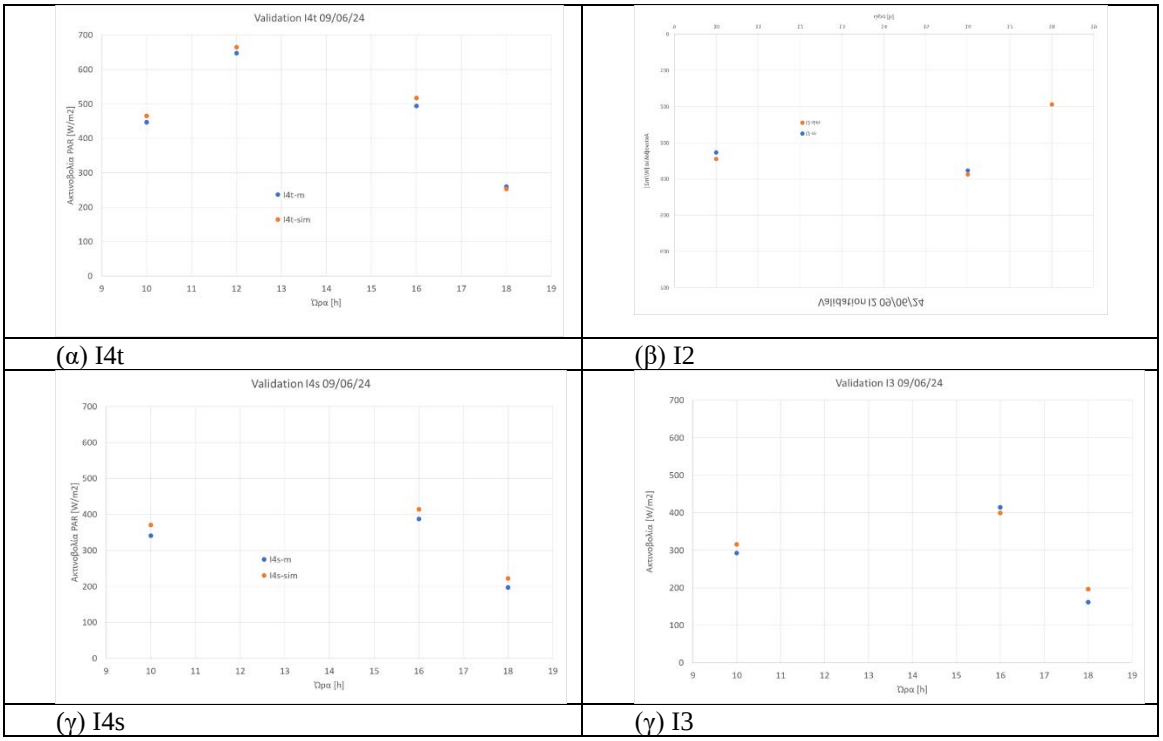
(α) 9/6/24 (β) 17/12/24

Σχήμα 5. Διαφοροποίηση πρόλεξης PAR ακτινοβολίας με και χωρίς σκίασης

Κατά τη διάρκεια της θερινής προσομοίωσης η διαφοροποίηση κατά τις μεσημεριανές ώρες σχεδόν εξαφανίζεται ενώ κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες είναι σημαντική, ειδικά στις θέσεις κοντά στις άκρες του θαλάμου. Κατά τη διάρκεια της χειμερινής προσομοίωσης η διαφοροποίηση φαίνεται να είναι σημαντική σε όλη τη διάρκεια της ημέρας και όχι μόνο στις ακριανές θέσεις.

4.2 Πιστοποίηση του μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Εφόσον διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα χρήσης του υπο-μοντέλου προσδιορισμού της επίδρασης της σκίασης το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις πιστοποίησης του συνολικού μοντέλου διάδοσης της ακτινοβολίας. Στα Σχήματα 6.α έως 6.δ δίνεται η σύγκριση ανάμεσα στη μέτρηση και την προσομοίωση για 4 ώρες προσομοίωσης για διαφορετικές θέσεις αισθητηρίων (I2, I3, I4s και I4t) μέσα στο θάλαμο για την 9/6/24.



(α) I4t (β) I2

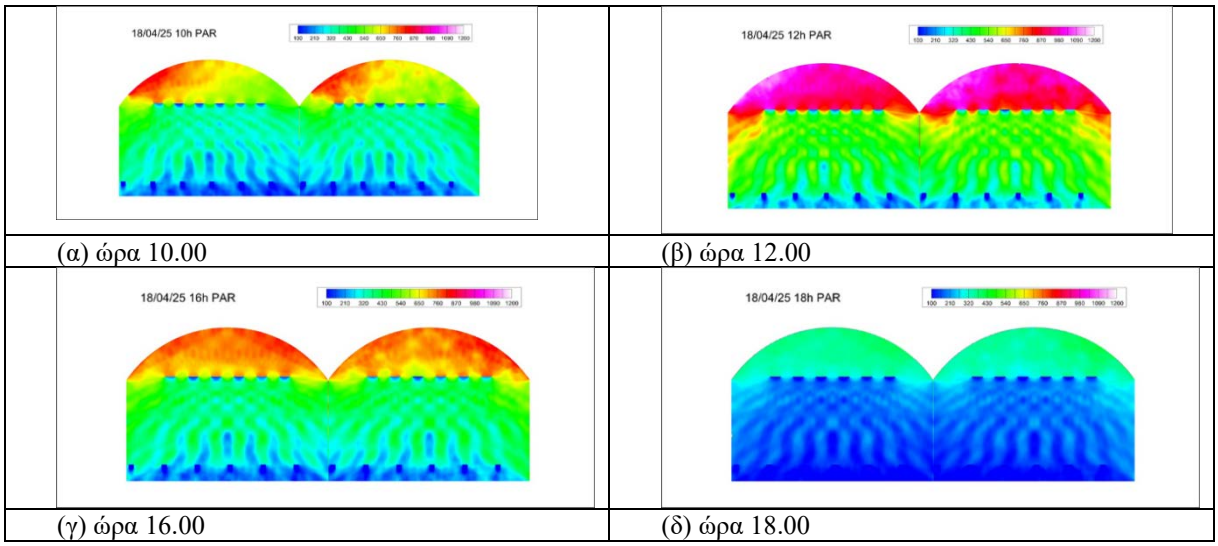
(γ) I4s (γ) I3

Σχήμα 6. Σύγκριση μετρήσεων με αποτελέσματα προσομοίωσης για 9/6/24

Η σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και μετρήσεων για τη θερινή προσομοίωση είναι εξαιρετική αφού η διαφορά περιορίζεται σε ποσοστά μικρότερα του 3%.

4.3 Επίδραση των ΦΒ στα επίπεδα PAR ακτινοβολίας μέσα σε θαλάμους με ΦΒ

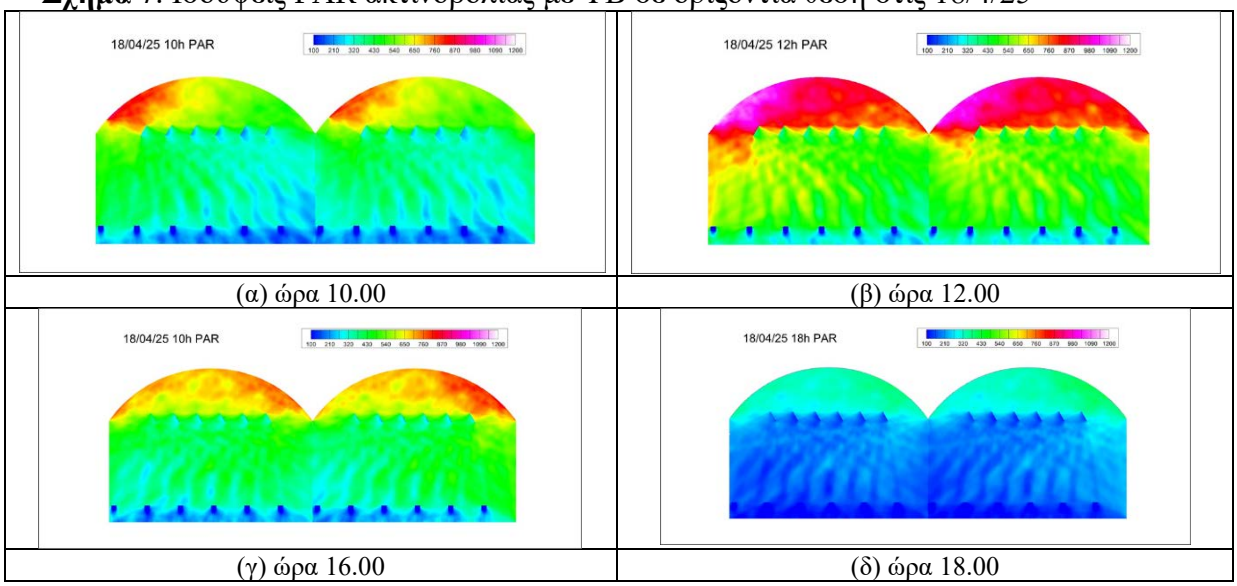
Στα Σχήματα 7.α έως 7.δ παρουσιάζονται οι ισοϋψείς PAR ακτινοβολίας εντός των θαλάμων 4 και 5 όπως διαμορφώνονται με την παρουσία των ΦΒ σε σταθερή οριζόντια θέση για την 18/4/25, για διάφορες ώρες της ημέρας, ενώ στις εικόνες 8.α έως 8.δ δίνονται οι ισοϋψείς για την ίδια μέρα και τις ίδιες ώρες αλλά με τα ΦΒ στη μέγιστη κλίση του συγκεκριμένου συστήματος, δηλ. 60^{o} ως προς τον ορίζοντα προς τα αριστερά τις πρωινές ώρες και προς τα δεξιά τις απογευματινές ώρες.



(α) ώρα 10.00 (β) ώρα 12.00

(γ) ώρα 16.00 (δ) ώρα 18.00

Σχήμα 7. Ισοϋψείς PAR ακτινοβολίας με ΦΒ σε οριζόντια θέση στις 18/4/25



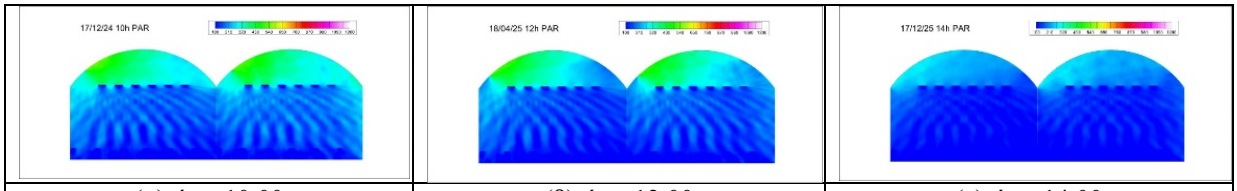
(α) ώρα 10.00 (β) ώρα 12.00

(γ) ώρα 16.00 (δ) ώρα 18.00

Σχήμα 8. Ισοϋψείς PAR ακτινοβολίας με ΦΒ σε κλίση 60^{o} στις 18/4/25

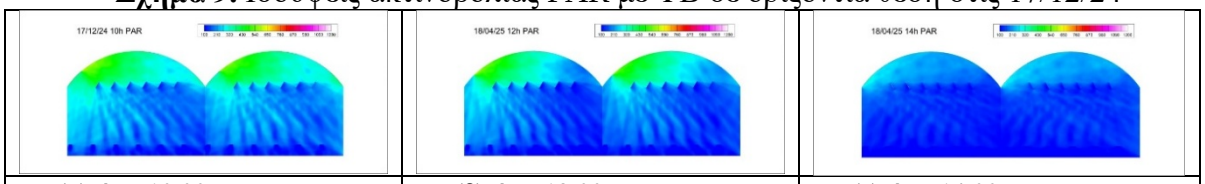
Σε όλες τις περιπτώσεις διακρίνονται οι κροσσοί συμβολής, χαρακτηριστικοί της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – ακτινοβολίας, η σκίαση που δημιουργείται, η οποία πάντως τις μεσημεριανές ώρες επιτρέπει σημαντικές ποσότητες ακτινοβολίας λόγω της διάχυτης ακτινοβολίας, και η ενίσχυση της διαθέσιμης ακτινοβολίας από ανακλάσεις τόσο πάνω από τα ΦΒ όσο και κάτω από αυτά, ανάκλαση από το έδαφος που είναι καλυμμένο με ανοιχτόχρωμο

γεωύφασμα και η οποία εμποδίζεται σε κάποιες περιπτώσεις μόνο από τους πάγκους της υδροπονίας. Ωστόσο εκείνο που γίνεται ήδη σαφές είναι ότι η τοποθέτηση των ΦΒ σε κλίση δεν εξασφαλίζει σε όλες τις ώρες μεγιστοποίηση της ακτινοβολίας στο επίπεδο των φυτών. Στα Σχήμα 9.α έως 9.γ δίνονται οι ισοϋψείς της PAR ακτινοβολίας στους θαλάμους 4 και 5 με τα ΦΒ σε οριζόντια θέση για τρεις ώρες της 17/12/24. Ενώ στα Σχήματα 10.α έως 10.γ τα ΦΒ τοποθετούνται στη μέγιστη κλίση τους των 60ο. Σε αυτήν την περίπτωση το όφελος της τοποθέτησης των ΦΒ υπό κλίση σαφώς διακρίνεται ευκρινέστερα.



(α) ώρα 10.00 (β) ώρα 12.00 (γ) ώρα 14.00

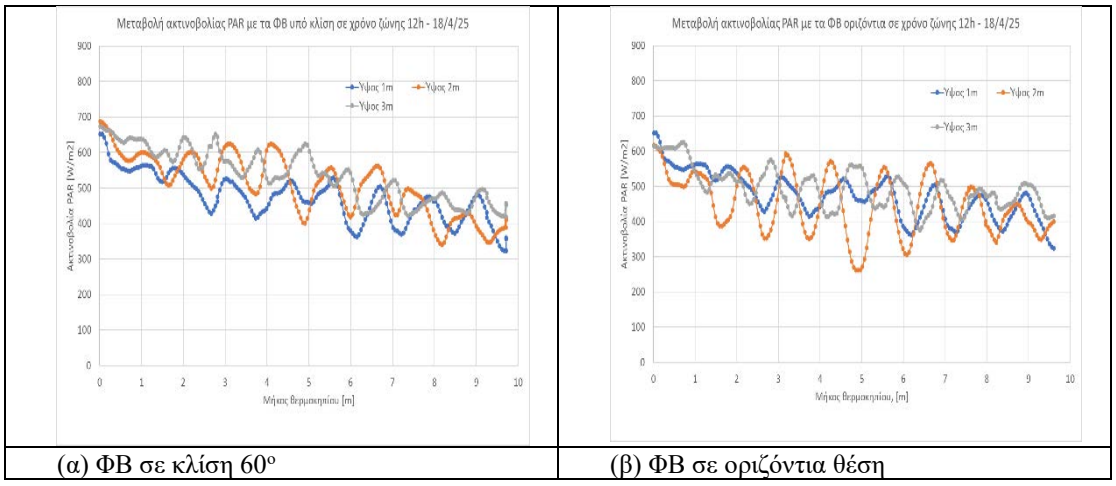
Σχήμα 9. Ισοϋψείς ακτινοβολίας PAR με ΦΒ σε οριζόντια θέση στις 17/12/24



(α) ώρα 10.00 (β) ώρα 12.00 (γ) ώρα 14.00

Σχήμα 10. Ισοϋψείς PAR ακτινοβολίας με ΦΒ σε κλίση 60ο στις 17/12/24

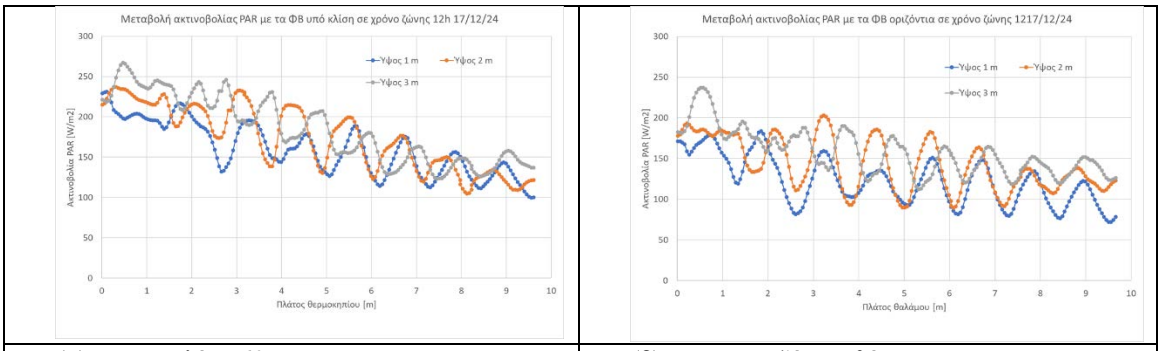
Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν οι διαφορές στο επίπεδο των φυτών στα Σχήματα 11.α και 11.β παρουσιάζεται η κατανομή της PAR ακτινοβολίας σε όλο το πλάτος του 4ου θαλάμου σε τρία ύψη (1, 2 και 3 μέτρων) για την ώρα 12h στις 18/4/25 με ΦΒ στη μέγιστη κλίση των 60ο και με τα ΦΒ σε οριζόντια θέση. Στη συγκεκριμένη μέρα και ώρα η μέγιστη διαφοροποίηση παρατηρείται σε ύψος 2 μέτρων. Το πλάτος της διακύμανσης είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση των οριζόντιων ΦΒ, η καθ' ύψος μεταβολή είναι σχετικά μικρή, ωστόσο διακριτή, κυρίως στην περίπτωση των ΦΒ υπό κλίση. Η κλίση φαίνεται να ευνοεί τα φυτά στο μέσο του θαλάμου και η οριζόντια θέση τις ακριανές σειρές. Ωστόσο σε όλο το πλάτος του θαλάμου και στις δύο εξεταζόμενες θέσεις η PAR ακτινοβολία στο επίπεδο των φυτών είναι επαρκής για την ανάπτυξή τους.



(α) ΦΒ σε κλίση 60ο (β) ΦΒ σε οριζόντια θέση

Σχήμα 11. Κατανομή PAR ακτινοβολίας στο πλάτος του θαλάμου 4 στις 18/4/25 στις 12h

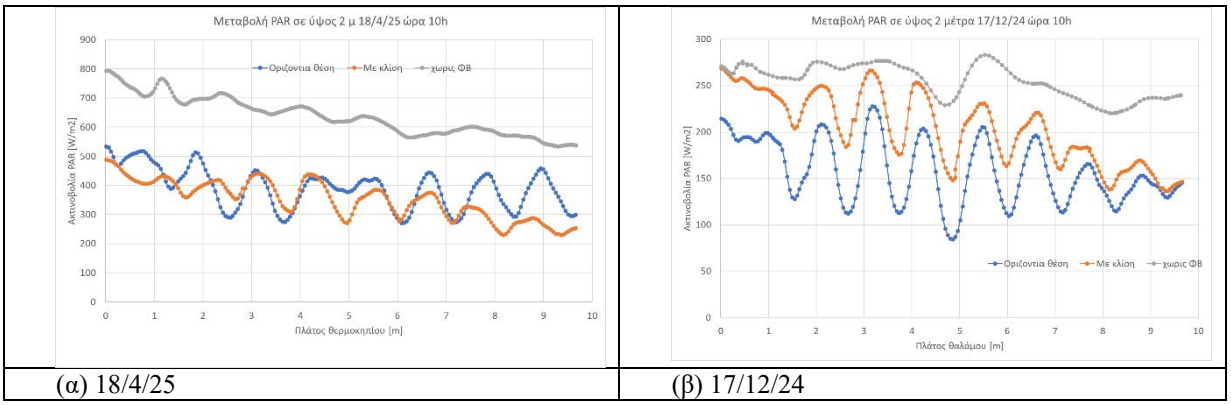
Στα Σχήματα 12.α και 12.β δίνονται οι ίδιες κατανομές σε ύψη 1, 2 και 3 μέτρων για την ώρα 12.00 της 17/12/24. Από τις εικόνες αυτές προκύπτει σαφής βελτίωση της διαθέσιμης ακτινοβολίας με τα Φβ υπό κλίση καθώς και μείωση της διαθέσιμης ακτινοβολίας κατά πλάτος του θαλάμου, διότι το θερμοκήπιο δεν έχει προσανατολισμό Βορά – Νότου αλλά έχει μια κλίση 36^{o}. Στη Χειμερινή αυτή ημέρα, παρόλο που η εξωτερική ακτινοβολία είναι σημαντική το χαμηλό ηλιακό ύψος δείχνει να οδηγεί σε διαθέσιμη PAR ακτινοβολία χαμηλότερη από την απαραίτητη για την ανάπτυξη των φυτών.



(α) ΦΒ σε κλίση 60^{o} (β) ΦΒ σε οριζόντια θέση

Σχήμα 12. Κατανομή PAR ακτινοβολίας στο πλάτος του θαλάμου 4 στις 17/12/24 στις 12h

Προκειμένου να διευκρινιστεί περεταίρω η επίδραση των ΦΒ και να διακριβωθεί αν η μειωμένη PAR οφείλεται σε αυτά στα Σχήματα 13.α και 13.β συγκρίνεται η διαθέσιμη PAR ακτινοβολία κατά πλάτος του θαλάμου για την ώρα 10.00 των ημερών 18/4/25 και 17/12/24 αντίστοιχα για τις περιπτώσεις: (α) χωρίς ΦΒ, (β) με ΦΒ σε οριζόντια θέση και (γ) με ΦΒ υπό κλίση 60^{o} σε ύψος 2 m. Ακόμα και χωρίς ΦΒ υπάρχει μια διακύμανση της PAR ακτινοβολίας η οποία οφείλεται σε ανακλάσεις και η οποία είναι εντονότερη στην περίπτωση του χαμηλού ηλιακού ύψους του Χειμώνα. Κατά τη θερινή προσομοίωση η διακύμανση σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρή και τελικά σε όλο το πλάτος του θαλάμου η διαθέσιμη PAR ακτινοβολία παραμένει υψηλότερη από 200 W/m^2. Ωστόσο για τη συγκεκριμένη ώρα προκύπτει ότι η κλίση των ΦΒ τελικά δεν οδηγεί σε αυξημένη ακτινοβολία στο επίπεδο των φυτών. Στη Χειμερινή προσομοίωση η διαθέσιμη PAR ακτινοβολία χωρίς την παρουσία των ΦΒ είναι οριακά κατάλληλη για την ανάπτυξη των φυτών σε όλο το πλάτος του θαλάμου. Τα ΦΒ υπόκλιση υπερτερούν σαφώς της οριζόντιας θέσης αφήνοντας κάτω από το όριο των 200 W/m2 μικρό μέρος του θαλάμου. Τα ΦΒ σε οριζόντια θέση ωστόσο οδηγούν σχεδόν όλο το θάλαμο κάτω από τα 200 W/m^2.



(α) 18/4/25 (β) 17/12/24

Σχήμα 13. Κατανομή PAR ακτινοβολίας σε ύψος 2 μ με και χωρίς ΦΒ, ώρα 10.00

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την περιγραφή της διάδοσης της ακτινοβολίας μέσα σε θερμοκήπιο εξοπλισμένο με φωτοβολταικά το οποίο πιστοποιήθηκε ικανοποιητικά ως προς μετρήσεις της ακτινοβολίας για διαφορετικές εποχές του έτους. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε δίνει τη δυνατότητα να προσομοιωθεί με ακρίβεια το φαινόμενο των κροσσών συμβολής που αναπτύσσεται κατά τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπως είναι η ακτινοβολία καθώς και το πλήθος των ανακλάσεων σε διάφορες επιφάνειες του θερμοκηπίου, κάτι που δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί με εμπειρικά μονοδιάστατα μοντέλα μελέτης της ακτινοβολίας.

Επίσης στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε με επιτυχία συνάρτηση μεταφοράς για τη ‘μεταφορά’ των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών, σε ότι αφορά την ακτινοβολία, ως οριακές συνθήκες στις εσωτερικές κάθετες επιφάνειες ενός πολλαπλού θερμοκηπίου. Αυτό επιτρέπει τον περιορισμό της μελέτης σε έναν ή δύο ξεχωριστούς θαλάμους, αυξάνοντας την ακρίβεια των υπολογισμών και μειώνοντας το υπολογιστικό κόστος, ενώ είναι πολύτιμο για προετοιμασία τρισδιάστατων προσομοιώσεων.

Από τις προσομοιώσεις αποδείχτηκε ότι η προσομοίωση της σκίασης που επιβάλλουν οι πλαϊνές οροφές ενός πολλαπλού θερμοκηπίου σε έναν θάλαμο είναι σημαντική και δεν μπορεί να αγνοηθεί κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες κατά τη θερινή περίοδο, και σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της ημέρας κατά τη χειμερινή περίοδο, ενώ σημαντική είναι η επίδραση της σκίασης αυτής στις ακριανές σειρές των φυτών, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διαθέσιμης PAR μέχρι και 20%. Αντιθέτως στο κέντρο των θερμοκηπίων κατά τις μεσημεριανές ώρες τη θερινή περίοδο η σκίαση αυτή μπορεί με ασφάλεια να αγνοηθεί.

Η επιλογή τα ΦΒ να τοποθετούνται με μεγάλη κλίση δεν εξασφαλίζει σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερη σκίαση. Η εύρεση της βέλτιστης σκίασης εξαρτάται από το ύψος της καλλιέργειας, την ημέρα του έτους, την ώρα της ημέρας καθώς και τον προσανατολισμό του θερμοκηπίου. Κατά τους θερινούς μήνες τα εγκατεστημένα ΦΒ δε μειώνουν τη διαθέσιμη PAR ακτινοβολία στο επίπεδο των φυτών σε απαγορευτικά, για την καλλιέργεια, επίπεδα ανεξαρτήτως της κλίσης τους. Αντιθέτως τους χειμερινούς μήνες είναι απαραίτητη η βέλτιστη διαχείριση της γωνίας κλίσης τους αφού μπορεί να επιτρέψει σημαντική ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο των φυτών.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου REGACE, το οποίο έχει λάβει χρηματοδότηση από το Πρόγραμμα Έρευνας και Καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο της Συμφωνίας Επιχορήγησης αριθ. 101096056.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Baxevanou C., Fidaros D., Katsoulas N., Mekeridis E., Varlamis Ch., Zachariadis A. and Logothetidis S., 2020. *Simulation of Radiation and Crop Activity in a Greenhouse Covered with Semitransparent Organic Photovoltaics,* Appl. Sci. 2020, 10, 2550

Baxevanou, C., Fidaros, D., Papaioannou, C., Katsoulas, N., 2023. *Design and Optimization of a Hybrid Solar–Wind Power Generation System for Greenhouses*. Horticulturae 2023, 9, 181.

Chui E.H. and Raithby, G.D., 1993, *Computation of radiant heat transfer on a nonorthogonal mesh using the finite-volume method,* Numerical Heat Transfer. Part B, Fundamentals 23:269-288.

Ferziger J.H. and Peric, M., 1996, *Computational Methods for Fluid Dynamics,* Springer, London

Launder B. E. and Spalding D. B., 1974, *The numerical computation of turbulent flows*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3:269-289.

Raithby G.D. and Chui, E.H., 1990, *A Finite-Volume Method for redicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media*, Transactions of ASME Journal of Heat Transfer 112:415-423.

Raithby G.D., 1999, *Discussion of the finite-volume method for radiation, and its application using 3D unstructured meshes*, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals 35:389-405

26. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΓΡΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΥΔΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Ελβανίδη[1], Χ. Παπαϊωάννου[2] , Ι. Ναουνούλης[1] , Σ. Φαλιάγκα[1], Ν. Κατσούλας[1]

[1] Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, 38446 Βόλος Μαγνησίας, Ελλάδα, elaggeliki@gmail.com, nkatsoul@uth.gr
[2] Τμήμα Γεωπονίας-Αγροτεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Γαιόπολις, 41500 Λάρισα email: chpapa@uth.gr

Περίληψη

Στην παρούσα μελέτη αξιολογείται η υδατική καταπόνηση θερμοκηπιακής καλλιέργειας αγγουριού μέσω του Δείκτη Υδατικής Καταπόνησης Καλλιεργειών (Crop Water Stress Index - CWSI). Ο δείκτης βασίζεται στη διαφορά θερμοκρασίας φυλλώματος-αέρα και παρέχει μη καταστρεπτική εκτίμηση της υδατικής καταπόνησης. Εφαρμόστηκε σε τέσσερις μεταχειρίσεις: (α) φυτά σε συμβατικές συνθήκες (μάρτυρας), (β) με εμπλουτισμό CO_2, (γ) με σκίαση μέσω φωτοβολταϊκών και (δ) με συνδυασμό CO_2 και φωτοβολταϊκών. Κλιματικά δεδομένα εντός και εκτός θερμοκηπίου αξιοποιούνται για τον υπολογισμό του CWSI καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο, επιτρέποντας συγκριτική αξιολόγηση. Η σκίαση από τα φωτοβολταϊκά επηρεάζει τις απαιτήσεις σε νερό, ενώ ο εμπλουτισμός με CO_2 ενισχύει την ικανότητα των φυτών να ανταποκρίνονται σε ήπιες καταπονήσεις. Ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών προσφέρει ένα βελτιστοποιημένο μικροκλίμα, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση υδατικών πόρων χωρίς μείωση της παραγωγικότητας.

Λέξεις κλειδιά: Φωτοβολταϊκά, μικροκλίμα, θερμοκρασία κόμης, διαπνοή, CWSI

AGRIVOLTAIC SYSTEMS IMPACT ON WATER STRESS OF GREENHOUSE CROPS

A. Elvanidi [1*], Ch. Papaioannou[2], I. Naounoulis[1], S. Faliagka[1], N. Katsoulas[1]

*[1]Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446 Volos, Magnesia, Greece *elaggeliki@gmail.com, nkatsoul@uth.gr*
*[2]Department of Agriculture–Agrotechnology, University of Thessaly, Gaiopolis, 41500 Larissa, Greece *chpapa@uth.gr*

ABSTRACT

This study evaluates water stress in greenhouse cucumber cultivation using the Crop Water Stress Index (CWSI). The index is based on the canopy-to-air temperature difference and provides a non-destructive estimate of plant water stress. It was applied in four treatments:
(a) plants under conventional conditions (control), (b) with CO_2 enrichment, (c) with shading from photovoltaic panels, and (d) with a combination of CO_2 enrichment and photovoltaic shading. Climate data inside and outside the greenhouse were used throughout the growing season to calculate the CWSI, allowing comparative assessment. Photovoltaic shading affected water requirements, while CO_2 enrichment enhanced plant tolerance to mild stress. The combination of the two technologies created an optimized microclimate, contributing to water savings without reducing productivity.

Keywords: photovoltaics, microclimate, canopy temperature, transpiration, CWSI

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενεργειακή κρίση, σε συνδυασμό με τις εντεινόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για υιοθέτηση καινοτόμων, βιώσιμων και ενεργειακά αποδοτικών λύσεων στον αγροτικό τομέα και ειδικότερα στη λειτουργία θερμοκηπιακών συστημάτων (Ma Lu et al., 2024). Στο πλαίσιο αυτό, τα αγροβολταϊκά συστήματα, δηλαδή η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών μονάδων στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις, προβάλλουν ως μια καινοτόμος πρακτική που συνδυάζει την παραγωγή τροφίμων με την παραγωγή ενέργειας, συμβάλλοντας στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος της γεωργικής δραστηριότητας (Agostini et al., 2021).

Ωστόσο, η εφαρμογή φωτοβολταϊκών (Φ/Β) σε θερμοκήπια επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο μικροκλίμα, όπως είναι η σκίαση και οι τροποποιήσεις στη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν τη φυσιολογία των φυτών και τις ανάγκες τους σε νερό (Fernández et al., 2022). Η αξιολόγηση αυτών των επιπτώσεων κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να διασφαλιστεί η ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και γεωργικής παραγωγικότητας. Για την αξιολόγηση αυτών των επιπτώσεων, ο Crop Water Stress Index (CWSI) και άλλοι δίκτες όπως ο Stress Degree Day (SDD) βασισμένοι στη διαφορά θερμοκρασίας κόμης–αέρα αποτελεί ένα αποτελεσματικό, μη καταστροφικό εργαλείο παρακολούθησης της υδατικής καταπόνησης φυτών σε πραγματικό χρόνο (Boyaci et al., 2024).

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Επίδραση των αγροβολταϊκών στο μικροκλίμα

Η κάλυψη, ο προσανατολισμός και η διάταξη των Φ/Β επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας και την ένταση/ομοιομορφία φωτός. Για παράδειγμα, κάλυψη 50% μείωσε την ακτινοβολία κατά 64% αλλά δημιούργησε ανομοιογενή φωτισμό (Gnayem et al., 2024; Cossu et al., 2014). Η διάταξη "σκακιέρας" προσφέρει καλύτερη κατανομή φωτός σε σχέση με την ευθύγραμμη (Kadowaki et al., 2012), ενώ ημιδιαφανή πάνελ και δυναμικά σκίαστρα μειώνουν τις αρνητικές επιπτώσεις της σκίασης, ευνοώντας την ανάπτυξη φυτών (Hassanien et al., 2018; Ezzaeri et al., 2020). Αντίθετα, για φωτόφιλες καλλιέργειες, η υπερβολική σκίαση μπορεί να μειώσει τις αποδόσεις

2.2 Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο δείκτη CWSI

Η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει τη διαπνοή και τη φωτοσύνθεση, επηρεάζοντας άμεσα τη θερμοκρασία κόμης και συνεπώς τον CWSI. Υψηλή ακτινοβολία αυξάνει τη θερμοκρασία των φύλλων, ανεβάζοντας τον δείκτη σε συνθήκες υδατικής καταπόνησης, ενώ μειωμένη ακτινοβολία μπορεί να τον περιορίσει εφόσον υπάρχει επάρκεια νερού. Η αντίδραση αυτή εξαρτάται από τη στοματική αγωγιμότητα, το διαθέσιμο νερό, τη μορφολογία των φύλλων και τα χαρακτηριστικά του φυτικού είδους (Poirier-Pocovi and Bailey, 2020).

Στην παρούσα μελέτη διερευνάται η επίδραση των αγροβολταϊκών συστημάτων και τη διαμόρφωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην υδατική καταπόνηση θερμοκηπιακής καλλιέργειας αγγουριού, μέσω της εφαρμογής του CWSI και SDD οι οποίοι επιτρέπουν τη μη καταστρεπτική και δυναμική παρακολούθηση της κατάστασης των φυτών ως προς την επάρκεια νερού. Η μελέτη στοχεύει να συμβάλει στην κατανόηση των φυσιολογικών

αποκρίσεων των φυτών υπό διαφορετικά μικροκλιματικά σενάρια και να υποστηρίξει τη βιώσιμη διαχείριση υδατικών και ενεργειακών πόρων στον θερμοκηπιακό τομέα.

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε θερμοκήπιο γοτθικού τύπου με πολλαπλές σήραγγες, στις πιλοτικές εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βελεστίνο (39°22′, 22°44′, 85 m). Το θερμοκήπιο είχε συνολική επιφάνεια 1500 m² και ήταν χωρισμένο σε έξι διαμερίσματα των 240 m². Τέσσερα από αυτά χρησιμοποιήθηκαν για καλλιέργεια, εξοπλισμένα με έξι υδροπονικά αυλάκια και σάκους πετροβάμβακα (Grodan International, Roermond, Ολλανδία). Σε δύο καλλιεργητικά διαμερίσματα εγκαταστάθηκαν φωτοβολταϊκά πάνελ στο ύψος της υδρορροής. Εμπλουτισμός με CO_2 εφαρμόστηκε σε δύο διαμερίσματα – ένα με φωτοβολταϊκά και ένα χωρίς – ώστε να μελετηθούν οι μεμονωμένες και συνδυασμένες επιδράσεις σκίασης και CO_2 στην απόδοση της καλλιέργειας. Τα φωτοβολταϊκά κάλυπταν 60 m² ανά διαμέρισμα, ήταν διπλής όψης με κάλυμμα πλεξιγκλάς τοποθετημένα σε σύστημα ηλιακής παρακολούθησης μίας κατεύθυνσης και παρείχαν σκίαση 30%. Στον εμπλουτισμό CO_2, το αέριο διοχετευόταν μέσω διάτρητων σωλήνων κάτω από κάθε υδροπονικό αυλάκι. Η παροχή ήταν ενεργή από 8:00 π.μ. έως 6:30 μ.μ., έως ότου η συγκέντρωση έφτανε τα 650 ppm, με τα παράθυρα κλειστά.

Τα φυτά αγγουριού (Cucumis sativus cv. Columbia) μεταφυτεύτηκαν στις 12 Σεπτεμβρίου 2024 σε κύβους πετροβάμβακα (7.5 × 7.5 cm), με πυκνότητα φύτευσης 1.8 φυτά/m². Η καλλιέργεια πραγματοποιήθηκε σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα και η διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ήταν 91 ημέρες. Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε τέσσερις μεταχειρίσεις, καθεμία εφαρμοσμένη σε ξεχωριστό διαμέρισμα: (α) έλεγχος χωρίς φωτοβολταϊκά και χωρίς CO_2, (β) εμπλουτισμός με CO_2 μόνο, (γ) φωτοβολταϊκά μόνο και (δ) συνδυασμός φωτοβολταϊκών και εμπλουτισμού με CO_2. Τα φυτά όλων των μεταχειρίσεων αρδεύονταν με υδατικό διάλυμα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται απορροή 30%.

Οι κλιματικές συνθήκες εντός του θερμοκηπίου (air temperature, Ta, oC; Relative humidity, RH, %) ρυθμίζονταν αυτόματα και καταγράφονταν συνεχώς μέσω ολοκληρωμένου υπολογιστικού συστήματος (SERCOM, Automation SL, Lisse, Ολλανδία). Η ένταση φωτός (J cm^{-2}) μετριόταν με κβαντικούς αισθητήρες (Apogee SQ 500-SS, Apogee Instruments, Logan UT, ΗΠΑ). Ένας αισθητήρας τοποθετήθηκε εξωτερικά, στην κορυφή του θερμοκηπίου (7,5 m), για μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας, και τέσσερις στο ύψος της υδρορροής (ένας ανά διαμέρισμα) για καταγραφή της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR). Η συνολική ημερήσια ακτινοβολία PAR (J cm^{-2}) μετατρεπόταν σε W m^{-2} με διαίρεση με τον χρόνο καταγραφής και πολλαπλασιασμό επί 10^4. Η ημερήσια ποσότητα άρδευσης και απορροής (L), ανάλογα με τη μεταχείριση, καταγραφόταν αυτόματα σε βάση δεδομένων Access (Microsoft Corporation, 2021, ΗΠΑ). Οι παράμετροι ανάπτυξης (ύψος φυτών και αριθμός φύλλων) παρακολουθούνταν εβδομαδιαία.

3.1 Μεθοδολογία υπολογισμού διαπνοής και θερμικών-υδατικών δεικτών

Η εκτίμηση της καθαρής διαπνοής προσεγγίστηκε έμμεσα, βάσει της αρχής του υδατικού

ισοζυγίου. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι η διαπνοή ισούται προσεγγιστικά με τη διαφορά μεταξύ της ποσότητας άρδευσης και απορροής (Grewal et al., 2011). Για την έκφραση της διαπνοής σε ενεργειακούς όρους (W m^{-2}), το υδατικό ισοζύγιο όλης της καλλιέργειας προσαρμόστηκε σε L m-2 και πολλαπλασιάστηκε με τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού (λ ≈ 2,45 MJ kg^{-1}), σύμφωνα με την ενεργειακή μορφή της εξατμισοδιαπνοής.

Ο δείκτης SDD (= Tc-Ta) στηρίζεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της φυλλικής επιφάνειας και του περιβάλλοντος αέρα (Idso, 1981). Ο δείκτης CWSI (Crop Water Stress Index) ορίζεται σύμφωνα με τους Jackson et al. (1988) ως εξής: CWSI = ((Tc - Ta) - (Tc - Ta)LL)/ ((Tc - Ta)UL - (Tc - Ta)LL) όπου, (Tc - Ta) είναι η παρατηρούμενη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του φυλλώματος και του αέρα, (Tc - Ta)LL είναι το κατώτερο όριο, που αντιστοιχεί σε συνθήκες χωρίς υδατική καταπόνηση. Η τιμή (Tc - Ta) υπολογίζεται σύμφωνα με τους Jackson et al. (1981), (Tc - Ta) = [rA * (Rn - λE)] / (ρ * Cp), όπου Rn είναι η καθαρή ακτινοβολία (W/m^2), δηλαδή η συνολική εισερχόμενη και εξερχόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια, λE: ροή λανθάνουσας θερμότητας (W/m^2), που αντιστοιχεί στην ενέργεια που καταναλώνεται για εξατμισοδιαπνοή, ρ η πυκνότητα του αέρα (1.204 kg/m^3), Cp η ειδική θερμότητα του αέρα σε σταθερή πίεση (1006 J/kg·K), rA η αεροδυναμική αντίσταση (s/m), που εκφράζει την αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από την κόμη στον αέρα. (Tc - Ta)UL είναι το ανώτερο όριο, που αντιστοιχεί σε πλήρως καταπονημένη (μη διαπνεόμενη) κατάσταση και ορίζεται σταθερά στους 5 ^oC. Η τιμή (Tc - Ta)LL υπολογίζεται θεωρώντας ότι η αντίσταση διαπνοής rC= 0, σύμφωνα με τους Jackson et al. (1981) και Zhang et al. (2024), (Tc - Ta)LL = [(rA * Rn) / (ρ* Cp) * (γ / (Δ + γ))] - [VPD / (Δ + γ)], όπου, γ η ψυχρομετρική σταθερά (0.066 Pa/K), Δ η κλίση της καμπύλης κορεσμένου υδρατμού ως προς τη θερμοκρασία (Pa/K), VPD, έλλειμμα πίεσης υδρατμών (Pa). Οι τιμές των Δ και VPD υπολογίστηκαν σύμφωνα με τους Katsoulas et al. (2001) και Monteith και Unsworth (2013). Ο υπολογισμός του δείκτη πραγματοποιήθηκε σε ημερήσια βάση, χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο των κλιματικών δεδομένων που καταγράφηκαν από 8:00 π.μ. έως 6:30 μ.μ.. Οι πρώτες 20 ημέρες της καλλιέργειας δεν λήφθηκαν υπόψη στην ανάλυση, καθώς παρατηρήθηκαν σφάλματα στις τιμές του δείκτη λόγω της περιορισμένης φυλλικής επιφάνειας κατά το αρχικό στάδιο ανάπτυξης

3.2 Στατιστική ανάλυση

Η σύγκριση των μέσων τιμών πραγματοποιήθηκε με μονοπαραγοντική ανάλυση διακύμανσης (one-way ANOVA) σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($p \leq 0.05$), με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, IBM, ΗΠΑ).

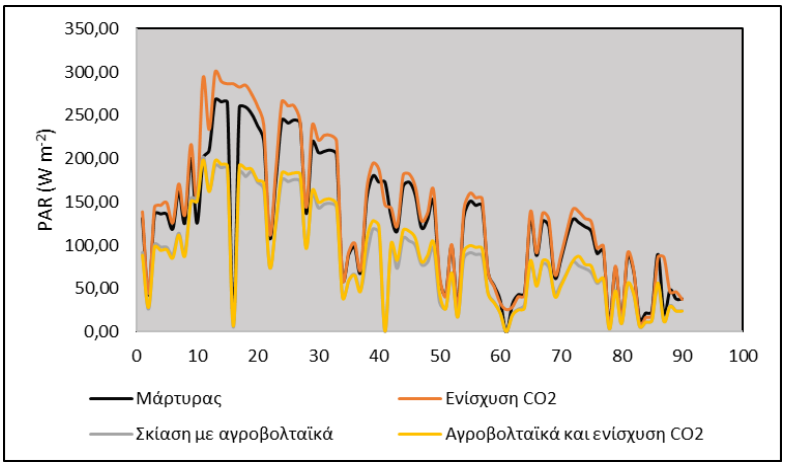
4. Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η μεταβολή της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) κατά την καλλιεργητική περίοδο υπό τέσσερα διαφορετικά καλλιεργητικά σενάρια. Οι υψηλότερες τιμές καταγράφονται στον μάρτυρα και στην ενίσχυση CO_2, όπου η ακτινοβολία δεν περιορίζεται. Αντίθετα, στη σκίαση από αγροβολταϊκά παρατηρείται αισθητή μείωση της PAR, κυρίως τις ώρες αιχμής ($p < 0,5$). Ο συνδυασμός σκίασης και CO_2 διατηρεί τη χαμηλή PAR, αλλά η προσθήκη CO_2 ενδέχεται να μετριάζει τις επιπτώσεις της.

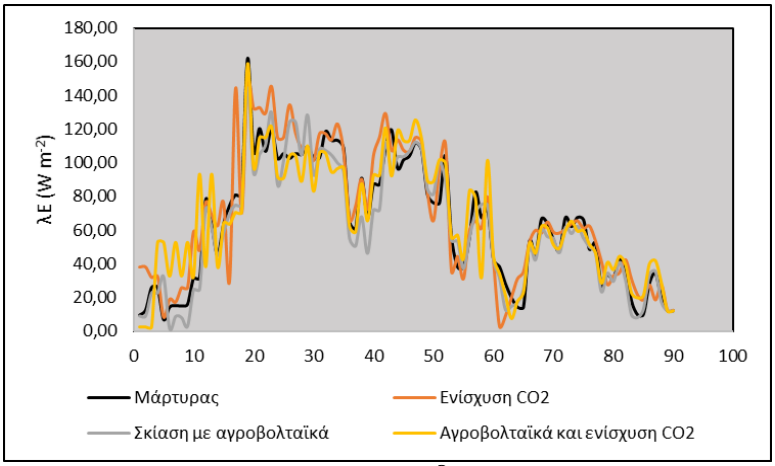
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η διακύμανση της λανθάνουσας θερμότητας (λE). Οι τιμές μεταξύ των μεταχειρίσεων ακολουθούν παρόμοιο μοτίβο με μικρές αποκλίσεις. Οι

διαφορές αντανακλούν μεταβολές στη διαπνοή και στην εξάτμιση, επηρεαζόμενες από τις συνθήκες φωτισμού και CO_2. Συνολικά, η λανθάνουσα θερμότητα παραμένει σχετικά σταθερή μεταξύ των σεναρίων ($p > 0,05$).

Το Σχήμα 3 απεικονίζει τις ημερήσιες τιμές του δείκτη SDD κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, για τέσσερις διαφορετικές μεταχειρίσεις. Στις πρώτες ημέρες καλλιέργειας, παρατηρείται έντονη διακύμανση του δείκτη, με το σενάριο του μάρτυρα να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή, ξεπερνώντας το 1,5, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη θερμική καταπόνηση ($p< 0,05$). Αντίθετα, στα σενάρια που περιλαμβάνουν σκίαση, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με ενίσχυση CO_2, οι τιμές του SDD είναι αισθητά χαμηλότερες, δείχνοντας ότι η σκίαση συμβάλλει ουσιαστικά στον περιορισμό της θερμικής καταπόνησης. Καθώς η καλλιέργεια εξελίσσεται, όλες οι καμπύλες συγκλίνουν, υποδηλώνοντας μια γενική μείωση ή σταθεροποίηση της θερμικής καταπόνησης. Σε αυτό το διάστημα, η επίδραση των παρεμβάσεων είναι πιο ήπια, όμως η σκίαση με αγροβολταϊκά εξακολουθεί να προσφέρει ελαφρύ πλεονέκτημα σε σύγκριση με τον μάρτυρα και την απλή ενίσχυση CO_2. Συνολικά, ο συνδυασμός σκίασης και εμπλουτισμού CO_2 φαίνεται να προσφέρει τη βέλτιστη διαχείριση της θερμικής καταπόνησης, ιδίως στο αρχικό στάδιο, όπου οι ανάγκες προσαρμογής των φυτών είναι υψηλότερες.

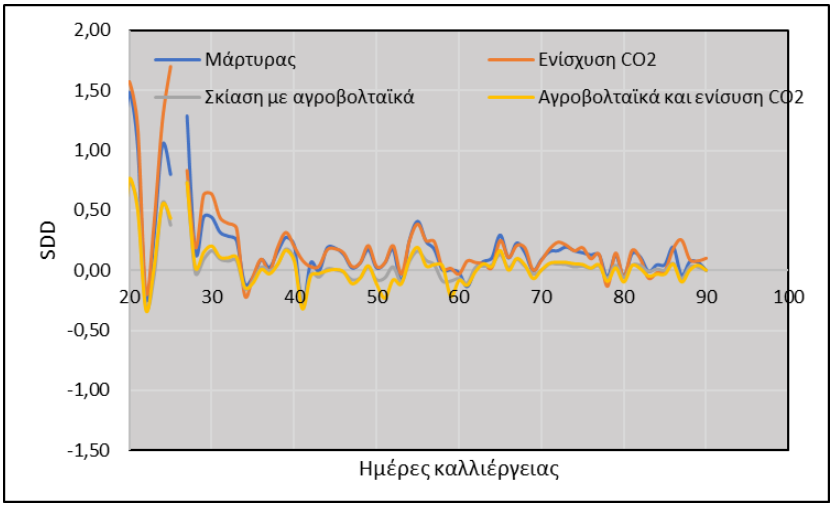


Σχήμα 1. Μεταβολή της PAR ακτινοβολίας (W m^{-2}) για τις διαφορετικές μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου του αγγουριού.

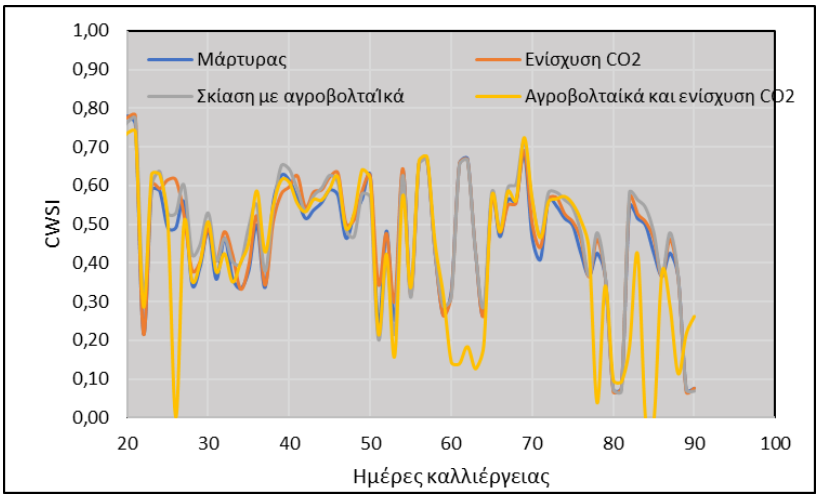


Σχήμα 2. Μεταβολή της διαπνοής (λE, W m^{-2}) για τις διαφορετικές μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου του αγγουριού.

Το Σχήμα 4 παρουσιάζει τη διακύμανση του CWSI κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Όσο υψηλότερη η τιμή (πλησιέστερα στο 1), τόσο εντονότερη η υδατική καταπόνηση των φυτών. Όπως φαίνεται, οι καμπύλες των διαφορετικών μεταχειρίσεων είναι μεταξύ τους παραπλήσιες, ιδιαίτερα από τα μέσα της περιόδου και μετά, με το CWSI να κυμαίνεται γενικά μεταξύ 0,3 και 0,7, υποδεικνύοντας μέτρια επίπεδα υδατικής καταπόνησης. Μικρές διαφοροποιήσεις εμφανίζονται κυρίως στις αρχικές ημέρες, με κάποιες μεταχειρίσεις να παρουσιάζουν οριακά υψηλότερες τιμές. Ωστόσο, σε συγκεκριμένα διαστήματα —όπως μεταξύ των ημερών 60–70— διαφαίνονται διαφορές μεταξύ των σεναρίων ($p < 0,05$), με τη μεταχείριση που αντιστοιχεί στον συνδυασμό σκίασης και ενίσχυσης CO_2 να παρουσιάζει ελαφρώς χαμηλότερες τιμές CWSI σε σχέση με τις υπόλοιπες. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη συνολική ποσοστιαία μείωση του δείκτη σε σχέση με τη μαρτυρική καλλιέργεια: η εφαρμογή CO_2 μείωσε τον δείκτη κατά 3,87%, η σκίαση μέσω αγροβολταϊκών κατά 5,52%, ενώ ο συνδυασμός των δύο παρεμβάσεων οδήγησε στη μεγαλύτερη μείωση, της τάξης του 8,65%.



Σχήμα 3. Μεταβολή του δείκτη Stress Degree Day (SDD) για τις διαφορετικές μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου του αγγουριού.



Σχήμα 4. Μεταβολή του δείκτη Crop Water Stress Index (CWSI) για τις διαφορετικές μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου του αγγουριού.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα δείχνουν ξεκάθαρα πως η σκίαση που προσφέρουν τα αγροβολταϊκά επηρεάζει σημαντικά τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR), μειώνοντάς την ιδιαίτερα τις ώρες αιχμής. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα πάνελ περιορίζουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, παρά τη μείωση της PAR, η ανάπτυξη των φυτών όχι μόνο δεν περιορίστηκε, αλλά βελτιώθηκε σημαντικά στις μεταχειρίσεις με σκίαση, ειδικά όταν αυτή συνδυάστηκε με εμπλουτισμό CO_2. Η σταθερότητα της λανθάνουσας θερμότητας (λΕ) μεταξύ των μεταχειρίσεων υποδηλώνει ότι οι αλλαγές στην εξάτμιση και διαπνοή ήταν ήπιες, πιθανόν λόγω της αντισταθμιστικής επίδρασης της σκίασης και της αυξημένης συγκέντρωσης CO_2. Η μείωση του δείκτη θερμικής καταπόνησης (SDD) στα σενάρια με σκίαση καταδεικνύει πως η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας βοηθά στην αποφυγή υπερβολικής θερμικής καταπόνησης, κυρίως στα κρίσιμα πρώτα στάδια της καλλιέργειας. Αυτό το εύρημα επιβεβαιώνει ότι η σκίαση λειτουργεί ως προστατευτικός μηχανισμός για τα φυτά, μειώνοντας την καταπόνηση που προκαλεί η υψηλή θερμοκρασία. Παράλληλα, η ανάλυση του CWSI δείχνει ότι η υδατική καταπόνηση μειώνεται περισσότερο στον συνδυασμό σκίασης και CO_2, υπογραμμίζοντας τη σημαντική συμβολή και των δύο παραγόντων στη διατήρηση καλύτερης υδατικής ισορροπίας. Η αυξημένη βιομάζα — τόσο σε ύψος όσο και σε αριθμό φύλλων — στις μεταχειρίσεις με αγροβολταϊκά και CO_2 ενισχύει την υπόθεση ότι η σκίαση δεν περιορίζει την ανάπτυξη, αλλά αντίθετα δημιουργεί ένα πιο ευνοϊκό μικροκλίμα, που μαζί με την αυξημένη συγκέντρωση CO_2 βελτιώνει τη φωτοσύνθεση και τη φυτική ανάπτυξη. Συνολικά, τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι η χρήση αγροβολταϊκών μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη πρακτική για τη βελτίωση της καλλιέργειας αγγουριού, ιδίως όταν συνδυάζεται με ενίσχυση CO_2. Η σκίαση μειώνει τη θερμική καταπόνηση και την υδατική καταπόνηση, ενώ η παρουσία αυξημένου CO_2 προσφέρει επιπλέον ώθηση στην ανάπτυξη, δημιουργώντας συνθήκες πιο ευνοϊκές για την παραγωγή.

Ευχαριστίες

Το παρόν έργο έχει λάβει χρηματοδότηση από το πρόγραμμα «Horizon Europe» για τον συντονισμό και τις δράσεις υποστήριξης βάσει της συμφωνίας επιχορήγησης αριθ. 101096056 (ακρωνύμιο έργου: REGACE).

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agostini, A., Rivaroli, M., Fantin, V., και Masoni, P., 2021. *Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy*. *Applied Energy*, 282, 116041.

Boyaci, M., Yalcin, E., και Ersus, S., 2024. *Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for High Tunnel Greenhouse Tomatoes under Different Irrigation Levels*. *Atmosphere*, 15(2), 205.

Cossu, M., Murgia, L., Ledda, L., Deligios, P.A., Sirigu, A., Chessa, F., et al., 2014. *Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity*. *Applied Energy*, 133, 89–100.

Ezzaeri, K., Fatnassi, H., Wifaya, A., Bazgaou, A., Aharoune, A., Poncet, C., et al., 2020. *Performance of photovoltaic canarian greenhouse: A comparison study between summer and winter seasons*. *Solar Energy*, 198, 275–282.

Fernández, E. F., Villar-Fernández, A., Montes-Romero, J., Ruiz-Torres, L., Rodrigo, P. M., Manzaneda, A. J., & Almonacid, F. (2022). Global energy assessment of the

potential of photovoltaics for greenhouse farming. *Applied Energy*, 309, 118474.

Gnayem, N., Magadley, E., Haj-Yahya, A., Masalha, S., Kabha, R., Abasi, A., Barhom, H., Matar, M., Attrash, M., & Yehia, I., 2024. *Examining the effect of different photovoltaic modules on cucumber crops in a greenhouse agrivoltaic system: A case study*. *Biosystems Engineering*, 241, 83–94.

Grewal, H. S., Maheshwari, B., & Parks, S. E. (2011). Water and nutrient use efficiency of a low- cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: An Australian case study. *Agricultural Water Management, 98*(5), 841–846.

Hassanien, R.H.E., Li, M., & Yin, F., 2018. *The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production*. *Renewable Energy*, 121, 377–388.

Idso, S.B., 1981. *A research note on the concept of crop water stress index*. *Irrigation Science*, 2(3), 233–240.

Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., & Pinter, P.J., 1988. *Canopy temperature as a crop water stress indicator*. *Water Resources Research*, 24(5), 1133–1138.

Kadowaki, M., Yano, A., Ishizu, F., Tanaka, T., & Noda, S., 2012. *Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth*. *Biosystems Engineering*, 111(3), 290– 297.

Katsoulas, N., Kittas, C., & Baille, A., 2001. *Evaluation of greenhouse microclimate and crop transpiration models*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107(1), 1–17.

Ma Lu, S., Amaducci, S., Gorjian, S., Haworth, M., Hägglund, C., Ma, T., Zainali, S., & Campana,

P. E. (2024). Wavelength-selective solar photovoltaic systems to enhance spectral sharing of sunlight in agrivoltaics. *Joule, 8*(9), 2483–2522.

Monteith, J.L., & Unsworth, M.H., 2013. *Principles of environmental physics: Plants, animals, and the atmosphere* (4η έκδ.). Academic Press.

Poirier-Pocovi, M., & Bailey, B.N., 2020. *Sensitivity analysis of four crop water stress indices to ambient environmental conditions and stomatal conductance*. *Agricultural Water Management*, 240, 106277.

Zhang, Q., Yang, X., Liu, C., Yang, N., Yu, G., Zhang, Z., Chen, Y., Yao, Y., & Hu, X., 2024. *Monitoring soil moisture in winter wheat with crop water stress index based on canopy-air temperature time lag effect*. *International Journal of Biometeorology*, 68(4), 647–659.

27. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΛ ΟΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΕΝΟΣ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Ν. Κατσούλας, Χ. Παπαϊωάννου, Σ. Φαλιάγκα, Ι. Ναουνούλης, Α. Σαπουνάς, Δ. Φείδαρος, Α. Μπαξεβάνου

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, 38446 Βόλος Μαγνησίας, Ελλάδα, nkatsoul@uth.gr

Περίληψη

Η σκίαση που προκαλεί η ενσωμάτωση αγροβολταϊκών (Agrivoltaics, AV) σε θερμοκήπια μπορεί να μεταβάλει το μικροκλίμα του θερμοκηπίου, επηρεάζοντας την θερμοκρασία, την σχετική υγρασία, το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR). Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε η επίδραση ενός AV συστήματος παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς και του εμπλουτισμού με CO_2 σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού για δύο καλλιεργητικές περιόδους. Οι μεταχειρίσεις περιλάμβαναν: (T_1) μάρτυρας, (T_2) μόνο εμπλουτισμός CO_2, (T_3) μόνο AV σύστημα και (T_4) συνδυασμός AV και εμπλουτισμού CO_2. Η παρουσία πάνελ μείωσε την PAR κατά 30%, όμως ο εμπλουτισμός με CO_2 βελτίωσε την παραγωγικότητα. Συνεπώς, ο συνδυασμός AV και CO_2 μπορεί να ενισχύσει την αποδοτικότητα θερμοκηπίων, απαιτώντας προσεκτικό σχεδιασμό για ισορροπία ενέργειας και παραγωγής.

Λέξεις-κλειδιά: φωτοβολταϊκά πάνελ, μικροκλίμα, διπλή χρήση γης

ASSESSMENT OF PHOTOVOLTAIC PANELS AND CARBON DIOXIDE ENRICHMENT ON THE MICROCLIMATE OF A HYDROPONIC GREENHOUSE

N. Katsoulas✉, C. Papaioannou, S. Faliagka, I. Naounoulis, A. Sapounas, D. Feidaros, A. Baxevanou,

Laboratory of Agricultural Constructions and Environmental Control, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446, Volos, Magnesia, Greece, ✉nkatsoul@uth.gr

Abstract

The shading of the integration of agrivoltaics (AV) into greenhouses can alter the greenhouse microclimate, affecting temperature, relative humidity, carbon dioxide (CO_2), and photosynthetically active radiation (PAR). In the present study, the effects of a dynamic AV system with solar-tracking and CO_2 enrichment were investigated in a hydroponic cucumber crop over two growing seasons. The treatments included: (T1) control, (T2) CO_2 enrichment only, (T3) AV system only, and (T4) a combination of AV and CO_2 enrichment. The presence of panels reduced PAR by 30%, but CO_2 enrichment improved productivity. Therefore, the combination of AV and CO_2 can enhance greenhouse efficiency, requiring careful design to balance energy and crop production.

Keywords: photovoltaic panels, microclimate, dual land use

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για βιωσιμότητα και ενεργειακή αποδοτικότητα στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες έχει ενισχύσει το ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση και την ανάπτυξη αγροβολταϊκών συστημάτων (AV) στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις. Τα AV συστήματα αποτελούν μια καινοτόμο στρατηγική που επιτρέπει τη συνδυασμένη παραγωγή γεωργικών προϊόντων και ηλεκτρικής ενέργειας στην ίδια επιφάνεια, αξιοποιώντας τη γη με διπλό τρόπο (Dupraz et al., 2011; Weselek et al., 2019).

Τα αγροβολταϊκά συστήματα όταν τοποθετούνται στην οροφή της θερμοκηπιακής εγκατάστασης, επιδρούν στο μικροκλίμα, τροποποιώντας παραμέτρους όπως η προσπίπτουσα στην καλλιέργεια ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία. Η μερική σκίαση που προκαλούν τα αγροβολταϊκά πάνελ μειώνει σημαντικά την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (Photosynthetically active radiation, PAR) , με άμεση επίδραση στη φωτοσύνθεση και συνεπώς στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών (Elamri et al., 2018).

Σε συνθήκες πλεονάζουσας ηλιακής ακτινοβολίας, όπως η θερινή περίοδος, η εφαρμογή σκίασης σε ποσοστό 20-40% δύναται να επιφέρει σημαντικά ευνοϊκές μεταβολές στο μικροκλίμα της καλλιέργειας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας των φύλλων και του ρυθμού διαπνοής, καθώς και βελτίωση του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών, ενώ παράλληλα ενισχύεται η ομοιογενής διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της κόμης των φυτών (Lorenzo et al., 2006; Elamri et al., 2018). Η τροποποίηση αυτή του μικροκλίματος συμβάλλει στην αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης του νερού και υπό ξηροθερμικές κλιματικές συνθήκες, μπορεί όχι μόνο να διατηρήσει αλλά και να ενισχύσει την τελική απόδοση της καλλιέργειας (Allali et al., 2025).

Αντιθέτως, κατά τις χειμερινές περιόδους ή υπό παρατεταμένες συννεφιασμένες συνθήκες, η περιορισμένη ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να λειτουργήσει ως περιοριστικός παράγοντας για τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα, επηρεάζοντας αρνητικά τη φυτική ανάπτυξη και την τελική απόδοση. Ενδεικτικά, σε καλλιέργειες αγγουριού καταγράφηκε μείωση της παραγωγής έως και 25% υπό συνθήκες έντονης σκίασης (Kitta et al., 2012), γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη για προσεκτική διαχείριση της διαθέσιμης ακτινοβολίας σε αγροβολταϊκά συστήματα.

Μία προτεινόμενη στρατηγική αντιστάθμισης είναι η ενσωμάτωση ημιδιαφανών ή διπλής όψης φωτοβολταϊκών πάνελ, τα οποία επιτρέπουν τη μερική διέλευση της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας, ενώ ταυτόχρονα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η χρήση AV πάνελ με διαπερατότητα 30–40%, σε συνδυασμό με βελτιστοποιημένες γεωμετρικές διατάξεις (π.χ. ρυθμιζόμενη κλίση, μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ σειρών) εξασφαλίζουν επαρκή επίπεδα φωτεινότητας για την καλλιέργεια (Ravishankar et al., 2022). Παράλληλα, η σκίαση μπορεί να μειώσει τις ενεργειακές απαιτήσεις ψύξης έως και 30% σε περιοχές με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία.

Λαμβάνοντας υπόψη το αυξανόμενο ενδιαφέρον για αγροβολταϊκά συστήματα και τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτινοβολίας, διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και της φυσιολογικής απόκρισης των φυτών σε αυτά, η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της επίδρασης ενός αγροβολταϊκού συστήματος με παρακολούθηση της ηλιακή πορείας και του εμπλουτισμού με CO_2 στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Στόχος ήταν να διερευνηθεί πώς τα συστήματα αυτά επηρεάζουν τη διέλευση της PAR, τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και την αξιοποίηση της ακτινοβολίας, τόσο μεμονωμένα όσο και σε συνδυασμό με τον εμπλουτισμό CO_2, σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού κατά δύο καλλιεργητικές περιόδους (φθινόπωρο–χειμώνα και χειμώνα–άνοιξη).

2. ΥΛΙΚΑ – ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Πειραματικός σχεδιασμός

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο θερμοκηπιακό πάρκο του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βελεστίνο (39°22′, 22°44′, 85 m). Το θερμοκήπιο συνολικής επιφάνειας 1500 m^2, ήταν χωρισμένο σε έξι θαλάμους των 240 m^2, εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις με καλλιεργούμενη έκταση 190 m^2. Κάθε θάλαμος διέθετε έξι υδροπονικά κανάλια, ενώ το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των φυτών ήταν ο πετροβάμβακας (Grodan International, Ολλανδία). Σε δύο από τους τέσσερις θαλάμους εγκαταστάθηκαν φωτοβολταϊκά πάνελ διπλής όψης (Trisolar, Ισπανία) σε σύστημα μονού περιστρεφόμενου άξονα, καλύπτοντας 60 m^2, και παρέχοντας σκίαση περίπου 30%. Ο εμπλουτισμός με CO_2 εφαρμόστηκε σε έναν θάλαμο με αγροβολταϊκά και σε έναν χωρίς, μέσω διάτρητων σωλήνων τοποθετημένων κάτω από τα κανάλια καλλιέργειας.

Η καλλιέργεια που μελετήθηκε ήταν αγγούρι (*Cucumis sativus* cv. Columbia), σε ανοικτό υδροπονικό σύστημα με πυκνότητα φύτευσης 1,8 φυτά m^{-2}. Η μεταφύτευση έγινε σε κύβους πετροβάμβακα (7.5 × 7.5 cm). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε δύο καλλιεργητικές περιόδους: 12/09–12/12/2024 (φθινόπωρο–χειμώνας) και 16/01-03/04/2025 (χειμώνας-άνοιξη).

Ο πειραματικός σχεδιασμός περιλάμβανε τέσσερις μεταχειρίσεις, η καθεμία εφαρμοσμένη σε ξεχωριστό θάλαμο:

(T_1) Μάρτυρας, χωρίς φωτοβολταϊκά και χωρίς εμπλουτισμό με CO_2
(T_2) Μόνο εμπλουτισμός με CO_2
(T_3) Μόνο φωτοβολταϊκά πάνελ
(T_4) Συνδυασμός με φωτοβολταϊκά πάνελ και εμπλουτισμός με CO_2

Οι συνθήκες μικροκλίματος του θερμοκηπίου ρυθμίζονταν και καταγράφονταν αυτόματα (SERCOM, Automation SL, Ολλανδία). Η ένταση και ποιότητα της ακτινοβολίας μετρήθηκαν με κβαντικούς αισθητήρες (Apogee SQ 500-SS, ΗΠΑ). Ένας αισθητήρας τοποθετήθηκε εξωτερικά (7.5 m ύψος) για την καταγραφή της ολικής ακτινοβολίας, ενώ τέσσερις αισθητήρες τοποθετήθηκαν εσωτερικά (ένας ανά θάλαμο) στο ύψος της υδρορροής για την παρακολούθηση της PAR.

Η διαπερατότητα της PAR (PAR transmission, %) υπολογίστηκε ξεχωριστά για ηλιόλουστες και συννεφιασμένες ημέρες, ως λόγος της εσωτερικής προς την εξωτερική PAR τη χρονική στιγμή της μέγιστης εξωτερικής ακτινοβολίας. Για κάθε μεταχείριση, υπολογίστηκε η συσσωρευτική ημερήσια ενέργεια του φωτός (Daily Light Integral, DLI, mol_{PAR} m^{-2} day^{-1}). Επιπλέον υπολογίστηκε η αποτελεσματικότητα χρήσης του φωτός (Light Use Efficiency, LUE), η οποία ορίζεται ως η παραγόμενη ξηρή βιομάζα ανά μονάδα προσπίπτουσας PAR (g MJ_{PAR}^{-1} m^{-2}) και αποτελεί βασικό δείκτη της αποδοτικότητας της φωτοσύνθεσης και της παραγωγικότητας της καλλιέργειας.

2.2 Στατιστική Ανάλυση

Η σύγκριση των μέσων όρων πραγματοποιήθηκε με ανάλυση One Way ANOVA σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($p \leq 0,05$), με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS (Statistical Package for Social Sciences, IBM, Armonk, NY, ΗΠΑ). Επιπλέον,

χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος LSD (Least Significant Difference) στο επίπεδο σημαντικότητας 5%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Κλιματικά δεδομένα

Στην παρούσα μελέτη δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα μεταξύ των θαλάμων με και χωρίς αγροβολταϊκά πάνελ, γεγονός που αποδίδεται στη ρύθμιση του κλίματος μέσω του αυτοματισμού (Πίνακας 1).

Πίνακα 5. Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C) και η σχετική υγρασία (%) για τους μη σκιασμένους (T_1&T_2) και σκιασμένους (T_3&T_4) θαλάμους κατά τις δύο καλλιεργητικές περιόδους.

		Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)			
Περίοδος	**Μήνες**	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**
Φθινόπωρο-Χειμώνας	Σεπτ.	21,4±0,17	20,5±0,21	20,9±0,25	20,8±0,26
	Οκτ.	19,5±0,28	19,5±0,28	19,5±0,31	19,6±0,29
	Νοέμ.	16,6±0,27	16,6±0,27	16,6±0,28	16,7±0,28
	Δεκ.	14,5±0,27	14,4±0,26	14,2±0,31	14,4±0,28
Χειμώνας-Άνοιξη	Ιαν.	15,7±0,38	15,8±0,36	15,8±0,37	16,0±0,36
	Φεβ.	15,0±0,37	15,1±0,36	15,1±0,36	15,3±0,35
	Μάρ.	17,4±0,30	17,1±0,28	17,2±0,29	17,3±0,27
	Απρ.	17,9±0,09	17,6±0,09	17,6±0,07	17,6±0,09
		Μέση Μηνιαία Σχετική Υγρασία (%)			
Περίοδος	**Μήνες**	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**
Φθινόπωρο-Χειμώνας	Σεπτ.	81,4±1,66	80,5±1,73	75,4±1,69	78,1±1,68
	Οκτ.	84,8±1,06	84,9±1,07	82,0±1,19	82,5±1,14
	Νοέμ.	83,9±1,60	84,0±1,51	83,6±1,70	82,2±1,63
	Δεκ.	97,8±0,67	97,5±0,60	97,5±0,71	96,1±0,90
Χειμώνας-Άνοιξη	Ιαν.	73,9±1,56	73,3±1,52	71,2±1,63	72,1±1,62
	Φεβ.	75,9±1,34	76,5±1,42	73,7±1,43	73,9±1,42
	Μάρ.	78,7±1,52	80,9±1,44	76,8±1,55	78,3±1,57
	Απρ.	90,6±0,57	92,3±0,47	89,1±0,48	90,9±0,42

Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με προηγούμενες μελέτες, οι οποίες τονίζουν ότι, υπό ελεγχόμενες συνθήκες, η ενσωμάτωση αγροβολταϊκών συστημάτων δεν συνεπάγεται απαραίτητα αλλαγές στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Οι Marrou et al., (2013) ανέφεραν ότι σε ημι-ελεγχόμενα αγροβολταϊκά συστήματα, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα παρέμειναν σταθερές, παρά τη σημειακή σκίαση που προκαλούν τα αγροβολταϊκά πάνελ. Αντίστοιχα, οι Ezzaeri et al., (2018) διαπίστωσαν ότι σε μεσογειακά θερμοκήπια με μερική κάλυψη φωτοβολταϊκών (έως 25%), οι μικροκλιματικές συνθήκες διατηρήθηκαν εντός των βέλτιστων ορίων για παραγωγή λαχανοκομικών προϊόντων, εφόσον η διαχείριση του αερισμού και της θερμοκρασίας ήταν επαρκής. Συνεπώς, σε τεχνολογικά εξοπλισμένα θερμοκήπια, η σκίαση από αγροβολταϊκά μπορεί να ελεγχθεί αποτελεσματικά, επιτρέποντας ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της παραγωγής και της ενεργειακής απόδοσης.

3.2 Διαθεσιμότητα φωτός

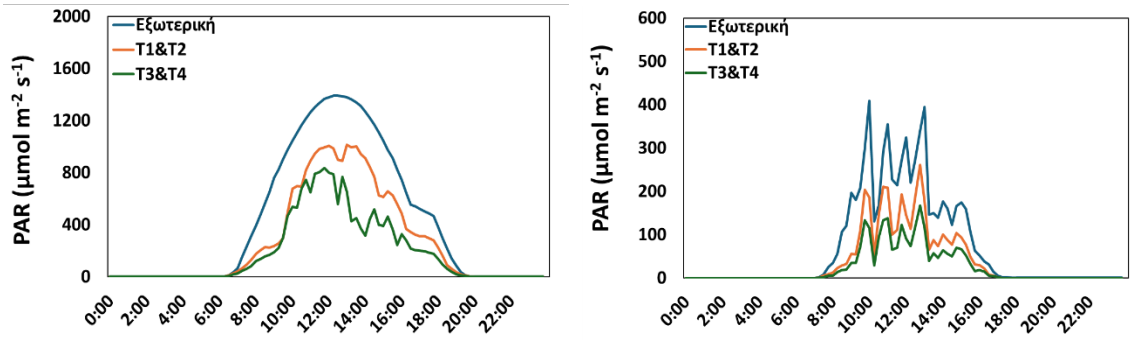
Οι μετρήσεις της σωρευτικής PAR ανέδειξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των θαλάμων με και χωρίς σκίαση από αγροβολταϊκά (Πίνακας 2). Κατά την 1η και 2η καλλιεργητική περίοδο, η προσπίπτουσα PAR στους μη σκιασμένους θαλάμους (T_1&T_2) ανήλθε σε περίπου 200 και 350 MJ m^{-2}, αντίστοιχα, περίπου 33% περισσότερη συγκριτικά με την εισερχόμενη ακτινοβολία στους σκιασμένους θαλάμους (T_3&T_4).

Πίνακας 6. Μέση αθροιστική ηλιακή ακτινοβολία (MJ_{PAR} m^{-2}) και ποσοστό διαπερατότητας της PAR (%) για τους μη σκιασμένους (T_1&T_2) και σκιασμένους (T_3&T_4) θαλάμους κατά τις δύο καλλιεργητικές περιόδους.

	Αθροιστική ακτινοβολία (MJ_{PAR} m^{-2})			**Διαπερατότητα της PAR (%)**	
Περίοδος	**Εξωτερική**	**T_1 & T_2**	**T_3 & T_4**	**T_1 & T_2**	**T_3 & T_4**
Φθινόπωρο-Χειμώνας	369,0±0,50	199,8±8,91	133,3±2,25	54,2±2,41	36,1±0,61
Χειμώνας-Άνοιξη	638,7±0,50	348,2±17,94	244,5±3,32	54,5±2,80	38,3±0,50

Η ημερήσια ωριαία καμπύλη διακύμανσης της PAR ακολουθούσε κανονική κατανομή τις ηλιόλουστες ημέρες ενώ σε συννεφιασμένες ημέρες καταγράφηκαν έντονες διακυμάνσεις (**Σχήμα 2**).

Η σκίαση από τα αγροβολταϊκά μείωσε τη μετάδοση φωτός κατά 20-40%, με την επίδραση να είναι εντονότερη υπό συνθήκες διάχυτης ακτινοβολίας, όπου η διαπερατότητα περιορίστηκε στο 36% στους σκιασμένους θαλάμους (T_3 & T_4) έναντι 57% στους μη σκιασμένους (T_1 & T_2). Αντίστοιχα ποσοστά μείωσης (25-60%) έχουν αναφερθεί και σε άλλες μελέτες αγροβολταϊκών συστημάτων, ανάλογα με τον τύπο, την πυκνότητα και τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πάνελ (Waller et al., 2021; Magadley et al., 2022).



(α) **(β)**

Σχήμα 2. Ωριαία μεταβολή της PAR (μmol m^{-2} s^{-1}) κατά τη διάρκεια μιας (α) ηλιόλουστης ημέρας και (β) μιας συννεφιασμένης ημέρας για τους μη σκιασμένους (T_1&T_2) και σκιασμένους (T_3&T_4) θαλάμους.

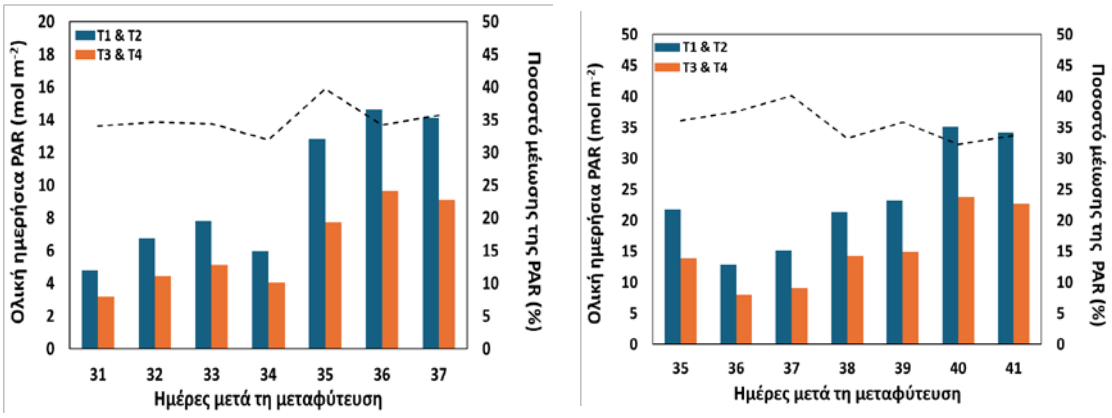
Η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της διαπερατότητας της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας και του βαθμού κάλυψης από αγροβολταϊκά συστήματα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στα θερμοκήπια τέτοιου τύπου. Η υπερβολική κάλυψη δύναται να περιορίσει τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα, οδηγώντας σε μείωση της παραγωγικότητας (Marrou et al., 2013; Elamri et al., 2018). Προηγούμενες μελέτες έχουν επισημάνει ότι η σκίαση από αγροβολταϊκά μπορεί να τροποποιήσει το μικροκλίμα και τη φωτοσυνθετική

δραστηριότητα, καθιστώντας απαραίτητο τον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό και την εργονομική διάταξη των συστημάτων για την επίτευξη μιας ισορροπημένης συνύπαρξης ενεργειακής απόδοσης και γεωργικής παραγωγής (Amaducci et al., 2018; Dupraz et al., 2011).

Στον Πίνακα 3, παρουσιάζεται ο μέσος όρος της αθροιστικής ημερήσιας ενέργειας του φωτός (Daily Light Integral, DLI) για κάθε μήνα των δυο καλλιεργητικών περιόδων. Ο DLI αποτελεί κρίσιμο δείκτη για τη φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών. Κατά την περίοδο φθινόπωρο–χειμώνας, οι μέσες μηνιαίες τιμές του DLI στους μη σκιασμένους θαλάμους (T_1 & T_2) μειώθηκαν από 13,85 σε 4,83 mol m^{-2}, ενώ στους σκιασμένους θαλάμους (T_3 & T_4) από 9,65 σε 2,97 mol m^{-2}, καταγράφοντας ποσοστά μείωσης 30–39% ανά μήνα, συγκρίνοντας τον Σεπτέμβριο με τον Δεκέμβριο αντίστοιχα.

Πίνακας 7. Μέση μηνιαία αθροιστική ενέργεια του φωτός (mol_{PAR} m^{-2}) για κάθε μήνα για τους μη σκιασμένους (T_1&T_2) και σκιασμένους (T_3&T_4) θαλάμους κατά τις δύο καλλιεργητικές περιόδους.

	Φθινόπωρο-Χειμώνας			
Μεταχειρίσεις	**Σεπτέμβριος**	**Οκτώβριος**	**Νοέμβριος**	**Δεκέμβριος**
T_1 & T_2	13,8±0,83	13,1±0,63	7,0±0,48	4,8±0,54
T_3 & T_4	9,6±0,58	8,9±0,45	4,4±0,29	3,0±0,33
	Χειμώνας-Άνοιξη			
	Ιανουάριος	**Φεβρουάριος**	**Μάρτιος**	**Απρίλιος**
T_1 & T_2	16,7±0,92	17,9±0,99	25,1±1,57	16,2±0,45
T_3 & T_4	10,6±0,58	11,6±0,66	19,3±1,19	9,9±0,20



Σχήμα 3. Μέση αθροιστική ημερήσια PAR (mol m^{-2}) για τους μη σκιασμένους (T_1&T_2) και σκιασμένους (T_3&T_4) θαλάμους κατά τη διάρκεια μίας εβδομάδας για την πρώτη (α) και (β) δεύτερη καλλιεργητική περίοδο, καθώς και το ποσοστό μείωσης της PAR (%).

Κατά την περίοδο χειμώνας-άνοιξη, ο DLI αυξήθηκε σημαντικά, φθάνοντας τα 25,14 mol m^{-2} τον Μάρτιο στους μη σκιασμένους θαλάμους, υπερβαίνοντας το ελάχιστο όριο των 15,0 mol m^{-2} d^{-1} που θεωρείται απαραίτητο για τη βέλτιστη ανάπτυξη της καλλιέργειας αγγουριού (Runkle, 2019; Ji et al., 2020; Cui et al., 2021). Η σκίαση από τα αγροβολταϊκά περιόρισε επίσης την διαθέσιμη PAR κατά 23–38%, με μικρότερη επίδραση την περίοδο της άνοιξης (Σχήμα 2).

3.3 Αποτελεσματικότητα χρήσης φωτός

Η αποτελεσματικότητα χρήσης φωτός (Light Use Efficiency, LUE) παρουσίασε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων και για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους, υπογραμμίζοντας την επίδραση των αγροβολταϊκών συστημάτων. Κατά την περίοδο φθινόπωρο-χειμώνας, η μειωμένη διαθεσιμότητα φωτός στις μεταχειρίσεις T_3 & T_4 οδήγησε σε αύξηση του LUE κατά 50% σε σχέση με τις T_1 & T_2, ενώ ο εμπλουτισμός CO_2 δεν παρουσίασε κάποια επίδραση.
Αντίθετα, στην περίοδο χειμώνας-άνοιξη, η μεταχείριση T_4 κατέγραψε LUE κατά 7% υψηλότερο από την T_3, ενώ η χαμηλότερη τιμή παρατηρήθηκε στη μεταχείριση T_1 (0,92 g MJ_{PAR}^{-1} m^{-2}). Η μειωμένη αποτελεσματικότητα της χρήσης του φωτός που παρατηρήθηκε στη δεύτερη καλλιεργητική περίοδο συγκριτικά με την πρώτη πιθανώς σχετίζεται με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες που επικρατούσαν στα πρώτα στάδια της καλλιέργειας (Πίνακας 1). Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες ιδιαίτερα κατά τα πρώτα στάδια καλλιέργειας επιβραδύνουν την ανάπτυξη και την σχηματισμό καρπών (Marcelis et al., 1993; Zhang et al., 2022) και δεδομένου ότι το μεγαλύτερο ποσοστό βιομάζας κατανέμεται στους καρπούς, επηρεάζεται σημαντικά ο δείκτης LUE.

Πίνακας 8. Αποτελεσματικότητα χρήσης του φωτός (g MJ_{PAR}^{-1} m^{-2}) για τους μη σκιασμένους (T_1&T_2) και σκιασμένους (T_3&T_4) θαλάμους κατά τις δύο καλλιεργητικές περιόδους.

	Αποτελεσματικότητα χρήσης φωτός (g MJ_{PAR}^{-1} m^{-2})	
Μεταχειρίσεις	**Φθινόπωρο-Χειμώνας**	**Χειμώνας-Άνοιξη**
T_1	$2,92\pm0,08^{\beta}$	$1,01\pm0,01^{\gamma}$
T_2	$2,92\pm0,06^{\beta}$	$0,92\pm0,01^{\delta}$
T_3	$4,30\pm0,18^{\alpha}$	$1,41\pm0,0\ 1^{\beta}$
T_4	$4,32\pm0,18^{\alpha}$	$1,51\pm0,02^{\alpha}$

Διαφορετικά γράμματα (α, β, γ, δ) στην ίδια στήλη, υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$).

Παρόμοιες μελέτες επιβεβαιώνουν ότι τα αγροβολταϊκά συστήματα μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τον δείκτη LUE (Morreti and Marucci, 2019; Espitia et al., 2024; Gnayem et al., 2024). Επιπλέον, οι ευεργετικές επιδράσεις του CO_2 στην καλλιέργεια, γίνονται περισσότερο εμφανείς υπό ιδανικές συνθήκες φωτισμού, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας (Jones and Massacci, 1990).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα παρουσίασαν ότι η σκίαση που προκλήθηκε από το σύστημα αγροβολταϊκών με παρακολούθηση της ηλιακής πορείας επηρέασε σημαντικά τη διαθεσιμότητα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, οι μεταχειρίσεις που βρίσκονταν υπό σκίαση από τα αγροβολταϊκά πάνελ δέχθηκαν κατά μέσο όρο 33% λιγότερη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία σε σύγκριση με τις μη σκιασμένες. Η μείωση αυτή ήταν ιδιαίτερα αισθητή κατά τους χειμερινούς μήνες, επηρεάζοντας το συνολικό ημερήσιο φως που ήταν διαθέσιμο στην καλλιέργεια.

Παρά τη σημαντική μείωση της διαθέσιμης ακτινοβολίας, τα φυτά που καλλιεργήθηκαν υπό τα αγροβολταϊκά πάνελ αξιοποίησαν το διαθέσιμο φως με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Και στις δύο καλλιεργητικές περιόδους, η αποτελεσματικότητα χρήσης φωτός ήταν σημαντικά αυξημένη στις σκιασμένες μεταχειρίσεις, γεγονός που υποδηλώνει την προσαρμογή των φυτών σε συνθήκες μειωμένης PAR.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο αυτό αποτελεί μέρος του έργου REGACE, το οποίο έχει λάβει χρηματοδότηση από το Πρόγραμμα Έρευνας και Καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο της Συμφωνίας Επιχορήγησης αριθ. 101096056.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Allali, F. E., Fatnassi, H., Demrati, H., Errais, R., Wifaya, A., & Aharoune, A., 2025. *Greenhouse Cooling Systems: A Systematic Review of Research Trends, Challenges, and Recommendations for Improving Sustainability.* Cleaner Engineering and Technology, 100973.

Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M., 2018. *Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production.* Applied energy, 220, 545-561.

Cui, J., Song, S., Yu, J., Liu, H., 2021. *Effect of daily light integral on cucumber plug seedlings in artificial light plant factory.* Horticulturae, *7*(6), 139.

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y, 2011. *Combining solar panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes.* Renewable Energy, 36(10), 2725–2732.

Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J. M., Dejean, C., Belaud, G., 2018. *Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces.* Agricultural water management, 208, 440-453.

Espitia, J. J., Velázquez, F. A., Rodriguez, J., Gomez, L., Baeza, E., Aguilar-Rodríguez, C. Espitia, J. J., Velázquez, F. A., Rodriguez, J., Gomez, L., Baeza, E., Aguilar-Rodríguez, C. E & Villagran, E., 2024. *Solar energy applications in protected agriculture: a technical and bibliometric review of greenhouse systems and solar technologies.* Agronomy, 14(12), 2791

Gnayem, N., Magadley, E., Haj-Yahya, A., Masalha, S., Kabha, R., Abasi, A., ... & Yehia, I., 2024. *Examining the effect of different photovoltaic modules on cucumber crops in a greenhouse agrivoltaic system: A case study. Biosystems Engineering*, *241*, 83-94.

Ji, F., Wei, S., Liu, N., Xu, L., & Yang, P., 2020. *Growth of cucumber seedlings in different varieties as affected by light environment*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 13(5), 73-78.

Jones, H.G., Massacci, A., 1990. *Estimation of the Light Limitation of Photosynthesis*. In: Current Research in Photosynthesis. Stockholm, Sweden, (pp. 3701-3704). Dordrecht: Springer Netherlands.

Kitta, E., Katsoulas, N., & Savvas, D., 2012. *Shading effects on greenhouse microclimate and crop transpiration in a cucumber crop grown under Mediterranean conditions.* Applied Engineering in Agriculture, 28(1), 129-140.

Magadley, E., Kabha, R., Dakka, M., Teitel, M., Friman-Peretz, M., Kacira, M., ... & Yehia, I., 2022. *Organic photovoltaic modules integrated inside and outside a polytunnel roof.* Renewable Energy, 182, 163-171.

Marcelis, L. F., & Hofman-Eijer, L. R. B., 1993. *Effect of temperature on the growth of individual cucumber fruits.* Physiologia Plantarum, 87(3), 321-328.

Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., Wery, J., 2013. *Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?* Agricultural and Forest Meteorology, 177, 117-132.

Ravishankar, E., Booth, R. E., Hollingsworth, J. A., Ade, H., Sederoff, H., DeCarolis, J. F., & O'Connor, B. T., 2022. *Organic solar powered greenhouse performance*

optimization and global economic opportunity. Energy & Environmental Science, 15(4), 1659-1671.

Runkle, E. R. I. K., 2019. *DLI 'requirements'*. Greenhouse Production News, 4.

Waller, R., Kacira, M., Magadley, E., Teitel, M., & Yehia, I., 2021. *Semi-transparent organic photovoltaics applied as greenhouse shade for spring and summer tomato production in arid climate.* Agronomy, 11(6), 1152.

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P.,2019. *Agrivoltaic systems: applications, challenges and opportunities.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 105, 200–211.

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P., 2019. *Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review.* Agronomy for sustainable development, 39 (4) 35.

Zhang, F., Luo, J., Yuan, C., Li, C., & Yang, Z., 2022. *A model for the effect of low temperature and poor light on the growth of cucumbers in a greenhouse*. Agronomy, 12(12), 2992.

28. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΙΕΣΕΩΝ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Β. Λάσκος, Ξ-Ε. Πανταζή, Β. Φράγκος, Μ. Καραγιοβανίδης, Α. Δενιζοπούλου

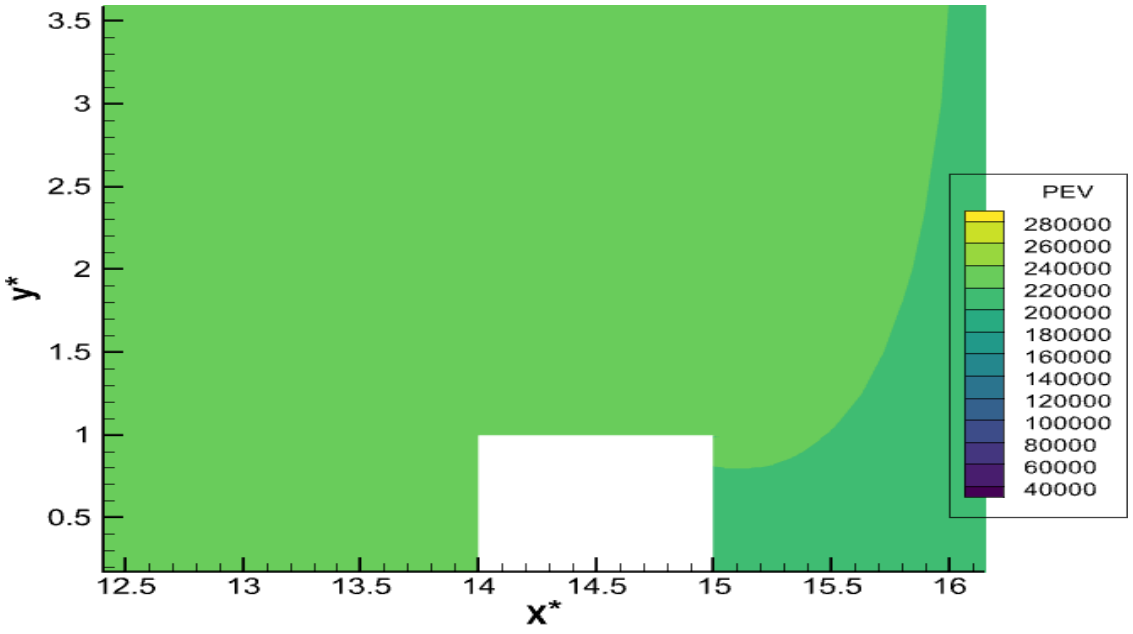
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης, Τμήμα Γεωπονίας, ΤΚ 54124,Θεσ/νίκη, e -mail: laskvasi@agro.auth.gr

Εκτεταμένη περίληψη

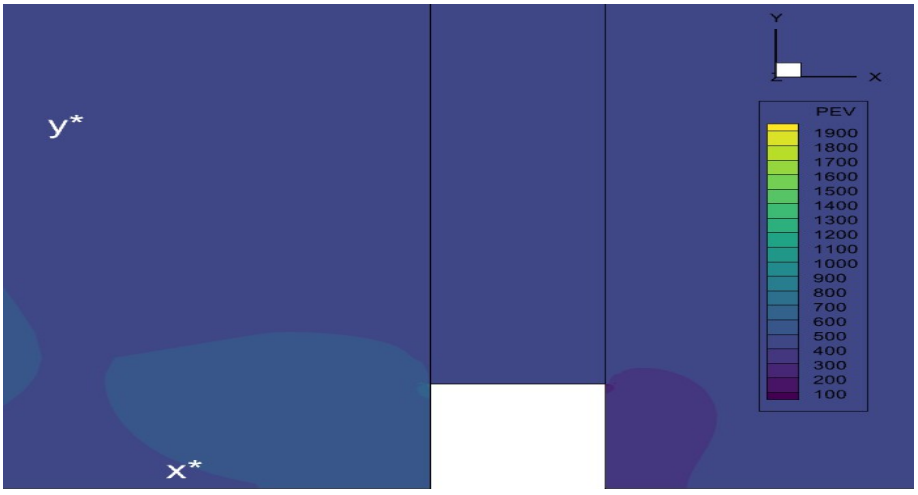
Στην παρούσα εργασία γίνεται διερεύνηση της κατανομής των συντελεστών πίεσης πάνω στην επιφάνεια ορθογωνικής αγροτικής κατασκευής που είναι τοποθετημένη μέσα σε αεροσήραγγα. Ο λόγος ύψος εμποδίου προς ύψος αεροσήραγγας είναι 1:9.6, ενώ ο λόγος ύψος εμποδίου προς πλάτος αεροσήραγγας είναι 1:20. Οι αδιάστατες πιέσεις υπολογίζονται επιλύοντας αριθμητικά τις τρισδιάστατες εξισώσεις κίνησης (Navier Stokes) και συνέχειας, θεωρώντας τη ροή ασυμπίεστη, ισόθερμη και σταθερή. Η επίλυση των διεπουσών εξισώσεων γίνεται με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων και με την χρήση παράλληλου προγραμματισμού με κώδικες FEM3D, διαμέσου της υπερυπολογιστικής συστοιχίας ARISTOTELIS. (που είναι ένα ισχυρό, σύγχρονο εργαλείο υποστήριξης επιστημονικών εφαρμογών μεγάλης κλίμακας, που τίθεται στη διάθεση των ερευνητών για τη διεξαγωγή απαιτητικών υπολογισμών και για την εξαγωγή έγκυρων επιστημονικών αποτελεσμάτων).

Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι κυβοειδή 27 κόμβων , όπου οι πιέσεις υπολογίζονται στις κορυφές κάθε κυβοειδούς. Οι μερικές μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα μετασχηματίζονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που επιλύεται με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Rapshon. Χρησιμοποιούνται οριακές συνθήκες μη ολίσθησης (no-slip), δηλαδή συνθήκες μηδενικών ταχυτήτων πάνω στα τοιχώματα και στο δάπεδο της αεροσήραγγας. Λίγο πριν την είσοδο της αεροσήραγγας θεωρείται ότι η ροή είναι ομοιόμορφη , ενώ λίγο μετά την είσοδο η ροή αποκτά παραβολικό προφίλ, που είναι χαρακτηριστικό της στρωτής ροής. Ο αρχικός αριθμός Reynolds είναι 0.02 ως προς το ύψος της κατασκευής και φτάνει ως την τιμή 200. Οι αριθμοί αυτοί με την χρήση της υδραυλικής διαμέτρου της αεροσήραγγας ανάγονται σε πραγματικούς αριθμούς Reynolds που κυμαίνονται από την τιμή 0.267 ως την τιμή 2667 όπου θεωρείται ότι είναι και το όριο μετάβασης από στρωτή σε μεταβατική ροή.

Μελετώνται γραμμές ίσης πίεσης σε κατακόρυφα επίπεδα, κινούμενα προς τα πλευρικά τοιχώματα στις θέσεις $z^*=0$ (επίπεδο συμμετρίας), $z^*=1.8$, $z^*=4.5$, $z^*=7.5$ και $z^*=9.98$ λίγο πριν το τοίχωμα, καθώς και κατανομές του συντελεστή πίεσης στην ανάντη και κατάντη πλευρά της κατασκευής, όπως και στην οροφή της. Παράλληλα επιλύεται το ίδιο πρόβλημα αλλά σε δύο διαστάσεις , χρησιμοποιώντας πάλι κώδικες FEM3D αλλά με την μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιείται ένα μόνο στοιχείο στην εγκάρσια διεύθυνση ώστε το πρόβλημα να μετατραπεί σε δισδιάστατο και γίνεται σύγκριση των γραμμών ίσης πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας του τρισδιάστατου προβλήματος με τις γραμμές ίσης πίεσης της δισδιάστατης λύσης ώστε να βρεθεί αν υπάρχει επίδραση των τοιχωμάτων όσο αφορά τις τιμές τις πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας. Παρατηρείται λοιπόν ότι ακόμα και σε αριθμό Reynolds 0.267 οι πιέσεις στην δισδιάστατη λύση είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές στο επίπεδο συμμετρίας (σχημα 1 α,β).



α)

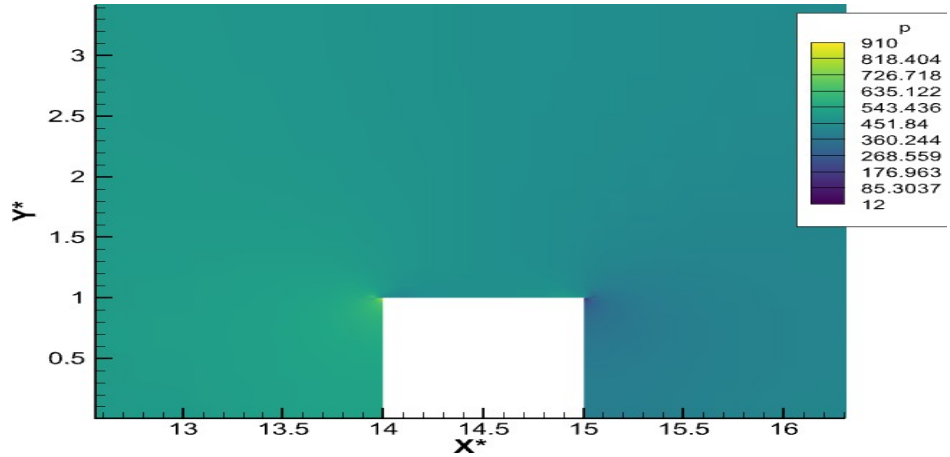


β)

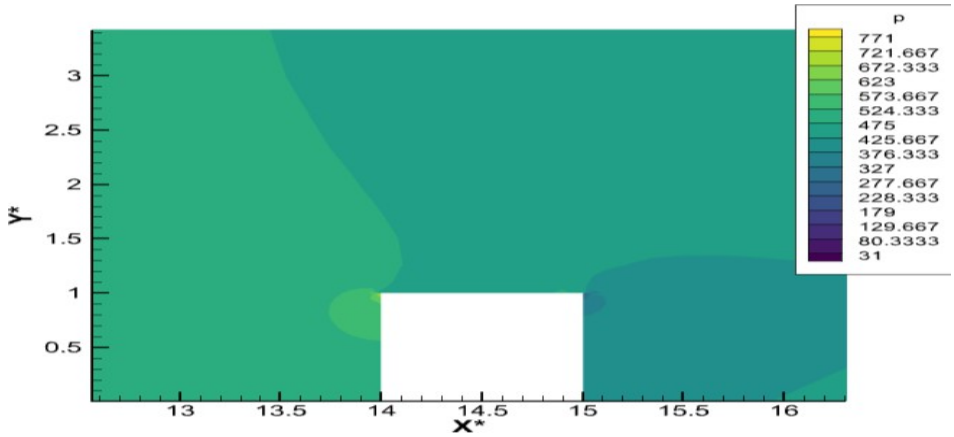
Σχήμα 1. α) δισδιάστατη ροή β) τρισδιάστατη ροή επίπεδο συμμετρίας.

Συμπεραίνεται ακόμη ότι στη θέση z*=0 (σχήμα 2 α), δηλαδή του επίπεδου συμμετρίας, παρατηρείται μια ενιαία περιοχή πίεσεων που είναι λίγο μικρότερες κατάντη και επάνω από το εμπόδιο. Μια πολύ μικρή περιοχή υψηλών πιέσεων δημιουργείται στο πάνω ανάντη άκρο του εμποδίου. Στο Σχήμα 2 β , στη θέση z*=1,8 φαίνονται να δημιουργούνται πέντε ευδιάκριτες περιοχές ίσων πιέσεων. Μία χαμηλών πιέσεων κατάντη του εμποδίου, με πάχος όσο περίπου το ύψος του εμποδίου, μία μικρή περιοχή ελαχίστων πιέσεων στο άνω κατάντη άκρο του εμποδίου, μία άλλη περιοχή πάνω ακριβώς από το εμπόδιο πιο υψηλών πιέσεων, μία περιοχή ανάντη και πάνω από το εμπόδιο υψηλότερων πιέσεων και μία μικρή περιοχή μέγιστων πιέσεων στο άνω ανάντη άκρο του εμποδίου. Όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 2 γ,δ,ε όσο προχωράμε προς τα πλευρικά τοιχώματα z*=9,98, η περιοχή μεγίστων πιέσεων μεγαλώνει απότομα και καλύπτει μεγαλύτερή περιοχή ανάντη του εμποδίου. Η περιοχή ελάχιστων πιέσεων μεγαλώνει ελάχιστα και παραμένει στο κατάντη άκρο του

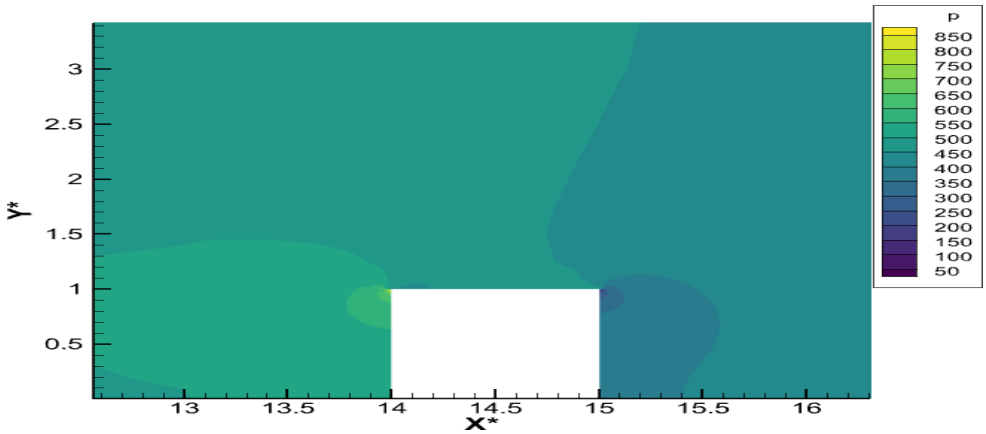
εμποδίου. Οι χαμηλές πιέσεις στο κατάντη άκρο του εμποδίου πιθανώς συνδέονται με την ύπαρξη έντονων στροβιλισμών λίγο κατάντη της κατασκευής, δημιουργούνται δηλαδή λόγω αντιστροφής της ροής. Στο ανάντη άκρο του εμποδίου, επειδή το ρευστό προσκρούει στην κατασκευή η πίεση είναι μεγαλύτερη από τι κατάντη ή πάνω από την κατασκευή. Παρατηρείται επίσης ότι οι ελάχιστες τιμές των πιέσεων κατάντη του εμποδίου μειώνονται καθώς προχωράμε προς το πλευρικό τοίχωμα. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στην επίδραση των τοιχωμάτων καθώς όλο και περισσότερα μόρια του ρευστού κινούνται προς την εγκάρσια διεύθυνση και η αντιστροφή της ροής είναι περισσότερο εμφανής.



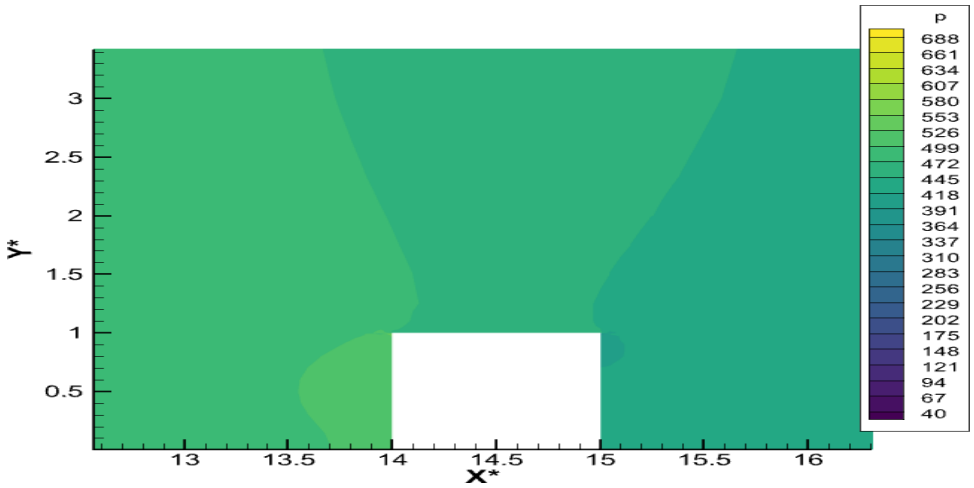
(α)



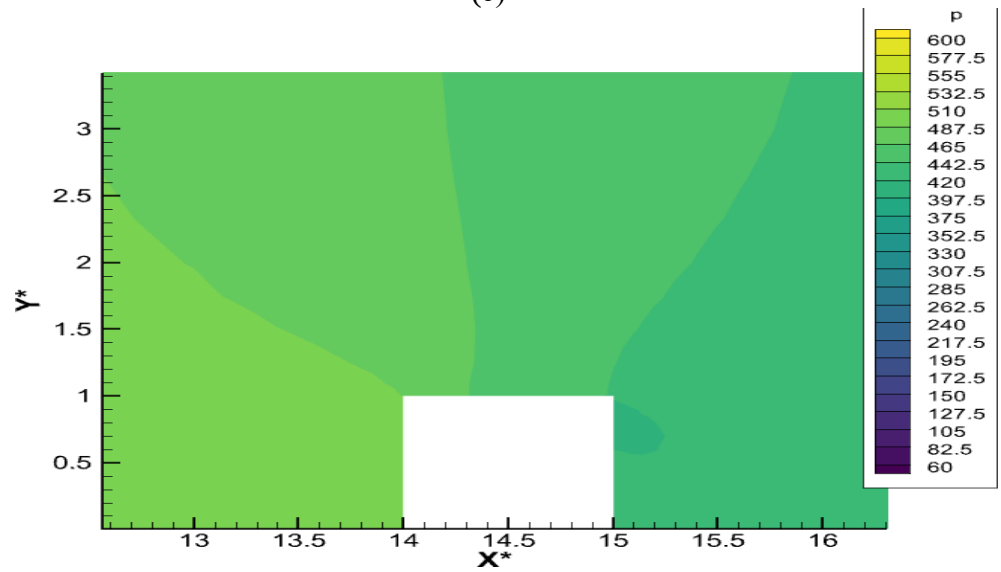
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 2. Γραμμές ίσης πίεσης στη θέση α) z*=0, β) z*=1.8 , γ) z*=4.5, δ) z*=7.5, z*=9.98

29. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΟΦΗΣ ΣΤΗ ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Μ. Παπαγρηγορίου, Β. Λάσκος, Κ. Πλιατσίδης, Α. Δενιζοπούλου & Β. Φράγκος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης, Τμήμα Γεωπονίας, ΤΚ 54124, Θεσ/νίκη, mpapagr@agro.auth.gr

Εκτεταμένη περίληψη

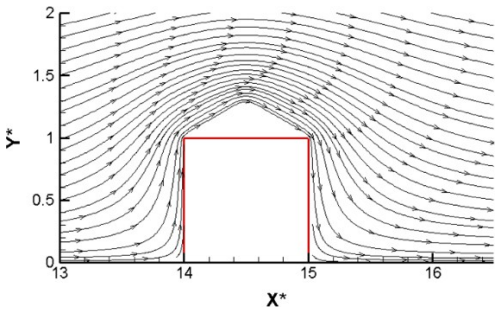
Στην παρούσα εργασία γίνεται δισδιάστατη διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης της οροφής στη ροή αέρα γύρω από τριών ειδών μοντέλα αγροτικών κατασκευών τοποθετημένα μέσα σε αεροσήραγγα, όπου ο λόγος ύψους εμποδίου προς ύψος αεροσήραγγας είναι 1:9.6. Παράλληλα συγκρίνονται οι συντελεστές πιέσεων σε όλο το πεδίο της αεροσήραγγας και στους τρείς τύπους οροφής, ώστε να γίνει η διερεύνηση κατανομής πίεσης στο πεδίο ροής γύρω από τις αγροτικές κατασκευές. Δισδιάστατη ροή είναι ουσιαστικά η ροή τριών διαστάσεων στο επίπεδο συμμετρίας μέσα σε αεροσήραγγα με πλάτος πολύ μεγαλύτερο από το ύψος, ώστε η ροή αέρα να μην επηρεάζεται από τα πλευρικά τοιχώματα της αεροσήραγγας στο επίπεδο συμμετρίας.

Κατά την πραγματοποίηση της εργασίας προσομοιώνονται τριών τύπων κλίσης οροφής αγροτικών κατασκευών, οι οποίοι είναι οι συνηθέστεροι σε πραγματικές συνθήκες. Πρώτον, κατασκευή τριγωνικής οροφής με γωνία 45^0 μεταξύ της οροφής και του οριζόντιου άξονα. Δεύτερον, κατασκευή τριγωνικής οροφής με γωνία 30^0 μεταξύ της οροφής και του οριζόντιου άξονα και τρίτον ορθογωνική κατασκευή με επίπεδη οροφή. Θεωρώντας τη ροή ασυμπίεστη, ισόθερμη και σταθερή οι δισδιάστατες εξισώσεις κίνησης (Navier Stokes) και συνέχειας επιλύονται αριθμητικά με τη βοήθεια των πεπερασμένων τετραπλευρικών στοιχείων και με την χρήση παράλληλου προγραμματισμού με κώδικες VISUAL FORTRAN 90-95 διαμέσου της υπερυπολογιστικής συστοιχίας ARISTOTELIS (που είναι ένα ισχυρό, σύγχρονο εργαλείο υποστήριξης επιστημονικών εφαρμογών μεγάλης κλίμακας, που τίθεται στη διάθεση των ερευνητών για τη διεξαγωγή απαιτητικών υπολογισμών και για την εξαγωγή έγκυρων επιστημονικών αποτελεσμάτων). Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι τετραπλευρικά 9 κόμβων, όπου οι πιέσεις υπολογίζονται στις κορυφές των τετραπλευρικών στοιχείων και οι οι ταχύτητες u,v σε όλους κόμβους. Οι μετασχηματισμένες αλγεβρικές μη γραμμικές εξισώσεις επιλύονται με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Rapshon. Χρησιμοποιούνται οριακές συνθήκες μη ολίσθησης (no-slip), δηλαδή συνθήκες μηδενικών ταχυτήτων πάνω στα τοιχώματα και στο δάπεδο της αεροσήραγγας. Λίγο πριν την είσοδο της αεροσήραγγας θεωρείται ότι η ροή είναι ομοιόμορφη , ενώ λίγο μετά την είσοδο η ροή αποκτά παραβολικό προφίλ, που είναι χαρακτηριστικό της στρωτής ροής. Ο αρχικός αριθμός Reynolds είναι 0.02 ως προς το ύψος της κατασκευής και φτάνει ως την τιμή 150. Οι αριθμοί αυτοί με την χρήση της υδραυλικής διαμέτρου της αεροσήραγγας ανάγονται σε πραγματικούς αριθμούς Reynolds που κυμαίνονται από την τιμή 0.384 ως την τιμή 2880 όπου θεωρείται ότι είναι και το όριο μετάβασης από στρωτή σε μεταβατική ροή.

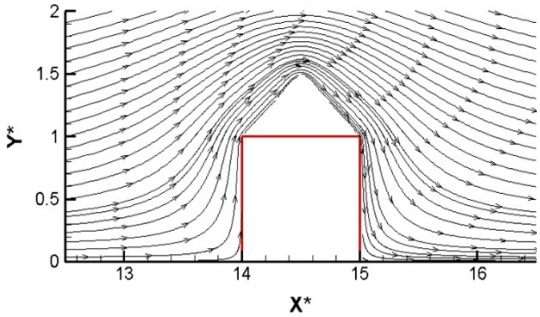
Μελετώνται γραμμές ροής, γραμμές ίσης πίεσης καθώς και κατανομές του συντελεστή πίεσης στο δάπεδο, στην ανάντη και κατάντη πλευρά της κατασκευής και στην οροφή της κατασκευής, για αριθμούς Reynolds ως προς το ύψος της κατασκευής

0.02 ως 150 ή αλλιώς για κανονικούς αριθμούς Reynolds από 0.384 ως 2880. Παρατηρείται ότι, σε μικρούς αριθμούς Reynolds (Σχήματα 1,2) στις τριγωνικές

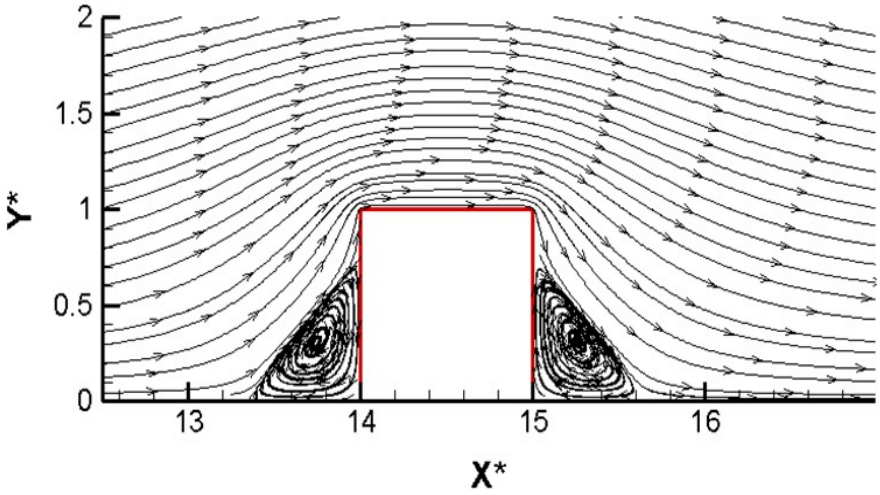
κατασκευές δεν σχηματίζονται στρόβιλοι ανάντη και κατάντη της κατασκευής γεγονός που συμβαίνει στην ορθογωνική κατασκευή(Σχήμα 3). Σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds στα τριγωνικά εμπόδια(Σχήματα 4,5) παρατηρείται αποκόλληση πάνω στην οροφή και μάλιστα κοντά στην κορυφή της οροφής με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια περιοχή ανακυκλοφορίας από το μέσο περίπου της οροφής και κατάντη αυτής. Συγκεκριμένα, στην οροφή των 30^0 υπάρχει μια ανεπαίσθητη ανακυκλοφορία στην κορυφή της, ενώ στην οροφή των 45^0 παρουσιάζεται αποκόλληση και επανακόλληση στην κατάντη πλευρά της οροφής. Στην περίπτωση της επίπεδης οροφής (Σχήμα 6) εντοπίζονται 2 στρόβιλοι, ένας μικρής έκτασης ανάντη του εμποδίου και έναν μεγάλης έκτασης κατάντη του εμποδίου αντίστοιχα. Όσον αφορά τους συντελεστές πίεσης η περιοχή όπου παρατηρούνται μέγιστες πιέσεις εμφανίζει σημαντική διεύρυνση με αύξηση του αριθμού Reynolds, καταλαμβάνοντας μια εκτενέστερη περιοχή ανάντη της κατασκευής. Ειδικότερα από Re_{real}=1440 η ζώνη αύξησης της πίεσης γύρω του εμποδίου ξεκινά από την ανάντη κορυφή του, με εξαίρεση την επίπεδη οροφή στον αριθμό Re_{real}=1440, όπου ξεκινά κάτω από αυτήν την κορυφή. Η περιοχή όπου εντοπίζονται οι ελάχιστες πιέσεις, παρουσιάζει μικρή μόνο αύξηση, παραμένοντας κυρίως στο κατάντη όριο της κατασκευής με μικρή μετατόπιση έναρξης της ζώνης των μικρότερων τιμών πίεσης από x*=17 στο x*=16.75 στην περίπτωση της οροφής των 45^0. Επιπλέον με αύξηση του αριθμού Reynolds αυξάνεται και ο συντελεστής πίεσης κατά αρνητική τιμή.



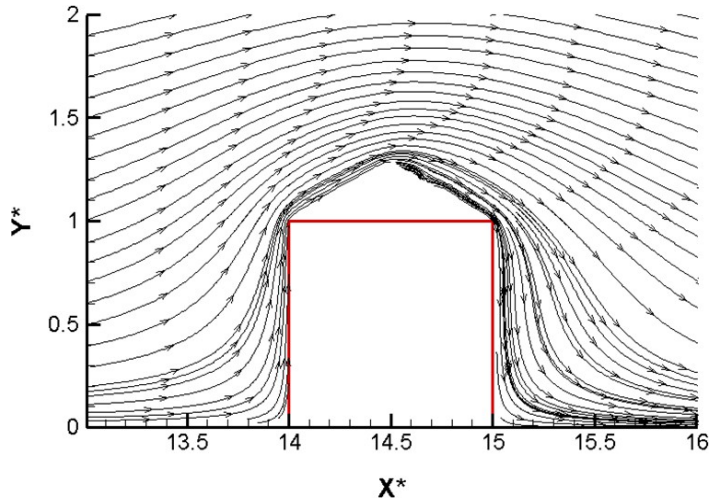
Σχήμα 1. Ροή αέρα τριγωνικής οροφής 30^0 για Re_{real}=0.384



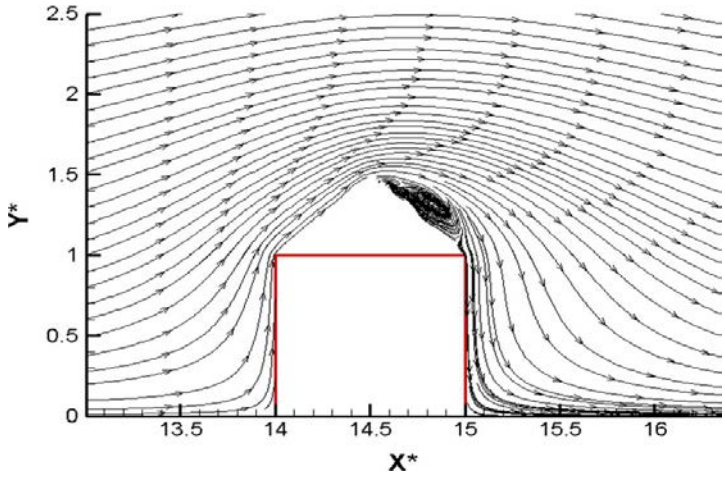
Σχήμα 2.Ροή αέρα τριγωνικής οροφής 45^0 για Re_{real}=0.384



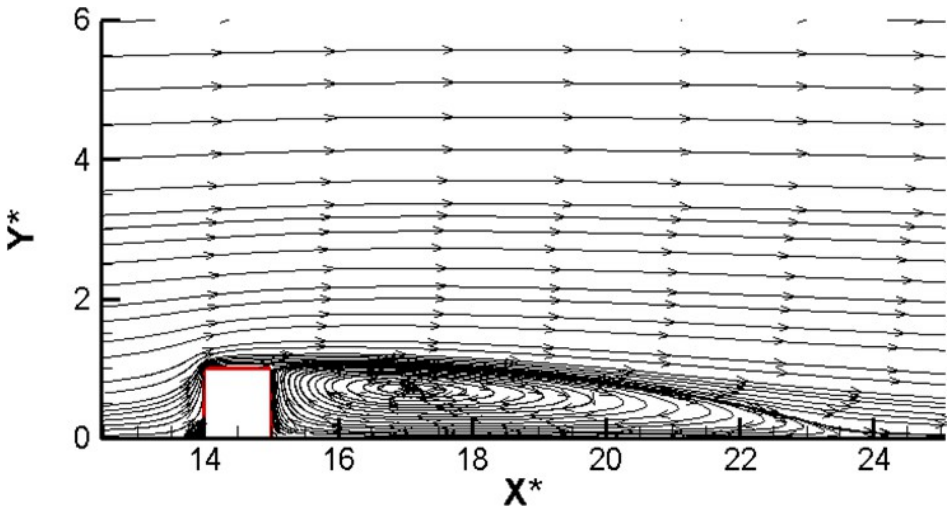
Σχήμα 3. Ροή αέρα επίπεδης οροφής για Re=0.384



Σχήμα 4. Ροή αέρα τριγωνικής οροφής 30^0 για Rereal=2880



Σχήμα 5. Ροή αέρα τριγωνικής οροφής 45^0 για Rereal=2880



Σχήμα 6. Ροή αέρα επίπεδης οροφής 0^0 για Rereal=2880

30. AGRITHES Η ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑ ΤΗΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΚΑΙ Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΓΡΟΤΡΟΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΚΟΥ ΚΑΜΠΟΥ

F. Micocci, Δ. Πούλιος, Μ. Ξανθοπούλου & Μ. Σταματέλλου

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Αρχιτεκτονικών Μηχανικών, Πεδίο Άρεως, 38334 Βόλος, fmicocci@uth.gr

Περίληψη

Το ερευνητικό έργο AGRITHES με χρηματοδότηση από το ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. στοχεύει στη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της αγροτικής κληρονομιάς και ανάπτυξης της υπαίθρου στην Ελλάδα με έμφαση στην αρχιτεκτονική του αγροτικού χώρου στο Θεσσαλικό κάμπο. Η έρευνα προβλέπει μια πολυσυστημική (multi-system) προσέγγιση που εκτείνεται από τον χωροταξικό σχεδιασμό σε περιφερειακή κλίμακα, στη μελέτη των αρχιτεκτονικών μορφών που υποστηρίζουν τη γεωργική δραστηριότητα και καταλήγει στην ενίσχυση της συμμετοχής της τοπικής κοινωνίας. Η έρευνα συνδυάζει τις επιστήμες του χώρου (χωροταξία, πολεοδομία) με τις ανθρωπιστικές σπουδές (πολιτιστική κληρονομία) και τα κοινά (συμμετοχική προσέγγιση) σε συνεργασία με εμπειρογνώμονες στους παραπάνω τομείς. Ο σκοπός του έργου έγκεινται: 1) στην οικοδόμηση μιας νέας γνώσης για την αγροτική περιφέρεια υπό το πρίσμα της διάχυτης πόλης 2) στην μελέτη, κατηγοριοποίηση και αξιολόγηση των αρχιτεκτονικών μορφών στην ελληνική ύπαιθρο, 3) στην επεξεργασία προτάσεων στην κατεύθυνση της βιώσιμης ανάπτυξης στον αγροτικό χώρο με κέντρο την αγροτική κληρονομιά ως κοινωνικό, οικονομικό, πολιτιστικό και ανθρώπινο κεφάλαιο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αγροτικός τομέας στην Ελλάδα αντιπροσωπεύει το 10% της συνολικής απασχόλησης σε όλους τους τομείς και απασχολεί περίπου 400.000 άτομα, ενώ η αξιοποιήσιμη γεωργική γη (UAA) καλύπτει το 54,4% της εθνικής επικράτειας. Έχει τεράστια επίδραση στην εθνική οικονομία, καθώς συμβάλλει στο ΑΕΠ της Ελλάδας με 4%, το υψηλότερο ποσοστό μεταξύ των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτά τα στοιχεία δείχνουν το μέγεθος της επιρροής του αγροτικού τομέα και συγκεκριμένα της Θεσσαλίας στην ελληνική επικράτεια, αλλά και πώς έχει διαμορφώσει το τοπίο της περιαστικής γης και της υπαίθρου, καθώς και τη ζωή των ανθρώπων.

Η επίδραση της γεωργίας στη διαμόρφωση του αγροτικού τοπίου είναι ακόμη πιο σημαντική στη Θεσσαλία, όπου η γεωργία συμβάλλει κατά 35% στο περιφερειακό ΑΕΠ, αντιπροσωπεύοντας το 10% των αγροκτημάτων και το 12% των καλλιεργούμενων εκτάσεων της Ελλάδας, με μεγάλη ποικιλία προϊόντων. Ο θεσσαλικός κάμπος παρουσιάζει μοναδικά χαρακτηριστικά όπου οι ανθρώπινες και περιβαλλοντικές δυναμικές είναι στενά αλληλένδετες: το τυπικό τοπίο των εύκρατων περιοχών – μια εύφορη πεδιάδα ανάμεσα σε βουνά· μια εκτεταμένη κοιλάδα οργανωμένη σε μωσαϊκό αγροτεμαχίων· ένα σύμπλεγμα αποθηκών, θερμοκηπίων και κτηνοτροφικών μονάδων που υποστηρίζουν την αγροτική παραγωγή· ένα πυκνό δίκτυο αλληλοσυνδεόμενων μικρών χωριών και μεσαίων πόλεων. Αυτή η μορφή αστικοποίησης εκτείνεται σε όλη την κοιλάδα και μας επιτρέπει να βλέπουμε τον θεσσαλικό κάμπο ως μια «πόλη-επικράτεια» (city-territory), μια διάχυτη οριζόντια μητρόπολη όπου το αστικό και το αγροτικό είναι πλήρως ενσωματωμένα.

1.1 Πρόβλημα

Αυτό το σύστημα «πόλης-επικράτειας» συγκροτείται από πολυεπίπεδη στρωμάτωση και παρουσιάζει πολλά κοινά στοιχεία που επαναλαμβάνονται στο δίκτυο και συνδέονται στενά με την εξέλιξη των γεωργικών πρακτικών και πολιτικών. Ο συνδυασμός γεωργικών πρακτικών των τοπικών κοινοτήτων και της εξέλιξης των οικισμών συγκροτεί την πολιτιστική κληρονομιά της Θεσσαλίας. Η σημασία της αγροτικής κληρονομιάς έχει αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια ως μοχλός βιωσιμότητας για τα οικοσυστήματα τοπικής παραγωγής τροφίμων, την προώθηση της «πολυλειτουργικότητας» των αγροτικών τοπίων και την ανάπτυξη των αγροτικών οικισμών.
Ωστόσο, η Θεσσαλία σήμερα βρίσκεται ανάμεσα σε ένα πλούσιο παρελθόν και ένα αβέβαιο μέλλον. Η αγροτική κληρονομιά της περιοχής βρίσκεται σε κίνδυνο, καθώς η αγροτική δραστηριότητα αναδιαρθρώνεται υπό τις δυνάμεις της παγκοσμιοποίησης και του εκσυγχρονισμού (με μεγάλη οικονομική στήριξη από την ΕΕ στους Έλληνες αγρότες μετά τις πλημμύρες). Ανταγωνιστικές χρήσεις γης, όπως τα φωτοβολταϊκά πάρκα, καθώς και η μείωση του πληθυσμού μπορεί να επηρεάσουν την παραγωγή και να επιταχύνουν φαινόμενα εγκατάλειψης (μείωση 6% μεταξύ 2011 και 2021 και αβέβαιο μέλλον για πολλές οικογένειες μετά την καταστροφή). Συνεπώς, η επαναδιαμόρφωση του μέλλοντος της ανάπτυξης της περιοχής αποτελεί αναγκαιότητα. Η αγροτική κληρονομιά ενσωματώνει ένα τεράστιο εδαφικό κεφάλαιο (κοινωνικό, οικονομικό, φυσικό και πολιτιστικό) και αποτελεί βασικό παράγοντα αλλαγής και ανάπτυξης σε συνέχεια με την τοπική ταυτότητα χάρη στο αναγεννητικό της δυναμικό.

1.2 Θέση – Σκοπός

Η χρηματοδοτούμενη έρευνα «AGRITHES – Κληρονομιά της Υπαίθρου και η Αρχιτεκτονική Αγροτροφικής Παραγαγωγής. Η Περίπτωση του Θεσσαλικού Κάμπου» (ΕΛΙΔΕΚ «3η Προκήρυξη και Οδηγός Διαχείρισης και Υλοποίησης Ερευνητικών Έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση Μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών») στοχεύει να διερευνήσει την χωρική οργάνωση του θεσσαλικού κάμπου με επίκεντρο την κληρονομιά της αρχιτεκτονικής της παραγωγής τροφίμων. Οι συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές μορφές έχουν μια πολύ καθαρή χωρική κατανομή. Παρότι υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ οικισμών και αγροτικών εκτάσεων, τα κτίρια παραγωγής τροφίμων (θερμοκήπια, αποθήκες κ.ά.) βρίσκονται διάσπαρτα στα αγροτεμάχια, στις περιαστικές ζώνες των οικισμών. Στόχος της έρευνας είναι να διερευνηθεί η σημασία της αγροτικής κληρονομιάς του θεσσαλικού κάμπου μέσω της μελέτης των υφιστάμενων αρχιτεκτονικών μορφών παραγωγής τροφίμων (εν χρήσει και εγκαταλελειμμένων) και να εξεταστεί το δυναμικό τους για κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη. Για τον σκοπό αυτό, η έρευνα θα πραγματοποιηθεί σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Πάδοβας, το οποίο θα προσφέρει σημαντική στήριξη χάρη στην εμπειρία του στη μελέτη της πολεοδομικής, αγροτικής και πολιτιστικής κληρονομιάς της Περιφέρειας Βένετο.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Η έρευνα βασίζεται σε τρεις κύριους άξονες, με διαφορετική κλίμακα:

- την πολεοδομική διάσταση (μελέτες για τη διάχυτη πόλη και την αγροτική κληρονομιά του θεσσαλικού κάμπου),
- το κτισμένο κεφάλαιο (κληρονομιά και μη κληρονομιά κτιρίων),
- και τα κοινά (με έμφαση στη συμμετοχή τοπικών κοινοτήτων και φορέων).

Η αρχική φάση της έρευνας είναι η ανάλυση του θεσσαλικού κάμπου μέσα από τον φακό

της «διάχυτης πόλης», ώστε να αναδειχθεί η σχέση μεταξύ αστικοποίησης και γεωργίας, με έμφαση στην χωρική οργάνωση και κατηγοριοποίηση των αρχιτεκτονικών παραγωγής τροφίμων. Ο όρος «διάχυτη πόλη» εισήχθη το 1990 από τον Francesco Indovina (2022) και μελετήθηκε περαιτέρω από μελετητές όπως ο Bernardo Secchi (1996), η Paola Viganò (2022), ο Michelangelo Savino (2017) και η Bénédicte Grosjean (2010). Αρχικά εφαρμόστηκε στην Περιφέρεια του Βένετο και στη συνέχεια επεκτάθηκε για να περιγράψει και άλλες ευρωπαϊκές περιοχές (Βρυξέλλες, Randstad κ.ά.). Παρά το γεγονός ότι υπάρχει σημαντική έρευνα γύρω από την έννοια της διάχυτης πόλης, της προαστιοποίησης και της αστικής εξάπλωσης στην Ελλάδα, αυτή σχετίζεται κυρίως με τη μεγάλη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας (Chorianopoulos et al. 2010; Sayas 2006; Aesopos 2009), με περιορισμένη έρευνα στην περιφέρεια και τις αγροτικές περιοχές. Αυτή η φάση θα αναπτυχθεί μέσω:

1. βιβλιογραφικής ανασκόπησης με παρουσίαση πανόραμα περιοχών με παρόμοια χαρακτηριστικά,
2. εξερεύνηση της χωρικής εξέλιξης της Θεσσαλίας και πλαισίωση υφιστάμενων στρατηγικών για περιφερειακή και τοπική ανάπτυξη,
3. χαρτογράφησης του θεσσαλικού κάμπου μέσω συλλογής δεδομένων για τις αρχιτεκτονικές παραγωγής τροφίμων και τις χωρικές τους διατάξεις, κυρίως με τεχνολογίες GIS.

Ο δεύτερος άξονας αφορά το υλικό και άυλο κεφάλαιο στις αγροτικές περιοχές. Από τη Σύμβαση του Faro (2005), πολλές έρευνες και ευρωπαϊκά έργα έχουν εστιάσει στην ανάδειξη της πολιτιστικής και αγροτικής κληρονομιάς ως βασικού παράγοντα βιώσιμης ανάπτυξης και βελτίωσης της ποιότητας ζωής, αλλά και ως ενεργού παράγοντα οικονομικής ανάπτυξης (Magnaghi 2003, 2007· Selicato 2016· Dezio 2020). Κατά την οικοδόμηση μιας διαχρονικής εικόνας της πολιτιστικής κληρονομιάς στον θεσσαλικό κάμπο από την αρχαιότητα, θα δοθεί μεγάλη έμφαση στην επανεκτίμηση εγκαταλελειμμένων ή ακόμη λειτουργικών εγκαταστάσεων παραγωγής τροφίμων. Αυτή η κληρονομιά θα εξεταστεί μέσα από το πρίσμα της αρχιτεκτονικής, κατανοώντας τυπολογίες, τεχνικές κατασκευής και μορφολογίες, καθώς και πιθανούς μοχλούς κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης. Αυτό το μέρος θα διερευνηθεί με μορφολογική και τυπολογική ανάλυση αρχιτεκτονικών παραγωγής τροφίμων σε τρεις επιλεγμένες περιοχές, με φωτογραφική αποτύπωση και γραφική αναπαράσταση κτιρίων (κατόψεις και αξονομετρικά), με σκοπό τη δημιουργία ενός καταλόγου αρχιτεκτονικών τυπολογιών που θα παρουσιάζει την τρέχουσα κατάσταση χρήσης κάθε κτιρίου.

Ο τρίτος άξονας αφορά τα κοινά ως στρατηγική βιώσιμης ανάπτυξης και διαχείρισης πολιτιστικής κληρονομιάς. Τα τελευταία χρόνια, μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στον αυξανόμενο ρόλο των τοπικών κοινοτήτων στην ανάπτυξη ενός βιώσιμου μέλλοντος, καθώς η οικοδόμηση συναίνεσης θεωρείται προτεραιότητα για την αντιμετώπιση κρίσιμων ζητημάτων της εποχής μας (Mazzucato 2019). Η έννοια των κοινών έχει επίσης εισαχθεί ευρέως στον τομέα της διαχείρισης κληρονομιάς (Barrère 2018). Η έρευνα θα ενσωματώσει αυτά τα μεθοδολογικά πλαίσια υιοθετώντας συμμετοχικές τεχνικές στη διαδικασία της έρευνας και μεθόδους επιστήμης των πολιτών, σε μια προσπάθεια συν-δημιουργίας λύσεων με τις τοπικές κοινότητες στη Θεσσαλία. Αυτό το μέρος βασίζεται στη συμμετοχή των εμπλεκόμενων φορέων μέσω εργαστηρίων σε τρεις περιοχές μελέτης, που θα βοηθήσουν στον καθορισμό στρατηγικών βιώσιμης ανάπτυξης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των εργαστηρίων θα συμβάλει στην αξιολόγηση ευκαιριών και πιθανοτήτων για ανάπτυξη μελλοντικών πρωτοβουλιών σε σχέση με την τοπική αγροτική κληρονομιά.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η έρευνα βρίσκεται σήμερα στα αρχικά της στάδια και, αντί για αποτελέσματα, το παρόν κείμενο στοχεύει να ανοίξει έναν διάλογο για τον ρόλο της αρχιτεκτονικής της αγροδιατροδής στην Ελλάδα.

Το πρώτο ερώτημα που θέτει αφορά την εδαφική οργάνωση των ελληνικών αγροτικών περιοχών ως πλέγμα τριών βασικών στοιχείων (αστικοποίηση, αγροτική κληρονομιά και τοπικές κοινότητες) και κατά πόσο η σύγκριση με το μοντέλο της «διάχυτης πόλης» μπορεί να βοηθήσει στη χαρτογράφηση δυνατοτήτων και κρίσιμων σημείων στη συνύπαρξη αγροτικών εκτάσεων, οικισμών και αρχιτεκτονικών παραγωγής τροφίμων με το φυσικό περιβάλλον.

Το δεύτερο ερώτημα αφορά τη δυνατότητα προώθησης αναγεννητικών έργων με τη συμμετοχή τοπικών κοινοτήτων, επαναχρησιμοποιώντας αυτές τις αρχιτεκτονικές για την παραγωγή τροφίμων. Διαθέτουν άραγε αυτά τα κτίρια την πολιτιστική, χωρική και υλική ποιότητα για να αποτελέσουν μοχλούς οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης προς μια πιο βιώσιμη και πράσινη οικονομία;

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aesopos, Y. (2009). ‘Diffused Athens’. *A10* 30: 60–62.

Barrère, C. (2018). ‘Cultural Heritage: Capital, Commons, and Heritages’. In *The Oxford Handbook of Public Heritage Theory and Practice*, edited by Angela M. Labrador and Neil Asher Silberman, 0. Oxford University Press.

Chorianopoulos, I., Pagonis, T., S. Koukoulas, and S. Drymoniti (2010). ‘Planning, Competitiveness and Sprawl in the Mediterranean City: The Case of Athens’. *Cities 27 (4)*: 249–59.

Corte, M. B. & Viganò, P. (2022). *The Horizontal City. An Anthology*. Springer Cham.

Council of Europe (2005). *Council of Europe Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society*. Faro, 27 October 2005.

Dezio, C. (2020). Rural Heritage as Antifragile Territorial Capital. *Journal Valori e Valutazioni*, N. 24.

Indovina, F. (2022). La Città Diffusa (The Diffuse City) (1990), In Barcelloni Corte, M. B. & Viganò, P., *The Horizontal City. An Anthology*. Springer Cham, 347–367.

Magnaghi, A. (ed.) (2007). *Scenari strategici. Visioni identitarie per il progetto di territorio*. Firenze: Alinea.

Mazzucato, M. (2019). *The Value of Everything: Making and Taking in the Global Economy*. 2 edition. Penguin.

Savino, M. (2017). *Governare il territorio in Veneto*. Padova: Cleup.

Selicato, F. (2016). The Concept of Heritage. In Rotondo, F., Selicato, F. , Marin, V. & Galdeano, J, F., *Cultural Territorial Systems. Landscape and Cultural Heritage as a Key to Sustainable and Local Development in Eastern Europe*. 7-12.

Sayas, J (2006) ‘Urban Sprawl in the Periurban Coastal Zones of Athens’. *The Greek Review of Social Research B* (120): 71–104.

ΕΝΟΤΗΤΑ 4η

Υδατικοί πόροι

31. ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΠΟΝΙΑΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΡΙΖΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Νικόλαος Κουκοβίνος, Παναγιώτης Καρνούτσος, Ευστράτιος Μαλλής, Μάριος Καραγιοβανίδης, Θεοδώρα Ματσή, Πανταζής Γεωργίου, Βασίλειος Φράγκος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Πανεπιστημιούπολη, 54624, Θεσσαλονίκη, email: nkoukov@agro.auth.gr

Περίληψη

Η υδροπονία συνιστά βασική τεχνολογία γεωργίας ελεγχόμενου περιβάλλοντος (Controlled Environment Agriculture – CEA), όπου η επιλογή και ο ορθολογικός σχεδιασμός των υποστρωμάτων καλλιέργειας επηρεάζουν καθοριστικά τη διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών στοιχείων στη ριζόσφαιρα. Στην παρούσα μελέτη, αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης με τη χρήση του λογισμικού HYDRUS, με στόχο τον υδραυλικό χαρακτηρισμό τριών αντιπροσωπευτικών υποστρωμάτων υδροπονίας: κοκοφοίνικα, περλίτη και πετροβάμβακα. Το μοντέλο βασίστηκε στις καμπύλες κατακράτησης νερού van Genuchten και στις συναρτήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας Mualem, παραμετροποιημένες βάσει δεδομένων της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Η επικύρωση του μοντέλου κατέδειξε εξαιρετική συμφωνία με βιβλιογραφικά καταγεγραμμένες πειραματικές μετρήσεις ($R^2 > 0.98$, RMSE < 0.02), επιβεβαιώνοντας την ακρίβεια του αλγορίθμου στην αποτύπωση των φαινομένων διαβροχής και αποστράγγισης. Η ανάλυση ευαισθησίας ανέδειξε το ολικό πορώδες και τον δείκτη κατανομής πόρων ως κρίσιμες παραμέτρους που καθορίζουν τη δυναμική υγρασίας και την αγωγιμότητα. Ο κοκοφοίνικας παρουσίασε υψηλή υδατοϊκανότητα, ο περλίτης ταχεία αποστράγγιση και ο πετροβάμβακας ενδιάμεση συμπεριφορά.

Επιπρόσθετα, η ενσωμάτωση αρχών Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics – CFD) στο προσομοιωτικό πλαίσιο επέτρεψε τη χωρικά ρητή ανάλυση ροών, τον εντοπισμό περιοχών στασιμότητας («νεκρών ζωνών»), καθώς και την αξιολόγηση εναλλακτικών γεωμετρικών διαμορφώσεων και σεναρίων άρδευσης.

Συνολικά, η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για τη σχεδίαση και βελτιστοποίηση καινοτόμων υποστρωμάτων υδροπονίας, με στόχο την ενίσχυση της αποδοτικής πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων και τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η μελλοντική ενσωμάτωση μηχανισμών πρόσληψης από τις ρίζες και μεταφοράς διαλυτών αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου, ιδίως σε συστήματα υψηλής οικονομικής αξίας, όπως η φαρμακευτική κάνναβη.

Λέξεις-κλειδιά: Υδροπονία, υποστρώματα καλλιέργειας, HYDRUS, CFD, Van Genuchten, υδραυλική αγωγιμότητα, ανάλυση ευαισθησίας, βελτιστοποίηση

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) ANALYSIS OF NOVEL SUBSTRATES FOR OPTIMAL NUTRIENT UPTAKE FROM THE ROOT ZONE

Nikolaos Koukovinos, Panagiotis Karnoutsos, Efstratios Mallis, Marios Karagiovanidis, Theodora Matsi, Pantazis Georgiou, Vasileios Fragos

[1]Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, University Campus, 54624, Thessaloniki, e-mail: nkoukov@agro.auth.gr

Abstract

Hydroponics constitutes a core controlled environment agriculture (CEA) technology, wherein the selection and rational design of growth substrates critically influence water and nutrient availability within the rhizosphere. In the present study, a numerical simulation model was developed and validated using the HYDRUS software to characterize the hydraulic behavior of three representative hydroponic substrates: coconut coir, perlite, and rockwool. The model employed van Genuchten water retention curves and Mualem hydraulic conductivity functions, parameterized using literature-derived data.

Model validation demonstrated excellent agreement with literature obtained experimental measurements ($R^2 > 0.98$, RMSE < 0.02 $cm^3 \cdot cm^{-3}$), confirming the algorithm's accuracy in capturing the wetting and drainage dynamics of the substrates. Sensitivity analysis identified total porosity and the pore size distribution index as key determinants of moisture retention and hydraulic conductivity. Among the tested substrates, coconut coir exhibited high water retention, perlite showed rapid drainage, and rockwool displayed intermediate hydraulic performance.

Furthermore, the integration of Computational Fluid Dynamics (CFD) principles into the simulation framework enabled spatially explicit flow analysis, identification of stagnant flow zones, and the evaluation of alternative substrate geometries and irrigation regimes.

Overall, the proposed methodology offers a robust tool for the design and optimization of innovative hydroponic substrates aimed at enhancing nutrient uptake efficiency while minimizing energy consumption. Future incorporation of root uptake mechanisms and solute transport dynamics is expected to further enhance the model's predictive capacity, particularly for high-value cropping systems such as pharmaceutical-grade cannabis.

Keywords: Hydroponics, cultivation substrates, HYDRUS, CFD, van Genuchten, hydraulic conductivity, sensitivity analysis, optimization

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υδροπονία αποτελεί βασική τεχνολογία της γεωργίας ακριβείας, καθώς επιτρέπει την καλλιέργεια φυτών χωρίς έδαφος σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Οι υδροπονικές καλλιέργειες χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή απόδοση και μικρή κατανάλωση νερού και θρεπτικών στοιχείων, γι' αυτό έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλείς παγκοσμίως (Abd-Elmoniem et al., 2006). Η απόδοση των υδροπονικών συστημάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέσο καλλιέργειας που χρησιμοποιείται. Το υπόστρωμα των υδροπονικών συστημάτων πρέπει να στηρίζει μηχανικά το ριζικό σύστημα και ταυτόχρονα να παρέχει επαρκές οξυγόνο, νερό και θρεπτικά στοιχεία, δηλαδή να λειτουργεί ως δεξαμενή υγρασίας και θρεπτικών στοιχείων (Schroeder & Engwicht, 2005). Ένα ιδανικό μέσο θα πρέπει επίσης να συνδυάζει καλή αεροπερατότητα και στράγγιση, ανθεκτικότητα στη φθορά και επαρκή πορώδη δομή ώστε να παραμένει υγρό για όσο χρόνο χρειάζεται για να απορροφήσουν οι ρίζες τα θρεπτικά στοιχεία (Pandey et al., 2023). Ελλιπής σχεδιασμός του υποστρώματος ή ακατάλληλες συνθήκες ροής οδηγούν σε ανομοιόμορφη παροχή θρεπτικών στοιχείων, τοπική εξάντληση ή συσσώρευση, περιορισμό της οξυγόνωσης και τελικά σε μειωμένη ανάπτυξη φυτών.

Η αριθμητική προσομοίωση μέσω υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (computational fluid dynamics, CFD) προσφέρει ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη της ροής μέσα σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Η CFD είναι κλάδος της ρευστομηχανικής που χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους

και κατάλληλες δομές δεδομένων για τη λύση των εξισώσεων κίνησης των ρευστών σε πεπλεγμένα χωρία (Boris, 1989). Με τη βοήθεια ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων μπορούμε να αναπαραστήσουμε με ακρίβεια τη ροή, τις μεταφορές μάζας και ενέργειας και την αλληλεπίδραση του ρευστού με τα στερεά όρια (Saleel et al., 2013), (Zhao & Xu, 2020). Η CFD επιτρέπει την ανάλυση εσωτερικών ροών μέσα σε πορώδη μέσα, όπου οι πειραματικές μετρήσεις είναι δύσκολες ή δαπανηρές. Ταυτόχρονα προσφέρει τη δυνατότητα μεταβολής παραμέτρων (γεωμετρία, παροχή, πορώδες) για να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στην ομοιομορφία ροής και στη μεταφορά θρεπτικών στοιχείων.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει τα παραπάνω κενά. Σχεδιάζονται και αξιολογούνται δομές υποστρωμάτων με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ροής θρεπτικού διαλύματος γύρω από το ριζικό σύστημα. Με χρήση CFD αναπτύσσεται τρισδιάστατο μοντέλο ροής, που περιλαμβάνει την επίλυση εξισώσεων Navier-Stokes σε συνδυασμό με εξισώσεις μεταφοράς μάζας για τα θρεπτικά ιόντα. Γίνονται παραμετρικές μελέτες διαφορετικών γεωμετριών και ρυθμών ροής, καταγράφοντας κατανομές ταχυτήτων, διαφορές πίεσης και συγκεντρώσεων. Ο στόχος είναι να προσδιοριστούν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος που οδηγούν σε ομοιόμορφη κατανομή του διαλύματος, ελαχιστοποίηση των «νεκρών ζωνών» και βέλτιστη πρόσληψη θρεπτικών, με παράλληλη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος.

Συνολικά, η συνδυασμένη χρήση νέων υποστρωμάτων και μοντελοποίησης CFD προσφέρει τη δυνατότητα σχεδιασμού υδροπονικών συστημάτων υψηλής απόδοσης. Η έρευνα αυτή στοχεύει να αποτελέσει οδηγό για τη βελτιστοποίηση των υλικών και των λειτουργικών παραμέτρων και να συμβάλει στη βιώσιμη ανάπτυξη της ελεγχόμενης γεωργικής παραγωγής.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Μεταφορά Μάζας και Νερού σε Πορώδη Υποστρώματα

Τα φαινόμενα μεταφοράς σε πορώδη υποστρώματα διέπονται κυρίως από τις αρχές της ροής των ρευστών και της μεταφοράς μάζας. Στα υδροπονικά υποστρώματα, το δίκτυο των πόρων καθορίζει τις υδραυλικές οδούς μέσω των οποίω μετακινούνται το νερό και τα διαλυμένα θρεπτικά στο εσωτερικό των υποστρωμάτων. Η γενικευμένη μορφή του νόμου του Darcy περιγράφει την κίνηση του υγρού μέσα σε ένα πορώδες μέσο, και εκφράζει την παροχή (Q) ως ανάλογη της διαφοράς του υδραυλικού φορτίου και της διατομής, και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της στήλης του εδάφους, μέσω της υδραυλικής αγωγιμότητας (K):

$$q = -K(h)\nabla(h + z) \quad [1]$$

όπου $K(h)$ είναι η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα ($m \cdot s^{-1}$), h το πιεζομετρικό φορτίο (m), και z το βαρυτικό δυναμικό (m). Η μη γραμμική εξάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας από το υδατικό δυναμικό του υποστρώματος h αντικατοπτρίζει τον κρίσιμο ρόλο των φυσικών ιδιοτήτων του υποστρώματος (π.χ. πορώδες, κατανομή μεγέθους πόρων) στον καθορισμό της διαθεσιμότητας νερού για τις ρίζες των φυτών (Bear, 1988).

2.2 Καμπύλες Κατακράτησης Νερού – Το μοντέλο van Genuchten

Η καμπύλη κατακράτησης εδαφικού νερού (Soil Water Retention Curve, SWRC), ή χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας, περιγράφει τη σχέση μεταξύ του ογκομετρικού περιεχομένου νερού θ και του πιεζομετρικού φορτίου h. Για υδροπονικά και τεχνητά υποστρώματα, η σχέση αυτή εκφράζεται συχνά μέσω της εμπειρικής εξίσωσης van Genuchten (van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad [2]$$

όπου θrκαι θs ειναι, αντίστοιχα, η υπολειμματική και η κορεσμένη περιεκτικότητα σε νερό ($m^3 \cdot m^{-3}$), η εμπειρική παράμετρος α (m^{-1}) αποτελεί παράμετρο αντίστροφης αναρρόφησης, ενώ οι συντελεστές n και m είναι παράμετροι προσαρμογής της καμπύλης (με τον περιορισμό ότι m = 1 − 1/n).

Η διατύπωση αυτή αποτυπώνει την επίδραση της κατανομής του μεγέθους των πόρων στην ικανότητα κατακράτησης νερού του υποστρώματος. Υποστρώματα με υψηλή μακροπορώδη δομή εμφανίζουν απότομες καμπύλες αποστράγγισης, ενώ υλικά με λεπτότερη υφή παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης νερού σε χαμηλότερες τιμές τάσης. Συνεπώς, η ακριβής εκτίμηση των παραμέτρων van Genuchten είναι κρίσιμη για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των υποστρωμάτων υπό διαφορετικές συνθήκες άρδευσης (Assouline & Or, 2013).

2.3 Μοντέλα Υδραυλικής Αγωγιμότητας

Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα $K(\theta)$ συνδέει την υγρό περιεχόμενο με τη μεταφορική ικανότητα. Ο Mualem (Mualem, 1976) πρότεινε ένα προγνωστικό μοντέλο που συσχετίζει την αγωγιμότητα με την καμπύλη κατακράτησης:

$$K(\theta) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad [3]$$

όπου Ks είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα ($m \cdot s^{-1}$), και Se είναι ο βαθμός αποτελεσματικού κορεσμού που ορίζεται ως:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [4]$$

και l είναι η παράμετρος συνδεσιμότητας των πόρων που περιγράφει την πολυπλοκότητα του δικτύου των πόρων στο εσωτερικό των υποστρωματών και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Η εξίσωση αυτή, σε συνδυασμό με τις παραμέτρους του μοντέλου van Genuchten, επιτρέπει τον πλήρη χαρακτηρισμό της ροής του νερού σε πορώδη υποστρώματα

2.4 Συσχέτιση Υδροπονικών Υποστρωμάτων με CFD

Τα τεχνητά υποστρώματα διαφοροποιούνται από τα εδαφικά υποστρώματα ως προς τις δομικές και ως προς τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες, παρουσιάζοντας συχνά προσαρμοσμένες ιδιότητες, όπως για παράδειγμα το πορώδες, υδρόφοβες ή υδρόφιλες επιφάνειες, καθώς και μεταβαλλόμενες πυκνότητες σε όλο τον όγκο του υποστρώματος (Gruda, 2009). Ως εκ τούτου, τα συμβατικά μοντέλα απαιτούν προσεκτική βαθμονόμηση. Η ενσωμάτωση αυτών των σχέσεων σε ένα υπολογιστικό πλαίσιο CFD επιτρέπει χωρικά ρητές (spatially explicit) προσομοιώσεις της κίνησης του νερού, των κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης και των υδραυλικών αποκρίσεων υπό δυναμικές στρατηγικές άρδευσης.

Η δυνατότητα σύζευξης των αρχών CFD με αλγόριθμους βελιστοποίησης ενισχύει περαιτέρω την προγνωστική ακρίβεια, καθώς οι φυσικοχημικές παράμετροι του υποστρώματος μπορούν να μεταβάλλονται συστηματικά με στόχο τη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας νερού και της αποδοτικότητας παροχής θρεπτικών στοιχείων. Αυτό το θεωρητικό υπόβαθρο παρέχει τη μαθηματική και φυσική βάση για την επικύρωση και την προσομοίωση του μοντέλου που παρουσιάζεται στην παρούσα μελέτη.

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Υποστρώματα που εξετάστηκαν

Η υπολογιστική ανάλυση επικεντρώθηκε σε αντιπροσωπευτικά υδροπονικά μέσα καλλιέργειας συμπεριλαμβανομένων ευρέων διαδεδομένων υποστρωμάτων. Για κάθε υπόστρωμα αναζητήθηκαν βιβλιογραφικά οι τιμές των φυσικοχημικών ιδιοτήτων, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι στο υπολογιστικό μοντέλο για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών καμπυλών κατακράτησης και υδραυλικής αγωγιμότητας.

Πίνακας 1. Φυσικοχημικές ιδιότητες των υποστρωμάτων που εξετάστηκαν, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Υπόστρωμα	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/cm]	n [-]	K_s [cm/sec]	l [-]	Πηγή
Κοκοφοίνικας	0.010	0.87	0.062	1.296	0.016	0.5	(Gohardoust et al., 2019)
Περλίτης	0.001	0.82	0.822	1.164	0.085	0.5	(Gohardoust et al., 2019)
Πετροβάμβακας	0.008	0.75	0.739	2.157	0.067	0.5	(Wallach, 2020)

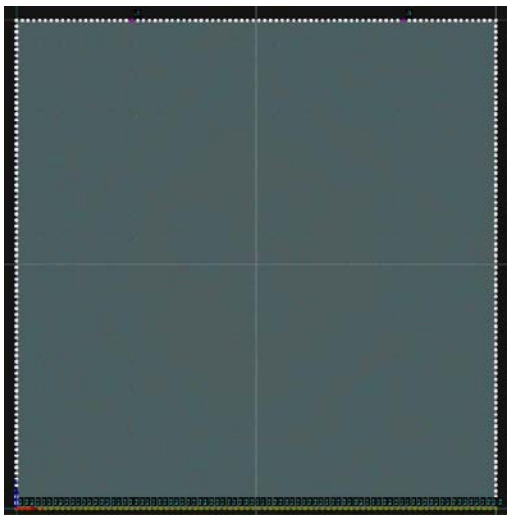
3.2 Πλατφόρμα προσομοίωσης και Ορισμός Πεδίου

Το μαθηματικό μοντέλο αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού HYDRUS (PC-Progress, Πράγα, Τσεχία), το οποίο παρέχει ένα αξιόπιστο πλαίσιο για την επίλυση της εξίσωσης Richards για την ροή του νερού σε πορώδη μέσα με μεταβαλλόμενο βαθμό κορεσμού. Η εξίσωση Richards, η οποία εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [K(h)\nabla(h+z)] \qquad [5]$$

διακριτοποιήθηκε με χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων. Οι εξισώσεις χαρακτηρισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων (Εξίσωση 2 & 3) παραμετροποιήθηκαν βάσει του μοντέλου van Genuchten–Mualem και των τιμών του Πίνακα 1 ανά υπόστρωμα.

3.3 Οριακές και Αρχικές Συνθήκες



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση των οριακών συνθηκών στο υπολογιστικό πεδίο (20 × 20 cm).

Το υπολογιστικό πεδίο ορίστηκε ως ένα δισδιάστατο κατακόρυφο προφίλ (20 x 20 cm), με τις οριακές συνθήκες να διαμορφώνονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.

- Άνω Όριο: εφαρμόστηκε συνθήκη μηδενικής ροής (no flux) σε όλη την επιφάνεια, με εξαίρεση δύο κόμβους στους οποίου ορίστηκε χρονικά μεταβαλλόμενη ροή (time variable flux) ώστε να προσομοιωθεί με επιτυχία η στάγδην άρδευση.
- Κάτω όριο: εφαρμόστηκε συνθήκη επιφάνειας διήθησης (seepage face), η οποία επιτρέπει την ελεύθερη εκροή νερού όταν η πίεση στο κατώτατο όριο υπερβαίνει το μηδενικό δυναμικό.
- Πλευρικά όρια: θεωρήθηκαν μηδενικής ροής όρια (no flux), αναπαριστώντας την περιορισμένη πλευρική ανταλλαγή νερού με το περιβάλλον.

Οι αρχικές συνθήκες καθορίστηκαν από ομοιόμορφη κατανομή υγρασίας στο υπόστρωμα, σύμφωνα με την καμπύλη κατακράτησης του κάθε υλικού.

Η διαμόρφωση αυτή επέτρεψε την προσομοίωση των φαινομένων ύγρανσης και αποστράγγισης που προκύπτουν από την τοπική παροχή νερού μέσω στάγδην άρδευσης και την επακόλουθη κατανομή της υγρασίας υπό συνθήκες δυναμικής ισορροπίας.

3.4 Επικύρωση του μοντέλου

Η απόδοση του μοντέλου επικυρώθηκε έναντι πειραματικών συνόλων δεδομένων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και αφορούν καμπύλες ύγρανσης/ξήρανσης και συναρτήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας για υδροπονικά υποστρώματα (Gohardoust, 2019 και Wallach, 2020). Η ακρίβεια των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων ποσοτικοποιήθηκε με τη χρήση της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και του συντελεστή προσδιορισμού (R^2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y_i})^2} \quad [6]$$

όπου yi είναι οι παρατηρούμενες τιμές, και $\hat{y}i$ οι προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου. Η επικύρωση θεωρείται επιτυχής όταν το RMSE ήταν μικρότερο από 0.05 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ για τις καμπύλες κατακράτησης και το R^2 μεγαλύτερο από 0.95 για τις συναρτήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Επικύρωση Καμπυλών Κατακράτησης

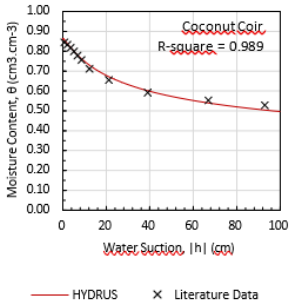
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης σχετικά με τις καμπύλες κατακράτησης με πειραματικά δεδομένα εξαγόμενα από βιβλιογραφικές πηγές επιβεβαιώνει την ικανότητα του μοντέλου να αναπαράγει με ακρίβεια την υδραυλική συμπεριφορά κοινών υδροπονικών υποστρωμάτων, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2(α), 2(β), και 2(γ).

Για το υπόστρωμα κοκοφοίνικα, το μοντέλο απέδωσε με ακρίβεια το σταδιακό μοτιβό αποστράγγισης, αντανακλώντας τη σχετικά υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού που οφείλεται κυρίως στην ισοκατανομή του μεγέθους των πόρων σε όλο τον όγκο του υποστρώματος. Οι καμπύλη που υπολογίστηκε από το μοντέλο συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά δεδομένα, με τιμές R2 > 0.98 και RMSE □ 0.010 cm3.cm-3.

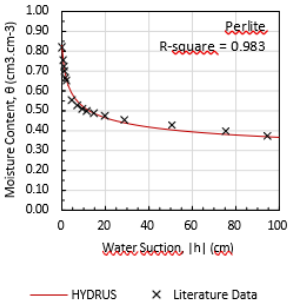
Στην περίπτωση του περλίτη, το μοντέλο αναπαρήγαγε την απότομη αρχική αποστράγγιση του υποστρώματος που συνδέεται με το μεγάλο μέγεθος μακροπόρων, η οποία ακολουθείται από απότομη μείωση του περιεχομένου υγρασίας σε σχετικά χαμηλές τιμές τάσης. Η συμφωνία με τα βιβλιογραφικά δεδομένα ήταν και σε αυτή τη περίπτωση μεγάλη (R2 = 0.983 και RMSE □

0.011 cm3.cm-3) αν και παρατηρήθηκε μια σχετική υποεκτίμηση του υγρού περιεχομένου σε μέσες τιμές τάσης (20-40 cm). Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην ετερογένεια μεγέθους και πυκνότητας των κόκκων, που επηρεάζουν τη συνοχή και την ομοιομορφία του περλίτη ως υδροπονικό υπόστρωμα.

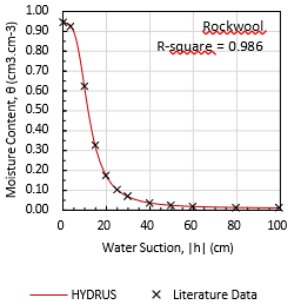
Τέλος, για τον πετροβάμβακα ο αλγόριθμος περιέγραψε επιτυχώς την ταχεία αποστράγγιση και τη χαμηλή υπολειμματική υγρασία που καταγράφεται πειραματικά. Η προσομοιωμένη καμπύλη κατακράτησης ακολούθησε την απότομη μείωση της υδατικής περιεκτικότητας μετά τα 10-15cm τάσης, σε συμφωνία με τη μικροδομή του υλικού, η οποία χαρακτηρίζεται από λεπτούς αλλά περιορισμένα διασυνδεδεμένους πόρους. Αν και η συνολική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα παραμένει μεγάλη (R2 = 0.986 και RMSE 0.013 cm3.cm-3), αποκλίσεις σε πολύ χαμηλές και υψηλές τιμές τάσης υποδηλώνουν ότι η υστέρηση και η ανομοιογένεια της μικροδομής επηρεάζει εντονότερα τον πετροβάμβακα σε σχέση με τον κοκκοφοίνικα και τον περλίτη, γεγονός το οποίο ο αλγόριθμος στην παρούσα έκδοση δεν είναι σε θέση να συλλάβει



Σχήμα 2(α). Επικύρωση της καμπύλης κατακράτησης υγρασίας για το υπόστρωμα κοκοφοίνικα. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και προσομοιωμένων τιμών του μοντέλου HYDRUS



Σχήμα 2(β). Επικύρωση της καμπύλης κατακράτησης υγρασίας για το υπόστρωμα περλίτη. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και προσομοιωμένων τιμών του μοντέλου HYDRUS



Σχήμα 2(γ). Επικύρωση της καμπύλης κατακράτησης υγρασίας για το υπόστρωμα πετροβάμβακα. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και προσομοιωμένων τιμών του μοντέλου HYDRUS

4.2 Επικύρωση Καμπυλών Υδραυλικής Αγωγιμότητας

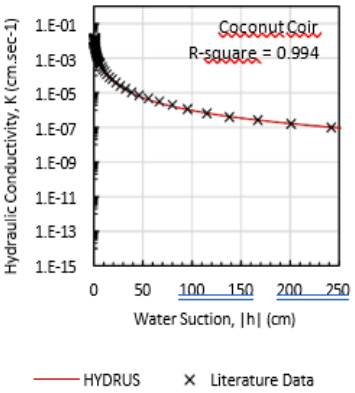
Η αξιολόγηση των συναρτήσεων υδραυλικής αγωγιμότητας έδειξε ότι το μοντέλο αποδίδει με υψηλή ακρίβεια τη μείωση της αγωγιμότητας σε συνθήκες ακόρεστης ροής, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 3(α), 3(β), και 3(γ).

Για τον κοκκοφοίνικα, η προσομοίωση περιέγραψε με επιτυχία τη σταδιακή πτώση της υδραυλικής αγωγιμότητας με την αύξηση της τάσης. Η καμπύλη του μοντέλου ακολουθεί τα πειραματικά δεδομένα σε όλο το εύρος των τιμών με τιμές R2 = 0.994 και RMSE 0.010 cm.sec-1, καταδεικνύοντας τη δυνατότητα του μοντέλου να αποτυπώνει τη σχετικά ομαλή μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας που χαρακτηρίζει το υπόστρωμα κοκοφοίνικα.

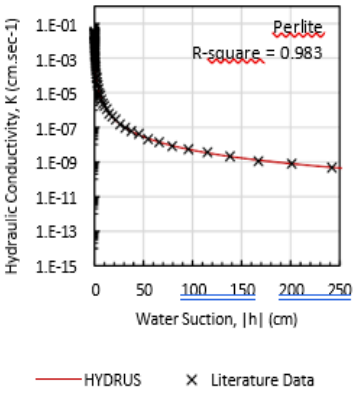
Στην περίπτωση του περλίτη, η προσομοίωση κατέγραψε την απότομη μείωση της αγωγιμότητας σε χαμηλές τιμές τάσης, η οποία αποδίδεται στη μεγάλη αναλογία μακροπόρων σε σχέση με το συνολικό όγκο του υποστρώματος. Η συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας ήταν και σε αυτή τη περίπτωση πολύ μεγάλη με τιμές R2 = 0.983 και RMSE 0.011 cm.sec-1 με μικρές αποκλίσεις να παρατηρούνται κυρίως σε ενδιάμεσες περιοχές (20–60 cm). Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται στην υψηλή ετερογένεια του περλίτη, που επηρεάζει την πραγματική συνδεσιμότητα των πόρων.

Για τον πετροβάμβακα, το μοντέλο κατέγραψε με επιτυχία τη ραγδαία μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας για σχετικά χαμηλές τιμές τάσης (10–20 cm), καθώς και τα πολύ χαμηλά επίπεδα αγωγιμότητας που καταγράφονται σε μεγαλύτερες τιμές. Η συνολική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα ήταν υψηλή (R^2 = 0.986, RMSE ≈ 0.013 $cm.sec^{-1}$), αν και καταγράφηκαν μικρές αποκλίσεις στις ακραίες τιμές τάσης, πιθανόν λόγω ανισοτροπίας και φαινομένων υστέρησης που χαρακτηρίζουν την πορώδη δομή του πετροβάμβακα.

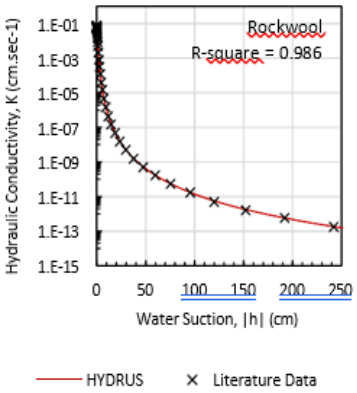
Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το υπολογιστικό πλαίσιο είναι σε θέση να περιγράψει με συνέπεια τις διαφορετικές υδραυλικές συμπεριφορές των υποστρωμάτων, ενσωματώνοντας με ακρίβεια τις συναρτήσεις αγωγιμότητας Van Genuchten–Mualem. Οι υψηλές τιμές R^2 και τα χαμηλά σφάλματα επικύρωσης καταδεικνύουν την αξιοπιστία του μοντέλου ως εργαλείου πρόβλεψης για εφαρμογές βελτιστοποίησης των φυσικοχημικών ιδιοτήτων υποστρωμάτων υδροπονίας.



Σχήμα 3(α). Επικύρωση της καμπύλης υδραυλικής αγωγιμότητας για το υπόστρωμα κοκκοφοίνικα. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και προσομοιωμένων τιμών του μοντέλου HYDRUS.



Σχήμα 3(β). Επικύρωση της καμπύλης υδραυλικής αγωγιμότητας για το υπόστρωμα περλίτη. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και προσομοιωμένων τιμών του μοντέλου HYDRUS.



Σχήμα 3(γ). Επικύρωση της καμπύλης υδραυλικής αγωγιμότητας για το υπόστρωμα πετροβάμβακα. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και προσομοιωμένων τιμών του μοντέλου HYDRUS.

4.3 Ανάλυση Ευαισθησίας σε Υποστρώματα Πετροβάμβακα

Η ανάλυση ευαισθησίας κατέδειξε ότι το πορώδες του υποστρώματος και πιο συγκεκριμένα ο δείκτης κατανομής πορώδους (n) ασκούν τη σημαντικότερη επίδραση στην κατακράτηση του νερού και την υδραυλική αγωγιμότητα του υποστρώματος. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον πετροβάμβακα, η αύξηση του συνολικού πορώδους ενίσχυσε τη διαθεσιμότητα του νερού όλο το φάσμα του εφαρμοζόμενου πιεζομετρικού φορτίου. Αντίθετα, υψηλότερες τιμές του δείκτη κατανομής πόρων (n) προκάλεσαν πιο απότομες καμπύλες αποστράγγισης, μειώνοντας την κατακράτηση σε μέσες τιμές τάσης. Η υπολειμματική υγρασία (θr) επηρέασε κυρίως τη διαθεσιμότητα του νερού σε χαμηλά επίπεδα κορεσμού, χωρίς όμως σημαντική επίδραση στην αγωγιμότητα σε υψηλότερες περιεκτικότητες.

Η ανάλυση ευαισθησίας κατέδειξε ότι το πορώδες του υποστρώματος και ειδικότερα ο δείκτης κατανομής πόρων (n) ασκούν καθοριστική επίδραση στην κατακράτηση του νερού και την υδραυλική αγωγιμότητα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, τα τρία σενάρια πετροβάμβακα διέφεραν ως προς την υπολειμματική υγρασία (θr), το κορεσμένο περιεχόμενο (θs), και τον δείκτη κατανομής πόρων (n).

Πίνακας 2. Φυσικοχημικές ιδιότητες των υποστρωμάτων που εξετάστηκαν, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

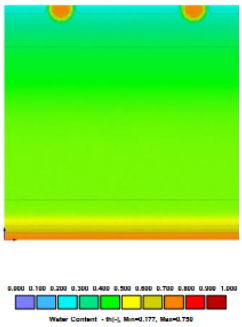
Υπόστρωμα	θ_r [-]	θ_s [-]	α [1/cm]	n [-]	K_s [cm/sec]	l [-]
Πετροβάμβακας 1	0.022	0.729	0.7353	4.2004	0.229	0.5
Πετροβάμβακας 2	0.001	0.941	0.9166	3.7685	7.77E-04	0.5
Πετροβάμβακας 3	0.018	0.571	0.9715	3.3448	0.60	0.5

Οι προσομοιώσεις στην αρχή της άρδευσης (Σχήματα 4α–4γ) έδειξαν ότι η κατανομή της υγρασίας παρουσίασε σαφείς διαφοροποιήσεις. Ενώ στα τελικά στάδια της άρδευσης (Σχήματα 5α–5γ), οι διαφορές έγιναν εντονότερες:

- Το υπόστρωμα με υψηλό πορώδες (Πετροβάμβακας 2) διατήρησε τη μεγαλύτερη διαθέσιμη ζώνη υγρασίας σε όλο το βάθος του προφίλ.
- Το σενάριο με υψηλό δείκτη (n) (Πετροβάμβακας 1) εμφάνισε απότομη αποστράγγιση, με έντονη μείωση της υγρασίας σε μέσες τιμές τάσης.
- Ο Πετροβάμβακας 3 λειτούργησε ενδιάμεσα, συνδυάζοντας χαμηλότερη συνολική κατακράτηση με μεγαλύτερη υπολειμματική υγρασία.

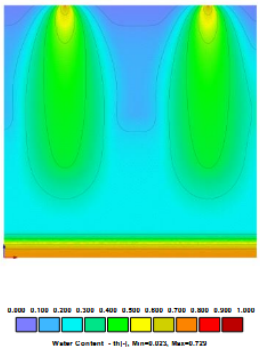
Συνολικά, η ανάλυση CFD επιβεβαίωσε ότι στοχευμένη τροποποίηση φυσικοχημικών παραμέτρων των υποστρωμάτων μπορεί να βελτιστοποιήσει τη συμπεριφορά τους σε υδροπονικές εφαρμογές. Υπόστρωμα με ενδιάμεσο πορώδες και ισορροπημένη κατανομή πόρων φαίνεται να προσφέρει τον καλύτερο συνδυασμό αποστράγγισης και διαθεσιμότητας νερού, μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων.

Σχήμα 4(α). Κατανομή υγρασίας σε υπόστρωμα πετροβάμβακα στην αρχή της άρδευσης (πετροβάμβακας 1, βλ. Πίνακα 2)

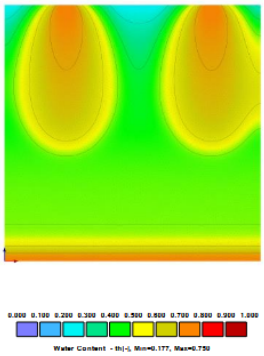


Σχήμα 4(β). Κατανομή υγρασίας σε υπόστρωμα πετροβάμβακα στην αρχή της άρδευσης (πετροβάμβακας 2, βλ. Πίνακα 2)

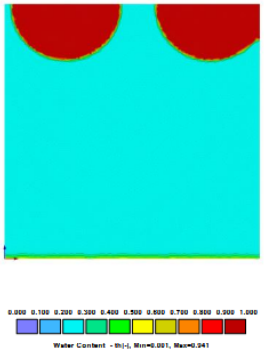
Σχήμα 4(γ). Κατανομή υγρασίας σε υπόστρωμα πετροβάμβακα στην αρχή της άρδευσης (πετροβάμβακας 3, βλ. Πίνακα 2)



Σχήμα 5(α). Κατανομή υγρασίας σε υπόστρωμα πετροβάμβακα στο τέλος της άρδευσης (πετροβάμβακας 1, βλ. Πίνακα 2)



Σχήμα 5(β). Κατανομή υγρασίας σε υπόστρωμα πετροβάμβακα στο τέλος της άρδευσης (πετροβάμβακας 2, βλ. Πίνακα 2)



Σχήμα 5(γ). Κατανομή υγρασίας σε υπόστρωμα πετροβάμβακα στο τέλος της άρδευσης (πετροβάμβακας 3, βλ. Πίνακα 2)

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης αναδεικνύουν τις δυνατότητες συνδυασμού της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFD) με αλγορίθμους βελιστοποίησης για τον χαρακτηρισμό και τη βελτίωση υδροπονικών υποστρωμάτων. Η επιβεβαιωμένη ικανότητα του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του HYDRUS να αναπαράγει τις καμπύλες κατακράτησης νερού van Genuchten και τις συναρτήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας Mualem επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του στην προσομοίωση φαινομένων μεταφοράς νερού σε υποστρώματα υδροπονίας διαφορετικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων.

5.1 Συμπεράσματα για την Υδραυλική Συμπεριφορά των Υποστρωμάτων

Η συγκριτική ανάλυση του περιλίτη, του κοκκοφοίνικα και του πετροβάμβακα ανέδειξε τη σημαντική μεταβλητότητα στις υδραυλικές αποκρίσεις των υδροπονικών υποστρωμάτων. Ο περλίτης, λόγω της κυριαρχίας των μακροπόρων, παρουσίασε ταχεία αποστράγγιση αλλά περιορισμένη κατακράτηση νερού, γεγονός που μπορεί να απαιτεί υψηλότερη συχνότητα άρδευσης για τη διατήρηση της υγρασίας στη ριζόσφαιρα. Αντίθετα, ο κοκκοφοίνικας εμφάνισε αυξημένη ικανότητα κατακράτησης νερού λόγω της λεπτής δομής των πόρων του, σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες που τονίζουν την καταλληλότητα του για καλλιέργειες που απαιτούν σταθερές συνθήκες υγρασίας (Wallach & Raviv, 2008). Ο πετροβάμβακας, ευρέως χρησιμοποιούμενος σε υδροπονικές καλλιέργειες, παρουσίασε ενδιάμεσες ιδιότητες, σε συμφωνία με την διαδεδομένη χρήση του ως υπόστρωμα καλλιέργειας (Raviv et al., 2002).

Η ανάλυση ευαισθησίας σε υποστρώματα πετροβάμβακα ανέδειξε περαιτέρω ότι το πορώδες και ο δείκτης κατανομής μεγέθους πόρων (n) αποτελούν τις πλέον καθοριστικές παραμέτρους για την υδραυλική συμπεριφορά και τη συνολική απόδοση των υποστρωμάτων. Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν προηγούμενες παρατηρήσεις, σύμφωνα με τις οποίες η μηχανική τροποποίηση της αρχιτεκτονικής των υποστρωμάτων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βελτιστοποίηση της διαθεσιμότητας νερού και της αποδοτικής παροχής θρεπτικών στοιχείων σε συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας (Savvas et al., 2002).

5.2 Σύγκριση με Προηγούμενες Προσεγγίσεις Μοντελοποίησης

Τα περισσότερα υφιστάμενα μοντέλα μεταφοράς νερού και διαλυτών σε υποστρώματα βασίζονται σε εμπειρικές συσχετίσεις ή απλοποιημένες αναλυτικές λύσεις (Simunek et al., 2016, Assouline & Or, 2013). Αν και χρήσιμες, οι προσεγγίσεις αυτές δεν επαρκούν για τη διερεύνηση πολυδιάστατων πεδίων ή για την αποτύπωση μη γραμμικών υδραυλικών αποκρίσεων. Η παρούσα μεθοδολογία, που συνδυάζει τεχνικές CFD με αλγορίθμους βελτιστοποίησης, προωθεί το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο επιτρέποντας την αναλυτική προσομοίωση των υδραυλικών διεργασιών, την άμεση συσχέτιση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του υποστρώματος με τη συμπεριφορά κατακράτησης νερού, και την επαναληπτική βελτιστοποίηση των κριτηρίων σχεδιασμού υποστρωμάτων. Ο συνδυασμός αυτός προσφέρει ερμηνευτική ισχύ και προγνωστική ικανότητα, μεταβαίνοντας από την απλή στατική περιγραφή των ιδιοτήτων προς τη δημιουργία εργαλείων σχεδιασμού καινοτόμων υποστρωμάτων.

5.3 Περιορισμοί και Μελλοντική Έρευνα

Παρά τις ενθαρρυντικές προοπτικές, η παρούσα μελέτη παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Πρώτον, η επικύρωση περιορίστηκε στα φαινόμενα μεταφοράς νερού, χωρίς να ληφθούν υπόψη η μεταφορά διαλυτών ή η απορρόφηση από το ριζικό σύστημα. Δεδομένου ότι η κίνηση των διαλυτών και η απορρόφηση θρεπτικών είναι κρίσιμες διεργασίες για την ανάπτυξη των φυτών, η ενσωμάτωση αυτών των μηχανισμών σε μελλοντικές εκδοχές του μοντέλου είναι απαραίτητη. Δεύτερον, η επικύρωση βασίστηκε σε δεδομένα της βιβλιογραφίας. Η

πειραματική επιβεβαίωση υπό ελεγχόμενες συνθήκες είναι αναγκαία για να διασφαλιστεί η προγνωστική ακρίβεια του αλγορίθμου σε νέα υποστρώματα.

Οι μελλοντικές επεκτάσεις θα επικεντρωθούν στη σύζευξη εκφράσεων μεταφοράς διαλυτών και απορρόφησης από τις ρίζες στο υπολογιστικό πλαίσιο CFD, επιτρέποντας την πλήρη περιγραφή της δυναμικής νερού και θρεπτικών στοιχείων. Η εφαρμογή σε καλλιέργειες υψηλής αξίας, όπως η φαρμακευτική κάνναβη, θα αναδείξει περαιτέρω τη χρησιμότητα του μοντέλου για την προσαρμογή υποστρωμάτων σε εξειδικευμένα συστήματα καλλιέργειας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Assouline, S., & Or, D. (2013). Conceptual and Parametric Representation of Soil Hydraulic Properties: A Review. Vadose Zone Journal, 12(4), 1–20. https://doi.org/10.2136/vzj2013.07.0121

Bear, Jacob. (2014). Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications Incorporated. Boris, J. P. (1989). New Directions in Computational Fluid Dynamics. Annual Review of Fluid Mechanics, 21(1), 345–385. https://doi.org/10.1146/annurev.fl.21.010189.002021

Gohardoust, M. R., Bar-Tal, A., Effati, M., & Tuller, M. (2020). Characterization of Physicochemical and Hydraulic Properties of Organic and Mineral Soilless Culture Substrates and Mixtures. Agronomy, 10(9), 1403. https://doi.org/10.3390/agronomy10091403

Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12(3), 513–522. https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513

Pandey, K., Singh, K. G., & Singh, A. (2023). Multi-Sensors based smart nutrient reuse management system for closed soilless culture under protected cultivation. Computers and Electronics in Agriculture, 204, 107495. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107495

Saleel C.A., Shaija A., & Jayraj S. (2013). Computational simulation of fluid flow over a triangular step using immersed boundary method. Intern. Journal of Computational Methods, 10(04), 1350016. https://doi.org/10.1142/S0219876213500163

Savvas, Dimitrios., & Passam, Harold. (2002). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo Publications.

Schroeder, F. G., & Engwicht, K. (2005). GAS CONCENTRATION IN THE ROOT ZONE OF ROSA HYBRIDA L. GROWN IN DIFFERENT GROWING MEDIA. Acta Horticulturae, 697, 49–55. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.697.4

Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., & Šejna, M. (2016). Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. Vadose Zone Journal, 15(7), 1–25. https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033

van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892–898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

Wallach, R. (2019). Physical characteristics of soilless media. In Soilless Culture: Theory and Practice Theory and Practice (pp. 33–112). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00003-7

Wallach, R., & Raviv, M. (2008). THE HYDRAULIC PROPERTIES OF GROWING MEDIA - FROM LABORATORY MEASUREMENTS TO GREENHOUSE MANAGEMENT. Acta Horticulturae, 779, 263–272. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.779.32

Zhao, P., Xu, J., Liu, X., Ge, W., & Wang, J. (2020). A computational fluid dynamics-discrete element-immersed boundary method for Cartesian grid simulation of heat transfer in compressible gas–solid flow with complex geometries. Physics of Fluids, 32(10). https://doi.org/10.1063/5.0023423

32. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΧΛΟΟΤΑΠΗΤΑ

Μ. Κούτρας, Β. Λιάκος & Π. Βύρλας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας-Αγροτεχνολογίας, Εργαστήριο Αρδευτικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Γαιόπολις, 41500, Λάρισα, irrenglab@uth.gr

Περίληψη

Ο τεχνητός χλοοτάπητας έχει αποκτήσει ευρεία χρήση σε αθλητικά γήπεδα, καθώς θεωρείται εναλλακτική λύση έναντι του φυσικού χλοοτάπητα για λόγους εξοικονόμησης νερού και ελάχιστης συντήρησης. Ωστόσο, οι υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι ένα δυνητικά σημαντικό δυσμενές χαρακτηριστικό του τεχνητού χλοοτάπητα. Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να αξιολογηθεί η επίδραση της άρδευσης στη θερμοκρασία του τεχνητού χλοοτάπητα. Για τη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας εφαρμόσθηκαν στρατηγικές μιας (άπαξ) άρδευσης μεγάλης διάρκειας και πολλαπλή εφαρμογή νερού σύντομης διάρκειας. Η εφαρμογή νερού μεγάλης διάρκειας δεν ήταν αποτελεσματική, αφού η άρδευση μείωσε τη θερμοκρασία της επιφάνειας έως και 30°C, αλλά ανέκαμψε σχετικά γρήγορα. Το καλύτερο αποτέλεσμα δροσισμού εμφανίστηκε στις περιπτώσεις που το νερό εφαρμόστηκε σε κύκλους μικρής διάρκειας (5 min), όπου η θερμοκρασία της αρδευόμενης επιφάνειας παρέμεινε κάτω από αυτήν της μη διαβρεχόμενης επιφάνειας καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου μετά την πρώτη εφαρμογή νερού.

Λέξεις κλειδιά: συνθετικός χλοοτάπητας, αθλητικά γήπεδα, επιφανειακή θερμοκρασία, κυκλική άρδευση.

IRRIGATION EFFECT ON ARTIFICIAL TURF TEMPERATURE

M. Koutras, V. Liakos & P. Vyrlas*

*University of Thessaly, Department of Agrotechnology, Irrigation Engineering and Technology Lab, Gaiopolis, 41500, Larissa, Greece, *irrenglab@uth.gr*

ABSTRACT

Artificial turf has gained widespread use in sports fields, as it is considered an alternative to natural turf due to water conservation and minimal maintenance. However, high surface temperatures occurring during the day are a potentially significant adverse characteristic of artificial turf. The aim of this study was to evaluate the effect of irrigation on the temperature of artificial turf. To reduce the surface temperature, a single (long-duration) irrigation strategy and multiple short-duration water applications were applied. The long-duration water application was not effective, as the irrigation reduced the surface temperature by up to 30°C, but recovered relatively quickly. The best cooling effect occurred in cases where water was applied in short-duration cycles (5 min), where the temperature of the irrigated surface remained below that of the non-irrigated surface throughout the time after the first water application.

Keywords: Synthetic turf, sports fields, surface temperature, cycling irrigation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τεχνητός (συνθετικός) χλοοτάπητας χρησιμοποιείται πλέον ευρέως, ιδιαίτερα σε γήπεδα ποδοσφαίρου, ως αντικατάσταση της επιφάνειας παιχνιδιού με γρασίδι σε περιπτώσεις όπου ο φυσικός χλοοτάπητας δεν μπορεί να αναπτυχθεί ή όπου η συντήρησή του είναι δαπανηρή ή ανεπιθύμητη.

Ωστόσο, η χρήση συνθετικών επιφανειών σε αθλητικά πεδία ερευνάται εδώ και καιρό, ιδίως με βάση τις αρνητικές επιπτώσεις του τεχνητού χλοοτάπητα στην υγεία των αθλητών και στο περιβάλλον (Cheng et al., 2014).

Ανησυχίες για την ανθρώπινη υγεία έχουν εγερθεί λόγω της σύνθεσης των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή επιφανειών τεχνητού χλοοτάπητα. Τα βασικότερα ζητήματα περιλαμβάνουν την αυξημένη θερμοκρασία επιφάνειας (Williams and Pulley, 2002; Serensits et al., 2011; Petrass et al., 2014; Jim, 2017; Liu and Jim, 2021) την τοξικότητα που σχετίζεται με τα υλικά πλήρωσης από καουτσούκ (Zhang et al., 2008; Claudio, 2008; Li et al., 2010; Ginsberg et al., 2011; Perkins et al., 2019; και τους τραυματισμούς (Meyers and Barnhill, 2004; Fuller et al., 2007a; Fuller et al., 2007b; Loughran et al., 2019).

Σε αντίθεση με το φυσικό γρασίδι, ο τεχνητός χλοοτάπητας δεν απαιτεί νερό για ανάπτυξη ή συντήρηση. Ωστόσο, υπάρχουν λόγοι για τους οποίους ο τεχνητός χλοοτάπητας χρειάζεται άρδευση. Οι βασικότεροι εκ των οποίων είναι ο δροσισμός του χλοοτάπητα και η έκπλυση ρύπων και εξάλειψη οσμών.

Ενώ τα σύγχρονα συνθετικά πεδία τρίτης γενιάς έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα προηγούμενα, αναπτύσσουν υψηλή θερμοκρασία όταν εκτίθενται στο άμεσο ηλιακό φως. Μια ηλιόλουστη, χωρίς σύννεφα ημέρα, με θερμοκρασία περιβάλλοντος 35^{o}C μπορεί να παράγει θερμοκρασίες πάνω από 70^{o}C στην επιφάνεια του γηπέδου.

Διάφορες μελέτες έχουν καταγράψει αυξημένες επιφανειακές θερμοκρασίες σε συνθετικά γήπεδα, ιδιαίτερα όταν εκτίθενται στο άμεσο ηλιακό φως (Jim, 2017; Devitt et al., 2007; McNitt et al., 2008; Penn State, 2015). Επιφανειακές θερμοκρασίες έως και 93 ^{o}C έχουν καταγραφεί σε συνθετικό χλοοτάπητα (Williams and Pulley, 2002).

Σε μελέτη του Εργαστηρίου Αρδευτικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, που διεξάχθηκε ταυτόχρονα και στο ίδιο πεδίο με την παρούσα, οι επιφανειακές θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στον τεχνητό χλοοτάπητα ήταν κατά 10 ^{o}C, 12 ^{o}C, 15 ^{o}C και 30 ^{o}C υψηλότερες από αυτές στην επιφάνεια του στίβου, στην άσφαλτο, στο γυμνό έδαφος και στο φυτοκαλυμμένο έδαφος, αντίστοιχα (Vyrlas et al., 2024).

Κατά τη διάρκεια των αθλητικών αγώνων, μπορεί να συσσωρευτούν ρύποι όπως βρωμιά, σωματικά υγρά (ιδρώτας, πτύελα, εκκρίματα από εκδορές) και σκόνη στον χλοοτάπητα. Η άρδευση μπορεί να απομακρύνει τους ρύπους αυτούς, ξεπλένοντας τα υλικά του τάπητα και οδηγώντας τα προς τα κάτω στο σύστημα στράγγισης. Επίσης, ξεπλένεται η σκόνη που δημιουργείται από το καουτσούκ (που οι παίκτες μπορεί να καταπίνουν καθώς πέφτουν στον χλοοτάπητα). Η εφαρμογή νερού βοηθά επίσης στην εξάλειψη των οσμών από το γήπεδο (Cheng and Reinhard, 2014; Serensits et al., 2011; Zhang et al., 2008; Li et al., 2010).

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση διαφόρων αρδευτικών εφαρμογών μείωσης της επιφανειακής θερμοκρασίας του τεχνητού χλοοτάπητα σύμφωνα με τη θεώρηση των παραπάνω μελετών.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Η μελέτη αυτή διεξήχθη στο Αθλητικό Κέντρο της Γαιόπολης του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σε γήπεδο ποδοσφαίρου με συνθετικό χλοοτάπητα. Η διαδικασία των μετρήσεων διήρκησε από τις 28 Αυγούστου έως τις 24 Σεπτεμβρίου του 2023. Η κατασκευή του αθλητικού πεδίου που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία ολοκληρώθηκε τον Αύγουστο του 2023.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της άρδευσης στη θερμοκρασία του συνθετικού χλοοτάπητα, εφαρμόστηκε νερό με καταιονισμό. Οι μεταχειρίσεις περιλάμβαναν τις ακόλουθες στρατηγικές άρδευσης:

- μία (άπαξ) εφαρμογή νερού μεγάλης διάρκειας,
- πολλαπλή εφαρμογή νερού σύντομης διάρκειας και
- μεταχείριση χωρίς άρδευση.

Η καταγραφή των θερμοκρασιών γινόταν καθ' όλο το 24ωρο, μέσω διάταξης εξοπλισμένης με ψηφιακά θερμόμετρα. Σε κάθε μεταχείριση μετρήθηκε η θερμοκρασία σε τρία ύψη: στην επιφάνεια του χλοοτάπητα και σε ύψη 1,5 m και 2,0 m από την επιφάνεια.

Η συλλογή δεδομένων περιλάμβανε τη θερμοκρασία του αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία, τη μέση σχετική υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εργαστηρίου Αρδευτικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε απόσταση 200 m από το γήπεδο.

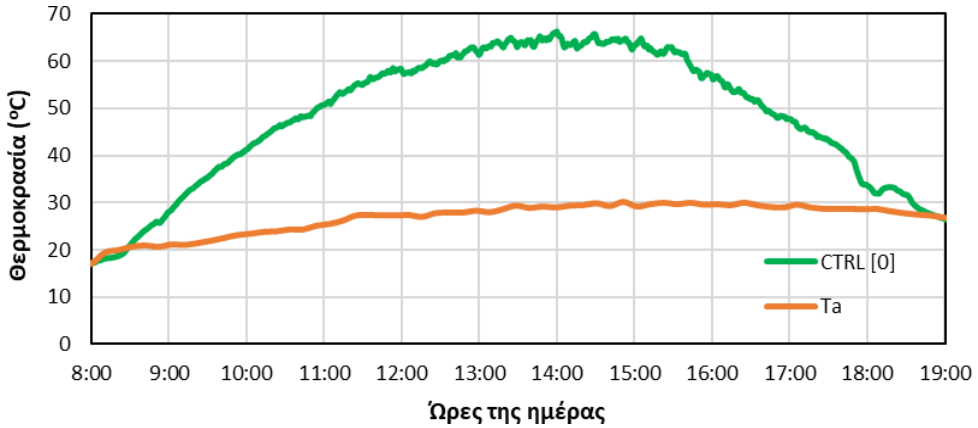
Για την εφαρμογή του νερού χρησιμοποιήθηκαν στατικοί εκτοξευτές επιφανειών πρασίνου, τοποθετημένοι σε σταθερή μεταλλική βάση.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

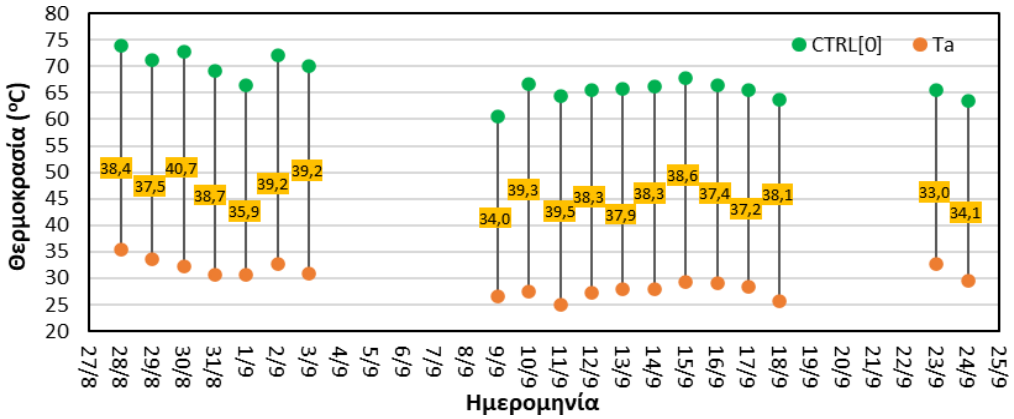
3.1 Θερμοκρασία επιφάνειας τεχνητού χλοοτάπητα

Στο διάγραμμα του Σχήματος 1 παρουσιάζεται η τυπική διακύμανση της θερμοκρασίας επιφάνειας του τεχνητού χλοοτάπητα και αυτή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια μιας ηλιόλουστης ημέρας.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καμπύλη θερμοκρασίας εμφανίζεται κωδωνοειδής, με τη θερμοκρασία να αυξάνεται γρήγορα τις πρωινές ώρες και να μειώνεται το απόγευμα, με τις μέγιστες θερμοκρασίες να καταγράφονται μετά το μεσημέρι.



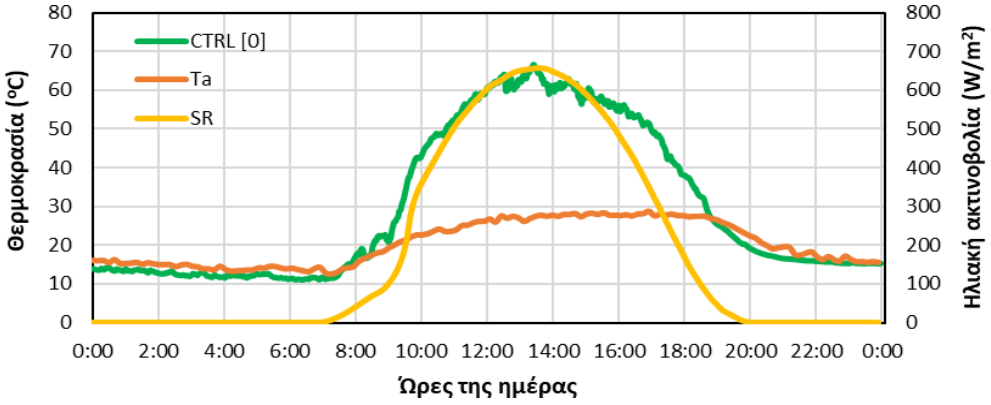
Σχήμα 1. Η θερμοκρασία επιφάνειας του χλοοτάπητα και η θερμοκρασία αέρα (Μέτρηση 16.09.2023).



Σχήμα 2. Οι μέγιστες θερμοκρασίες επιφάνειας του χλοοτάπητα και η θερμοκρασία αέρα την ίδια ώρα της ημέρας, για όλες τις ημέρες μετρήσεων.

Η επιφάνεια του τεχνητού χλοοτάπητα παρουσίασε θερμοκρασίες που ξεπερνούσαν τους 65,0°C μετά το μεσημέρι, τιμές υψηλότερες κατά 30 και πλέον βαθμούς ακόμα και στο τέλος Σεπτεμβρίου (Σχήμα 2).

Η ηλιακή ακτινοβολία είχε τη μεγαλύτερη επίδραση στην επιφανειακή θερμοκρασία του τεχνητού χλοοτάπητα. Σε μικρότερο βαθμό επηρέασε η θερμοκρασία αέρα (Σχήμα 3) ενώ ισχνή παρουσιάσθηκε η επίδραση της σχετικής υγρασίας και του ανέμου.

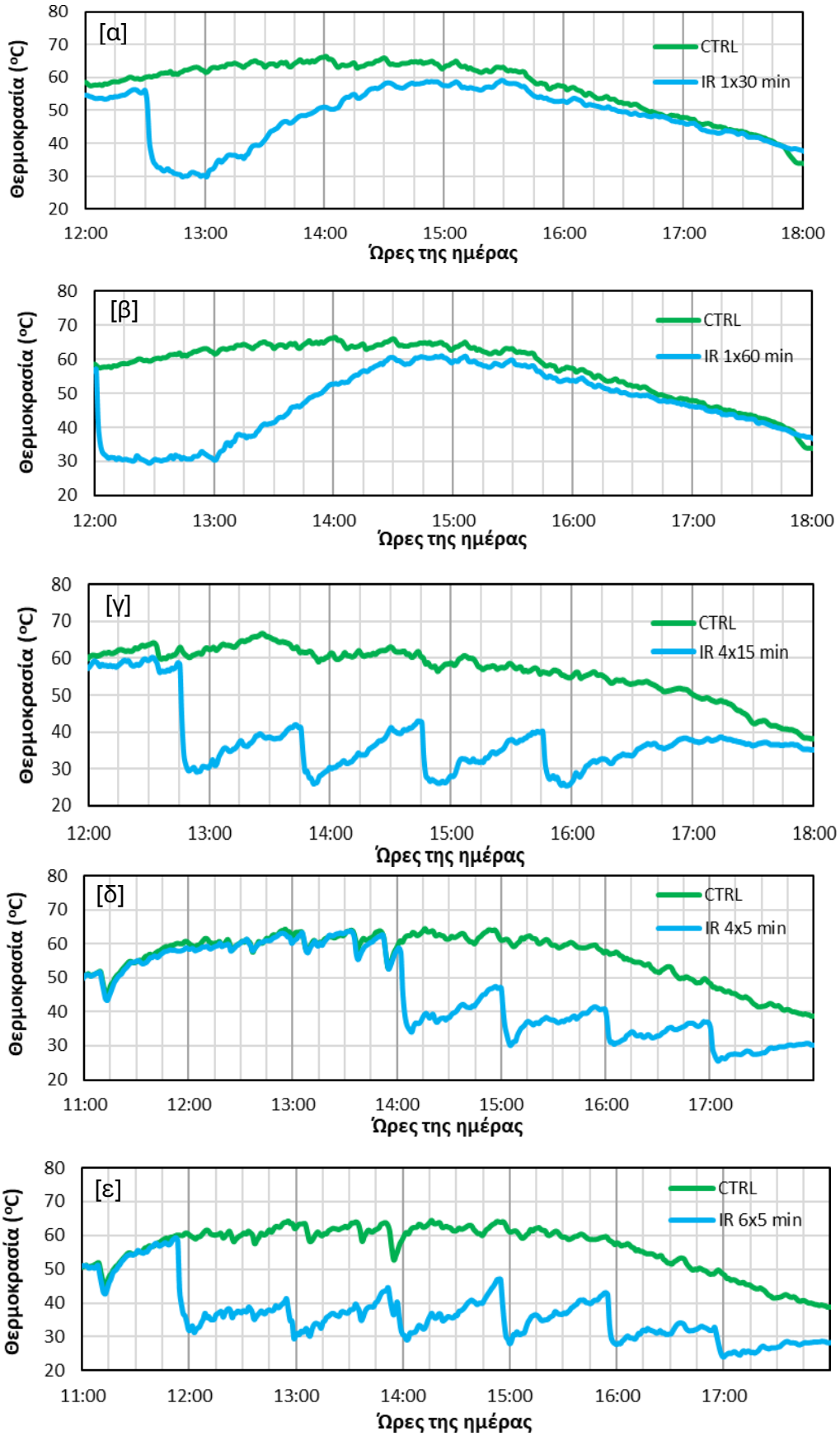


Σχήμα 3. Η διακύμανση της θερμοκρασίας επιφάνειας του χλοοτάπητα, της θερμοκρασίας αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας κατά το 24ωρο της 10.09.2023.

3.2 Επίδραση της άρδευσης

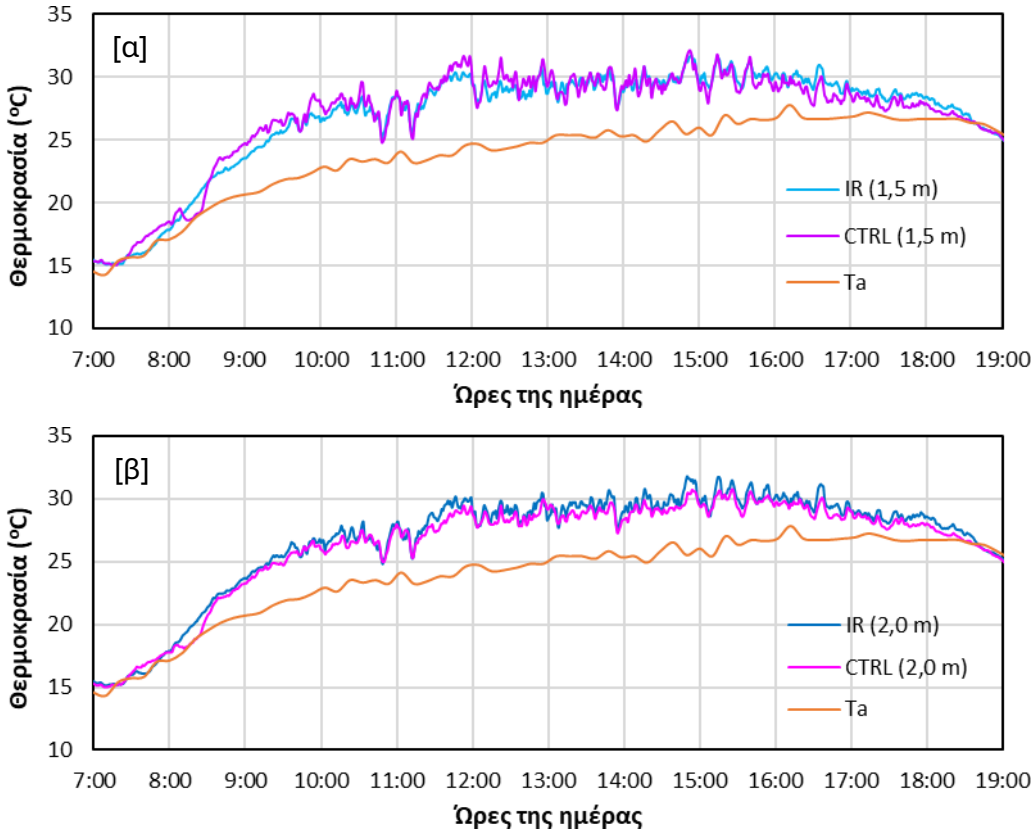
Η εφαρμογή νερού μεγάλης διάρκειας δεν ήταν αποτελεσματική, καθώς η θερμοκρασία αυξήθηκε σε υψηλές τιμές την ώρα που συνήθως ξεκινά η χρήση του γηπέδου (15:00). Η άρδευση μείωσε τη θερμοκρασία της επιφάνειας έως και 30°C. Ωστόσο, η θερμοκρασία ανέκαμψε σχετικά γρήγορα, επιστρέφοντας στα προ άρδευσης επίπεδα μετά από περίπου 90 min από το τέλος της εφαρμογής νερού (Σχήμα 4α και 4β).

Το καλύτερο αποτέλεσμα δροσισμού εμφανίστηκε στις περιπτώσεις που το νερό εφαρμόστηκε σε κύκλους μικρής διάρκειας. Η θερμοκρασία της αρδευόμενης επιφάνειας παρέμεινε κάτω από τη θερμοκρασία του μη διαβρεχόμενου χλοοτάπητα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου μετά την πρώτη εφαρμογή νερού στην κυκλική εφαρμογή διάρκειας 15 min (Σχήμα 4γ) και 5 min (Σχήμα 4δκαι ε). Η κυκλική εφαρμογή του νερού μικρής διάρκειας (5 min) είναι δυνητικά η αποδοτικότερη αφού μπορεί να εφαρμοσθεί χωρίς να διακόπτει σημαντικά τη χρήση του γηπέδου και να δροσίζει τον χλοοτάπητα με μικρότερη κατανάλωση νερού.



Σχήμα 4. Η διακύμανση της θερμοκρασίας επιφάνειας του μη αρδευόμενου χλοοτάπητα (CTRL) και των μεταχειρίσεων άρδευσης (IR).

Η εφαρμογή νερού δεν είχε επίδραση στη θερμοκρασία σε ύψος 1,5 και 2,0 m από την επιφάνεια του χλοοτάπητα. Στα ύψη αυτά, η θερμοκρασία κυμάνθηκε 2-3ºC υψηλότερα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος χωρίς να διαφέρει μεταξύ αρδευόμενης και μη επιφάνειας του συνθετικού χλοοτάπητα (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Η διακύμανση της θερμοκρασίας σε ύψος 1,5 (α) και 2,0 m (β) στην αρδευόμενη (IR) και την μη αρδευόμενη (CTRL) επιφάνεια του τεχνητού χλοοτάπητα σε σύγκριση με τη θερμοκρασία αέρα (Ta) (Μέτρηση 16.09.2023).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ευρήματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι οι επιφάνειες του τεχνητού χλοοτάπητα εμφανίζουν σημαντικά υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες και ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο καθοριστικός παράγοντας επίδρασης στη θερμοκρασία του τεχνητού χλοοτάπητα.

Το πρόβλημα θερμοκρασίας στα πεδία με τεχνητό χλοοτάπητα μπορεί να αντιμετωπισθεί με άρδευση. Η μείωση της θερμοκρασίας είναι βραχύβια καθώς αρχίζει σιγά-σιγά να αυξάνεται μετά την άρδευση. Για το λόγο αυτό, οι διαχειριστές των γηπέδων, σε εγκαταστάσεις υψηλής χρήσης πρέπει να εφαρμόζουν νερό όχι μόνο μεταξύ των αγώνων ή προπονήσεων αλλά και κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε ανάπαυλας.

Υπό τις συνθήκες αυτής της πειραματικής διαδικασίας, η μικρής διάρκειας, κυκλική εφαρμογή νερού, αποτέλεσε μια αποτελεσματική στρατηγική άρδευσης του τεχνητού χλοοτάπητα για τη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειάς του.

Τα αποτελέσματα μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία πρωτοκόλλων άρδευσης που θα χρησιμοποιούνται για τον δροσισμό του τεχνητού χλοοτάπητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Cheng, H., Hu, Y. and Reinhard, M., 2014. *Environmental and Health Impacts of Artificial Turf: A Review*, Environ. Sci. Technol., 48, 2114-2129.

Claudio, L., 2008. *Synthetic turf: Health debate takes root*. Environmental Health Perspectives, 116, 116–122.

Devitt, D.A., Young, M.H., Baghzouz, M., and Bird, B.M, 2007. *Surface Temperature, Heat Loading and Spectral Reflectance of Artificial Turfgrass*. Journal of Turfgrass and Sports Surface Science, 83, 68-82.

Fuller, C.W., Dick, R.W., Corlette, J., and Schmalz, R., 2007. *Comparison of the incidence, nature and cause of injuries sustained on grass and new generation artificial turf by male and female football players. Part 1: match injuries*. Br. J. Sports Med., 41, i20–i26.

Fuller, C.W., Dick, R.W., Corlette, J., and Schmalz, R., 2007. *Comparison of the incidence, nature and cause of injuries sustained on grass and new generation artificial turf by male and female football players. Part 2: training injuries*. Br. J. Sports Med., 41, i27–i32.

Ginsberg, G., Toal, B., Simcox, N., et al., 2011. *Human health risk assessment of synthetic turf fields based upon investigation of five fields in Connecticut*. J. Toxicol. Environ. Health, Part A 74 (17), 1150–1174.

Jim, C.Y., 2017. *Intense summer heat fluxes in artificial turf harm people and environment*. Landscape and Urban Planning, (157):561–576.

Li, X., Berger, W., Musante, C., and Mattina, M.I., 2010. *Characterization of substances released from crumb rubber material used on artificial turf fields*. Chemosph, 80(3), 279−85

Liu, Z., and Jim, C.Y., 2021. *Playing on Natural or Artificial Turf Sports Field? Assessing Heat Stress of Children, Young Athletes, and Adults in Hong Kong*. Sust. Cities and Soc,75, 103271

Loughran, G.J., Vulpis, C.T., Murphy, J.P., Weiner, D.A., Svoboda, S.J., Hinton, R.Y., and Milzman, D.P., 2019. *Incidence of knee injuries on artificial turf versus natural grass in National Collegiate Athletic Association American football: 2004-2005 through 2013-2014 seasons*. The American journal of sports medicine, 47(6), 1294–1301.

McNitt, A.S., Petrunak, D.M., and Serensits, T.J., 2008. *Temperature Amelioration of Synthetic Turf Surfaces through Irrigation*. Acta Hortic. (ISHS), 783, 573-582.

Meyers, M.C., and Barnhill, B.S., 2004. *Incidence, causes, and severity of high school football injuries on FieldTurf versus natural grass: a 5-year prospective study*. Am. J. Sports Med., 32, 1626–1638.

Penn State's Center for Sports Surface Research, 2015. *The Effect of Irrigation on Synthetic Turf Characteristics: Surface Temperature, Soccer Ball Roll, and Traction*. Progress Report.

Perkins, A.N., Inayat-Hussain, S.H., Deziel, N.C., et al., 2019. *Evaluation of potential carcinogenicity of organic chemicals in synthetic turf crumb rubber*. Env. Res. 169, 163– 172.

Petrass, L.A., Twomey, D.M., and Harvey, J.T., 2014. *Understanding how the components of a synthetic turf system contribute to increased surface temperature*. Proc. Eng, 72, 943–948.

Serensits, T.J., McNitt, A.S., and Petrunak, D.M., 2011. *Human Health Issues on Synthetic Turf in the USA*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P, Journal of Sports Engineering and Technology, 225(3), 139-146.

Vyrlas, P., Koutras, M., and Liakos, V., 2024. *Surface Temperature Experienced and Irrigation Effects on Artificial Turf*. WSEAS Transactions on Env. and Development, 20, 194- 202.

Williams, C.F., and Pulley, G.E., 2002. *Synthetic Surface Heat Studies*. Available at https://plantscience.psu.edu/research/centers/ssrc/research/synthetic-turf-surface-temperature.

Zhang, J.F., Han, I.K., Zhang, L., and Crain, W., 2008. *Hazardous chemicals in synthetic turf materials and their bioaccessibility in digestive fluids*. J. Exposure Sci. Environ. Epidemiol., 18, 600–607.

33. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΦΥΤΟΥ ΣΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Αναστασία Αγγελάκη[1], Αθανάσιος Βογιατζής[1], Βασιλική Ρούστα[1], Μαρία Ελένη Κωτσοπούλου[1], Ευγενία Κριαρίδου[1], Νικόλαος Κοσμάς[1], Καλλιόπη Χρυσούλα Νησιώτη[1] & Βασιλική Μπότα[1]

[1] *Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, Τ.Κ. 38446, Βόλος, anaggel@uth.gr*

Περίληψη

Η χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους (SWCC) αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τη διερεύνηση της κίνησης του νερού και της μεταφοράς ουσιών στην ακόρεστη ζώνη, ενώ επιπλέον, δίνει πληροφορίες για τις υδραυλικές παραμέτρους του εδάφους, που επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων για τον προγραμματισμό άρδευσης. Το ριζικό σύστημα των φυτών αναπτύσσεται στην ακόρεστη ζώνη και επομένως η γνώση της επίδρασης της παρουσίας φυτού στη χαρακτηριστική καμπύλη μπορεί να συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της χρήσης του αρδευτικού νερού. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις τάσης και υγρασίας στο πεδίο, με και χωρίς την παρουσία φυτού, ώστε να μελετηθεί η επίδραση της παρουσίας του ριζικού συστήματος των φυτών στη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης. Τα αποτελέσματα έδειξαν, επίδραση της φυτικής κάλυψης του εδάφους στη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης. Συγκεκριμένα, για τιμές μύζησης που αντιστοιχούν σε υγρασίες μικρότερες από την υδατοϊκανότητα, παρουσιάστηκε μετατόπιση της καμπύλης προς τα αριστερά, δηλαδή προς μικρότερες τιμές υγρασίας, ενώ για τιμές τάσης που αντιστοιχούν από τη μέγιστη υγρασία έως και κάτω από την υδατοϊκανότητα, η καμπύλη δεν παρουσίασε μεταβολή. Συμπερασματικά, η αλληλεπίδραση του ριζικού συστήματος των φυτών με το διαθέσιμο νερό στο έδαφος, επηρεάζει τα επίπεδα υγρασίας, με αποτέλεσμα η χαρακτηριστική καμπύλη να παρουσιάζει για εύρος μυζήσεων μεγαλύτερων από την τιμή που αντιστοιχεί στην υδατοϊκανότητα, μετατόπιση προς μικρότερες τιμές υγρασίας.

Λέξεις κλειδιά: υδραυλικές παράμετροι, άρδευση, ακόρεστη ζώνη, ακόρεστη ροή

EFFECT OF THE PRESENCE OF PLANTS ON THE SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE

A. Angelaki[1*], A. Vogiatzis, V. Rousta[1], M.E. Kotsopoulou[1], E. Kriaridou[1], N. Kosmas[1], K.C. Nisioti[1] & V. Bota[1]

[1]*University of Thessaly, Department of Agriculture, Cropo Production & Rural Environment, Fytokou Street, 38446, Volos, Greece *anaggel@uth.gr*

ABSTRACT

The soil water characteristic curve (SWCC) is a useful tool for investigating water movement and substance transport in the unsaturated zone, while it provides information on the decision-making for irrigation planning, hydraulic properties. The root system of the plants develops in the unsaturated zone and therefore, knowledge of the effect of the presence of plants on the characteristic curve can contribute to the optimization of irrigation water usage. In the present

study, experimental data of the water suction into the soil pores along with soil moisture data were obtained, with and without the presence of plants, to investigate the effect of the presence of the plant root system on the shape of the characteristic curve. The results showed that plants have impact on the soil water characteristic curve. Specifically, for suction values corresponding to soil moisture lower than the field capacity, a shift of the curve to the left was observed, i.e., towards lower soil moisture values, while for suction values corresponding from maximum soil moisture close to field capacity, there was no significant change of the characteristic curve. In conclusion, the interaction of the plant root system with the available water affects the soil moisture levels, while for suction ranges greater than the suction point corresponding to field capacity, a shift towards lower soil moisture values has been observed.

Keywords: hydraulic properties, irrigation, unsaturated zone, vadose zone

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους (Soil Water Characteristic Curve (SWCC)) είναι ένα από τα σημαντικότερα υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους, χρήσιμο και πολλές φορές απαραίτητο για την έρευνα από υδρολογική, περιβαλλοντική και γεωργική οπτική. Η SWCC ορίζεται ως η καμπύλη $\Psi(\theta)$, που συνδέει τη μύζηση του νερού στους πόρους του εδάφους ($\Psi = -h$) με την υγρασία του εδάφους θ (Ren et al. 2020, Chai et al. 2020, Zhai et al. 2013) και αποτελεί πηγή σημαντικών πληροφοριών για την κίνηση του νερού, τον μηχανισμό διήθησης, αλλά και για τη μεταφορά ουσιών στην ακόρεστη ζώνη. Κατά τη στράγγιση, η αρνητική τάση (h) του νερού στο έδαφος μειώνεται, επομένως η απόλυτη τιμή της (μύζηση Ψ) αυξάνει. Κατά τη διαβροχή, η αρνητική πίεση (h) αυξάνει, επομένως η απόλυτη τιμή της (Ψ) μειώνεται. Κατά τη διαδικασία στράγγισης-διαβροχής, η υγρασία του εδάφους κυμαίνεται μεταξύ της υπολειμματικής υγρασίας θ_r και της υγρασίας κορεσμού θ_s (Fredlund et al., 2011). Όσον αφορά την υπολειμματική υγρασία, οι Brooks και Corey (1964) συσχέτισαν τη θ_r με την κατανομή πόρων, ενώ ο Gaudet (1978) όρισε τη θ_r ως τη μικρότερη τιμή που μπορεί να φτάσει το θ κατά τη στράγγιση. Οι Van Genuchten (1978, 1980) και Mualem (1976) όρισαν τη θ_r ως την τιμή του θ για την οποία η κλίση $d\theta/dh$ είναι μηδέν (στην καμπύλη $\theta(h)$). Ο Haverkamp (1983) θεώρησε τη θ_r ως εμπειρική παράμετρο, που αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα νερού, η οποία δεν συμμετέχει στη ροή.

Η χαρακτηριστική καμπύλη αντιστοιχεί σε μια βασική υδραυλική συνάρτηση, η οποία βοηθά στην αποκωδικοποίηση της κίνησης του νερού στο έδαφος και στην ορθολογική διαχείριση του νερού, τη βελτιστοποίηση της άρδευσης, που μπορεί με τη σειρά της να οδηγήσει σε εξοικονόμηση νερού (Angelaki et al. 2004, 2023, Jabro et al. 2020). Επομένως, η διαχείριση των υδατικών πόρων για σκοπούς άρδευσης θα πρέπει να εμπλουτίζεται με τη γνώση της κίνησης του νερού στο έδαφος, καθώς και των υδραυλικών παραμέτρων που εμπλέκονται στις σχέσεις νερού-εδάφους (Kargas et al., 2022, 2024). Η γνώση αυτή συμβάλλει στον προγραμματισμό άρδευσης, στις μελέτες στράγγισης, αλλά και στη μελέτη της υδρολογίας μιας λεκάνης απορροής γενικότερα. Έτσι, η διαχείριση του διαθέσιμου νερού στη γεωργία μπορεί να επιτευχθεί με ορθολογικό τρόπο (Mualem 1976, Eyo et al. 2022). Η ανάπτυξη των καλλιεργειών εξαρτάται από το νερό του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη (Jabro et al. 2020, Li et al., 2020), επομένως η χαρακτηριστική καμπύλη παρέχει ουσιαστικές και εξαιρετικά σημαντικές υδραυλικές πληροφορίες για την εκτίμηση της διαθεσιμότητας του νερού του εδάφους για χρήση από τα φυτά, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της κίνησης του νερού και της ροής διαλυμένων ουσιών στην ακόρεστη ζώνη (Ket et al., 2018).

Ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης πραγματοποιείται είτε στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας όργανα, όπως η συσκευή Richards, στήλες εδάφους με συστήματα πίεσης-

υγρασίας, συσκευή δίσκου πιέσεως (pressure ceramic plate extractor) κ.λπ., είτε στο πεδίο, όπου χρησιμοποιούνται watermarks, τενσιόμετρα, διηθητόμετρα τύπου mini disc infiltrometer, κ.α. (Lin et al. 2024, Angelaki et al. 2023, Zeitoun et al. 2021, Sihag et al. 2020, Kumar et al. 2010). Τόσο τα εργαστηριακά πειράματα, όσο τα πειράματα πεδίου έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Ket et al. 2018, Zeitoun et al. 2021).

Μελετώντας τη χαρακτηριστική καμπύλη μπορεί να αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο το έδαφος συγκρατεί και απελευθερώνει νερό, αλλά και επιπλέον, να εκτιμηθεί η διαθέσιμη υγρασία, η οποία σχετίζεται με τις υδατικές ανάγκες των φυτών. Η χαρακτηριστική καμπύλη σχετίζεται επίσης με διάφορες υδραυλικές παραμέτρους και φυσικές ιδιότητες, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, το μέγεθος των πόρων του εδάφους κ.λπ., (Zeitoun et al. 2021, Jiang et al. 2019), και έχει χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των υδρολογικών επιδράσεων της βλάστησης (Fuentes 2009, Li et al. 2020).

Η γνώση και η προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης αποτελεί χρήσιμο εργαλείο, ώστε να εμβαθύνουμε στην κίνηση του νερού και στις υδραυλικές παραμέτρους του εδάφους, όπως η υγρασία του εδάφους στον κορεσμό, η υπολειμματική υγρασία του εδάφους, το έργο που απαιτείται για πλήρη αποστράγγιση, η υδατοϊκανότητα (FC) και το σημείο μόνιμης μάρανσης (PWP) (Zeitoun et al. 2021, Li et al. 2020, Fuente et al. 2009, Patil et al. 2009, Angelaki et al. 2013, Zai et al. 2013, 2020). Η μοντελοποίηση της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι μεν απαιτητική, όμως αναδεικνύει, ότι η μελέτη της κίνησης του νερού στο έδαφος είναι κρίσιμης σημασίας για το μέλλον των υδατικών πόρων (Yaseen et al. 2021, Achieng 2019), με τις πιο πρόσφατες έρευνες να υποδεικνύουν τη σημασία του προσδιορισμού της από δεδομένα είτε στο πεδίο, είτε στο εργαστήριο (Batsilas et al. 2023, Jabro and Stevens 2022, Wang et al. 2021), καθώς το σχήμα και η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εξαρτώνται από τις φυσικές ιδιότητες και υδραυλικές παραμέτρους του εδάφους και έχουν αντίκτυπο στη συμπεριφορά της καθοδικής κίνησης του νερού (Ghanbarian, B. and Skaggs 2022, Ranaivomanana et al. 2022, Zhang et al. 2021, Zhai et al. 2020). Επιπλέον, ορισμένοι επιστήμονες έχουν στραφεί σε νέες τεχνικές, όπως η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη, με πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα (Baumann et al. 2022, Li et al. 2022, Yang et al. 2021, Nikooee et al. 2020).

Ωστόσο, πέρα από τις φυσικές ιδιότητες, η παρουσία ή όχι φυτοκάλυψης επηρεάζει τη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης (Jabro and Stevens 2022, Leung et al. 2015, Antonopoulos et al. 2013), όμως οι μελέτες είναι περιορισμένες και χρειάζεται περαιτέρω και συστηματική πειραματική διερεύνηση. Επιπλέον, η παρουσία των ριζών των φυτών αυξάνει την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, διευκολύνοντας τη διήθηση και μειώνοντας την ικανότητα συγκράτησης του νερού (Lin et al., 2025). Στην παρούσα εργασία γίνεται διερεύνηση της χαρακτηριστικής καμπύλης σε γυμνό έδαφος και σε έδαφος παρουσία φυτών βιομηχανικής κάνναβης (*Felina 32*), ώστε να διερευνηθεί αν η παρουσία του φυτού επηρεάζει τη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης του εδάφους.

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η χαρακτηριστική καμπύλη ορίζεται ως η καμπύλη $\Psi(\theta)$ που συνδέει τη μύζηση του νερού των εδαφικών πόρων ($\Psi = -h$) με την εδαφική υγρασία θ. Η μύζηση είναι η απόλυτη τιμή της αρνητικής πίεσης που επικρατεί στην ακόρεστη ζώνη και η υγρασία κυμαίνεται μεταξύ των ακραίων τιμών θ_s και θ_r, όπου θ_s είναι η υγρασία κορεσμού και θ_r είναι η υπολειμματική υγρασία. Κατά τη στράγγιση, η αρνητική τάση (h) του νερού που παραμένει στο έδαφος μειώνεται, επομένως η απόλυτη τιμή της (Ψ) αυξάνει. Κατά την διαβροχή, η αρνητική πίεση (h) αυξάνει, επομένως η απόλυτη τιμή της (Ψ) μειώνεται. Στην πράξη, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στράγγισης-διαβροχής, η υγρασία του εδάφους ποικίλλει μεταξύ της

υπολειμματικής περιεκτικότητας σε νερό θ_r και της περιεκτικότητας σε νερό στον κορεσμό θ_s (Fredlund et al. 2011). Στην ακόρεστη ζώνη, η συνάρτηση $\Psi = f(\theta)$ μεταξύ της μύζησης και της υγρασίας του εδάφους δεν είναι συνάρτηση ένα προς ένα (1-1), που σημαίνει, ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στράγγισης-διαβροχής, μία τιμή Ψ αντιστοιχεί σε δύο τιμές υγρασίας εδάφους θ_i (μία για τη στράγγιση και μία διαφορετική για την διαβροχή). Επιπλέον, παρατηρείται, ότι η καμπύλη προσρόφησης δείχνει μια «προς τα κάτω» μετατόπιση σε σχέση με την καμπύλη εκρόφησης (ή απελευθέρωσης). Αυτό συνίσταται στο φαινόμενο υστέρησης και αποτυπώνεται γραφικά με τον βρόχο υστέρησης.

$$\Theta = \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} = \frac{1}{[1+(a\Psi)^n]^m} \qquad (1)$$

όπου:

$$m = 1-\frac{1}{n}\ , 0 < m < 1 \ (2)$$

Μία από τις πιο σημαντικές συναρτήσεις για την προσομοίωση της SWCC είναι το μοντέλο του van Genuchten (1978, 1980), που δίνεται από την εξίσωση:

θ_s είναι η υγρασία του εδάφους στον κορεσμό, θ_r είναι η υπολειμματική υγρασία, α, m, n είναι παράμετροι, που έχουν να κάνουν με τη μορφή και το σχήμα της καμπύλης $\Psi(\theta)$. Συγκεκριμένα, η παράμετρος α προκαλεί παράλληλη μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης χωρίς να αλλάζει το σχήμα της, εφόσον οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές, ενώ η παράμετρος n είναι υπεύθυνη για την παραμόρφωση της καμπυλότητας (Αγγελάκη 2004).
Η εξίσωση (1) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\Psi = \left[\left(\frac{\theta_s-\theta_r}{\theta-\theta_r}\right)^{1/m} - 1\right]^{1/n} \frac{1}{a} \qquad (3)$$

Στην καμπύλη $\Psi(\theta)$ το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη στράγγισης εκφράζει το έργο που απαιτείται για την πλήρη στράγγιση μιας μονάδας κορεσμένου εδάφους και παρομοίως ισχύει για την πλήρη διαβροχή. Η διαφορά μεταξύ των δύο εμβαδών αποτελεί το έργο υστέρησης, το οποίο εκφράζεται από τον τύπο:

$$\frac{w}{\gamma_w} = \int_0^{\theta_s} \Psi(\theta) d\theta \qquad (4)$$

όπου $\gamma_w = 1\ g/cm^3$ είναι το ειδικό βάρος του νερού.

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο (Γ.Π. 39°22′43″N, Γ.Μ. 22°44′30″E, υψόμετρο 70 m από την επιφάνεια της θάλασσας) καλλιεργήθηκε βιομηχανική κάνναβη (*Felina 32*) και πλησίον των φυτών τοποθετήθηκε σύστημα μέτρησης της εδαφικής υγρασίας, το οποίο τροφοδοτούνταν ενεργειακά από ηλιακό πάνελ και κατέγραφε τις τιμές σε data logger (Εικόνα 1). Ταυτόχρονα τοποθετήθηκε τενσιόμετρο με κεραμική κάψα, το οποίο μετρούσε τις τιμές της πίεσης του νερού των πόρων του εδάφους στο ριζόστρωμα. Από τις μετρήσεις που ελήφθησαν σχεδιάστηκε η χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους, τόσο για γυμνό έδαφος, όσο και για έδαφος παρουσία φυτού. Ταυτόχρονα, ελήφθησαν δείγματα γυμνού εδάφους και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε συσκευή δίσκου πιέσεως στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού

Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα δείγματα εδάφους αναλύθηκαν μηχανικά, ώστε να χαρακτηριστεί το έδαφος ως προς τα ποσοστά αργίλου, ιλύος και άμμου. Στο εργαστήριο μετρήθηκαν επίσης οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους, όπως η φαινόμενη ξηρή πυκνότητα (ρ_b), η υγρασία κορεσμού (θ_s), η υδατοϊκανότητα (FC), το σημείο μόνιμης μάρανσης (PWP), το pH, το ποσοστό οργανικής ουσίας (OM), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και τα ποσοστά $CaCO_3$. Οι μετρήσεις υγρασίας- πίεσης πραγματοποιήθηκαν σε τρεις επαναλήψεις και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι οι μέσες τιμές των επαναλήψεων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος (t-test) για επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

Εικόνα 1. Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης

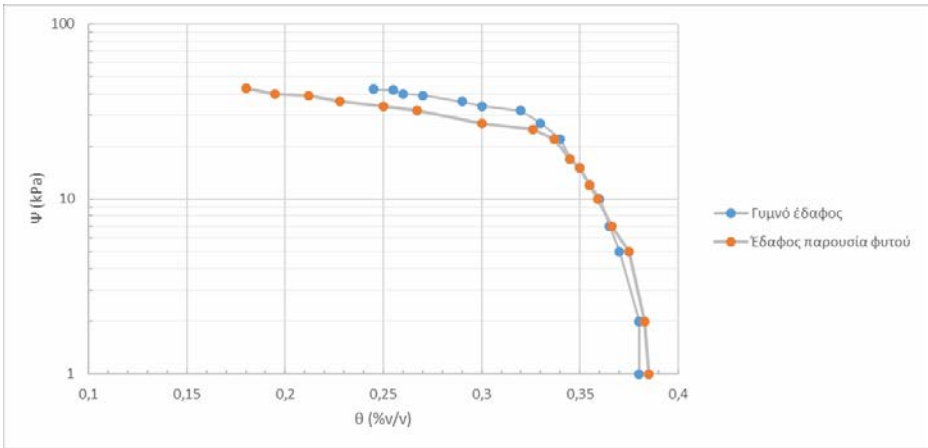
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Από τα δεδομένα της μηχανικής ανάλυσης το έδαφος χαρακτηρίστηκε ως αργιλοπηλώδες και τα ποσοστά αργίλου, ιλύος και άμμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Στον ίδιο πίνακα περιέχονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, όπως αυτές μετρήθηκαν στο εργαστήριο. Οι τιμές της χαρακτηριστικής καμπύλης του εδάφους από τα δεδομένα πίεσης- υγρασίας, όπως μετρήθηκαν στον αγρό για γυμνό έδαφος και για έδαφος με φυτοκάλυψη φαίνονται στο Σχήμα 1.

Πίνακας 1. Φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους

Παράμετρος	**Τιμή**
pH(1:1)	7,45 ± 0,7
EC (μS cm^{-1})	475,7 ± 6,5
OM (%)	2,1 ± 0,4
$CaCO_3$ (%)	9,2 ± 0,9
Clay (%)	32,0 ± 1,2
Silt (%)	40,0 ± 2,2
Sand (%)	28,0 ± 2,2
ρ_b (g cm^{-3})	1,40 ± 0,02
FC (%v/v)	32,0 ± 0,5
PWP (%v/v)	12,0 ± 0,5

Στο Σχήμα 1 παρατηρείται μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης προς μικρότερες τιμές υγρασίας, για τιμές πίεσης, που αντιστοιχούν σε υγρασίες κάτω από την υδατοϊκανότητα (στατιστικώς σημαντικές διαφορές). Παράλληλα, δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή (μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές) των ζευγών των τιμών πίεσης- υγρασίας, όταν οι τιμές τάσης κυμαίνονται από τη μέγιστη υγρασία έως και κάτω από την υδατοϊκανότητα. Η μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης υποδεικνύει αλληλεπίδραση του ριζικού συστήματος με το διαθέσιμο νερό στο έδαφος, η οποία επηρεάζει τα επίπεδα υγρασίας. Έτσι, η χαρακτηριστική καμπύλη παρουσιάζει, λόγω της παρουσίας του φυτού, μετατόπιση προς μικρότερες τιμές υγρασίας, για εύρος τάσεων μεγαλύτερων από την τιμή που αντιστοιχεί στην υδατοϊκανότητα. Επιπλέον παρατηρήθηκε, ότι μετά την εφαρμογή νερού στο έδαφος, η μέγιστη τιμή της υγρασίας δεν έφτασε την τιμή της υγρασίας κορεσμού, όπως αυτή μετρήθηκε στο εργαστήριο και στις δύο περιπτώσεις (γυμνό έδαφος και παρουσία φυτού). Ωστόσο, υπήρξε μια μικρή τάση αύξησης της μέγιστης τιμής υγρασίας στην περίπτωση παρουσίας φυτού, χωρίς όμως να είναι στατιστικώς σημαντική.



Σχήμα 1. Πειραματικές τιμές υγρασίας-πίεσης για γυμνό έδαφος και παρουσία φυτού.

Η εξήγηση που μπορεί να δοθεί για τη μετατόπιση αυτή της χαρακτηριστικής καμπύλης έχει να κάνει με την παρουσία των ριζών στο έδαφος, η οποία διευρύνει τους πόρους του εδάφους, δημιουργώντας διόδους και καθιστώντας ευκολότερη την κίνηση του νερού. Επιπλέον, οι ρίζες συμβάλλουν στην υδατοκατανάλωση του φυτού. Έρευνες έχουν δείξει, ότι η υδραυλική επίδραση των ριζών στο έδαφος εξαρτάται τόσο από τα είδη φυτών, όσο και από τους τύπους εδάφους (Vergani και Graf, 2016). Επιπλέον, η διαδικασία ανάπτυξης και αποσύνθεσης των ριζών έχει ποικίλες επιπτώσεις στους πόρους του εδάφους, και τα διαφορετικά ριζικά συστήματα, που διεισδύουν στους πόρους του εδάφους μπορούν να μεταβάλουν τις ιδιότητες και τη δομή του εδάφους (Ni et al., 2019, Jotisankasa and Sirirattanachat, 2017). Αυτό έχει ως συνέπεια μεταβολή της διαπερατότητας, του μηχανισμού διήθησης, αλλά και της συγκράτησης του νερού από το έδαφος (Ni et al., 2019). Επομένως, κατά την αξιολόγηση των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικοί συνδυασμοί βλάστησης-εδάφους. Για παράδειγμα, ορισμένες μελέτες υποδεικνύουν, ότι οι ποώδεις ρίζες μπορεί να αυξήσουν τη συγκράτηση νερού στο έδαφος φράσσοντας τους πόρους (Leung et al., 2015a, Leung et al., 2015b, Song et al., 2017, Jotisankasa and Sirirattanachat, 2017), ενώ άλλες έρευνες δείχνουν, ότι υπό συνθήκες χαμηλής πυκνότητας φύτευσης ή μικτής φύτευσης, οι ρίζες των φυτών μπορούν να μειώσουν τη συγκράτηση του νερού στο έδαφος και να αυξήσουν την υδραυλική αγωγιμότητα και τη διηθητικότητα (Ng et al., 2016, Ni et al., 2019). Η παρούσα μελέτη της χαρακτηριστικής καμπύλης αφορά την παρουσία του συγκεκριμένου φυτού στο συγκεκριμένο τύπο εδάφους και προτείνεται διερεύνηση σε άλλους τύπους εδαφών και φυτών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις τάσης και υγρασίας στο πεδίο με και χωρίς την παρουσία φυτού, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της παρουσίας του ριζικού συστήματος του φυτού στη χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους. Από τις μετρήσεις πίεσης-υγρασίας, προέκυψε, ότι υπάρχει επίδραση της φυτικής κάλυψης του εδάφους στην καμπύλη SWCC και μάλιστα η επίδραση αυτή αφορούσε μόνο τιμές υγρασίας μικρότερες της υδατοϊκανότητας. Έτσι, για τιμές τάσης που αντιστοιχούσαν σε τιμές υγρασίας μικρότερες από την υδατοϊκανότητα, παρουσιάστηκε μετατόπιση της καμπύλης προς τα αριστερά, δηλαδή προς μικρότερες τιμές υγρασίας, ενώ για τιμές τάσης που αντιστοιχούν από τη μέγιστη υγρασία έως και κάτω από την υδατοϊκανότητα, τα ζεύγη τιμών υγρασίας-πίεσης δεν παρουσίασαν ιδιαίτερη μεταβολή. Συμπερασματικά, κατά την εφαρμογή του νερού σε αργιλοπηλώδες έδαφος, η αλληλεπίδραση του ριζικού συστήματος του φυτού *Felina 32* με το διαθέσιμο νερό, επηρέασε τα επίπεδα υγρασίας, με αποτέλεσμα η χαρακτηριστική καμπύλη να παρουσιάζει για εύρος τάσεων μεγαλύτερων από την τιμή που αντιστοιχεί στην υδατοϊκανότητα, μετατόπιση προς μικρότερες τιμές υγρασίας. Επειδή η επίδραση διαφορετικών ριζικών συστημάτων και διαφορετικών τύπων εδαφών ποικίλει, θα πρέπει να γίνει διερεύνηση και σε άλλους τύπους εδαφών και φυτών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς της εργασίας θα ήθελαν να ευχαριστήσουν θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή του Εργαστηρίου Γεωργίας και Εφαρμοσμένης Φυσιολογίας Φυτών του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Γιαννούλη Κυριάκο, για τη διάθεση του χώρου του πειράματος στο Αγρόκτημα Π.Θ.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγγελάκη Α.,2004. *Διερεύνηση των υδροδυναμικών παραμέτρων σε ακόρεστη ροή με πειραματικές μεθόδους και μαθηματικά μοντέλα*. Διδακτορική Διατριβή, σελ. 241.

Achieng, K.O., 2019. *Modelling of soil moisture retention curve using machine learning techniques: Artificial and deep neural net-works vs support vector regression models Comput. Geosci., 133, 104320.*

Angelaki A., Sakellariou-Makrantonaki M., Tzimopoulos, C., 2004. Laboratory experiments and estimation of cumulative infiltration and sorptivity. Water Air Soil Pollut. Focus 4, 241–251. Angelaki A., Sakellariou-Makrantonaki M., Tzimopoulos C., 2013 Theoretical and

Experimental Research of Cumulative Infiltration. Transp. Porous Media, 100, 247–257.

Angelaki, Anastasia, Vasiliki Bota, and Iraklis Chalkidis, 2023. Estimation of Hydraulic Parameters from the Soil Water Characteristic Curve. Sustainability 15, no. 8: 6714. https://doi.org/10.3390/su15086714

Antonopoulos, V. Z., Georgiou, P. E., & Kolotouros, C. A., 2013. Soil water dynamics in cropped and uncropped fields in northern Greece using a dual-permeability model. Hydrological Sciences Journal, 58(8), 1748–1759. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.816424

Batsilas I., Angelaki A., Chalkidis I., 2023. Hydrodynamics of the Vadose Zone of a Layered Soil Column. Water, 15, 221.

Baumann P., Lee J., Behrens T., Biswas A., Six J., McLachlan G., Viscarra Rossel R.A., 2022. Modelling soil water retention and water-holding capacity with visible–near- infrared spectra and machine learning. Eur. J. Soil Sci., 73, e13220.

Brooks, A.T.; Corey, A.T. 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Papers. Colorado State University: Fort Collins, CO, USA, 1964.

Eyo E.U., Ng'ambi S., Abbey S.J., 2022. An overview of soil–water characteristic curves of stabilised soils and their influential factors. J. King Saud Univ.-Eng. Sci., 34, 31–45.

Fredlund D.G., Sheng D., Zhao J., 2011. Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. Can. Geotech. J., 86, 338–344.

Fuentes C., Zavala M., Saucedo H., 2009. Relationship between the storage coefficient and the soil-water retention curve in sub-surface agricultural drainage systems: water table drawdown. J. Irrig. Drain. Eng. 2009, 135, 279–285.

Gaudet, J.P., 1978. Transferts d'eau et de soluté dans les sols non-saturés: mesures et simulation. Ph.D. Thesis, Universite Scientifique et Médicale de Grenoble: Grenoble, France, p. 350.

Ghanbarian B., Skaggs T.H., 2022. Soil water retention curve inflection point: Insight into soil structure from percolation theory. Soil Sci. Soc. Am. J., 86, 338–344.

Havercamp R., 1983. Résolution de L'équation de l'Infiltration de l'Eau dans le Sol: Approches analytiques et numériques. https://theses.hal.science/tel-00688101

Jabro J.D., Stevens W.B., Iversen W.M., Allen B.L., Sainju U.M., 2020. Irrigation scheduling based on wireless sensors output and soil-water characteristic curve in two soils. Sensors, 20, 1336.

Jabro J.D., Stevens W.B., 2022. Soil-water characteristic curves and their estimated hydraulic parameters in no-tilled and conventionally tilled soils. Soil Tillage Res., 219, 105342.

Jiang C., Zhang H., Wang X., Feng Y., Labzovskii L., 2019. Challenging the land degradation in China's Loess Plateau: Benefits, limitations, sustainability, and adaptive strategies of soil and water conservation. Ecol. Eng. 2019, 127, 135–150.

Jotisankasa A., T. Sirirattanachat, 2017. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function. Can. Geotech. J., 1612–1622, 10.1139/cgj-2016-0281

Kargas G. and Mindrinos L., 2025. A new method of estimating infiltration parameters for furrow irrigation. Irrigation and Drainage, 74(2), 658–672. https://doi.org/10.1002/ird.3016

Kargas G., Koka D., Londra P. A., 2022. Evaluation of Soil Hydraulic Parameters Calculation Methods Using a Tension Infiltrometer. Soil Systems, 6(3), 63. https://doi.org/10.3390/soilsystems6030063

Ket P., Oeurng C., Degré, A. 2018. Estimating Soil Water Retention Curve by Inverse Modelling from Combination of In Situ Dynamic Soil Water Content and Soil Potential Data. Soil Syst., 2, 55.

Kumar S., Sekhar M., Reddy D.V., Mohan Kumar, M.S., 2010. Estimation of Soil Hydraulic Properties and Their Uncertainty: Comparison between Laboratory and Field Experiment. Hydrol. Process., 24, 3426–3435.

Leung A.K., A. Garg, J.L. Coo, C.W.W. Ng, B.C.H. Hau, 2015a. Effects of the roots of Cynodon dactylon and Schefflera heptaphylla on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity. Hydrol. Process., 29, pp. 3342-3354, 10.1002/hyp.10452

Leung A.K., A. Garg, C.W.W. Ng, 2015b. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil. Eng. Geol., 193, pp. 183-197, 10.1016/j.enggeo.2015.04.017

Li X., Hu C. F., Gao H., 2020. Determining soil water characteristic curve of lime treated loess using multiscale structure fractal characteristic. Sci. Rep. 10, 21569.

Li Y., Vanapalli S.K., 2022. Prediction of soil-water characteristic curves using two artificial intelligence (AI) models and AI aid design method for sands. Can. Geotech. J. 2022, 59, 129– 143.

Lin Liu, Lu Yili, Horton Robert, Ren Tusheng, 2024. Determination of soil water retention curves from thermal conductivity curves, texture, bulk density, and field capacity. Soil and tillage researchhttps://doi.org/10.1016/j.still.2023.105957

Lin Yunzhao, Jian Wenbin, Wang Hao, Zheng Guoming, Liu Qingling, Lu Jianjia, 2025. Effects of tree roots on water infiltration under extreme rainfall: insights from in-situ experiments. Journal of Hydrology, Volume 662, Part B, 133989, ISSN 0022-1694, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133989.

Mualem, Y. 19 76 . A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12, 513–522.

Ng C.W.W., J.J. Ni, A.K. Leung, C. Zhou, Z.J. Wang, 2016. Effects of planting density on tree growth and induced soil suction. Géotechnique, 66, pp. 711-724, 10.1680/jgeot.15.P.196

Ni J., A.K. Leung, C.W.W. Ng, 2019. Unsaturated hydraulic properties of vegetated soil under single and mixed planting conditions. Géotechnique, 69, pp. 554-559, 10.1680/jgeot.17.T.044

Nikooee E., Mirghafari R., Habibagahi G., Khorassani A.G., Nouri, A.M., 2020. Determination of soil-water retention curve: An artificial intelligence-based approach. In E3S Web of Conferences; EDP Sciences: Les Ulis, France, Volume 195, p. 02010.

Patil N., Rajput G., 2009. Evaluation of water retention functions and computer program "Rosetta" in predicting soil water characteristics of seasonally impounded shrink-swell soils. J. Irrig. Drain. Eng., 135, 286–294.

Ranaivomanana H., Das G., Razakamanantsoa A., 2022. Modeling of Hysteretic Behavior of Soil– Water Retention Curves Using an Original Pore Network Model. Transp. Porous Media, 142, 559–584.

Sihag P., Angelaki A., Chaplot B., 2020. Estimation of the recharging rate of ground water using Random Forest Technique. Appl. Water Sci., 10, 1–11.

Song L., J.H. Li, T. Zhou, D.G. Fredlund, 2017. Experimental study on unsaturated hydraulic properties of vegetated soil, Ecol. Eng., 103, pp. 207-216, 10.1016/j.ecoleng.2017.04.013

van Genuchten R., 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed form analytical model. Water Res. Prog. Res. Rep., 78, 8–63.

van Genuchten R., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 862–898.

Vergani C., Graf F., 2016. Soil permeability, aggregate stability and root growth: a pot experiment from a soil bioengineering perspective. Ecohydrology, 9, pp. 830-842, 10.1002/eco.1686

Wang S., Fan W., Zhu Y., Zhang J., 2021. The effects of fitting parameters in best fit equations in determination of soil-water characteristic curve and estimation of hydraulic conductivity function. Rhizosphere, 17, 100291.

Yang S., Zheng P.Q., Yu Y.T., Zhang J. 2021. Probabilistic analysis of soil-water characteristic curve based on machine learning algorithms. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing: Bristol, UK, Volume 861, p. 062030.

Yaseen Z., Sihag, P., Yusuf, B., Al-Janabi A., 2021. Modelling infiltration rates in permeable stormwater channels using soft computing techniques. Irrig. Drain. 2021, 70, 117–130.

Zhang F., Zhao C., Lourenço S.D., Dong S., Jiang Y., 2021. Factors affecting the soil–water retention curve of Chinese loess. Bull. Eng. Geol. Environ., 80, 717–729.

Zhai Q., Rahardjo H., 2013. Quantification of Uncertainties in Soil—Water Characteristic Curve Associated with Fitting Parameters. Eng. Geol., 163, 144–152.

Zhai Q., Rahardjo H., Satyanaga A., Dai G., Zhuang Y., 2020. Framework to estimate the soil-water characteristic curve for soils with different void ratios. Bull. Eng. Geol. Environ., 79, 4399–4409.

Zeitoun R., Vandergeest M., Vasava H.B., Machado P.V.F., Jordan S., Parkin G., Wagner-Riddle C., Biswas A., 2021. In-Situ Estimation of Soil Water Retention Curve in Silt Loam and Loamy Sand Soils at Different Soil Depths. Sensors, 21, 447. https://doi.org/10.3390/s2102044

34. ΒΙΩΣΙΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΔΙΑΔΑ ΤΩΝ ΣΕΡΡΩΝ

Γ. Λιανοστάθη, Π. Γεωργίου & Δ. Καρπούζος

Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Πανεπιστημιούπολη, 54124, Θεσσαλονίκη glianosta@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά το υδατικό αποτύπωμα (ΥΑ) βασικών γεωργικών καλλιεργειών στην πεδιάδα Σερρών, με σκοπό την αξιολόγηση της κατανάλωσης και της ρύπανσης των υδατικών πόρων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό CROPWAT του FAO και τη μεθοδολογία του Water Footprint Network, αξιοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα πενήντα τριών ετών (1972–2024), εδαφολογικά χαρακτηριστικά και αγρονομικές παραμέτρους. Υπολογίστηκαν οι τρεις συνιστώσες του ΥΑ (πράσινη, μπλε, γκρι) για εννέα καλλιέργειες, με ενσωμάτωση των ιδιοτήτων διαφορετικών εδαφικών τύπων μέσω GIS. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ καλλιεργειών και επιβεβαίωσαν τη χρησιμότητα του ΥΑ ως εργαλείου για τη βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων σε αρδευόμενες περιοχές υψηλής περιβαλλοντικής ευαισθησίας.

Λέξεις κλειδιά: Υδατικό Αποτύπωμα, Cropwat, Υδατικοί Πόροι

SUSTAINABLE WATER RESOURCES MANAGEMENT IN AGRICULTURE: ASSESSMENT OF THE WATER FOOTPRINT OF CROPS IN THE SERRES PLAIN

G. Lianostathi*, P. Georgiou & D. Karpouzos

Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Agriculture, University Campus, 54124, Thessaloniki
**glianosta@agro.auth.gr*

ABSTRACT

This study investigates the water footprint (WF) of major agricultural crops in the Serres plain, aiming to assess water consumption and pollution impacts on local resources. The analysis was conducted using the FAO CROPWAT software and the Water Footprint Network methodology, based on 53 years of meteorological records (1972–2024), soil characteristics, and agronomic parameters. The three WF components (green, blue, grey) were estimated for nine crops, integrating the properties of different soil types through GIS. Results revealed substantial variations among crops and confirmed the relevance of WF as a decision-support tool for sustainable water resources management in irrigated areas of high environmental sensitivity.

Key words: Water Footprint, Cropwat, Water Resources

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό αποτελεί θεμελιώδη φυσικό πόρο για τη διατήρηση της ζωής, την ανάπτυξη των οικοσυστημάτων και την κοινωνικοοικονομική πρόοδο. Η γεωργία, απορροφώντας το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης γλυκού νερού, καθιστά αναγκαίο τον ακριβή υπολογισμό των αρδευτικών αναγκών, τον ορθολογικό σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των αρδευτικών δικτύων, με στόχο τον περιορισμό απωλειών και τη βιώσιμη αξιοποίηση των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Στο πλαίσιο αυτό, η Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ) δεν επικεντρώνεται μόνο στην κάλυψη των αναγκών των χρηστών, αλλά και στη δίκαιη και αποδοτική κατανομή των υδατικών αποθεμάτων, εξισορροπώντας περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς στόχους.

Ένα σημαντικό αναλυτικό εργαλείο που συμβάλλει στην κατεύθυνση αυτή είναι το Υδατικό Αποτύπωμα (ΥΑ), το οποίο εισήχθη από τους Hoekstra and Hung (2002) και Hoekstra (2003) και εδράζεται στην έννοια του «εικονικού νερού» που πρωτοδιατύπωσε ο Allan (1998). Το ΥΑ παρέχει μια ολοκληρωμένη αποτίμηση της κατανάλωσης γλυκού νερού μέσω τριών συνιστωσών: πράσινης (βρόχινο νερό που αξιοποιείται από τις καλλιέργειες), μπλε (υπόγειο και επιφανειακό νερό που χρησιμοποιείται για άρδευση) και γκρι (όγκος νερού που απαιτείται για την αραίωση των ρύπων, ώστε να πληρούνται τα πρότυπα ποιότητας) (Hoekstra et al., 2009, 2011, Παπαστάμκου κ. άλ., 2016, Λιάπης κ. άλ., 2020). Ο χωρικός και χρονικός προσδιορισμός αυτών των συνιστωσών επιτρέπει τη σύνδεση της γεωργικής παραγωγής με την υδατική διαχείριση, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες για την ανάπτυξη στρατηγικών βιώσιμης χρήσης των υδατικών πόρων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση του Υδατικού Αποτυπώματος εννέα (9) βασικών καλλιεργειών (βαμβάκι, ελιά, ζαχαρότευτλα, καπνός, καλαμπόκι, καρπούζι, πατάτα, μηδική, και σιτάρι) στην πεδιάδα του Νομού Σερρών. Η μελέτη καλύπτει μια εκτενή περίοδο 53 ετών (1972–2024) και βασίζεται στη μεθοδολογία των Hoekstra και Chapagain, ενώ η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού CROPWAT του FAO, ενσωματώνοντας μετεωρολογικά, εδαφικά και καλλιεργητικά δεδομένα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Υπολογισμός Υ.Α. με τη μέθοδο των Hoekstra and Chapagain

Η μέθοδος υπολογισμού του υδατικού αποτυπώματος που αναπτύχθηκε από τους Hoekstra και Chapagain λαμβάνει υπόψη τρεις βασικές συνιστώσες: το μπλε νερό, που αφορά επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους, το πράσινο νερό, δηλαδή την υγρασία του εδάφους από τη βροχόπτωση, και το γκρι νερό, το οποίο σχετίζεται με την ποσότητα νερού που απαιτείται για την αραίωση των ρύπων που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία, ώστε να επιτευχθούν αποδεκτά περιβαλλοντικά όρια. Το συνολικό υδατικό αποτύπωμα προκύπτει ως το άθροισμα των όγκων αυτών των τριών συνιστωσών (Hoekstra et al., 2009, 2011):

$$Y.A._{ολικό} = Y.A._{.πράσινο} + Y.A._{.μπλε} + Y.A._{.γκρι} \quad (1)$$

Το υδατικό αποτύπωμα κατά τη διαδικασία ανάπτυξης μιας καλλιέργειας εκφράζεται σε m^3/ton το οποίο ισοδυναμεί με l/kg.

2.2 Πράσινη Συνιστώσα

Η πράσινη συνιστώσα του υδατικού αποτυπώματος μιας καλλιέργειας ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού όγκου πράσινου νερού – δηλαδή της υγρασίας του εδάφους που προέρχεται

από τη βροχόπτωση και καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια του κύκλου ανάπτυξης της καλλιέργειας προς τη γεωργική της απόδοση, εκφρασμένη σε μονάδες παραγόμενης μάζας:

$$Y.A._{\text{πράσινο}} = \frac{CWU_g}{Y} \quad (2)$$

όπου: CWU_g ο όγκος του πράσινου νερού που καταναλώθηκε (m^3/στρ.) και Y η απόδοση της καλλιέργειας (ton/στρ.)

Η ποσότητα του πράσινου νερού που αξιοποιείται από μία καλλιέργεια καθορίζεται από δύο βασικούς παράγοντες: τις απαιτήσεις της καλλιέργειας σε εξατμισοδιαπνοή (ET_c) και τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της χρήσιμης βροχόπτωσης (P_{eff}). Ο υπολογισμός της πράσινης υδατικής χρήσης (U_g) βασίζεται στην ελάχιστη τιμή μεταξύ αυτών των δύο μεγεθών. Επομένως, η τιμή της πράσινης υδατικής συνιστώσας προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$U_g = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (3)$$

Η τιμή που προκύπτει από τη σχέση (3) αναφέρεται στην υδατική χρήση για κάθε μέρα της βλαστικής περιόδου. Η συνολική πράσινη κατανάλωση νερού (CWU_g) για μια καλλιέργεια προκύπτει από το άθροισμα των ημερήσιων ποσοτήτων νερού που αξιοποιούνται από τη βροχόπτωση, καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Η περίοδος αυτή ξεκινά από τη σπορά και διαρκεί μέχρι τη συγκομιδή

$$CWU_g = \sum_{i=1}^{n} U_g \quad (4)$$

όπου: n ο συνολικός αριθμός ημερών της βλαστικής περιόδου

2.3 Μπλε Συνιστώσα

Η μπλε συνιστώσα του υδατικού αποτυπώματος περιγράφει την ποσότητα του γλυκού νερού (προερχόμενου από επιφανειακούς ή υπόγειους υδατικούς πόρους) που χρησιμοποιήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Η τιμή αυτή προκύπτει από τη σχέση του συνολικού όγκου μπλε νερού που καταναλώθηκε προς τη γεωργική απόδοση, η οποία εκφράζεται σε τόνους ανά μονάδα επιφάνειας.

$$Y.A._{\text{μπλέ}} = \frac{CWU_b}{Y} \quad (5)$$

όπου: CWU_b ο όγκος του μπλε νερού που καταναλώθηκε (m^3/στρ.) και Y η απόδοση της καλλιέργειας (ton/στρ.).

Η πραγματική κατανάλωση μπλε νερού υπολογίζεται με βάση τις καθαρές αρδευτικές ανάγκες που προκύπτουν από το λογισμικό Cropwat:

$$U_b = IR_n \quad (6)$$

όπου: IRn οι τιμές των καθαρών αρδευτικών αναγκών που εκφράζονται σε mm.

Το συνολικό άθροισμα των ημερήσιων καθαρών αρδευτικών αναγκών αποτυπώνει τον τελικό όγκο του μπλε νερού που καταναλώθηκε για τις ανάγκες κάθε καλλιέργειας.

$$CWU_b = \sum_{i=1}^{n} U_b \quad (7)$$

όπου: n είναι ο συνολικός αριθμός ημερών της βλαστικής περιόδου.

2.4 Γκρι Συνιστώσα

Η γκρι συνιστώσα αναφέρεται στην ποσότητα γλυκού νερού που απαιτείται για την διάλυση ρύπων σε τέτοιο βαθμό, ώστε η ποιότητα του νερού να παραμένει πάνω από το επιθυμητό όριο. Το ποσοστό της ποσότητας του ρύπου που τελικά καταλήγει στο υδατικό σύστημα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 3% και 10%, ανάλογα με τις εδαφικές και κλιματικές συνθήκες (Hoekstra et al., 2009).

Κατά την καλλιεργητική διαδικασία, ρύποι θεωρούνται τα αγροχημικά προϊόντα που εφαρμόζονται, όπως το άζωτο και ο φώσφορος στα λιπάσματα, τα φυτοφάρμακα και τα εντομοκτόνα. Ωστόσο, για τον υπολογισμό της γκρι συνιστώσας του υδατικού αποτυπώματος, λαμβάνεται υπόψη μόνο ο πιο κρίσιμος ρύπος, δηλαδή εκείνος για τον οποίο απαιτείται ο μεγαλύτερος όγκος νερού για να επιτευχθεί η αραιωτική ικανότητα του αποδέκτη και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Hoekstra et al., 2009):

$$Y.A._{\gamma\kappa\rho\iota} = \frac{(\alpha \cdot AR)/(c_{max} - c_{nat})}{Y} \quad (8)$$

όπου: α το ποσοστό του ρυπαντή που εισχωρεί στο υδατικό σύστημα, AR η ποσότητα του ρυπαντή που τοποθετείται για λίπανση (kg/στρέμμα), c_{max} η μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση του ρυπαντή (mg/l), c_{nat} η φυσική συγκέντρωση του ρυπαντή (mg/l) και Y η απόδοση της καλλιέργειας (ton/στρέμμα).

Η προσέγγιση αυτή στοχεύει στην ποσοτικοποίηση της ρύπανσης των υδάτων με όρους όγκου νερού, διευκολύνοντας τη σύγκριση με την κατανάλωση νερού, και προάγει τη βιώσιμη διαχείριση των αγροτικών εισροών στο πλαίσιο του υδατικού αποτυπώματος.

2.5 Λογισμικό CROPWAT

Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της μπλε και πράσινης συνιστώσας του υδατικού αποτυπώματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CROPWAT (Clarke et al., 2001), το οποίο συνδυάζει μετεωρολογικά, εδαφολογικά και γεωργικά δεδομένα, διευκολύνοντας τον σχεδιασμό βιώσιμων στρατηγικών άρδευσης και την ορθολογική διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Προσδιορίζει με ακρίβεια τις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών, ώστε να υποστηρίξει τον υπολογισμό του πράσινου και του μπλε υδατικού αποτυπώματος. Έχει αναπτυχθεί από τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας του ΟΗΕ (FAO) και έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει στους χρήστες τη δυνατότητα να εκτιμούν με ακρίβεια τις υδατικές απαιτήσεις των καλλιεργειών και να οργανώνουν την άρδευση με τρόπο που να ελαχιστοποιεί τις απώλειες και να βελτιώνει την αποδοτικότητα.

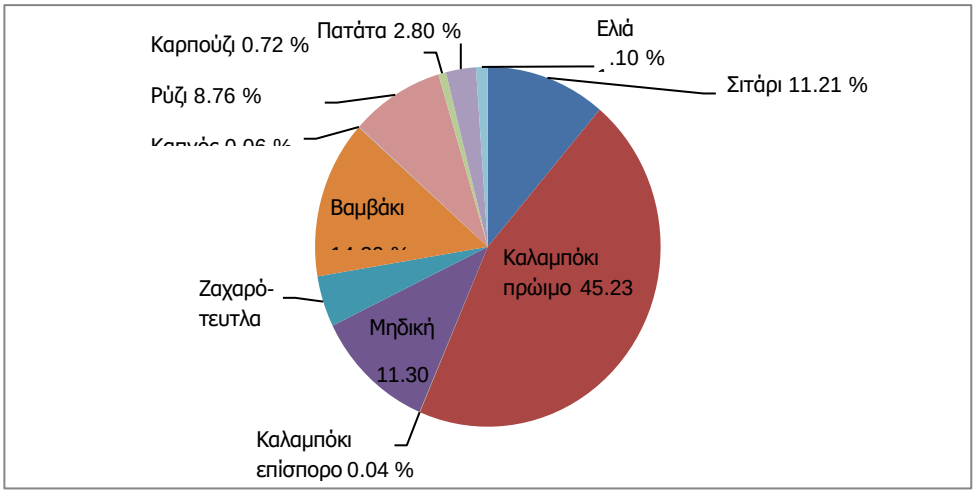
Ο υπολογισμός των αρδευτικών απαιτήσεων των καλλιεργειών πραγματοποιήθηκε μέσω εισαγωγής κλιματικών, εδαφικών και καλλιεργητικών δεδομένων στο λογισμικό. Τα κλιματικά δεδομένα περιλάμβαναν την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, τη διάρκεια ηλιοφάνειας, την ταχύτητα ανέμου και τη σχετική υγρασία. Με βάση αυτά υπολογίστηκε η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) σύμφωνα με την εξίσωση FAO-56 Penman-Monteith. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης για τον υπολογισμό της ωφέλιμης βροχόπτωσης, η οποία εκτιμήθηκε με τη μέθοδο FAO (FAO/AGWL formula), μία από τις τέσσερις διαθέσιμες μεθόδους του προγράμματος. Τα καλλιεργητικά δεδομένα περιλάμβαναν την ημερομηνία σποράς, τις τιμές του φυτικού συντελεστή (k_c), τον αριθμό ημερών της βλαστικής περιόδου, το βάθος του ριζοστρώματος, τον συντελεστή ωφελιμότητας, τον συντελεστή ανταπόκρισης και το μέγιστο ύψος των καλλιεργειών. Όσον αφορά στα εδαφικά δεδομένα, αυτά περιλάμβαναν τη συνολική διαθέσιμη υγρασία (Total Available Water – TAW), τον μέγιστο ρυθμό διήθησης,

το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος και την αρχική εξάντληση της υγρασίας. Με βάση τα δεδομένα αυτά υπολογίστηκε η αρχική διαθέσιμη υγρασία του εδάφους. Επιπλέον, για κάθε καλλιέργεια εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί τύποι εδαφών. Ο προσδιορισμός των εδαφικών τύπων πραγματοποιήθηκε μέσω εδαφολογικού χάρτη της πεδιάδας Σερρών, με τη χρήση του λογισμικού QGIS.

Το λογισμικό προσφέρει δυο επιλογές υπολογισμού των αρδευτικών απαιτήσεων και κατ' επέκταση του υδατικού αποτυπώματος. Η πρώτη «Crop Water Requirements» (CWR) επιτρέπει τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας, της ωφέλιμης βροχόπτωσης, καθώς και των καθαρών αναγκών σε νερό άρδευσης. Η πράσινη συνιστώσα του υδατικού αποτυπώματος υπολογίζεται ως το ελάχιστο μεταξύ της συνολικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ET_c) και της χρήσιμης βροχόπτωσης (P_{eff}). Η μπλε συνιστώσα του υδατικού αποτυπώματος υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της συνολικής εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ET_c) και της χρήσιμης βροχόπτωσης (P_{eff}), με την προϋπόθεση ότι είναι μηδενική όταν η αποτελεσματική βροχόπτωση υπερβαίνει τη συνολική εξατμισοδιαπνοή (Hoekstra et. all. 2009, 2011).

Η δεύτερη επιλογή «Irrigation Schedule», προϋποθέτει την εισαγωγή των ίδιων δεδομένων που χρησιμοποιούνται και στη μέθοδο CWR, με την ουσιώδη διαφοροποίηση ότι απαιτείται η συμπλήρωση και των στοιχείων που αφορούν τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Σε αυτή την περίπτωση, η μπλε συνιστώσα του υδατικού αποτυπώματος προσδιορίζεται από τις καθαρές αρδευτικές ανάγκες όπως αυτές εκτιμώνται από το μοντέλο με τη βοήθεια του εδαφικού υδατικού ισοζυγίου. Η πράσινη συνιστώσα υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της συνολικής εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας (ET_c) και της μπλε συνιστώσας. Η παραπάνω επιλογή χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς του υδατικού αποτυπώματος στην παρούσα εργασία.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ



Σχήμα 3.1 Ποσοστά κατανομής των καλλιεργειών στα δίκτυα της πεδιάδας των Σερρών

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το ποσοστό που καταλαμβάνει κάθε καλλιέργεια στα αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας των Σερρών σύμφωνα με τον Χατζηγεωργίου (2019), με βάση στοιχεία που προκύπτουν από τον ΓΟΕΒ. Όπως παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνει η καλλιέργεια του πρώιμου καλαμποκιού (45,23%) και ακολουθεί η μηδική με ποσοστό 11,3%. Μικρότερο ποσοστό καταλαμβάνει η καλλιέργεια του επίσπορου καλαμποκιού και του καπνού με τιμές 0,04% και 0,06% αντίστοιχα.

Η παρουσία του ποταμού Στρυμόνα στην περιοχή των Σερρών, ο οποίος διασχίζει ολόκληρη την Περιφερειακή Ενότητα, είναι καθοριστική για τη διαμόρφωση τόσο του φυσικού τοπίου όσο και των χρήσεων γης. Εκτός από τον Στρυμόνα, αξιοσημείωτη είναι η παρουσία των ποταμών Αγγίτη και Κρουσοβίτη, ενώ κομβικής σημασίας υγροτοπικό οικοσύστημα αποτελεί η λίμνη Κερκίνη.

Η γεωργία αποτελεί τον βασικό πυλώνα της τοπικής οικονομίας, παρουσιάζοντας υψηλό βαθμό ανάπτυξης και εντατικοποίησης των καλλιεργειών. Από τα περίπου 1.700.000 στρέμματα καλλιεργήσιμης γης, η πεδιάδα του Στρυμόνα καταλαμβάνει περίπου 1.020.000 στρέμματα. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι αρδευόμενες εκτάσεις, που ξεπερνούν τις 850.000 στρέμματα, εκ των οποίων 580.000 στρέμματα καλύπτονται από οργανωμένα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα (Χατζηγεωργίου, 2019).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

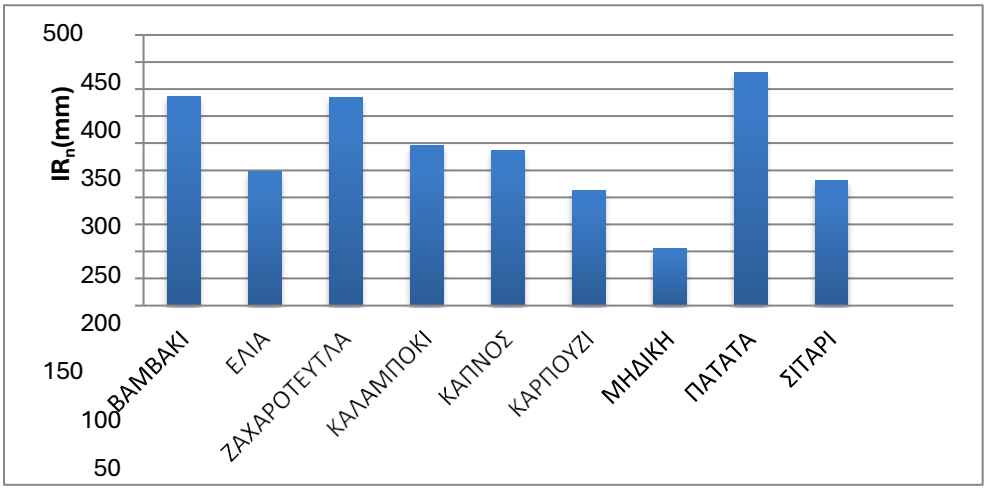
Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των αρδευτικών αναγκών των εννέα (9) καλλιεργειών στην πεδιάδα των Σερρών πάρθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) και συγκεκριμένα από τον μετεωρολογικό σταθμό των Σερρών. Συγκεκριμένα αυτά αφορούν στην ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, στη σχετική υγρασία, στην ταχύτητα του ανέμου, στη διάρκεια της ηλιοφάνειας και στη βροχόπτωση. Αναφέρονται στη χρονική περίοδο 1972 μέχρι 2024 (53 έτη) και έχουν μηνιαίο χρονικό βήμα. Οι εννέα (9) καλλιέργειες για τις οποίες υπολογίστηκαν οι καθαρές αρδευτικές ανάγκες και το υδατικό αποτύπωμα είναι οι εξής: βαμβάκι, ελιά, ζαχαρότευτλα, καλαμπόκι, καπνός, καρπούζι, μηδική, πατάτα και σιτάρι. Όπως αναφέρθηκε το μπλε και το πράσινο υδατικό αποτύπωμα προκύπτει από τη διαίρεση του μπλε και του πράσινου νερού αντίστοιχα με την απόδοση της κάθε καλλιέργειας για την περίοδο μελέτης. Οι αποδόσεις των καλλιεργειών για τα έτη 2000 εώς 2018 πάρθηκαν από την ιστοσελίδα του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (https://www.minagric.gr/statistikes-tekmiriosi/statistikes-diadikasies-dedomena/statistika-stoixeia-ektaseon-kai-paragogis-fytikon-proionton), ενώ για τα έτη 2019 εώς 2022 από την ιστοσελίδα της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής ELSTAT (https://www.statistics.gr/statistics/agr). Για τα έτη 1972-1999 και 2022-2024 το Υδατικό Αποτύπωμα υπολογίστηκε με βάση τις μέσες αποδόσεις των καλλιεργειών των ετών για τις οποίες υπήρχαν δεδομένα.

Τα δεδομένα λίπανσης που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του γκρι υδατικού αποτυπώματος στην πεδιάδα των Σερρών πάρθηκαν από την Υ.Α. Αριθμ. Η.Π. 50982/2309 (ΦΕΚ 1894 τ.Β' (29-12-2006)) και αφορούν σε μονάδες αζώτου. Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (https://ypen.gov.gr/), το ποσοστό του ρυπαντή, α, που εισχωρεί στο υδατικό σύστημα κυμαίνεται από 3%-10%. Στην περιοχή μελέτης παίρνουμε την τιμή του α ίση με 7%, ενώ σύμφωνα με την ΚΥΑ Υ2/2600/2001 η μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση NO_3 στο υδατικό σύστημα των Σερρών παίρνει την τιμή 96mg/l. Λόγω έλλειψης των απαραίτητων στοιχείων, η φυσική συγκέντρωση των ρυπαντών, c_{nat}, στους υδατικούς αποδέκτες θεωρήθηκε μηδενική.

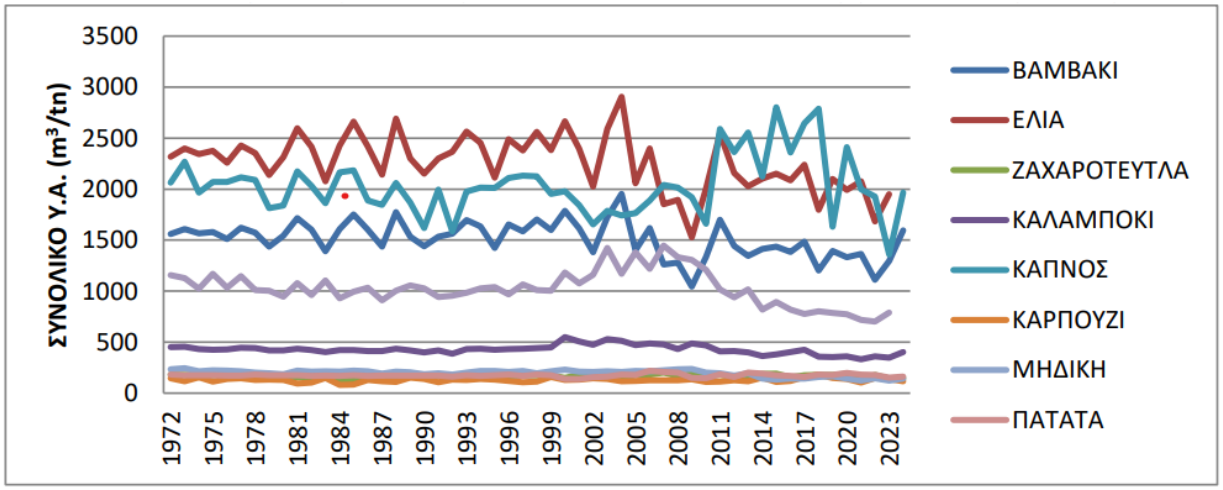
Όσον αφορά στα δεδομένα του εδάφους, προκειμένου να υπολογιστούν οι αρδευτικές ανάγκες και το υδατικό αποτύπωμα σε δύο (2) διαφορετικούς τύπους εδαφών για κάθε καλλιέργεια μελετήθηκε ο χάρτης των καλλιεργειών στη πεδιάδα των Σερρών με τη βοήθεια του λογισμικού QGIS. Επομένως, τα παραπάνω υπολογίστηκαν σε αργιλώδη και σε αμμώδη εδάφη για την ελιά, το βαμβάκι, τα ζαχαρότευτλα, τη μηδική, την πατάτα και το σιτάρι, ενώ σε αργιλώδη και σε πηλώδη για το καλαμπόκι και το καρπούζι.

Οι υπολογισμοί που παρουσιάζονται προέκυψαν με βάση την επιλογή "Irrigation Schedule" του λογισμικού Cropwat. Για λόγους ομοιομορφίας και καλύτερης παρουσίασης των αποτελεσμάτων, προέκυψαν μέσες τιμές για το μπλε και το πράσινο υδατικό αποτύπωμα, οι οποίες υπολογίστηκαν συνδυαστικά από τους δύο διαφορετικούς τύπους εδαφών που εξετάστηκαν για κάθε καλλιέργεια.

Το Σχήμα 4.1 δίνει τις μέσες ετήσιες καθαρές σε αρδευτικό νερό ανάγκες των καλλιεργειών της περιοχής μελέτης. Όπως φαίνεται οι καλλιέργειες με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε αρδευτικό νερό είναι η πατάτα και το βαμβάκι. Ακολουθούν με φθίνουσα σειρά τα ζαχαρότευτλα, το καλαμπόκι, ο καπνός, η ελιά, το σιτάρι, το καρπούζι και τέλος την καλλιέργεια με τις μικρότερες υδατικές απαιτήσεις αποτελεί η μηδική.



Σχήμα 4.1 Μέσες ετήσιες καθαρές σε αρδευτικό νερό ανάγκες των καλλιεργειών της περιοχής μελέτης



Σχήμα 4.2 Ετήσια μεταβολή του συνολικού υδατικού αποτυπώματος των 9 καλλιεργειών (1972-2024)

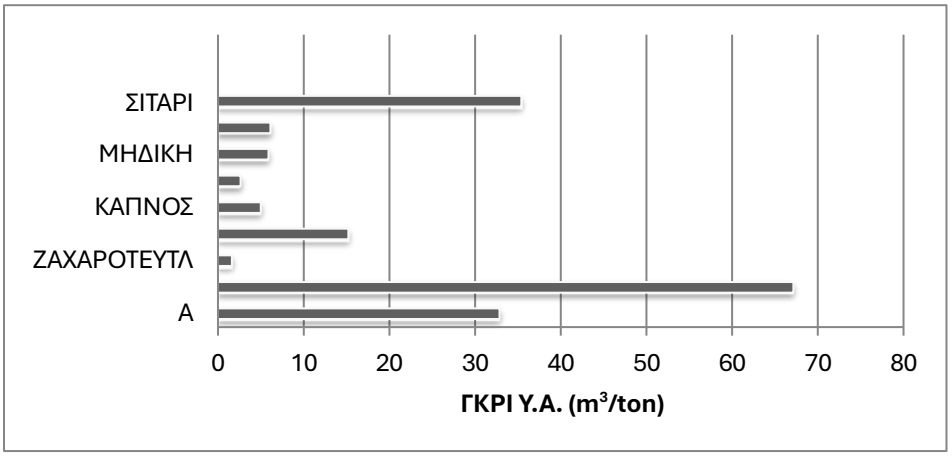
Για την περίοδο μελέτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 η ετήσια μεταβολή του συνολικού υδατικού αποτυπώματος για κάθε μία από τις εννέα (9) καλλιέργειες της περιοχής μελέτης.

Όπως φαίνεται το μεγαλύτερο συνολικό υδατικό αποτύπωμα, παρουσιάζει η καλλιέργεια της ελιάς, ενώ οι καλλιέργειες με το μικρότερο υδατικό αποτύπωμα κατά φθίνουσα σειρά είναι η μηδική, η πατάτα, τα ζαχαρότευτλα και το καρπούζι. Μεγάλη διακύμανση στις τιμές του συνολικού υδατικού αποτυπώματος εμφανίζουν η **ελιά** με ελάχιστη τιμή 1527,37m^3/ton κατά

το έτος 2009, μέγιστη 2905,1m^3/ton το 2004 και μέση τιμή 2216,23m^3/ton και ο **καπνός**, με εύρος τιμών από 1358,97m^3/ton έως 2802,12m^3/ton, τιμές οι οποίες αντιστοιχούν στα έτη 2023 και 2015 και μέση τιμή 2080,54m^3/ton. Ακολουθούν το **βαμβάκι**, το υδατικό αποτύπωμα του οποίου παίρνει την ελάχιστη τιμή 1044,53m^3/ton το έτος 2009 και την μέγιστη 1953,19m^3/ton το έτος 2004 με μέση τιμή 1498,86m^3/ton, το **σιτάρι** με ελάχιστη τιμή 702,11m^3/ton και μέγιστη 1446,66m^3/ton τα έτη 2022 και 2007 αντίστοιχα, και μέση τιμή 1074,38m^3/ton και το **καλαμπόκι** με ελάχιστη τιμή 331,9m^3/ton το 2021, μέγιστη 549,24m^3/ton το 2000 και μέση τιμή 440,57m^3/ton.

Ακολουθούν οι 4 καλλιέργειες σε φθίνουσα σειρά οι οποίες εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις στις τιμές τους και μικρή διακύμανση διαχρονικά. Η **μηδική** με ελάχιστη τιμή 122,819m^3/ton το έτος 2021, μέγιστη 244,568m^3/ton το 1973 και μέση τιμή 183,68m^3/ton, η **πατάτα** με ένα εύρος τιμών από 138,34m^3/ton έως 218, 99m^3/ton οι τιμές των οποίων αντιστοιχούν στα έτη 2001 και 2006 και μέση τιμή 178,66m^3/ton, τα **ζαχαρότευτλα** με ελάχιστη τιμή 124,64m^3/ton το έτος 1985, μέγιστη 201,76m^3/ton το έτος 2007 και μέση τιμή 163,2m^3/ton Τέλος, το **καρπούζι** με το μικρότερο συνολικό υδατικό αποτύπωμα με εύρος τιμών από 80,54m^3/ton έως 159,66m^3/ton κατά τα έτη 1984 και 1999 αντίστοιχα και μέση τιμή 120,1m^3/ton.

Στο Σχήμα 4.3 δίνεται το μέσο γκρι Υδατικό αποτύπωμα των εννέα (9) καλλιεργειών της περιοχής μελέτης. Φαίνεται ότι η καλλιέργεια της ελιάς ξεχωρίζει με το μεγαλύτερο γκρι υδατικό αποτύπωμα, καθώς συνδέεται με την ανάγκη αραίωσης μεγαλύτερης ποσότητας ρύπων συγκριτικά με τις υπόλοιπες καλλιέργειες. Ακολουθούν οι καλλιέργειες , σιταριού, και βαμβακιού οι οποίες έχουν μεγάλο γκρι υδατικό αποτύπωμα, άρα και μεγαλύτερη πιθανή περιβαλλοντική επιβάρυνση από ρύπανση. Αντίθετα, καλλιέργειες όπως το καρπούζι και τα ζαχαρότευτλα έχουν πολύ χαμηλές τιμές, δείχνοντας μικρότερη συμβολή στη ρύπανση των υδάτων.



Σχήμα 4.3 Μέσο γκρι Υδατικό Αποτύπωμα των εννέα (9) καλλιεργειών της περιοχής μελέτης

Σύμφωνα με τον χρησιμοποιούμενο τύπο που υπολογίζει το γκρι υδατικό αποτύπωμα με βάση την αζωτούχο λίπανση, ο αριθμητής παραμένει αμετάβλητος καθ' όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου για κάθε καλλιέργεια, εφόσον το ποσοστό του ρύπου που εισχωρεί στο υδατικό σύστημα (α), η ποσότητα του ρύπου που εφαρμόζεται στο χωράφι για κάθε μια από τις εννέα καλλιέργειες (AR) και η μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση NO_3 (c_{max}) στο υδατικό σύστημα παραμένουν σταθερά , ενώ ο παρονομαστής διαφοροποιείται ανάλογα με την ετήσια απόδοση. Κατά τα πρώτα έτη της περιόδου μελέτης το γκρι υδατικό αποτύπωμα διατηρεί σταθερή τιμή, καθώς, για τα συγκεκριμένα έτη η απόδοση υπολογίσθηκε βάσει του μέσου όρου

προηγούμενων καλλιεργητικών περιόδων, με αποτέλεσμα τόσο ο αριθμητής όσο και ο παρονομαστής να παραμένουν σταθεροί και το γκρι υδατικό αποτύπωμα να μην παρουσιάζει διακύμανση. Για τα επόμενα έτη, το γκρι υδατικό αποτύπωμα κάθε καλλιέργειας διαφέρει και εμφανίζει μεγάλη τιμή όταν η ετήσια απόδοση είναι μικρή και μικρή τιμή όταν η απόδοση είναι μεγάλη.

Με βάση τους υπολογισμούς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάζεται ο συνολικός πίνακας (Πίνακας 4.1) των συνιστωσών και του Συνολικού Υδατικού Αποτυπώματος που αφορά τις μέσες τιμές για την περίοδο 1972-2024.

Πίνακας 4.1. Μέσες τιμές συνιστωσών και συνολικού υδατικού αποτυπώματος των καλλιεργειών για τη χρονική περίοδο 1972-2024 (m^3/ton)

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	ΠΡΑΣΙΝΟ Υ.Α.	ΜΠΛΕ Υ.Α.	ΓΚΡΙ Υ.Α.	ΣΥΝΟΛΙΚΟ Υ.Α.
ΒΑΜΒΑΚΙ	140,71	1338,56	32,84	1512,12
ΕΛΙΑ	684,43	1510,54	67,12	2262,09
ΖΑΧΑΡΟΤΕΥΤΛΑ	96,98	70,71	1,61	169,31
ΚΑΛΑΜΠΟΚΙ	117,07	295,18	15,22	427,49
ΚΑΠΝΟΣ	77,52	1949,81	4,98	2032,32
ΚΑΡΠΟΥΖΙ	80,55	44,97	2,65	128,17
ΜΗΔΙΚΗ	66,70	123,30	5,90	195,91
ΠΑΤΑΤΑ	28,83	138,72	6,12	173,69
ΣΙΤΑΡΙ	126,51	866,35	35,39	1028,26

Η συγκριτική αξιολόγηση των καλλιεργειών ως προς το υδατικό τους αποτύπωμα αναδεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιμέρους συνιστωσών (πράσινης, μπλε και γκρι). Συγκεκριμένα, η καλλιέργεια της ελιάς εμφανίζει το υψηλότερο πράσινο υδατικό αποτύπωμα, ενώ η καλλιέργεια της πατάτας καταγράφει τη χαμηλότερη τιμή στην ίδια κατηγορία. Όσον αφορά στο μπλε υδατικό αποτύπωμα, οι μεγαλύτερες τιμές καταγράφονται στον καπνό, ενώ οι μικρότερες στο καρπούζι. Σε σχέση με το γκρι υδατικό αποτύπωμα, η ελιά εμφανίζει τη μεγαλύτερη επιβάρυνση, σε αντίθεση με τα ζαχαρότευτλα που παρουσιάζουν τη μικρότερη. Συνολικά, η καλλιέργεια της ελιάς συγκεντρώνει το υψηλότερο συνολικό υδατικό αποτύπωμα, ενώ η καλλιέργεια του καρπουζιού το χαμηλότερο.

Επιπλέον, παρατηρείται, ειδικότερα κατά την ανάλυση του μπλε υδατικού αποτυπώματος, το οποίο συνδέεται άμεσα με τις καθαρές αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών, ότι η πατάτα παρουσιάζει τις υψηλότερες ανάγκες σε αρδευτικό νερό (μέση τιμή απόδοσης κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 3,0 ton/στρ.). Έτσι θα περιμέναμε να εμφανίζει και το μεγαλύτερο μπλε υδατικό αποτύπωμα. Ωστόσο, η καλλιέργεια του καπνού με μέση τιμή απόδοσης κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 0,15 ton/στρ. εμφανίζει συνολικά μεγαλύτερο μπλε υδατικό αποτύπωμα, σε σχέση με την πατάτα. Η διαφοροποίηση αυτή, όπως φαίνεται, δεν αποδίδεται αποκλειστικά στον όγκο του αρδευτικού νερού που απαιτείται, αλλά σχετίζεται άμεσα με την ετήσια παραγωγή κάθε καλλιέργειας. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι όταν η απόδοση ανά στρέμμα είναι υψηλή, το αρδευτικό νερό αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο όγκο καλλιέργειας, με αποτέλεσμα το υδατικό αποτύπωμα να μειώνεται (περίπτωση πατάτας). Αντίθετα, όταν η καλλιέργεια παρουσιάζει χαμηλότερη απόδοση, το αποτύπωμα κατανέμεται σε μικρότερη ποσότητα και επομένως αυξάνεται (περίπτωση καπνού). Αντίστοιχα το ίδιο συμβαίνει και με το πράσινο υδατικό αποτύπωμα, καθώς αυτό υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε,

από τη διαφορά της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας και της μπλε συνιστώσας.

Γενικότερα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το συνολικό υδατικό αποτύπωμα μιας καλλιέργειας δεν καθορίζεται αποκλειστικά από μία μόνο συνιστώσα. Αν και το μπλε υδατικό αποτύπωμα καταγράφει συνήθως τις υψηλότερες τιμές, ο τελικός δείκτης προκύπτει από τον συνδυασμό και των τριών επιμέρους συνιστωσών (πράσινο, μπλε και γκρι).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση του υδατικού αποτυπώματος ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις τόσο στις συνολικές υδατικές απαιτήσεις όσο και στη συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών (μπλε,πράσινης και γκρι). Η εφαρμογή της μεθοδολογίας Hoekstra και Chapagain, σε συνδυασμό με το λογισμικό CROPWAT, κατέστησε δυνατή την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών λαμβάνοντας υπόψη μετεωρολογικά, εδαφολογικά και καλλιεργητικά δεδομένα. Η μέθοδος Irrigation Schedule παρέχει πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις, καθώς ενσωματώνει σημαντικές εδαφικές παραμέτρους. Συνολικά, η μελέτη καταδεικνύει ότι το υδατικό αποτύπωμα επηρεάζεται καθοριστικά τόσο από τις ιδιότητες του εδάφους, όσο και από τον τύπο της καλλιέργειας και τις κλιματικές συνθήκες. Η κατανόηση των παραμέτρων αυτών είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό ορθολογικών στρατηγικών διαχείρισης των υδατικών πόρων, ιδιαίτερα σε περιοχές όπως η πεδιάδα των Σερρών όπου η γεωργική παραγωγή αποτελεί βασικό αναπτυξιακό άξονα.

Ευχαριστίες: Οι συγγραφείς ευχαριστούν την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.) για τη χορήγηση των μετεωρολογικών δεδομένων από το σταθμό των Σερρών.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ELSTAT). *Ανάκτηση από https://www.statistics.gr/statistics/agr*

Λιάπης, Α.Κ, Γεωργίου, Π.Ε. και Καρπούζος, Δ.Κ, 2020. *Υδατικό Αποτύπωμα των Καλλιεργειών τηςΠεδιάδας του Νέστου με τη Μεθοδολογία της Εκτίμησης Κύκλου Ζωής. Υδροτεχνικά, 30, 56-68.*

Παπαστάμκου, Ν., Παπαμιχαήλ, Δ. και Γεωργίου, Π.Ε., 2016. *Διερεύνηση Μεθόδων και Εκτίμηση του Υδατικού Αποτυπώματος Καλλιεργειών της Πεδιάδας Θεσσαλονίκης. Υδροτεχνικά, 24, 37-50.*

Υ.Α. Αριθμ. Η.Π. 50982/2309 ΦΕΚ 1894 τ.Β' (29-12-2006).

Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων *Ανάκτηση από https://www.minagric.gr/statistikes-tekmiriosi/statistikes-diadikasies dedomena/statistika-stoixeia-ektaseon-kai-paragogis-fytikon-proionton*

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. *Ανάκτηση από https://ypen.gov.gr/*

ΥΠΕΚΑ, 2013 *Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Μακεδονίας , Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής – Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Ελλάδας*

Χατζηγεωργίου Δ., 2019. *Μεταπτυχιακή Διατριβή «Διαχείριση Αρδευτικού Νερού σε Δίκτυα της πεδιάδας Σερρών.»* Π.Μ.Σ. Γεωργικής Μηχανικής και Υδατικών Πόρων. Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ.

Allan, J. A. (1998). *Virtual water: a strategic resource. Ground water, 36(4), 545-547.*

Clarke, D., Smith, M., & El-Askari, K., 2001. CropWat for Windows: user guide. Oak Brook, IL, USA: Ihe.

Hoekstra, A.Y. (Ed.), 2003. *Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002, Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft.*

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M., 2009. *Water footprint manual: State of the art 2009. Water Footprint Network, Enschede, The Netherlands.*

Hoekstra, A.Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya and M.M Mekonnen, 2011. *The Water Footprint Assessment Manual-Setting the Global Standard. Earthscan, London, Water Footprint Network, pp. 203.*

Hoekstra, A.Y. and P.Q. Hung, 2002. *Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. In: Value of Water Research Report Series No.11. UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.*

35. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΖΩΝΩΝ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΛΟΓΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ

Ν. Ταουκίδου, Δ. Καρπούζος & Π. Γεωργίου

Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσσαλονίκης, Πανεπιστημιούπολη, 54124, Θεσσαλονίκη, ntaouki@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την αξιολόγηση ζωνών επικινδυνότητας πλημμύρας της Π.Ε. Χαλκιδικής με τη δημιουργία ενός Χάρτη Πλημμυρικής Επικινδυνότητας (ΧΠΕ). Η μεθοδολογία βασίζεται στην εφαρμογή του μοντέλου Λόγου Συχνοτήτων σε GIS. Το μοντέλο Λόγου Συχνοτήτων είναι ένα στατιστικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στην ύπαρξη ιστορικών δεδομένων. Τα ιστορικά δεδομένα χωρίστηκαν τυχαία σε δύο σύνολα δεδομένων, 70%-30% για εκπαίδευση και επικύρωση. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι το 34% της περιοχής μελέτης εντάσσεται στις περιοχές με υψηλή και πολύ υψηλή επικινδυνότητα. Η επικύρωση ολοκληρώθηκε με τον υπολογισμό του εμβαδού κάτω από την ROC καμπύλη (AUC), και με σύγκριση του ΧΠΕ με τα αποτελέσματα της 1ης Αναθεώρησης των ΣΔΚΠ του ΥΠΕΝ. Μέσω της ROC ανάλυσης, επιβεβαιώθηκε ότι το μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια (AUC =0.74), ενώ επίσης προέκυψε ότι οι περιοχές που χαρακτηρίστηκαν ως επικίνδυνες και πολύ επικίνδυνες, συμπίπτουν με τις Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας ΣΔΚΠ.

Λέξεις κλειδιά: πλημμύρες, GIS, Μοντέλο Λόγου Συχνοτήτων, επικινδυνότητα πλημμύρας, Χάρτης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας, Καμπύλη Λειτουργικού Χαρακτηριστικού Δέκτη

EVALUATION OF FLOOD HAZARD ZONES USING THE FREQUENCY RATIO MODEL: CASE STUDY OF THE CHALKIDIKI REGIONAL UNIT

N. Taoukidou*, D. Karpouzos & P. Georgiou

*School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, University Campus, 54124, Thessaloniki, * ntaouki@agro.auth.gr*

ABSTRACT

This study aims to evaluate the flood hazard zones of the Chalkidiki Regional Unit by creating a Flood Hazard Map. The methodology is based on the application of the Frequency Ratio (FR) model in GIS. The FR model is a statistical model that relies on the existence of historical data. The historical data were randomly divided into two datasets, 70%-30% for training and validation. The results revealed that 34% of the study area falls into areas with high and very high hazard. The validation was completed by calculating the area under the ROC curve (AUC), and by comparing the FHM with the results of the 1st Revision of the Flood Risk Management (FRM) Plans of the Hellenic Ministry of Environment and Energy. Through the ROC analysis, it was confirmed that the model presents satisfactory accuracy with an AUC value of 0.74. Furthermore, it was demonstrated that the areas characterized as hazardous and very hazardous correspond to the respective zones of the FRM Plans.

Keywords: floods, GIS, Frequency Ratio Model, flood hazard, Flood Hazard Map, ROC

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των πλημμυρών παγκοσμίως, οδηγώντας σε συχνότερα και πιο καταστροφικά γεγονότα. Σύμφωνα με έρευνα που διεξήγαγε το World Economic Forum για την Έκθεση Παγκόσμιων Κινδύνων του 2025, τα ακραία καιρικά φαινόμενα κατατάσσονται δεύτερα στους παγκόσμιους κινδύνους σε επίπεδο διετίας και πρώτα σε επίπεδο δεκαετίας (World Economic Forum, 2025). Βάσει των δεδομένων της EM-DAT, το 64% των καταστροφών ανήκουν στην ομάδα «Φυσικές Καταστροφές» οι περισσότερες εκ των οποίων αφορούν πλημμύρες (22%) και καταιγίδες (18%) (Delforge et al., 2025).

Η Ελλάδα παρουσιάζει σημαντική τρωτότητα στα πλημμυρικά φαινόμενα εξαιτίας των ποικίλων γεωμορφολογικών, φυσιογραφικών και κλιματικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτή (Mattas et al., 2023). Την τελευταία 20ετία (2000-2024), έχουν καταγραφεί στην EM-DAT για τη χώρα μας 75 μεγάλες πλημμύρες, οι οποίες είχαν αντίκτυπο στη ζωή 25.660 ανθρώπων, προκάλεσαν την απώλεια 75 ανθρώπινων ζωών και είχαν οικονομικό κόστος περίπου 1.2 USD. Επομένως, είναι σημαντική η αποτύπωση των πλημμυρικών φαινομένων, η οποία παρέχει τη βάση για την κατανόηση των παρελθοντικών τάσεων, την πρόβλεψη μελλοντικών εξελίξεων και τον εντοπισμό περιοχών που παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία σε πλημμυρικά γεγονότα (Antzoulatos et al., 2022).

Τα νερά της πλημμύρας έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν ανυπολόγιστες ζημιές μεταφέροντας φερτά υλικά και απόβλητα σε μεγάλες αποστάσεις. Η έλλειψη κατάλληλης αποστράγγισης μπορεί να προκαλέσει συσσώρευση νερού και αποβλήτων σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου ή σε περιοχές με χαμηλή εδαφική διαπερατότητα (Taoukidou et al., 2023). Επομένως, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να προσδιοριστούν οι περιοχές που είναι ευάλωτες στις πλημμύρες προκειμένου να βοηθήσουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να αποφύγουν καταστροφικές συνέπειες τους (Tehrany et al., 2019 και Ταουκίδου, 2021). Αυτός ο προσδιορισμός γίνεται εφικτός με τη δημιουργία χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας (ΧΠΕ). Η δημιουργία ακριβών χαρτών επικινδυνότητας σε πλημμύρες είναι απαραίτητη για τον μετριασμό των καταστροφικών επιπτώσεων των πλημμυρών (Shafizadeh-Moghadam et al., 2018).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση και η οριοθέτηση περιοχών που εμφανίζουν μεγαλύτερη ευπάθεια στις πλημμύρες στην Π.Ε. Χαλκιδικής με τη χρήση του Μοντέλου Λόγου Συχνοτήτων (Frequency Ratio Model - FR) σε συνδυασμό με τα GIS. Προϊόν αυτού του μοντέλου, είναι ο Χάρτης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας ο οποίος παρουσιάζει τις πιο ευάλωτες στις πλημμύρες περιοχές εντός της περιοχής μελέτης, μια περιοχή που έχει πλημμυρίσει αρκετές φορές στο παρελθόν.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Διαχείριση πλημμυρών

Η σωστή διαχείριση των πλημμυρών είναι ένα από τα πιο σημαντικά βήματα για την αντιμετώπισή τους. Η αξιολόγηση των περιοχών με αυξημένη ευπάθεια σε πλημμυρικά φαινόμενα, όπως και η ανάλυση της πλημμυρικής επικινδυνότητας, αποτελούν διαδικασίες καθοριστικής σημασίας για την προστασία της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας αλλά και για την ορθολογική διαχείριση των υδρολογικών λεκανών. Θεμελιώδες εργαλείο για την αντιμετώπιση των πλημμυρών, αποτελεί η εκπόνηση σχεδίου διαχείρισης πλημμυρών. Αναπόσπαστο τμήμα των σχεδίων διαχείρισης πλημμυρών είναι η χαρτογράφηση των

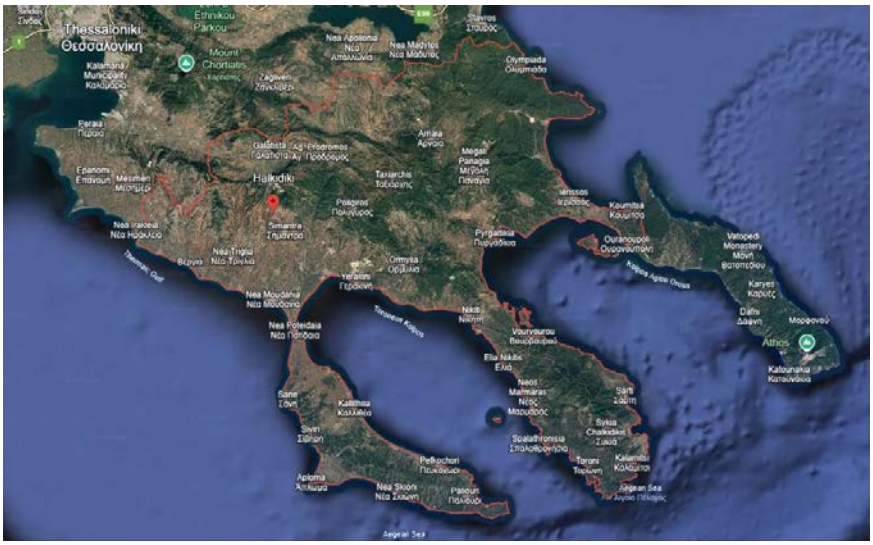
περιοχών που παρουσιάζουν πλημμυρική επικινδυνότητα. Η χαρτογράφηση γίνεται με τη δημιουργία Χαρτών Πλημμυρικής Επικινδυνότητας, που είναι και ένα βασικό εργαλείο της διαχείρισης πλημμυρών. Στους ΧΠΕ επισημαίνονται οι πιο επιρρεπείς περιοχές ώστε να μελετηθούν επιστημονικά και, κατά συνέπεια, να υιοθετηθούν βιώσιμα μέτρα προστασίας και να μειωθεί η ένταση των καταστροφικών συνεπειών που εκδηλώνονται σε αυτές. Αποτελούν ουσιώδες εργαλείο για τον χωροταξικό σχεδιασμό, τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και τη διαχείριση των περιβαλλοντικών κινδύνων σε περιοχές με υψηλή τρωτότητα σε πλημμυρικά φαινόμενα (Chapi, et al., 2017).

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Στην παρούσα μελέτη εκτιμήθηκε η πλημμυρική επικινδυνότητα της Π.Ε. Χαλκιδικής με την εφαρμογή του μοντέλου FR, για τη δημιουργία ζωνών επικινδυνότητας. Το μοντέλο FR συνδυάστηκε με GIS προκειμένου να καταρτισθεί ο Χάρτης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας (ΧΠΕ) και η περιοχή μελέτης κατατάχθηκε σε πέντε βαθμούς επικινδυνότητας 2-πολύ χαμηλή, 4-χαμηλή, 6-μέτρια, 8-υψηλή και 10-πολύ υψηλή. Ως δεδομένα εισόδου του μοντέλου επιλέχθηκαν οκτώ παράμετροι που σχετίζονται με την εμφάνιση πλημμυρών και ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα της περιοχής μελέτης.

3.1 Περιοχή Μελέτης

Η παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε στην Περιφερειακή Ενότητα (Π.Ε.) Χαλκιδικής (Σχήμα 1). Η Π.Ε. Χαλκιδικής ανήκει στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και περιλαμβάνει τη Χαλκιδική και το Άγιο Όρος. Η περιοχή έχει έκταση 3183.62 km^2, περίμετρο 772 km, μέσο υψόμετρο 279.1 m και μέση κλίση 11.6%. Υπάγεται στο Υδατικό Διαμέρισμα (ΥΔ) Κεντρικής Μακεδονίας (EL10) και με βάση τα στοιχεία απογραφής του 2021, ο συνολικός πληθυσμός της ανέρχεται σε 101324 κατοίκους.



Σχήμα 1. Περιοχή μελέτης (*Πηγή: earth.google.com*).

3.2 Παράμετροι

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθοδολογίας είναι: το υψόμετρο (E), οι χρήσεις γης (U), η συσσώρευση ροής (FA), η γεωλογία (G), η πυκνότητα αποστράγγισης (DD), η κλίση εδάφους (S), η απόσταση από το δίκτυο αποστράγγισης (D) και ο δείκτης βροχόπτωσης (RI).

Το υψόμετρο (E), η κλίση εδάφους (S), η συσσώρευση ροής (FA), η απόσταση από το δίκτυο αποστράγγισης (D), και η πυκνότητα αποστράγγισης (DD) προσδιορίστηκαν από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) με τη χρήση εργαλείων GIS.

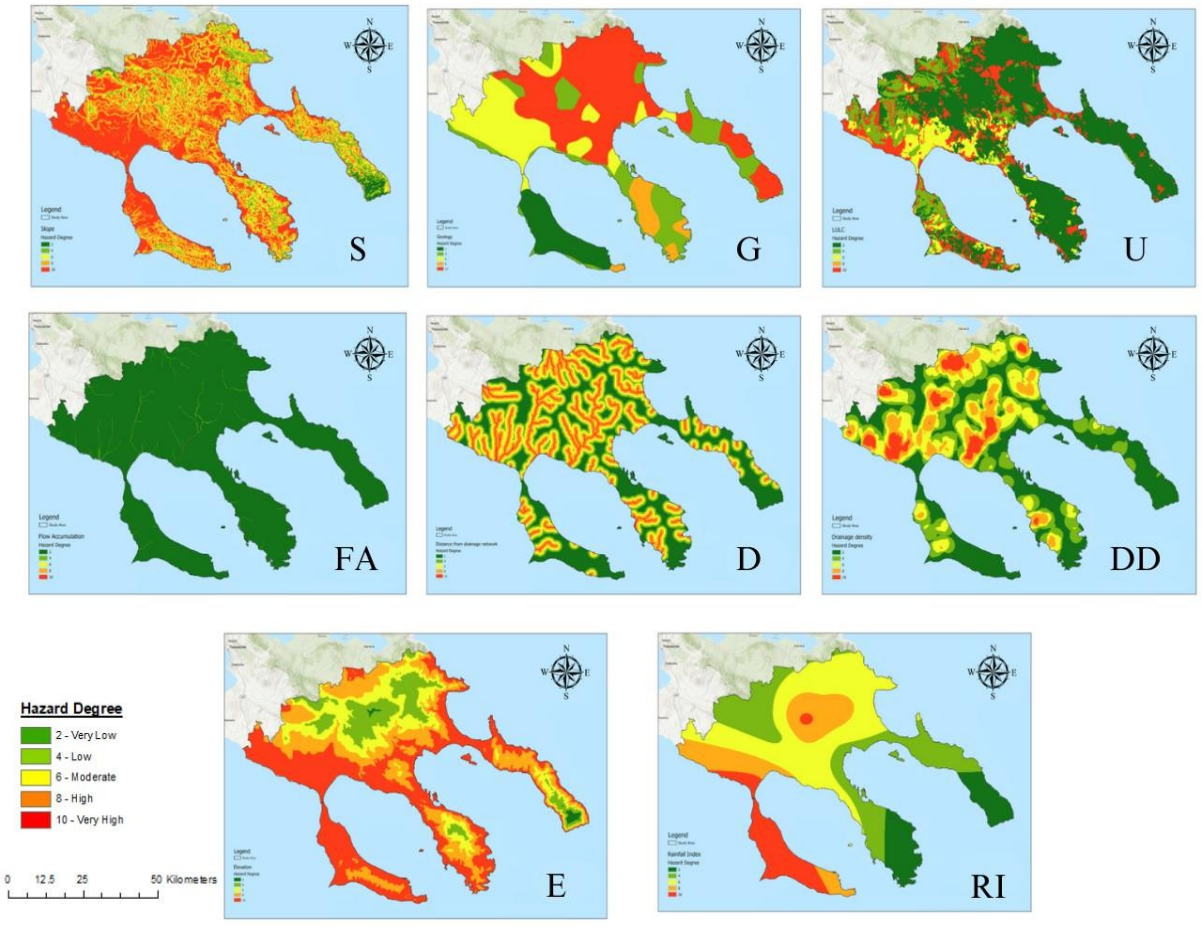
Τα δεδομένα χρήσεων γης (U) αντλήθηκαν από το CORINE LAND COVER 2018 ενώ τα δεδομένα της γεωλογίας (G) από στοιχεία της Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών (Ε.Α.Γ.Μ.Ε. - πρώην Ι.Γ.Μ.Ε.).

Ο δείκτης βροχόπτωσης (RI), υπολογίστηκε με τη χρήση του Τροποποιημένου Δείκτη Fournier (MFI), ο οποίος δίνεται στη σχέση (1)

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i}{P_t} \quad (1)$$

όπου MFI ο τροποποιημένος δείκτης Fournier, i ο μήνας, p_i η μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm) και P_t η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm). Για τον προσδιορισμό των τιμών του MFI, χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης, τα οποία συλλέχθηκαν από μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής.

Τα κριτήρια-παράμετροι τα οποία επιλέχθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν ως βαθμονομημένοι θεματικοί χάρτες που επεξεργάστηκαν σε περιβάλλον GIS και παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Η κατηγοριοποίηση των χαρτών, έγινε με τη μέθοδο των Φυσικών Ορίων του Jenks (Natural Breaks Jenks) και σε κάθε κατηγορία που δημιουργήθηκε δόθηκε μια τιμή διαβάθμισης της επικινδυνότητας.



Σχήμα 2. Θεματικοί χάρτες παραμέτρων.

3.3 Χάρτης καταγραφής πλημμυρών (Flood inventory map)

Για την εφαρμογή του Μοντέλου Λόγου Συχνοτήτων (Frequency Ratio Model) απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη παρελθοντικών πλημμυρικών συμβάντων. Η ανάπτυξη μιας ιστορικής βάσης δεδομένων πλημμυρών αποτελεί τη βάση των μελετών επικινδυνότητας πλημμυρών (Sharma et al., 2024). Τα διαθέσιμα δεδομένα αντλήθηκαν από το ΥΠΕΝ, την ηλεκτρονική βάση δεδομένων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (meteo.gr) καθώς και διάφορες άλλες δημοσιευμένες αναφορές.

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα ιστορικά συμβάντα, δημιουργήθηκε ο χάρτης καταγραφής πλημμυρών. Ο χάρτης καταγραφής πλημμυρών, αποτελεί βασικό εργαλείο για την εκτίμηση των μελλοντικών φαινομένων πλημμύρας (Saha et al., 2022). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του αφορούν 148 ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα που σημειώθηκαν στην περιοχή μελέτης κατά τα έτη 1980 έως 2018. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Tehrany et al., 2019, Sharma et al., 2024 και Lahiri at al., 2024), ο χάρτης χωρίστηκε τυχαία σε δύο σύνολα δεδομένων: το 70% χρησιμοποιήθηκε για σκοπούς εκπαίδευσης και το υπόλοιπο 30% χρησιμοποιήθηκε για την επικύρωση των αποτελεσμάτων.

3.4 Μοντέλο Λόγου Συχνοτήτων

Το Μοντέλο Λόγου Συχνοτήτων (Frequency Ratio Model) είναι ένα στατιστικό μοντέλο το οποίο επιλέχθηκε εξαιτίας της ευκολίας συνδυασμού του με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Είναι από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα στατιστικά μοντέλα για την πρόβλεψη της ευπάθειας σε φυσικούς κινδύνους (Megahed et al., 2023 και Sharma et al., 2024). Τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές έχουν εφαρμόσει το μοντέλο FR σε μελέτες αξιολόγησης πλημμυρών για την επισήμανση των επιρρεπών σε πλημμύρες περιοχών (Sarkar and Mondal, 2020, Munir et al., 2022, Qasimi et al., 2024, Taoukidou et al., 2025).

Το μοντέλο FR αποδίδει τιμές σε κάθε κατηγορία κάθε κριτηρίου που εξετάζεται και αξιολογεί την επίδρασή τους στην εμφάνιση πλημμυρών (Malla et al., 2024). Βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα πλημμύρας τα οποία αντλούνται από βάσεις δεδομένων καταγραφής πλημμυρών. Έχει αποδειχθεί ότι οι μεθοδολογίες που βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα και παρέχουν πιο αντιπροσωπευτικά και αντικειμενικά αποτελέσματα. Επομένως, η χρήση παρελθοντικών γεγονότων πλημμύρας για την πρόβλεψη πλημμυρών, είναι απαραίτητη και προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για την εκπαίδευση του μοντέλου, η κάθε παράμετρος που εξετάσθηκε χωρίστηκε σε πέντε κλάσεις. Ο χάρτης εκπαίδευσης πλημμυρών επικαλύφθηκε με κάθε κλάση των παραμέτρων χρησιμοποιώντας εργαλεία GIS. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο είχε τη δυνατότητα να μετρήσει τον αριθμό των περιστατικών πλημμύρας που εμπίπτουν σε κάθε κλάση κάθε παραμέτρου και τη συνολική έκταση κάθε κλάσης εντός ολόκληρης της περιοχής μελέτης. Οι χωρικές σχέσεις μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών εμφάνισης πλημμύρας και κάθε παράμετρο που συμβάλλει στην εμφάνιση πλημμυρών, προσδιορίστηκαν εφαρμόζοντας το Μοντέλο Λόγου Συχνοτήτων με σκοπό να οριοθετηθούν οι ζώνες ευπάθειας πλημμύρας στην περιοχή μελέτης. Ως αποτέλεσμα, ο λόγος συχνοτήτων υπολογίστηκε για κάθε κλάση κάθε παραμέτρου χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (2).

$$FR_{ij} = \frac{\%\ \text{πλημμυρισμένης περιοχής που περιβάλλεται από συγκεκριμένη κλάση κριτηρίου}}{\%\ \text{της συνολικής περιοχής που περιβάλλεται από την κλάση}} \quad (2)$$

όπου FRij ο λόγος συχνοτήτων της κλάσης i του κριτηρίου j. Οι τιμές του λόγου συχνοτήτων σε κάθε κλάση κριτηρίου κυμαίνονται από 0 έως 1, όπου το 0 απεικονίζει την απουσία πλημμύρας στην περιοχή και το 1 αντιπροσωπεύει την ύπαρξη πλημμύρας.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η σχετική συχνότητα ως η κανονικοποιημένη τιμή των τιμών του λόγου συχνοτήτων σύμφωνα με την Εξίσωση (3).

$$RF_{ij} = Fr_{ij} / \Sigma FR_{ij} \quad (3)$$

όπου RFij η σχετική συχνότητα της κλάσης i του κριτηρίου j, FRij ο λόγος συχνοτήτων της κλάσης i του κριτηρίου j και ΣFRij οι συνολικές τιμές του FR όλων των κλάσεων του κριτηρίου j. Η συγκεκριμένη τιμή αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ των κλάσεων και των ιστορικών γεγονότων πλημμύρας.
Έπειτα, εκτιμήθηκε ο ρυθμός πρόβλεψης. Ο ρυθμός πρόβλεψης βοηθά στην αναγνώριση των συσχετίσεων μεταξύ των κριτηρίων πλημμύρας και υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (4).

$$PR_j = \frac{\left(MaxRF_j - MinRF_j\right)}{Min\left(MaxRF_j - MinRF_j\right)} \quad (4)$$

όπου PR j η τιμή του ρυθμού πρόβλεψης του κριτηρίου j, MaxRFj η μέγιστη τιμή του RF μεταξύ όλων των κλάσεων του κριτηρίου j, MinRFj η ελάχιστη τιμή του RF μεταξύ όλων των κλάσεων του κριτηρίου j και Min(MaxRFj-MinRFj) η ελάχιστη τιμή από όλες τις τιμές των MaxRFj-MinRFj μεταξύ όλων των κριτηρίων.

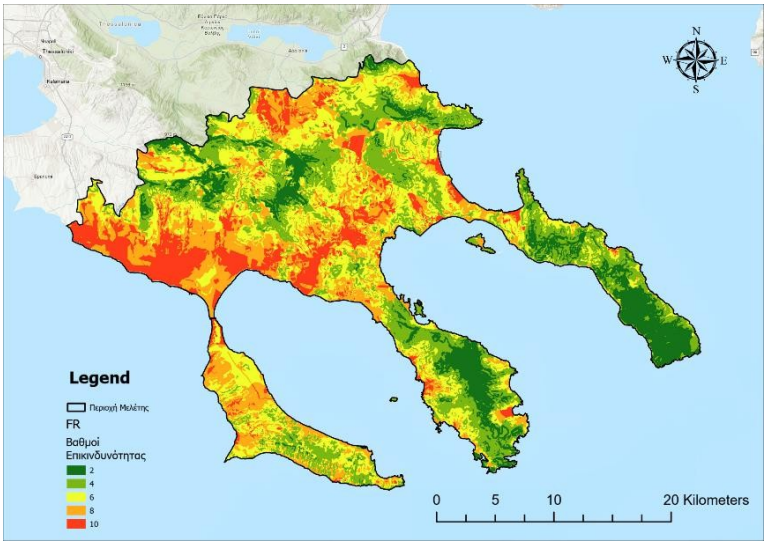
Ο Χάρτης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας ακολουθώντας το μοντέλο FR δημιουργήθηκε σύμφωνα με την Εξίσωση (5), χρησιμοποιώντας τα βάρη των παραμέτρων, τα οποία προσδιορίστηκαν έπειτα από κανονικοποίηση των τιμών του ρυθμού πρόβλεψης για κάθε κριτήριο.

$$FHM = \sum_{i=1}^{n} PR_i \times r_i \quad (5)$$

όπου PRi η τιμή του ρυθμού πρόβλεψης του κριτηρίου i, ri η κατάταξη κάθε κριτηρίου και n ο αριθμός των κριτηρίων.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή του μοντέλου, είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του ΧΠΕ για την Π.Ε. Χαλκιδικής όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.



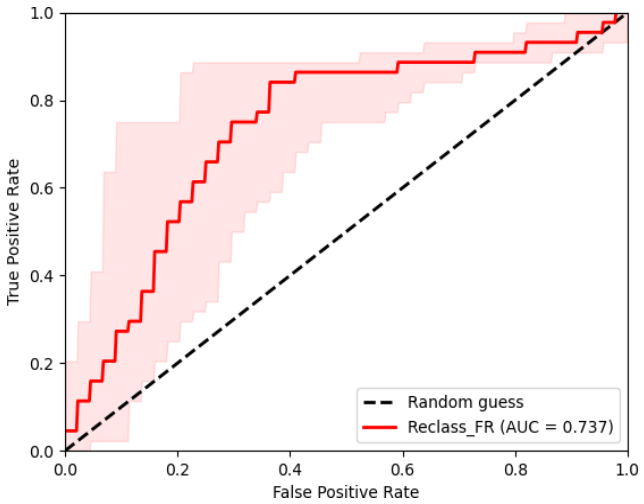
Σχήμα 4. Χάρτης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας Π.Ε. Χαλκιδικής.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου FR υποδεικνύουν ότι οι πιο επικίνδυνες περιοχές καλύπτουν το 12.11% της περιοχής μελέτης και οι λιγότερο επικίνδυνες το 12.75%. Υψηλός και πολύ υψηλός κίνδυνος εντοπίζεται στο 34% της Π.Ε. Χαλκιδικής, κυρίως σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου, απότομες περιοχές και περιοχές που συνορεύουν με την Π.Ε. Θεσσαλονίκης, στις οποίες παρατηρείται έντονη αστικοποίηση. Επικινδυνότητα εντοπίζεται στις εκβολές των ποταμών Ολυνθίου και Χαβρία, στο βορειοανατολικό τμήμα της Π.Ε. Χαλκιδικής στις περιοχές όπου ασκείται επιρροή από τα κατάντη της λίμνης Βόλβης, στη βορειοδυτική περιοχή της χερσονήσου του Άθω στην περιοχή Γομάτι, καθώς και στις βορειοανατολικές ακτές όπου βρίσκονται οι πεδινές περιοχές της Ολυμπιάδας και των Καλυβίων Βαρβάρας. Από υψηλή επικινδυνότητα χαρακτηρίζεται η περιοχή της Κουμίτσας στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου του Άθω, η περιοχή της Νέας Ποτίδαιας στην χερσόνησο της Κασσάνδρας, η περιοχή της Συκιάς στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου της Σιθωνίας και η παράκτια περιοχή της Ιερισσού στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Το 27.76% της περιοχής χαρακτηρίζεται από μέτριο ποσοστό επικινδυνότητας, που αντιστοιχεί σε 883.76 km^2 της περιοχής. Η κατανομή της επικινδυνότητας πλημμύρας στην Π.Ε. Χαλκιδικής σύμφωνα με το μοντέλο FR, δίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Κατανομή επικινδυνότητας πλημμύρας στην Π.Ε. Χαλκιδικής.

Επικινδυνότητα Πλημμύρας	Έκταση, km^2
Πολύ Χαμηλή	405.79
Χαμηλή	811.63
Μέτρια	883.76
Υψηλή	696.97
Πολύ Υψηλή	385.47

Βασικό βήμα κάθε μελέτης, αποτελεί η επικύρωση των αποτελεσμάτων. Η επικύρωση του μοντέλου είναι κρίσιμη προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η επιλεγμένη προσέγγιση είναι κατάλληλη για την επίτευξη των επιδιωκόμενων στόχων. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της μεθοδολογίας, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθοι έλεγχοι επικύρωσης: αρχικά, επικύρωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας το μοντέλο ROC-AUC και έπειτα, σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα αποτελέσματα της 1ης Αναθεώρησης των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του ΥΠΕΝ.

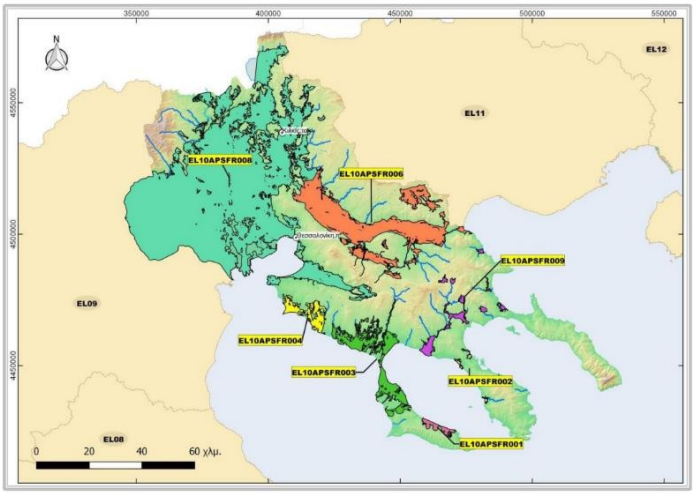


Σχήμα 3. Καμπύλη ROC του Χάρτη Πλημμυρικής Επικινδυνότητας.

Το μοντέλο ROC-AUC χρησιμεύει ως δείκτης ακρίβειας του συστήματος πρόβλεψης προκαθορισμένων συμβάντων και χρησιμοποιείται ευρέως για την επικύρωση μεθοδολογιών (Saha et al., 2022, Qasimi et al., 2024 και Taoukidou et al., 2025). Για την εξαγωγή της καμπύλης ROC (Σχήμα 3), χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης επικύρωσης που δημιουργήθηκε από τα ιστορικά δεδομένα και περιέχει το 30% των ιστορικών πλημμυρικών συμβάντων. Το μοντέλο που αξιολογείται μέσω της ROC καμπύλης θεωρείται ακατάλληλο για πρόβλεψη εάν η τιμή AUC είναι 0.5 ή μικρότερη.
Με βάση την ανάλυση της καμπύλης ROC, ο χάρτης του μοντέλου FR, με βαθμολογία AUC

0.74 (74%), επιδεικνύει ικανοποιητική αξιοπιστία αποτελεσμάτων. Αυτή η τιμή υποδεικνύει αποδεκτή αντιστοιχία μεταξύ των προβλεπόμενων επικίνδυνων περιοχών και των πραγματικών περιστατικών πλημμύρας. Τέτοιου είδους τιμές, επιβεβαιώνουν την επάρκεια των αποτελεσμάτων του συγκεκριμένου μοντέλου (FR) κάτι που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας πλημμύρας.

Αναφορικά με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα αποτελέσματα της 1ης Αναθεώρησης των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (Σχήμα 4), παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα συγκλίνουν σε ικανοποιητικό βαθμό. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί από τα ΣΔΚΠ ως ΖΔΥΚΠ συμπίπτουν με τις περιοχές που ο ΧΠΕ έχει επισημάνει ως υψηλής και πολύ υψηλής επικινδυνότητας. Πρόκειται για περιοχές που βρίσκονται κοντά σε εκβολές ποταμών, τοποθεσίες που επηρεάζονται από λιμναία ρέματα, παράκτιες περιοχές χαμηλού υψομέτρου, αστικοποιημένες περιοχές και παράκτιες ζώνες όπου καταλήγουν χειμαρρώδεις απορροές από τα ανάντη. Σημαντικό είναι να αναφερθεί, πως σε αυτές τις περιοχές έχουν καταγραφεί ιστορικά γεγονότα πλημμύρας, ακόμα και περισσότερες των μια φορές.



Σχήμα 4. Αναθεωρημένες Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας 1ης Αναθεώρησης των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του ΥΠΕΝ.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο FR έχει τη δυνατότητα να προσδιορίζει τις δυνητικά ευπαθείς στις πλημμύρες περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο εντόπισε αποτελεσματικά τις περιοχές υψηλής επικινδυνότητας πλημμύρας, προσδιορίζοντας με ακρίβεια ζώνες επικινδυνότητας στις οποίες συνέβησαν οι περισσότερες ιστορικές πλημμύρες. Η επικύρωση του μοντέλου FR υποδηλώνει ότι το μοντέλο εμφανίζει υψηλή προγνωστική ικανότητα όπου υπάρχουν επαρκή διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης και

ειδικότερα ο Χάρτης Πλημμυρικής Επικινδυνότητας μπορεί να αποτελέσει ένα ιδιαίτερα πολύτιμο εργαλείο για τις αρχές και τους υπευθύνους χάραξης πολιτικής, ώστε να αναπτύξουν στρατηγικές προσαρμογής και μετριασμού, ακολουθώντας τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης, με απώτερο στόχο την προστασία της ανθρώπινης ζωής και του περιβάλλοντος.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Antzoulatos, G., Kouloglou, I., Bakratsas, M., Moumtzidou, A., Gialampoukidis, I., Karakostas, A., Lombardo, F., Fiorin, R., Norbiato, D., Ferri, M., Symeonidis, A., Vrochidis, S. and Kompatsiaris, I., 2022. *Flood Hazard and Risk Mapping by Applying an Explainable Machine Learning Framework Using Satellite Imagery and GIS Data*. Sustainability, 14, 3251.

Delforge, D., Wathelet, V., Below, R., Lanfredi, C. S., Tonnelier, M., Van Loenhout, J.A.F. and Speybroeck, N., 2025. *EM-DAT: the Emergency Events Database*. International Journal of Disaster Risk Reduction, 124, 105509.

Chapi, K., Singhb, V. P., Shirzadia, A., Shahabic, H., Buid, D. T., Phame, B. T., and Khosravi, K., 2017. *A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment*. Environmental Modelling & Software Vol. 95, 229-245.

Lahiri, N., Arjun, B. M. and Nongkynrih, J. M., 2024. *Flood susceptibility mapping using Sentinel 1 and frequency ratio technique in Jinjiram River watershed, India*. Environ Monit Assess (2024) 196:103.

Malla, S. and Ohgushi, K., 2024. *Flood vulnerability map of the Bagmati River basin, Nepal: A comparative approach of the analytical hierarchy process and frequency ratio model*. Smart Constr. Sustain. Cities, 2, 16.

Mattas, C., Karpouzos, D., Georgiou, P. and Tsapanos, T., 2023. *Two-Dimensional Modelling for Dam Break Analysis and Flood Hazard Mapping: A Case Study of Papadia Dam, Northern Greece*. Water, 15, 994.

Megahed, H.A., Abdo, A.M., AbdelRahman, M.A.E., Scopa, A. and Hegazy, M.N., 2023. *Frequency Ratio Model as Tools for Flood Susceptibility Mapping in Urbanized Areas: A Case Study from Egypt*. Appl. Sci. 2023, 13, 9445.

Munir, A., Ghufran, M. A., Ali, S. M., Majeed, A., Batool, A., Khan, M. B. A. S. and Abbasi, G. H., 2022. *Flood Susceptibility Assessment Using Frequency Ratio Modelling Approach in Northern Sindh and Southern Punjab, Pakistan*. Pol. J. Environ. Stud., 31, 3249-3261.

Qasimi, A. B., Isazade, V. and Berndtsson, R., 2024. *Flood susceptibility prediction using MaxEnt and frequency ratio modeling for Kokcha River in Afghanistan*. Natural Hazards 120:1367–1394.

Saha, S., Sarkar, D. and Mondal, P., 2022. *Efficiency exploration of frequency ratio, entropy and weights of evidence-information value models in flood vulnerability assessment: a study of raiganj subdivision, Eastern India*. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 36:1721–1742.

Sarkar, D. and Mondal, P., 2020. *Flood vulnerability mapping using frequency ratio (FR) model: a case study on Kulik river basin, Indo-Bangladesh Barind region*. Applied Water Science 10:17.

Shafizadeh-Moghadam, H., Valavi, R., Shahabi, H., Chapi, K. and Shirzadi, A., 2018. *Novel forecasting approaches using combination of machine learning and statistical models for flood susceptibility mapping*. Journal of Environmental Management 217, 1-11.

Sharma, A., Poonia, M., Rai, A., Biniwale, R.B., Tügel, F., Holzbecher, E. and Hinkelmann, R., 2024. *Flood Susceptibility Mapping Using GIS-Based Frequency Ratio and Shannon's Entropy Index Bivariate Statistical Models: A Case Study of Chandrapur District,India*. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 13, 297.

Ταουκίδου Ν., 2021. *Ανάλυση Επικινδυνότητας Πλημμύρας στην Π.Ε. Χαλκιδικής με χρήση G.I.S και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωπονίας, Θεσσαλονίκη, Α.Π.Θ.

Taoukidou N., Karpouzos D. and Georgiou P., 2023. *Application of an A.H.P. - G.I.S. technique for flood hazard assessment in Chalkidiki region*. Water Utility Journal 32: 45-62, 2023.

Taoukidou N., Karpouzos D. and Georgiou P., 2025. *Flood Hazard Assessment Through AHP, Fuzzy AHP, and Frequency Ratio Methods: A Comparative Analysis*. Water, 17(14), 2155.

Tehrany, M. S., Kumar, L. and Shabani, F., 2019. *A novel GIS-based ensemble technique for flood susceptibility mapping using evidential belief function and support vector machine: Brisbane, Australia*. PeerJ 7:e7653.

World Economic Forum, 2025. *The Global Risks Report 2025*. Διαθέσιμο διαδικτυακά: https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/

36. ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΚΡΑΤΕΙΑ

Δ. Μητρόγιαννης

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, mitrogdimi@gmail.com

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποτυπώνει τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της ελληνικής επικράτειας, οι οποίες εφαρμόζουν επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση σύμφωνα με την περιβαλλοντική τους αδειοδότηση. Στοιχεία αντλήθηκαν από την Εθνική Βάση Δεδομένων Παρακολούθησης Λειτουργίας των ΕΕΛ του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Από τις συνολικά 277 ΕΕΛ, που είναι καταγεγραμμένες στη βάση δεδομένων, μόνο 14 εφαρμόζουν ήδη ή σχεδιάζουν επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού για άρδευση. Οι κυριότερες αρδευόμενες καλλιέργειες περιλαμβάνουν ελαιόδεντρα, αμπέλια και εσπεριδοειδή. Η συνολική ετήσια παροχή ανακτημένου νερού από τις 14 ΕΕΛ και η συνολική αρδευόμενη έκταση υπολογίζονται σε 8.199.298 m^3 και 51.837 στρ., αντίστοιχα. Η παροχή ανακτημένου νερού είναι πολύ χαμηλή συγκριτικά με τις ετήσιες απολήψεις (2.510.089.124 m^3) των Οργανισμών Εγγείων Βελτιώσεων (ΟΕΒ) σύμφωνα με τη 2η Αναθεώρηση των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΣΔΛΑΠ).

Λέξεις κλειδιά: επεξεργασμένα αστικά λύματα, επαναχρησιμοποίηση, άρδευση

REPORT ON THE REUSE OF TREATED MUNICIPAL WASTEWATER FOR IRRIGATION IN GREECE

D. Mitrogiannis✉

Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering., Iera Odos 75, 11855, Athens, ✉mitrogdimi@gmail.com

Abstract

This paper describes the Wastewater Treatment Plants (WTPs) of Greece, which implement the reuse of treated wastewater for irrigation in accordance with their environmental licensing. Data were drawn from the National Database for Monitoring the Operation of WTPs of the Ministry of Environment and Energy. Of the total 277 WTPs registered in the database, only 14 are already implementing or planning to reuse reclaimed water for irrigation. The main irrigated crops include olive trees, vineyards and citrus fruits. The total annual supply of reclaimed water from the 14 WTPs and the total irrigated area are estimated at 8,199,298 m^3 and 5183.7 ha, respectively. The supply of reclaimed water is very low compared to the annual abstractions (2,510,089,124 m^3) of the Land Reclamation Organizations according to the 2nd Revision of the River Basin Management Plans (RBMPs).

Keywords: treated municipal wastewater, reuse, irrigation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού από επεξεργασμένα αστικά λύματα για αρδευτική χρήση, σύμφωνα με τις ελάχιστες απαιτήσεις που ορίζει ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 (EU, 2020) και η Κοινή Υπουργική Απόφαση 145116/2011 (ΚΥΑ, 2011) για την επεξεργασμένη εκροή των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ), αναφέρεται στην Οδηγία 91/271/ΕΟΚ (EC, 1991) και στην Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ (EC, 2000) ως ένα από τα μέτρα για το μετριασμό των πιέσεων που υφίστανται οι υδάτινοι πόροι της Ευρωπαϊκής Ένωσης λόγω λειψυδρίας και ξηρασίας. Σκοπός της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων είναι η εξοικονόμηση νερού μέσω του περιορισμού των αρδευτικών απολήψεων από επιφανειακά και υπόγεια υδάτινα σώματα. Επιπλέον, η επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού για άρδευση μπορεί, ως εναλλακτική πηγή υδροδότησης που λαμβάνει υπόψη την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας, να συμβάλει στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας παρέχοντας θρεπτικά στοιχεία για τη λίπανση των καλλιεργειών (EU, 2020).

Τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια των μικροβιολογικών (ολικά κολοβακτηρίδια, *Escherichia coli*) και φυσικοχημικών παραμέτρων (BOD_5, αιωρούμενα στερεά, θολότητα: NTU, μέταλλα, pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα: EC, χλωριόντα, νάτριο, βαθμός απορρόφησης νατρίου: SAR, κ.α.) του ανακτημένου νερού σε περίπτωση επαναχρησιμοποίησής του για περιορισμένη και απεριόριστη άρδευση καλλιεργειών καθορίζονται στα Παραρτήματα της ΚΥΑ 145116/2011, με βάση το είδος των καλλιεργειών, το σύστημα άρδευσης και την προσβασιμότητα του κοινού στην αρδευόμενη περιοχή (ΚΥΑ, 2011).

Οι ΕΕΛ, η επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού και τα εγγειοβελτιωτικά έργα υπάγονται σε περιβαλλοντική αδειοδότηση (ΚΥΑ, 2013; ΥΑ, 2016). Σύμφωνα με το Παράρτημα IV της Υπουργικής Απόφασης Αριθμ. ΔΙΠΑ/οικ. 37674/2016, η οποία είχε εκδοθεί κατ' εξουσιοδότηση του Νόμου 4014/2011 (Νόμος, 2011), οι ΕΕΛ ανήκουν στην 4η Ομάδα έργων και δραστηριοτήτων με τίτλο «Συστήματα περιβαλλοντικών υποδομών». Αναλόγως της δυναμικότητάς τους σε μονάδες ισοδύναμου πληθυσμού (ΜΙΠ) και της διάθεσης των επεξεργασμένων εκροών σε επιφανειακό υδάτινο αποδέκτη, θάλασσα, έδαφος (π.χ. για εμπλουτισμό υπόγειου υδροφορέα ή άρδευση) ή για αστική-βιομηχανική χρήση, οι ΕΕΛ κατατάσσονται στην κατηγορία έργων Α ή Β (άρθρο 1 του Ν. 4014/2011). Από την άλλη, τα διάφορα εγγειοβελτιωτικά έργα (ταμιευτήρες, επιφανειακές υδροληψίες, υδρομαστεύσεις πηγών, υδρογεωτρήσεις, αρδευτικά και στραγγιστικά έργα, έργα πρόληψης ή αντιμετώπισης της υφαλμύρινσης υπόγειων υδάτων) ανήκουν στην 2η Ομάδα έργων και δραστηριοτήτων με τίτλο «Υδραυλικά έργα» (ΥΑ, 2016).

Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασία της περιβαλλοντικής αδειοδότησης των έργων και δραστηριοτήτων της κατηγορίας Α απαιτεί αρχικά την υποβολή Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) από τον φορέα του έργου και έπειτα την έκδοση Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) από το ΥΠΕΝ (υποκατηγορία Α1) ή την οικεία Αποκεντρωμένη Διοίκηση (υποκατηγορία Α2) (Νόμος, 2011). Για τα έργα της κατηγορίας Β, που χαρακτηρίζονται από τοπικές και μη σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, δεν απαιτείται ΜΠΕ αλλά Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις (ΠΠΔ) (Νόμος, 2011).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αποτύπωση των ΕΕΛ της Ελλάδας, οι οποίες έχουν λάβει έγκριση ή εφαρμόζουν ήδη επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού για αρδευτική χρήση σύμφωνα με την περιβαλλοντική τους αδειοδότηση. Η αποτύπωση εστιάζει στον δυνητικό όγκο του παρεχόμενου ανακτημένου νερού (αρδευτική παροχή) ανά ΕΕΛ καθώς επίσης στο είδος και στην έκταση των αρδευόμενων καλλιεργειών. Τέλος, η δυνητική αρδευτική παροχή συγκρίνεται με τις εκτιμώμενες συνολικές ετήσιες απολήψεις των Οργανισμών Εγγείων Βελτιώσεων ανά ΥΔ.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Δεδομένα για τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ)

Τα στοιχεία για τις ΕΕΛ αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα astikalimata.ypeka.gr/wtp, την οποία διαχειρίζεται το Τμήμα Ελέγχου και Σχεδιασμού Επεξεργασίας Λυμάτων της Γενικής Γραμματείας Συντονισμού και Διαχείρισης Αποβλήτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Η ιστοσελίδα αυτή αποτελεί μέρος της Εθνικής Βάσης Δεδομένων Παρακολούθησης Λειτουργίας των ΕΕΛ που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ και λειτουργεί από το 2012. Η βάση τεχνικών και λειτουργικών δεδομένων παρέχει σε αρμόδιους φορείς και στο ευρύ κοινό μεταξύ άλλων τις μετρήσεις των παραμέτρων BOD_5, COD, TSS, TN και TP όπως αυτές ορίζονται στη νομοθεσία (ΚΥΑ, 1997) στην είσοδο και την έξοδο των ΕΕΛ, τις οποίες καταχωρεί ο υπεύθυνος λειτουργίας κάθε εγκατάστασης.

Συγκεκριμένα, αντλήθηκαν στοιχεία για τον προβλεπόμενο όγκο του παρεχόμενου ανακτημένου νερού (m^3/έτος) και την προβλεπόμενη έκταση (στρ.) των αρδευόμενων καλλιεργειών. Η πληροφορία για το είδος των αρδευόμενων καλλιεργειών προήλθε από τις αρχικές ή τροποποιημένες ΑΕΠΟ κάθε ΕΕΛ, όπως έχουν αναρτηθεί στην παραπάνω ιστοσελίδα σε μορφή φορητού εγγράφου (pdf).

Η αποτύπωση των ΕΕΛ που εφαρμόζουν επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων και των ορίων των Υδατικών Διαμερισμάτων της Ελλάδας σε χάρτη (**Εικόνα 1**) πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό ανοικτού κώδικα QGIS 3.34.

2.2 Δεδομένα για τις απολήψεις αρδευτικού νερού ανά Υδατικό Διαμέρισμα (ΥΔ)

Για τα ποσοστά που καταλαμβάνουν οι απολήψεις νερού για αρδευτική και υδρευτική χρήση στις συνολικές ετήσιες απολήψεις νερού ανά ΥΔ χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από το πέμπτο κεφάλαιο της 2ης Αναθεώρησης των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΣΔΛΑΠ), που εγκρίθηκαν το 2024 και αποτυπώνουν δεδομένα του 2020 (διαθέσιμα στην ιστοσελίδα: https://wfdver.ypeka.gr/el/management-plans-gr/2revision-approved-management-plans-gr/).

Στοιχεία για τις ετήσιες απολήψεις νερού από τους Τοπικούς (ΤΟΕΒ) και Γενικούς Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων (ΓΟΕΒ) ανά ΥΔ της χώρας αντλήθηκαν από το αναλυτικό κείμενο τεκμηρίωσης «Οικονομική ανάλυση των χρήσεων ύδατος και προσδιορισμός του υφιστάμενου βαθμού ανάκτησης κόστους για τις υπηρεσίες ύδατος», το οποίο συνοδεύει ως παραδοτέο τη 2η Αναθεώρηση κάθε ΣΔΛΑΠ. Εξαίρεση αποτελεί το ΥΔ της Ανατολικής Μακεδονίας (EL11) όπου το αντίστοιχο παραδοτέο δεν έχει αναρτηθεί μέχρι σήμερα στην ιστοσελίδα του ΥΠΕΝ. Τα στοιχεία των απολήψεων αφορούν το έτος βάσης 2020, όπως καταχωρήθηκαν από τους παρόχους υπηρεσιών νερού αγροτικής χρήσης (κυρίως για αρδευτική και λιγότερο για κτηνοτροφική χρήση) στο πληροφοριακό σύστημα της Γενικής Διεύθυνσης Υδάτων (ΓΔΥ) του ΥΠΕΝ ή συλλέχθηκαν από την μελετητική ομάδα σύνταξης του παραδοτέου της οικονομικής ανάλυσης κατόπιν επικοινωνίας με τους παρόχους.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Αποτύπωση των ΕΕΛ στην εθνική βάση δεδομένων του ΥΠΕΝ

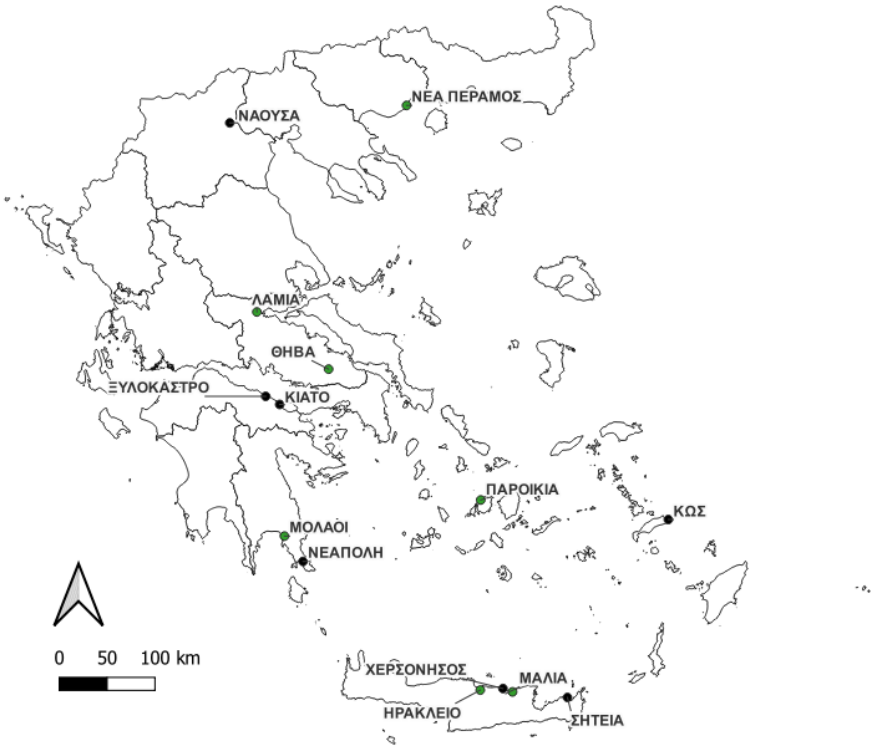
Οι φορείς που διαχειρίζονται τις ΕΕΛ περιλαμβάνουν Δημοτικές Επιχειρήσεις Ύδρευσης Αποχέτευσης (ΔΕΥΑ) όπως και Δήμους με αντίστοιχες υπηρεσίες. Από τις συνολικά 277

ΕΕΛ που υποβάλουν στοιχεία στην ιστοσελίδα της Εθνικής Βάσης δεδομένων του ΥΠΕΝ και κατανέμονται στα 14 ΥΔ της χώρας (**Πίνακας 1**), 220 βρίσκονται σε συμμόρφωση σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ, ενώ 57 εγκαταστάσεις δεν πληρούν τα κριτήρια.

Πίνακας 1. Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) ανά ΥΔ που είναι καταχωρημένες στην εθνική βάση δεδομένων του ΥΠΕΝ (στοιχεία 2024: https://astikalimata.ypeka.gr/wtp).

ΥΔ	Κωδικός ΥΔ	ΕΕΛ	Σε συμμόρφωση[1]	Σε μη συμμόρφωση[1]
Δυτικής Πελοποννήσου	EL01	10	8	2
Βόρειας Πελοποννήσου	EL02	15	13	2
Ανατολικής Πελοποννήσου	EL03	17	12	5
Δυτικής Στερεάς Ελλάδας	EL04	12	9	3
Ηπείρου	EL05	14	13	1
Αττικής	EL06	10	8	2
Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας	EL07	31	16	15
Θεσσαλίας	EL08	19	13	6
Δυτικής Μακεδονίας	EL09	18	15	3
Κεντρικής Μακεδονίας	EL10	45	35	10
Ανατολικής Μακεδονίας	EL11	15	15	0
Θράκης	EL12	12	11	1
Κρήτης	EL13	24	23	1
Νήσων Αιγαίου	EL14	35	29	6
Σύνολο		277	220	57

[1]Βάσει της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ.



Εικόνα 1. Υδατικά Διαμερίσματα και ΕΕΛ της Ελλάδας που επαναχρησιμοποιούν ανακτημένο νερό για άρδευση.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι μόνο επτά από αυτές (Νέα Πέραμος Καβάλας, Λαμία, Θήβα, Μολάοι, Παροικιά, Ηράκλειο και Μάλια) απεικονίζονται να εφαρμόζουν επαναχρησιμοποίηση λυμάτων στον ψηφιακό χάρτη της ιστοσελίδας astikalimata.ypeka.gr/wtp, εάν χρησιμοποιηθεί η αναζήτηση στο εργαλείο «Ερωτήματα → Επαναχρησιμοποίηση → Ναι». Ωστόσο, η μελέτη των ΑΕΠΟ και άλλων ΕΕΛ έδειξε ότι συνολικά δεκατέσσερεις εγκαταστάσεις (συμπεριλαμβανομένων των παραπάνω επτά) εφαρμόζουν ήδη ή σχεδιάζουν επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού για άρδευση, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα (**Πίνακας 2, Εικόνα 1**).

3.2 Αποτύπωση των ΕΕΛ με επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού για άρδευση

Οι φορείς διαχείρισης και τα κύρια χαρακτηριστικά των 14 ΕΕΛ, που εφαρμόζουν ή σχεδιάζουν επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού για άρδευση, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Σε όλες τις ΕΕΛ οι φορείς διαχείρισης είναι ΔΕΥΑ εκτός από αυτήν των Μολάων (Δήμος Μονεμβασίας). Οι περισσότερες ΕΕΛ εφαρμόζουν δευτεροβάθμια επεξεργασία λυμάτων (γνωστή και ως διεργασία ενεργού ιλύος) με απομάκρυνση αζώτου-φωσφόρου και απολύμανση της εκροής με χλωρίωση, έτσι ώστε να πληρούν τα κριτήρια και τις απαιτήσεις συμμόρφωσης που θεσπίζουν η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ και η ΚΥΑ 5673/400/1997. Τέσσερεις ΕΕΛ εφαρμόζουν τριτοβάθμια επεξεργασία με διήθηση και απολύμανση της εκροής με χλωρίωση ή υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Οι ΕΕΛ με τη μεγαλύτερη δυναμικότητα σε μονάδες ισοδύναμου πληθυσμού (ΜΙΠ) είναι του Ηρακλείου και της Λαμίας (> 100.000 ΜΙΠ). Οι όροι ΜΙΠ, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία διατυπώνονται στις Οδηγίες 91/271/ΕΟΚ (EC, 1991) και (ΕΕ) 2024/3019 (EU, 2024), όπως και στην ΚΥΑ 5673/400/1997 (ΚΥΑ, 1997).

Πίνακας 2. Φορείς διαχείρισης και βασικά χαρακτηριστικά των ΕΕΛ με επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση.

α/α	ΕΕΛ	Φορέας	ΥΔ	Επεξεργασία	Δυναμικότητα (ΜΙΠ)
1	Νέα Πέραμος Καβάλας	ΔΕΥΑ Παγγαίου	11	Δευτεροβάθμια	20.000
2	Νάουσα	ΔΕΥΑ Νάουσας	09	Δευτεροβάθμια	29.000
3	Λαμία	ΔΕΥΑ Λαμίας	07	Δευτεροβάθμια	104.200
4	Θήβα	ΔΕΥΑ Θήβας	07	Δευτεροβάθμια	40.000
5	Ξυλόκαστρο	ΔΕΥΑ Ξυλοκάστρου-Ευρωστίνης	02	Δευτεροβάθμια	17.500
6	Κιάτο	ΔΕΥΑ Σικυωνίων	02	Δευτεροβάθμιοι	23.000
7	Μολάοι	Δήμος Μονεμβασίας	03	Τριτοβάθμια	4.100
8	Νεάπολη	Δήμος Μονεμβασίας	03	Τριτοβάθμια	6.800
9	Πάρος (Παροικιά)	ΔΕΥΑ Πάρου	14	Τριτοβάθμια	25.000
10	Κως	ΔΕΥΑ Κω	14	Δευτεροβάθμια	53.383
11	Ηράκλειο	ΔΕΥΑ Ηρακλείου	13	Δευτεροβάθμια[1]	200.000
12	Χερσόνησος	ΔΕΥΑ Χερσονήσου	13	Τριτοβάθμια	40.000
13	Μάλια	ΔΕΥΑ Χερσονήσου	13	Τριτοβάθμια	26.500
14	Σητεία	ΔΕΥΑ Σητείας	13	Δευτεροβάθμια	20.000

[1] Κλάσμα της συνολικής ημερήσιας παροχής, με μέγιστο τα 6000 m^3/d, επεξεργάζεται σε τριτοβάθμιο στάδιο μέσω υπερδιήθησης.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 3, οι κυριότερες αρδευόμενες καλλιέργειες που αναφέρονται στις ΑΕΠΟ των ΕΕΛ περιλαμβάνουν ελαιόδεντρα, αμπέλια και εσπεριδοειδή, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η άρδευση αφορά αστικό και περιαστικό πράσινο (Ηράκλειο), πρανή εθνικής οδού (Μάλια) ή χώρους πρασίνου εντός των ΕΕΛ (Κως, Ηράκλειο) και αεροδρομίου (Σητεία). Λοιπές δυνητικές χρήσεις του ανακτημένου νερού που αναφέρονται στις ΑΕΠΟ, είναι ο τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα κατά τη χειμερινή περίοδο (ΕΕΛ Θήβας), η πυρόσβεση (ΕΕΛ Σητείας) και η βιομηχανική χρήση για τις ανάγκες των ΕΕΛ Κω και Ηρακλείου. Στις ΑΕΠΟ κάποιων ΕΕΛ (Ξυλόκαστρο, Κως) δεν αναφέρεται ετήσια παροχή ανακτημένου νερού ή αρδευόμενη έκταση, ενώ στις ΑΕΠΟ των ΕΕΛ Θήβας και Κιάτου δεν γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένο είδος καλλιέργειας παρά μόνο σε απεριόριστη ή περιορισμένη άρδευση, όπως αυτή ορίζεται στο άρθρο 4 της ΚΥΑ 145116/2011.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Νάουσας αναφέρεται η παροχή ανακτημένου νερού στον ΤΟΕΒ Αγροκτήματος Νάουσας κατά τη θερινή περίοδο, αποτελώντας το μοναδικό παράδειγμα δυνητικής συνεργασίας μεταξύ φορέα παροχής ανακτημένου νερού (ΔΕΥΑ) και συλλογικού φορέα παροχής υπηρεσιών άρδευσης. Τέλος, η συνολική εκτιμώμενη ετήσια παροχή ανακτημένου νερού από τις 14 ΕΕΛ του Πίνακα 3 και η συνολική αρδευόμενη έκταση ανέρχονται σε 8.199.298 m^3 και 51.837 στρέμματα, αντίστοιχα.

Πέρα από τις όποιες κοινωνικές επιφυλάξεις, η επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού για άρδευση δεν είναι πάντα οικονομικά βιώσιμη, ιδίως, όταν οι ΕΕΛ βρίσκονται σε χαμηλότερο υψόμετρο από τις καλλιέργειες, καθιστώντας υψηλό το ενεργειακό κόστος άντλησης και μεταφοράς του νερού στα ανάντη (Florides et al., 2024)

Πίνακας 3. Προβλεπόμενη ετήσια παροχή ανακτημένου νερού για άρδευση, αρδευόμενη έκταση και είδος καλλιέργειας ανά ΕΕΛ

α/α	ΕΕΛ	Αρδευτική Παροχή (m^3/έτος)	Αρδευόμενη έκταση (στρ.)	Είδος καλλιέργειας
1	Νέα Πέραμος Καβάλας	436.594	7.579	Ελιές, αμπέλια
2	Νάουσα	574.875	450	Ροδακινιές, κερασιές, αμπέλια
3	Λαμία	464.000	12.900	Δεν αναφέρεται
4	Θήβα	657.000	940	Δεν αναφέρεται (Π)[1]
5	Ξυλόκαστρο	Δεν αναφέρεται	1.700	Εσπεριδοειδή
6	Κιάτο	Δεν αναφέρεται	3.687	Δεν αναφέρεται (Α)[1]
7	Μολάοι	16.162	1.293	Ελιές, εσπεριδοειδή
8	Νεάπολη	Δεν αναφέρεται	311	Ελιές, εσπεριδοειδή
9	Πάρος (Παροικιά)	3.790	15	Άρδευση πρασίνου
10	Κως	5.500	Δεν αναφέρεται	Άρδευση ΕΕΛ και αστικού πρασίνου
11	Ηράκλειο	2.700.000	14.588	Ελιές, αμπέλια, αστικό και περιαστικό πράσινο, άρδευση ΕΕΛ
12	Χερσόνησος	2.140.000	4.000	Ελιές, καλλωπιστικά φυτά, αστικό πράσινο και παρόδια βλάστηση
13	Μάλια	1.200.000	2.484	Ελιές, καλλωπιστικά φυτά-αστικό πράσινο, πρανή εθνικής οδού
14	Σητεία	1.377	1.890	Ελιές, πρανή αεροδρομίου
Σύνολο		**8.199.298**	**51.837**	

[1] Α: απεριόριστη άρδευση χωρίς αναφορά καλλιέργειας, Π: περιορισμένη άρδευση χωρίς αναφορά καλλιέργειας

3.3 Συνολικές απολήψεις ύδατος για άρδευση και ύδρευση ανά ΥΔ

Στη 2η Αναθεώρηση των ΣΔΛΑΠ παρουσιάζονται στοιχεία για τις συνολικές εκτιμώμενες ετήσιες απολήψεις νερού ανά ΥΔ για τις εξής χρήσεις: ύδρευση, άρδευση, κτηνοτροφία και βιομηχανία (ΚΥΑ, 2014). Για λόγους σύγκρισης με τα στοιχεία της προηγούμενης και της επόμενης ενότητας, στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τόσο ο ετήσιος όγκος των απολήψεων για άρδευση όσο και τα ποσοστά των απολήψεων άρδευσης και ύδρευσης στις συνολικές απολήψεις νερού ανά ΥΔ. Οι απολήψεις νερού για κτηνοτροφική και βιομηχανική χρήση δεν αναφέρονται στον Πίνακα 4 επειδή στα περισσότερα ΥΔ αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό στην κατανομή των συνολικών απολήψεων.

Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι σε κάποια ΥΔ οι ανάγκες ανά χρήση ύδατος καλύπτονται από απολήψεις που ανήκουν σε γειτονικά ΥΔ. Για παράδειγμα, το μεγαλύτερο τμήμα των υδρευτικών και βιομηχανικών αναγκών του ΥΔ της Αττικής (EL06) καλύπτεται από απολήψεις που πραγματοποιούνται στο ΥΔ της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04), δηλαδή στα φράγματα του Μόρνου και του Εύηνου ποταμού, ενώ μέρος των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών του ΥΔ Θεσσαλίας (EL08) καλύπτεται από την Τεχνητή Λίμνη του Ταυρωπού (EL04). Επομένως, στον Πίνακα 4 αναγράφονται μόνο οι απολήψεις που πραγματοποιούνται εντός κάθε ΥΔ.

Η σημασία των απολήψεων νερού από επιφανειακά και υπόγεια υδατικά συστήματα που πραγματοποιούνται για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών στην ελληνική επικράτεια επιβεβαιώνεται από τα στοιχεία του Πίνακα 4. Τα ποσοστά της άρδευσης δείχνουν ότι σχεδόν σε όλα τα ΥΔ της χώρας, με εξαίρεση αυτό των Νήσων Αιγαίου (EL14), η γεωργία αποτελεί τον μεγαλύτερο χρήστη νερού ακολουθούμενη από την ύδρευση, όπως αναφέρουν και άλλοι ερευνητές (Kourgialas, 2021; Tzanakakis et al., 2020; Δέρκας et al., 2021).

Πίνακας 4. Ποσοστά των ετήσιων απολήψεων νερού για άρδευση και ύδρευση ανά ΥΔ σύμφωνα με τη 2η Αναθεώρηση των ΣΔΛΑΠ.

ΥΔ	Απολήψεις άρδευσης (m^3/y)	Άρδευση (%)	Ύδρευση(%)
Δυτικής Πελοποννήσου (EL01)	172.265.105	74,6	15,3
Βόρειας Πελοποννήσου(EL02)	370.916.058	76,6	19,4
Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03)	352.849.885	87,5	8,7
Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04)	501.388.650	93,6	5,3
Ηπείρου (EL05)	295.800.000	78,8	16,6
Αττικής (EL06)	65.398.752	60,9	27,7
Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07)	787.024.488	89,8	5,41
Θεσσαλίας (EL08)	1.170.200.000	92,1	6,6
Δυτικής Μακεδονίας (EL09)	736.463.272	71,9	14,1
Κεντρικής Μακεδονίας (EL10)	774.775.619	72,5	19,9
Ανατολικής Μακεδονίας (EL11)	762.665.473	93,5	4,2
Θράκης (EL12)	660.879.174	91,4	5,9
Κρήτης (EL13)	285.212.335	73,3	22,5
Νήσων Αιγαίου (EL14)	56.810.000	40,6	54,2
Σύνολο	**6.992.648.811**		

3.4 Ετήσιες απολήψεις αρδευτικού νερού από ΟΕΒ ανά ΥΔ

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται ανά ΥΔ οι εκτιμώμενες απολήψεις νερού από συλλογικούς φορείς παροχής υπηρεσιών νερού αγροτικής χρήσης (ΟΕΒ) προς τελικούς χρήστες (αρδευτές) πλην Δήμων και ΔΕΥΑ. Σημειώνεται ότι στο ΥΔ της Αττικής (EL06) δεν υπάρχουν ΟΕΒ, ενώ για το ΥΔ της Ανατολικής Μακεδονίας (EL11) δεν παρουσιάζονται στοιχεία καθώς δεν έχει αναρτηθεί ακόμα το αναλυτικό κείμενο τεκμηρίωσης του αντίστοιχου ΣΔΛΑΠ. Επίσης, στις ποσότητες νερού του Πίνακα 5, που αφορούν στοιχεία του 2020, περιλαμβάνονται και οι απώλειες του αρδευτικού δικτύου. Συνεπώς, το άθροισμα της εξουσιοδοτημένης κατανάλωσης (τιμολογούμενο νερό) και των απωλειών του δικτύου ανά ΥΔ ισούται με τις συνολικές απολήψεις νερού. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε αρκετά ΥΔ μεγάλο ποσοστό των αρδευτικών απολήψεων λαμβάνεται από ιδιωτικές γεωτρήσεις (π.χ. 84% στο ΥΔ EL07), πληροφορία η οποία αναφέρεται σε κάθε ΣΔΛΑΠ. Στον Πίνακα 5 δεν περιλαμβάνονται οι απολήψεις από εκείνους τους ΓΟΕΒ οι οποίοι διανέμουν νερό στους οικείους ΤΟΕΒ και επομένως δεν τιμολογούν νερό στους τελικούς χρήστες.

Πίνακας 5. Ετήσιες απολήψεις νερού από Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων (ΟΕΒ) ανά ΥΔ σύμφωνα με τη 2η Αναθεώρηση των ΣΔΛΑΠ

ΥΔ	Συνολική απόληψη (m^3/y)	Πάροχοι
Δυτικής Πελοποννήσου (EL01)[1]	99.637.180	11
Βόρειας Πελοποννήσου (EL02)[1]	178.465.370	48
Ανατολικής Πελοποννήσου (EL03)	78.235.450	32
Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04)	250.585.648	29
Ηπείρου (EL05)	154.687.401	34
Αττικής (EL06)	-	-
Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07)	287.497.843	17
Θεσσαλίας (EL08)[1]	433.527.123	57
Δυτικής Μακεδονίας (EL09)[2]	104.899.000	16
Κεντρικής Μακεδονίας (EL10)	572.446.735	31
Ανατολικής Μακεδονίας (EL11)	-	-
Θράκης (EL12)	287.258.545	23
Κρήτης (EL13)	60.358.859	39
Νήσων Αιγαίου (EL14)	2.489.970	5
Σύνολο	**2.510.089.124**	**342**

1Περιλαμβάνονται οι απολήψεις των ΓΟΕΒ Παμίσου (EL01), Αρδευτικού Οργανισμού Στυμφαλίας Ασωπού Κορινθίας (EL02) και ΓΟΕΒ Στραγγιστικών Έργων Θεσσαλίας (EL08), οι οποίοι δεν παρέχουν νερό σε ΤΟΕΒ αλλά μόνο σε μεμονωμένους αρδευτές.

2Τα στοιχεία για το ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας βασίζονται σε 16 ΤΟΕΒ, καθώς οι υπόλοιποι δεν διέθεσαν επαρκή στοιχεία στους συντάκτες του ΣΔΛΑΠ.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν το πολύ μικρό ποσοστό (5%) των 277 ΕΕΛ της χώρας που αξιοποιούν ήδη ή σχεδιάζουν μελλοντικά να αξιοποιήσουν ανακτημένο νερό για περιορισμένη ή απεριόριστη άρδευση καλλιεργειών, όπως και την πολύ μικρή συνολική παροχή (m3) ανακτημένου νερού συγκριτικά με τις ετήσιες απολήψεις των ΟΕΒ όπως αυτές εκτιμώνται στη 2η Αναθεώρηση των ΣΔΛΑΠ. Για την υλοποίηση και επέκταση της επαναχρησιμοποίησης σε περισσότερες περιοχές της χώρας απαιτούνται επενδύσεις σε υποδομές (π.χ. ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δεξαμενές αποθήκευσης και δίκτυα μεταφοράς του ανακτημένου νερού προς τις αρδευόμενες εκτάσεις) που θα την καθιστούν οικονομικά βιώσιμη για τους φορείς παροχής και τους τελικούς χρήστες του νερού.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

EC. 1991. European Community, Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment (amended by the Commission Directive 98/15/EC of 27 February 1998). Official Journal L 135, 30.5.1991.

EC. 2000. European Community, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal L 327, 22.12.2000.

EU. 2024. European Union, Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast) (Text with EEA relevance). Official Journal L, 2024/3019, 12.12.2024.

EU. 2020. European Union, Regulation (EU) 2020/741 of the European Parlament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse (Text with EEA relevance). Official Journal L 177, 5.6.2020.

Florides, F., Giannakoudi, M., Ioannou, G., Lazaridou, D., Lamprinidou, E., Loukoutos, N., Spyridou, M., Tosounidis, E., Xanthopoulou, M., Katsoyiannis, I.A. 2024. Water reuse: A comprehensive review. Environments, 11(4), 81.

Kourgialas, N.N. 2021. A critical review of water resources in Greece: The key role of agricultural adaptation to climate-water effects. Science of The Total Environment, 775, 145857.

Tzanakakis, V., Angelakis, A., Paranychianakis, N., Dialynas, Y., Tchobanoglous, G. 2020. Challenges and opportunities for sustainable management of water resources in the island of Crete, Greece. Water, 12(6), 1538.

Δέρκας, Ν., Σκούρας, Δ., Ψαλτόπουλος, Δ. 2021. Οι αναγκαίες μεταρρυθμίσεις του θεσμικού, οργανωτικού και λειτουργικού πλαισίου των συλλογικών δικτύων άρδευσης στην Ελλάδα. ΔιαΝΕΟσις, Οργανισμός Έρευνας & Ανάλυσης, Ιούνιος 2021.

ΚΥΑ. 2013. Κοινή Υπουργική Απόφαση Αριθ. οικ. 191002/2013, Τροποποίηση της υπ' αριθ. 145116/2011 κοινής υπουργικής απόφασης «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (Β΄ 354) και συναφείς διατάξεις». (ΦΕΚ Β' 2220).

ΚΥΑ. 1997. Κοινή Υπουργική Απόφαση 5673/400/14-3-1997 «Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών Λυμάτων» όπως τροποποιήθηκε με την 19661/1999 (ΦΕΚ 1811/29-9-1999) απόφαση. (ΦΕΚ 192/Β/1997).

ΚΥΑ. 2011. Κοινή Υπουργική Απόφαση 145116, 2011. «Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ Β' 354).

ΚΥΑ. 2014. Κοινή Υπουργική Απόφαση 146896, 2014. «Κατηγορίες αδειών χρήσης και εκτέλεσης έργων αξιοποίησης των υδάτων. Διαδικασία και όροι έκδοσης των αδειών, περιεχόμενο και διάρκεια ισχύος τους και άλλες συναφείς διατάξεις». (ΦΕΚ Β΄2878).

Νόμος. 2011. Νόμος 4014, 2011. «Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, ρύθμιση αυθαιρέτων σε συνάρτηση με δημιουργία περιβαλλοντικού ισοζυγίου και άλλες διατάξεις Υπουργείου Περιβάλλοντος» (ΦΕΚ Α΄209).

ΥΑ. 2016. Υπουργική Απόφαση Αριθμ. ΔΙΠΑ/οικ. 37674, Τροποποίηση και κωδικοποίηση της υπουργικής απόφασης 1958/2012 - Κατάταξη δημοσίων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες και υποκατηγορίες σύμφωνα με το άρθρο 1 παράγραφος 4 του Ν. 4014/21.9.2011 (ΦΕΚ 209/Α/2011) όπως αυτή έχει τροποποιηθεί και ισχύει. ΦΕΚ Β' 2471.

37. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Θεοτοκάτος Νικόλαος[1], Λόντρα Παρασκευή[1], Ευστρατιάδης Ανδρέας[2]

[1] Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Περιβάλλοντος και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, Ελλάδα theotokatosnick@aua.gr, v.londra@aua.gr,
[2] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Ηρ. Πολυτεχν. 5, 15773 Αθήνα,, andreas@itia.ntua.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνάται το πλέγμα νερού και ενέργειας σε αμπελώνες, όπου εφαρμόζονται καινοτόμες πρακτικές τόσο για τη διαχείριση του νερού μέσω συστημάτων συλλογής και αξιοποίησης του βρόχινου νερού, όσο και για την αξιοποίηση του ηλιακού δυναμικού με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ για την παραγωγή πράσινης ενέργειας. Η έρευνα επικεντρώνεται στη Νεμέα Κορινθίας και τη Νέα Αγχίαλο Μαγνησίας. Για τη διερεύνηση του μεγέθους των δεξαμενών συλλογής όμβριων υδάτων για αρδευτική χρήση στην καλλιέργεια αμπέλου, εφαρμόστηκε ένα μοντέλο ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου, χρησιμοποιώντας ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής για 20 υδρολογικά έτη (2001-2021). Επιπλέον, στα αγροτεμάχια μελέτης, εξετάστηκε η χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ ως επιφάνεια συλλογής ομβρίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση του συστήματος συλλογής όμβριων υδάτων με επιφάνεια συλλογής ίση με 500 m^2 για εκτάσεις καλλιεργειών από 0.5 έως 10 στρέμματα και με χρήση ομβροδεξαμενών από 10 έως 250 m^3, μπορεί να εξασφαλίσει ποσοστά κάλυψης της ζήτησης από 60% έως 95%. Η παραγωγή πράσινης ενέργειας μέσω των πάνελ κυμάνθηκε από 149 έως 156 MWh ανά έτος.

Λέξεις κλειδιά: συλλογή ομβρίων, μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, φωτοβολταϊκά πάνελ, πράσινη ενέργεια

OPTIMIZATION OF WATER AND ENERGY FOOTPRINT IN VINEYARDS USING INNOVATIVE TECHNOLOGIES

N. Theotokatos✉[1], P. Londra[1], A. Efstratiadis[2]

[1]Agricultural University of Athens, Dept. of NRD-AE, 75 Iera Odos, 11855 Athens, [2]Nat. Technical University of Athens, School of Civil Engineering, 5 Iroon Polytechniou, 15773 Athens, ✉theotokatosnick@aua.gr

ABSTRACT

This study explores the water–energy nexus in vineyards, where innovative practices are applied for water management through rainwater harvesting and solar energy utilization, via the installation of photovoltaic panels for green energy production. The research focuses on two regions in Greece: Nemea and Nea Anchialos. To investigate the required size of rainwater harvesting tanks for irrigation use in vineyards, a daily water balance model was implemented, using daily precipitation and evapotranspiration data over a 20-year hydrological period (2001–2021). Additionally, the use of photovoltaic panels as a rainwater collection area was examined. The results showed that the use of a rainwater harvesting system with a rainwater collection area of 500 m^2, for cultivated areas of 0.5 to 10 stremmata, and with rainwater tanks ranging from 10 to 250 m^3, can cover between 60% and 95% of the water demand. The production of green energy through photovoltaic panels ranged from 149 to 156 MWh per year.

Key words: rainwater harvesting, water balance model, photovoltaics, green energy

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό και η ενέργεια αποτελούν δύο από τους κρίσιμους πόρους στη σύγχρονη γεωργία, με τη διαχείριση και τη διαθεσιμότητά τους να επηρεάζουν άμεσα την παραγωγικότητα και τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών. Στο μεσογειακό κλίμα, όπου η βροχόπτωση παρουσιάζει έντονη εποχικότητα και οι ξηρές περίοδοι είναι συχνές και παρατεταμένες, η εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων νερού για άρδευση αποτελεί διαρκή πρόκληση.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων έχει οδηγήσει σε αισθητή πτώση του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα με αποτέλεσμα την υφαλμύρινση των υπόγειων υδάτων και κατά συνέπεια την αλάτωση των εδαφών, απειλώντας τη βιωσιμότητα της αγροτικής παραγωγής σε βάθος χρόνου (European Environment Agency, 2019). Στην Ελλάδα, όπου η γεωργία ευθύνεται για περίπου το 85% των συνολικών υδατικών εκμεταλλεύσεων, τα προβλήματα αυτά είναι ιδιαίτερα έντονα. Η κατάσταση επιδεινώνεται από την εφαρμογή αναποτελεσματικών πρακτικών άρδευσης και την αυξανόμενη μεταβλητότητα του κλίματος.

Παράλληλα, η χώρα βρίσκεται σε φάση ενεργειακής μετάβασης, καθώς περιορίζει σταδιακά την εξάρτησή της από τον λιγνίτη και στρέφεται προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μετάβαση αυτή προσθέτει νέα επίπεδα πολυπλοκότητας στη διαχείριση των πόρων στον γεωργικό τομέα (Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2023).

Η καλλιέργεια της αμπέλου, ένας από τους ιστορικά και οικονομικά σημαντικότερους κλάδους της ελληνικής γεωργίας, είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στις παραπάνω προκλήσεις. Οι αμπελώνες απαιτούν ακριβή και αποδοτική διαχείριση του νερού, καθώς η ποιότητα και η ποσότητα της παραγωγής σταφυλιών επηρεάζονται άμεσα από την υδατική επάρκεια. Η υπερβολική εξάρτηση από την άρδευση με υπόγειους υδάτινους πόρους είναι περιβαλλοντικά μη βιώσιμη και οικονομικά ασύμφορη, λόγω του υψηλού ενεργειακού κόστους που απαιτείται για άντληση και διανομή. Αυτό το ενεργειακό κόστος επιβαρύνει σημαντικά τη συνολική παραγωγική διαδικασία μειώνοντας την κερδοφορία των εκμεταλλεύσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, η ανάγκη για ολοκληρωμένες και έξυπνες λύσεις που να βελτιστοποιούν ταυτόχρονα τη χρήση νερού και ενέργειας είναι επιτακτική. Μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση είναι ο συνδυασμός συστημάτων συλλογής όμβριων υδάτων με τεχνολογίες φωτοβολταϊκής ενέργειας. Τα συστήματα ομβροσυλλογής επιτρέπουν τη συλλογή και αποθήκευση βρόχινου νερού, μειώνοντας την εξάρτηση από υπόγειες πηγές και ενισχύοντας την αυτάρκεια των καλλιεργειών (Mitchell et al., 2008). Όταν συνδυάζονται με φωτοβολταϊκά πάνελ, δημιουργούνται υβριδικά συστήματα που προσφέρουν διπλή ωφέλεια: παραγωγή καθαρής ενέργειας και αύξηση της επιφάνειας συλλογής του βρόχινου νερού (Barron–Gafford et al., 2019)

Οι τεχνολογίες αυτές εναρμονίζονται πλήρως με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, η οποία προωθεί μια γεωργία ανθεκτική στην κλιματική αλλαγή , μέσα από την αποδοτική χρήση φυσικών πόρων και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (European Commission, 2020).

Πλήθος μελετών έχει αναδείξει τα οφέλη της εφαρμογής των συστημάτων συλλογής όμβριων υδάτων και φωτοβολταϊκών στον αγροτικό χώρο. Οι Mitchell et al. (2008) απέδειξαν ότι κατάλληλα σχεδιασμένες υποδομές αποθήκευσης μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά τη διαθεσιμότητα νερού για άρδευση. Αντίστοιχα, οι Barron–Gafford et al. (2019), στο πλαίσιο της μελέτης των αγροβολταϊκων (agrivoltaics), έδειξαν ότι οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών όχι μόνο παρέχουν ενεργειακή αυτάρκεια, αλλά μειώνουν και τις απώλειες νερού λόγω εξάτμισης, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των συστημάτων συλλογής.

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη βελτιστοποίηση του υδατικού και ενεργειακού αποτυπώματος στην ελληνική αμπελοκαλλιέργεια μέσω της εφαρμογής συστημάτων συλλογής όμβριων υδάτων και φωτοβολταϊκών. Με βάση ιστορικές χρονοσειρές δεδομένων και την ανάπτυξη μοντέλου ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου, αξιολογείται η αποδοτικότητα των συστημάτων αυτών σε δύο περιοχές με έντονο αμπελουργικό ενδιαφέρον, τη Νεμέα (Κορινθία) και τη Νέα Αγχίαλο (Μαγνησία). Στόχος της μελέτης είναι να διερευνηθεί ο βαθμός κάλυψης των αρδευτικών αναγκών μέσω ομβροσυλλογής, να εκτιμηθεί το ενεργειακό δυναμικό των φωτοβολταϊκών συστημάτων και να προταθούν βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης των αμπελώνων. Τα αποτελέσματα αναμένεται να συμβάλουν στον ευρύτερο διάλογο για την «έξυπνη γεωργία» και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, προσφέροντας χρήσιμες κατευθύνσεις σε παραγωγούς, ερευνητές και φορείς πολιτικής.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιοχή Μελέτης

Η παρούσα μελέτη εστιάζει σε δύο περιοχές έντονου οινολογικού ενδιαφέροντος: τη Νεμέα (Π.Ε. Κορινθίας) και τη Νέα Αγχίαλο (Π.Ε. Μαγνησίας). Οι δύο περιοχές επιλέχθηκαν λόγω της σημαντικής αμπελουργικής τους δραστηριότητας και των διαφορών τους σε κλιματικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά, που επιτρέπουν συγκριτική αξιολόγηση των προτεινόμενων τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, στην περιοχή της Κορινθίας καλλιεργούνται περίπου 45.500 στρέμματα με την περιοχή της Νεμέας να αποτελεί τη μεγαλύτερη αμπελουργική ζώνη στην Ελλάδα, τόσο σε έκταση καλλιεργούμενων αμπελώνων και ετήσια παραγωγή κρασιού (220.000 HL), όσο και σε αριθμό οινοποιείων (40) (ΕΝΟΑΠ, 2015). Όσον αφορά στην περιοχή της Μαγνησίας η καλλιέργεια της αμπέλου δεν είναι τόσο έντονη όσο στην περιοχή της Κορινθίας, με συνολικά καλλιεργούμενα στρέμματα αμπελιού να μην ξεπερνούν τα 20.000, όμως στην περιοχή της Νέας Αγχιάλου στεγάζεται ένας από τους παλαιότερους αμπελουργικούς συνεταιρισμούς στην Ελλάδα, ο συνεταιρισμός «Δήμητρα», ο οποίος λειτουργεί από το 1811 και προμηθεύει την αγορά με γνωστές μάρκες κρασιών και αποσταγμάτων.

2.2 Κλιματολογικά και Βροχομετρικά δεδομένα

Το Ελληνικό κλίμα είναι τυπικά Μεσογειακό. Αυτό σημαίνει ότι η ψυχρή και βροχερή περίοδος διαρκεί από τα μέσα Οκτωβρίου έως το τέλος του Μαρτίου και η ζεστή και άνομβρη περίοδος από τέλη Απριλίου έως τον Σεπτέμβριο. Περεταίρω, λόγω της επίδρασης της τοπογραφίας σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας εντοπίζονται διαφορές στο κλίμα της κάθε περιοχής με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ποικιλία κλιματολογικών συνθηκών. Για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, επιλέχθηκαν δύο αντιπροσωπευτικοί βροχομετρικοί σταθμοί, ένας από κάθε μία από τις περιοχές μελέτης όπου μελετάται η εγκατάσταση δεξαμενών συλλογής όμβριων υδάτων και φωτοβολταϊκών πάνελ, με βάση τη διαθεσιμότητα πλήρων χρονοσειρών ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης.

Τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση του όγκου των ομβροδεξαμενών αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων των εγκατεστημένων μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και αφορούν στη χρονική περίοδο από το 2001 έως το 2021. Αυτή η περίοδος υπερβαίνει την ελάχιστη διάρκεια καταγραφής βροχόπτωσης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μεγέθους των δεξαμενών συλλογής ομβρίων, δηλαδή τα 10 έτη, όπως συνιστούν οι Mitchell et al. (2008).

2.3 Μοντέλο Ημερήσιου Υδατικού Ισοζυγίου

Η εξίσωση του μοντέλου ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό του μεγέθους της ομβροδεξαμενής είναι (Londra et al., 2021):

$$S_t = S_{t-1} + R_t - D_t - E_t, \quad 0 \le S_{t-1} \le V_{\text{tank}} \quad (1)$$

Όπου: S_t είναι ο αποθηκευμένος όγκος νερού στην δεξαμενή στο τέλος της t ημέρας (m^3), S_{t-1} ο αποθηκευμένος όγκος νερού στο ξεκίνημα της t ημέρας (m^3), D_t η ημερήσια ανάγκη σε νερό (m^3), E_t η ημερήσια εξάτμιση του νερού ομβροδεξαμενής (m^3), V_{tank} η χωρητικότητα της ομβροδεξαμενής (m^3).

Στο μοντέλο ημερήσιου υδατικού ισοζυγίου χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου, οι ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης, η επιφάνεια των φωτοβολταϊκων πάνελ ως επιφάνεια συλλογής, ο συντελεστής απορροής, ο όγκος της ομβροδεξαμενής και οι υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας. Η εξάτμιση θεωρείται αμελητέα, καθώς μελετώνται δεξαμενές κλειστού τύπου.

2.3.1 Όγκος ομβροσυλλογής (R_t)

Η ημερήσια ποσότητα νερού που συλλέγεται από την επιφάνεια των πάνελ υπολογίζεται ως εξής:

$$R_t = C \cdot A_p \cdot P_t \quad (2)$$

Όπου: C ο συντελεστής απορροής, A_ρ η επιφάνεια των πάνελ ως επιφάνεια συλλογής (m^2), και P_t η ημερήσια βροχόπτωση στο τέλος της ημέρας t (m).

2.3.2 Ημερήσιες Υδατικές Ανάγκες (D_t)

Ο υπολογισμός των ημερήσιων αρδευτικών αναγκών D_t πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την εξίσωση:

$$D_t = \left(ET_{c,t} - P_{ef,t}\right)/n = \left(K_c \cdot ET_{o,t} - P_{ef}\right)/n \quad (3)$$

Όπου ET_c είναι η ημερήσια εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας την t ημέρα (mm), K_c ο φυτικός συντελεστής για οινοποιήσιμη καλλιέργεια αμπέλου σύμφωνα με το μοντέλο Penman-Monteith, $ET_{o,t}$ η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς η οποία υπολογίστηκε με το μοντέλο εξατμισοδιαπνοής Penman-Monteith χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού την t ημέρα, $P_{ef,t}$ η ενεργός βροχόπτωση, δηλαδή η ποσότητα της βροχής που θα διηθηθεί στο έδαφος, χάνοντας ένα ποσοστό της ποσότητάς της (20%), και n ο βαθμός απόδοσης του συστήματος άρδευσης. Θεωρώντας ότι το πότισμα γίνεται με στάγδην άρδευση με βαθμό απόδοσης 0.9, οι μέσες ετήσιες αρδευτικές ανάγκες της καλλιέργειας υπολογίστηκαν σε 350 m^3/στρέμμα για την περιοχή της Αγχιάλου και 250 m^3/στρέμμα για την περιοχή της Νεμέας.

2.3.3 Προσδιορισμός όγκου ομβροδεξαμενής

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω εξισώσεις, την ποσότητα του νερού που συλλέγεται από τις επιφάνειες των πάνελ και τις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας της αμπέλου, η ημερήσια ποσότητα νερού στην ομβροδεξαμενή υπολογίζεται ως:

$$\text{if } S_t \succ V_{\text{tank}} \text{ then } V_{\text{tank}}, \text{ if } S_t \prec 0 \text{ then } 0 \text{ esle } S_t = S_{\text{tank},t} \quad (4)$$

Όπου: $S_{\text{tank},t}$ είναι ο διαθέσιμος όγκος νερού εντός της ομβροδεξαμενής την t ημέρα.
‘Οταν η ομβροδεξαμενή δέχεται μεγαλύτερο όγκο νερού από τη χωρητικότητά της, η ποσότητα νερού υπερχείλισης O_t από την ομβροδεξαμενή μπορεί να υπολογισθεί ως:

$$\text{if } S_t \succ V_{\text{tank}} \text{ then } O_t = S_t - V_{\text{tank}} \text{ esle } O_t = 0 \quad (5)$$

Ο υπολογισμός του όγκου υπερχείλισης πραγματοποιείται εφόσον έχουν καλυφθεί οι απαιτήσεις σε νερό.

Στην περίπτωση που ο αποθηκευμένος όγκος βρόχινου νερού στην ομβροδεξαμενή τη t ημέρα $S_{tank,t}$ δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση D_t, τότε η ζήτηση θα καλυφθεί από κάποια άλλη πηγή νερού (T_t), όπως γεώτρηση ή τοπικό δίκτυο άρδευσης και μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$\text{if } S_{\text{tank},t} \prec D_t \text{ then } T_t = D_t - S_{\text{tank},t} \text{ esle } T_t = 0 \quad (6)$$

Στη παρούσα μελέτη, έχει θεωρηθεί ότι η ομβροδεξαμενή είναι αρχικά άδεια και η επιφάνεια συλλογής ομβρίων είναι 500 m^2.

2.3.4 Συντελεστής αξιοπιστίας του συστήματος ομβροδεξαμενής

Ο συντελεστής αξιοπιστίας (Re) χρησιμεύει ως μία ένδειξη απόδοσης μιας δεξαμενής συλλογής όμβριων υδάτων στην κάλυψη ενός συγκεκριμένου επιπέδου ζήτησης. Αυτός ο συντελεστής υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της δεξαμενής στην παροχή επαρκούς ποσότητας νερού για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της καλλιέργειας αμπέλου και ορίζεται ως (Londra et al., 2021):

$$\text{Re} = \left(N_f / N_{tot}\right) \cdot 100\% \quad (7)$$

Όπου N_f ο αριθμός των ημερών που η ζήτηση καλύφθηκε αποκλειστικά με νερό της ομβροδεξαμενής και N_{tot} οι συνολικές μέρες.

2.4 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που εγκαθίστανται σε αμπελώνες μπορούν να επιτελέσουν διπλή λειτουργία, συνδυάζοντας την παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη συλλογή, μέσω της επιφανείας τους, όμβριων υδάτων για άρδευση. Συγκεκριμένα, για το σκοπό της μελέτης χρησιμοποιούνται πάνελ 400W για μεγιστοποίηση της απόδοσης. Αυτά τα πάνελ είναι στρατηγικά τοποθετημένα για να κατευθύνουν το νερό της βροχής σε δεξαμενή αποθήκευσης η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για άρδευση. Κάθε πάνελ εκτείνεται σε περίπου 2 m^2. Επιπλέον, η κλίση των πάνελ βελτιστοποιείται για να ενισχύσει τόσο την παραγωγή ενέργειας όσο και τη συλλογή του νερού διασφαλίζοντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων.

Σύμφωνα με τον Νόμο 5106/2024, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε γεωργικές εκτάσεις πρέπει να συμμορφώνονται με αυστηρούς κανονισμούς. Οι αγρότες μπορούν να εγκαταστήσουν συστήματα έως 1 MW, υπό την προϋπόθεση ότι αυτό δεν καλύπτει περισσότερο από το 0,8% της καλλιεργήσιμης γης ανά Περιφερειακή Ενότητα. Οι εγκαταστάσεις κάτω από 1 MW εξαιρούνται από την υποχρέωση λεπτομερών περιβαλλοντικών αδειών, υπό την προϋπόθεση απόκτησης «Πιστοποιητικού Εξαίρεσης από την Περιβαλλοντική Έγκριση» (Solarway, 2025). Τέτοιου είδους κανονισμοί διευκολύνουν τη βιώσιμη ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών στις γεωργικές πρακτικές. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η μέση ετήσια μετρημένη ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκών πάρκων στις περιοχές μελέτης σε kWh ανά εγκατεστημένη ισχύ kWp. Οι τιμές προέρχονται από δεδομένα φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων μέσης κλίμακας (10–100 kWp) (Vokas and Lagogiannis, 2013).

Πίνακας 1. Μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκών πάρκων ανά περιοχή μελέτης.

Περιοχή	Μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση (kWh/kWp)
Νεμέα (Κορινθίας)	1560
Νέα Αγχίαλος (Μαγνησίας)	1490

2.4.1 Εκτίμηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Σύμφωνα με τους κανονισμούς για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε γεωργικές εκτάσεις, η μέγιστη επιτρεπόμενη εγκατεστημένη ισχύς για ηλιακούς συλλέκτες είναι συνήθως 1MW. Αυτός ο κανονισμός διασφαλίζει ότι τα συστήματα παραγωγής ηλιακής ενέργειας δεν επηρεάζουν την παραγωγή καλλιεργειών, επιτρέποντας παράλληλα τη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας σε συνδυασμό με την γεωργία. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές προδιαγραφές των πάνελ, αλλά και των κανονισμών, σε περίπου 5 στρέμματα εγκατάστασης μπορούν να τοποθετηθούν περίπου 2500 πάνελ φτάνοντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ του κανονισμού.

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ σε έκταση 500 m^2, με σκοπό την αξιολόγηση της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα, το οποίο προτείνεται να εγκατασταθεί πλησίον του αμπελώνα. Η εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας βασίζεται στην εγκατεστημένη ισχύ των πάνελ και στη διαθέσιμη επιφάνεια τοποθέτησης. Κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ έχει επιφάνεια 2 m^2 και ονομαστική ισχύ 400 W (0,4 kW). Συνεπώς, στην επιφάνεια των 500 m^2 μπορούν να τοποθετηθούν 250 πάνελ.

Άρα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος υπολογίζεται σε $250\ \text{πάνελ} \cdot 0.4\ \text{kW} = 100\ \text{kWp}$.

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας στις περιοχές μελέτης εκτιμάται, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές της μέσης ετήσιας ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών του Πίνακα 1. Για σύστημα 100 kWp, η εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή υπολογίζεται σε $100\ \text{kWp} \cdot 1490\ \text{kWh/kWp} = 149000\ \text{kWh} = 149\ \text{MWh}$ για την περιοχή της Αγχιάλου και αντίστοιχα 156 MWh για την περιοχή της Νεμέας.

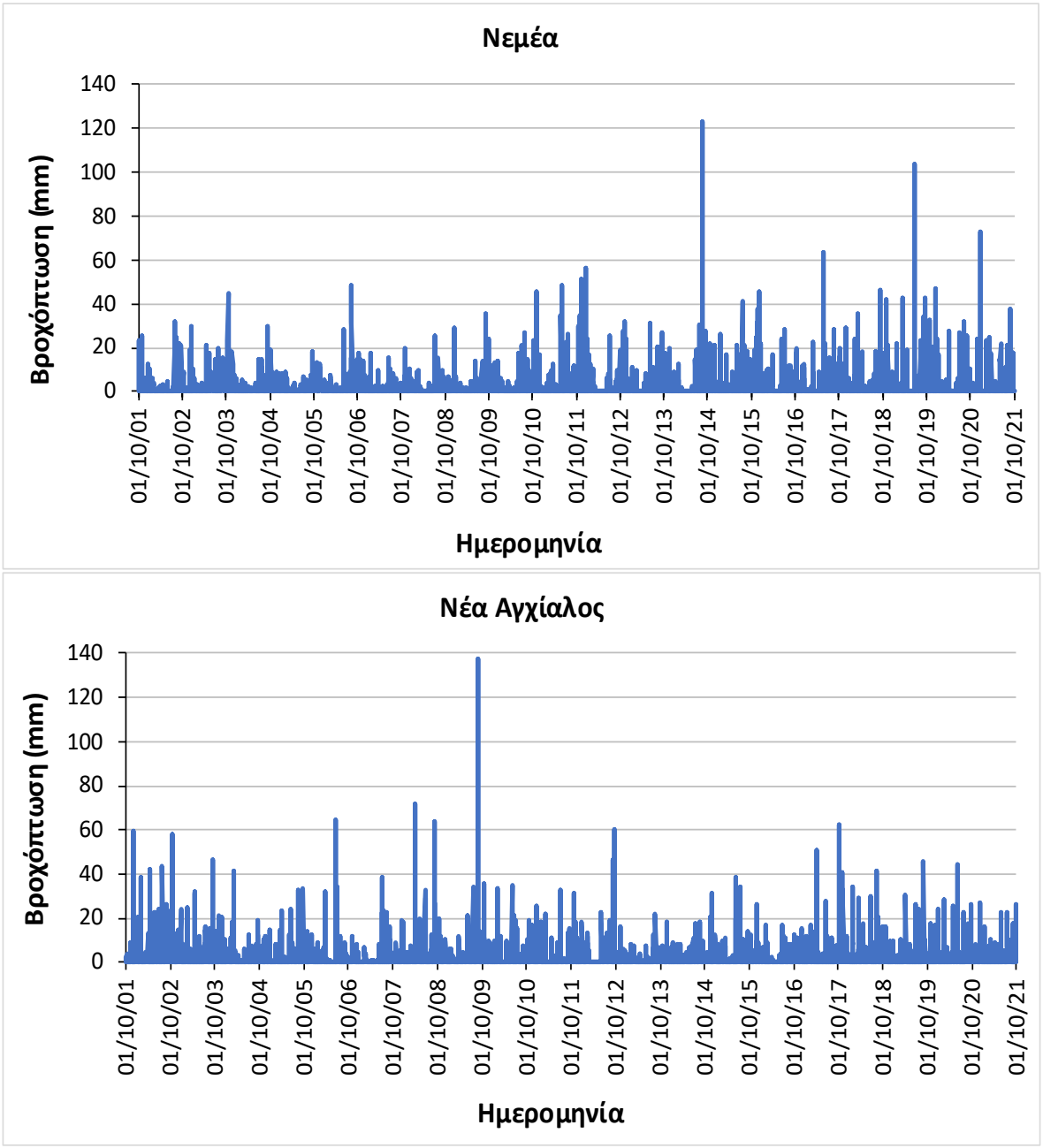
Η παραγόμενη αυτή ενέργεια μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος των ενεργειακών αναγκών του αμπελώνα ή να διοχετευθεί στο δίκτυο, συμβάλλοντας τόσο στη μείωση του ενεργειακού κόστους όσο και στην αύξηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας της εγκατάστασης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης (Σχήμα 1) για τους δύο μετεωρολογικούς σταθμούς υπολογίστηκαν η μέση ετήσια βροχόπτωση (P), η μέγιστη (Ndd,max), η ελάχιστη (Ndd,min) και η μέση (Ndd) διάρκεια των μέγιστων ετήσιων άνομβρων περιόδων, όπως αποτυπώνονται στον Πίνακα 2. Οι δύο σταθμοί εμφανίζουν διαφορά στη μέση ετήσια βροχόπτωση. Ωστόσο, η διάρκεια των άνομβρων περιόδων τους παραμένει παρόμοια, κυμαινόμενη από περίπου 2,5 έως 3 συνεχόμενους μήνες. Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός "Νεμέα" καταγράφει μέση ετήσια βροχόπτωση P = 637 mm και μέση μέγιστη άνομβρη περίοδο 45,2 ημέρες, ενώ ο σταθμός "Νέα Αγχίαλος" παρουσιάζει χαμηλότερη μέση ετήσια βροχόπτωση P = 485,5 mm, συνοδευόμενη από μια ελαφρώς μεγαλύτερη μέση μέγιστη άνομβρη περίοδο 52,1 ημερών.

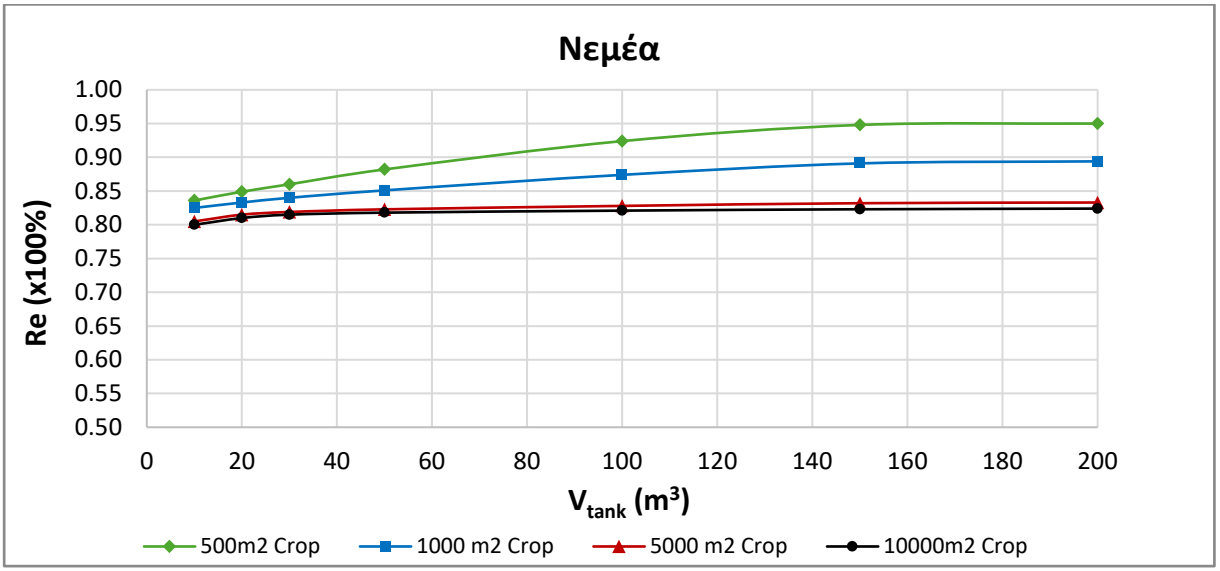
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών σταθμών των περιοχών μελέτης. Οι μεταβλητές που εξετάζονται είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση (P), η μέση (N_{dd}), η μέγιστη ($N_{dd,max}$) και η ελάχιστη ($N_{dd,min}$) τιμή των μέγιστων ετήσιων άνομβρων περιόδων για τη χρονοσειρά μελέτης (2001-2021).

Μετεωρολογικός Σταθμός	Περιοχή	Υψόμετρο (m)	Γεωγραφικό Μήκος (Deg.)	Γεωγραφικό Πλάτος (Deg.)	Βροχόπτωση P(mm)	N_{dd} (Days)	$N_{dd\ max}$ (Days)	N_d (D
Νεμέα	Κορινθία	305	22.65780	37.82630	637	45.2	91	2
Νέα Αγχίαλος	Μαγνησία	320	22.7943	37.8170	485.5	52.1	94	2

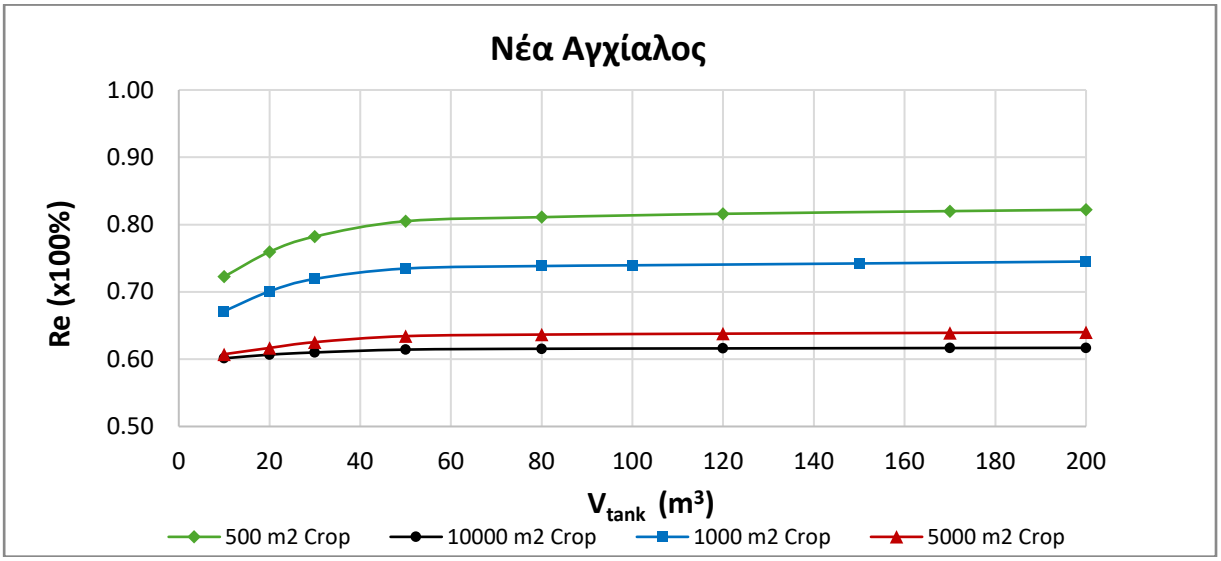


Σχήμα 1. Κατανομή ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης για την περίοδο 2001-2021 των περιοχών μελέτης.

Στα Σχήματα 2 και 3 απεικονίζονται οι καμπύλες αξιοπιστίας του συστήματος συλλογής όμβριων υδάτων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών συναρτήσει του όγκου της ομβροδεξαμενής για επιφάνεια συλλογής όμβριων 500 m^2 και καλλιεργούμενες εκτάσεις 500-10000 m^2 στις περιοχές Νεμέας και Νέας Αγχιάλου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, στην περίπτωση καλλιεργούμενης έκτασης 500 m^2, ο συντελεστής αξιοπιστίας (Re) του συστήματος κυμαίνεται από 84% έως 95% για ομβροδεξαμενές όγκου από 10 έως 200 m^3, αντίστοιχα. Όσο αυξάνεται η καλλιεργούμενη έκταση μειώνεται ο συντελεστής αξιοπιστίας για το ίδιο εύρος μεγέθους δεξαμενών δεδομένου ότι παραμένει ίδια η επιφάνεια ομβροσυλλογής. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι ο Re είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερος του 80%.



Σχήμα 2. Καμπύλες αξιοπιστίας του συστήματος συλλογής όμβριων υδάτων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών συναρτήσει του όγκου ομβροδεξαμενής (V_{tank}) για επιφάνεια συλλογής 500 m^2 και εκτάσεις καλλιέργειας που κυμαίνονται από 500 έως 10000 m^2 στην περιοχή της Νεμέας.



Σχήμα 3. Καμπύλες αξιοπιστίας του συστήματος συλλογής όμβριων υδάτων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών συναρτήσει του όγκου ομβροδεξαμενής για επιφάνεια συλλογής 500 m^2 και εκτάσεις καλλιέργειας που κυμαίνονται από 500 έως 10000 m^2στην περιοχή της Νέας Αγχιάλου.

Στην περίπτωση της Νέας Αγχιάλου, ο συντελεστής αξιοπιστίας είναι μικρότερος, γεγονός αναμενόμενο δεδομένου ότι η περιοχή δέχεται περίπου 150 mm λιγότερη βροχόπτωση κατά μέσο όρο ετησίως, και αυτό βέβαια συνεπάγεται μικρότερη συλλογή βρόχινου νερού. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση καλλιεργούμενης έκτασης 500 m^2, ο συντελεστής αξιοπιστίας του συστήματος κυμαίνεται από 72% έως 82% για ομβροδεξαμενές όγκου από 10 έως 200 m^3, αντίστοιχα. Ο Re μειώνεται όσο αυξάνεται η καλλιεργούμενη έκταση, αλλά παραμένει μεγαλύτερος του 60% σε όλες τις περιπτώσεις μελέτης.

Περαιτέρω, αναλύοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου παρατηρείται ότι ενώ η αύξηση του όγκου της δεξαμενής βελτιώνει την απόδοση του συστήματος, παρατηρούνται φθίνουσες

αποδόσεις του συντελεστή αξιοπιστίας από κάποιους όγκους και άνω. Αυτό υποδηλώνει ότι η βελτιστοποίηση του μεγέθους της ομβροδεξαμενής με βάση τις πραγματικές ανάγκες άρδευσης είναι απαραίτητη για να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα και ταυτόχρονα να μειωθεί το κόστος. Επιπλέον, οι μεγαλύτερες εκτάσεις αμπελώνων απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες νερού, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα των συστημάτων συλλογής βρόχινου νερού, αν δεν προσαρμοστούν ανάλογα. Συνολικά, η μελέτη αυτή προσφέρει ένα αξιόπιστο πλαίσιο για την ενσωμάτωση των τεχνολογιών συλλογής βρόχινου νερού και φωτοβολταϊκών στην διαχείριση των αμπελώνων.

Τέλος, η παραγωγή πράσινης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ κυμαίνεται περίπου μεταξύ 149 και 156 MWh ετησίως, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τον προσανατολισμό της εγκατάστασης των περιοχών μελέτης. Η παραγόμενη αυτή ενέργεια συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος του αμπελώνα και ενισχύει τη βιώσιμη ανάπτυξη μέσω αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη διερεύνησε τη βελτιστοποίηση του υδατικού και ενεργειακού αποτυπώματος σε αμπελώνες ενσωματώνοντας συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων και φωτοβολταϊκων σε δύο περιοχές της Ελλάδας με έντονο οινολογικό ενδιαφέρον. Στη Νεμέα, το σύστημα ομβροσυλλογής παρουσίασε συντελεστή αξιοπιστίας κοντά στο 95% για όγκο ομβροδεξαμενής 200 m3, επιφάνεια συλλογής ομβρίων από φωτοβολταϊκά 500 m2 και καλλιεργούμενη έκταση 500 m2. Στη Νέα Αγχίαλο, ο συντελεστής αξιοπιστίας για τα ίδια μεγέθη καλλιεργούμενης έκτασης, επιφάνειας συλλογής και όγκου ομβροδεξαμενής ανέρχεται σε 82%. Συνεπώς, ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων όχι μόνο συντελεί στην συλλογή του βρόχινου νερού, αλλά και στην παραγωγή πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας. Στις περιοχές μελέτης, για επιφάνεια κάλυψης με φωτοβολταϊκά 500 m2, η παραγωγή πράσινης ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 149 και 156 MWh ανά έτος.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι εφικτή η σημαντική μείωση της εξάρτησης από το τοπικό δίκτυο, ενώ παράλληλα ενισχύεται η ενεργειακή αυτονομία. Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να επεκτείνουν το αντικείμενο μελέτης, συμπεριλαμβάνοντας οικονομικές αξιολογήσεις για την αποδοτικότητα κόστους και την απόδοση της επένδυσης σε διαφορετικές κλίμακες εφαρμογής. Επιπροσθέτως, η μελέτη της χρήσης αγροβολταϊκών, όπου τα πάνελ παρέχουν μερική σκίαση στα αμπέλια, θα μπορούσε να βελτιώσει περαιτέρω τα οφέλη αυτών των υβριδικών συστημάτων. Υιοθετώντας τέτοιες βιώσιμες πρακτικές, οι παραγωγοί αμπελώνων μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των πόρων, να ευθυγραμμιστούν με πολιτικές γεωργίας προσαρμοσμένες στην κλιματική αλλαγή και να συμβάλλουν στον ευρύτερο στόχο βιώσιμης διαχείρισης νερού και ενέργειας στην Ελληνική Γεωργία.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

European Commission, 2007. *Joint Research Centre, Annual production of electricity from photovoltaics in Greece,* https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en

European Commission. (2020). *The European Green Deal.* Brussels: European Commission. Retrieved from https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

European Environment Agency, 2019. The impact of climate change on European ecosystems. Available at: https://www.eea.europa.eu/publications/impact-climate-change-europe

Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P. and Macknick, J.E. 2019. *Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. Nature Sustainability*, 2(9), 848-855. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5

Hellenic Ministry of Environment and Energy, 2023. *National energy and climate plan for Greece*. Available at: https://ypen.gr/en/national-energy-climate-plan

Hellenic Statistical Authority. Annual Agricultural Statistical Survey, Crops Surveys 2020. *Area under vines with wine grapes and raisins by region* (https://www.statistics.gr/en/statistics/-/publication/SPG63)

Londra, P.A., Kotsatos, I.-E., Theotokatos, N., Theocharis, A.T., Dercas, N. 2021. *Reliability Analysis of Rainwater Harvesting Tanks for Irrigation Use in Greenhouse Agriculture.* Hydrology, 8(3), 132. https://doi.org/10.3390/hydrology8030132

Mitchell, V.G., McCarthy, D.T., Deletic, A., Fletcher, T.D. 2008. *Urban stormwater Harvesting—Sensitivity of a storage behaviour model*. Environ. Model. Softw. 23, 782–793.

Solarway, 2025. *Αδειοδότηση φωτοβολταϊκών σταθμών [Οδηγός]*

Vokas, G. A., and Lagogiannis, K. V. 2013. *PV Energy Production Over Greece: Comparison of Predicted and Measured Data of Medium-Scale Photovoltaic Parks. International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(10), 3005–3011.

Αγροτικός Οινοποιητικός Συνεταιρισμός Νέας Αγχιάλου «Δήμητρα». 2025. *Ιστορικά στοιχεία.*https://dimitrawines.gr/

Ένωση Οινοπαραγωγών Αμπελώνα Πελοποννήσου (ΕΝΟΑΠ). 2025. *Στοιχεία του Πελοποννησιακού Αμπελώνα.* https://enoap.org/

Παπαζαφειρίου, Ζ. 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη. ISBN 9789604315802.

38. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΑΕΡΟΠΟΝΙΚΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΕΣΩ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΠΟΡΩΝ

Παναγιώτης Καρνούτσος, Μάριος Καραγιοβανίδης , Δημήτριος Κατσαντώνης , Άννα Γκοτζαμάνη , Αθανάσιος Κουκουνάρας , Θωμάς Κωτσόπουλος , Βασίλειος Φράγκος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Πανεπιστημιούπολη, 54624, Θεσσαλονίκη, e-mail: karnouts@agro.auth.gr

Περίληψη

Η αεροπονική καλλιέργεια αποτελεί μια καινοτόμο τεχνολογία παραγωγής φυτών υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως το μαρούλι (Lactuca sativa L.), χωρίς τη παρουσία υποστρώματος. Η διαχείριση της άρδευσης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση και την ποιότητα των φυτών, ενώ επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση νερού και ενέργειας. Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η αξιολόγηση της επίδρασης δύο διαφορετικών προγραμμάτων άρδευσης, με ακρίβεια ελεγχόμενων μέσω μικροελεγκτή, στην ανάπτυξη και αποδοτικότητα της αεροπονικής καλλιέργειας μαρουλιού. Στο πλαίσιο της μελέτης εγκαταστάθηκαν δύο ανεξάρτητα αεροπονικά συστήματα, καθένα από τα οποία λειτούργησε με διαφοροποιημένο χρόνο άρδευσης. Ο έλεγχος της διάρκειας και της συχνότητα των κύκλων ψεκασμού ρυθμίζονταν μέσω ενός μικροελεγκτή, ο οποίος ενεργοποιούσε τις αντλίες ψεκασμού του θρεπτικού διαλύματος μέσω ρελέ. Στο τέλος της καλλιέργειας, συλλέχθηκαν δεδομένα που αφορούσαν τη βιομάζα, τα ποιοτικά και τα ανατομικά χαρακτηριστικά του φυτού. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι το διαφοροποιημένο πρόγραμμα άρδευσης με μειωμένη διάρκεια και συχνότητα ψεκασμών οδήγησε σε σημαντική εξοικονόμηση νερού χωρίς να επηρεαστούν δυσμενώς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των φυτών. Παράλληλα, μειώθηκε η λειτουργία των αντλιών, οδηγώντας σε χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και αυξημένη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Συμπερασματικά, η ακριβής ρύθμιση της άρδευσης μέσω μικροελεγκτή αποτελεί αποτελεσματική στρατηγική για την ενίσχυση της βιωσιμότητας των αεροπονικών καλλιεργειών, επιτυγχάνοντας βελτιστοποίηση της παραγωγής με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων.

Λέξεις κλειδιά: Αεροπονική καλλιέργεια, Μικροελεγκτής, έξυπνη άρδευση, κατανάλωση νερού, βιωσιμότητα καλλιέργειας

EVALUATION OF MICROCONTROLLER-CONTROLLED IRRIGATION SCHEDULES IN AEROPONIC CULTIVATION: IMPACT ON YIELD, QUALITY, AND RESOURCE CONSERVATION

Panagiotis Karnoutsos[1] *Marios Karagiovanidis[1], Dimitrios Katsantonis[3], Anna Gkotzamani[1], Athanasios Koukounaras[1], Thomas Kotsopoulos[1], Vasileios Fragos[1]

[1]*Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, University Campus, 54624, Thessaloniki, e-mail: *karnouts@agro.auth.gr*

[2]*Hellenic Agricultural Organization DIMITRA, Institute of Plant Breeding & Genetic Resources, Thermi, 57001, Thessaloniki, e-mail: dikatsa@elgo.gr*

ABSTRACT

Aeroponic cultivation is an innovative technology for producing high-value plants, such as lettuce (Lactuca sativa L.), without the presence of a substrate. Irrigation management plays

a crucial role in the yield and quality of the plants, while directly affecting water and energy consumption. The purpose of this study was to evaluate the effect of two different irrigation programs, precisely controlled by a microcontroller, on the growth and efficiency of aeroponically grown lettuce. As part of the study, two independent aeroponic systems were installed, each operating with a different irrigation schedule. The duration and frequency of the spray cycles were controlled by a microcontroller, which activated the nutrient solution spray pumps via relays. At the end of the cultivation period, data was collected regarding the biomass, as well as the qualitative and anatomical characteristics of the plants. The results indicated that the differentiated irrigation program with reduced spray duration and frequency led to significant water savings without adversely affecting the qualitative characteristics of the plants. Concurrently, the operation of the pumps was reduced, leading to lower energy consumption and increased overall system efficiency. In conclusion, the precise regulation of irrigation via a microcontroller is an effective strategy for enhancing the sustainability of aeroponic crops, achieving production optimization while simultaneously reducing the consumption of natural resources.

Keywords: Aeroponic Cultivation, Microcontroller-based irrigation, Smart Irrigation, Water use efficiency, Sustainable production

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αεροπονία αποτελεί μία προηγμένη τεχνολογία καλλιέργειας χωρίς υπόστρωμα, όπου οι ρίζες παραμένουν εκτεθειμένες στον αέρα και τροφοδοτούνται περιοδικά με θρεπτικό διάλυμα υπό μορφή ψεκασμού (Barak et al., 1996; Shinohara et al., 1995; Stoner, 1983). Η μέθοδος αυτή μειώνει την κατανάλωση νερού και διευκολύνει τον έλεγχο των καλλιεργητικών συνθηκών, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές σε συστήματα ελεγχόμενου περιβάλλοντος (Cho et al., 2007; Bar-Tal et al., 2001). Πρόσφατες μελέτες με χρήση αισθητήρων IoT έχουν επίσης διερευνήσει εναλλακτικές στρατηγικές άρδευσης σε μαρούλι, προσφέροντας δυναμικό έλεγχο της υγρασίας και εξοικονόμηση νερού. Η αεροπονία έχει αναδειχθεί σε σημαντικό εργαλείο για την παραγωγή φυλλωδών λαχανικών υψηλής προστιθέμενης αξίας σε συνθήκες εσωτερικής καλλιέργειας ή κάθετης γεωργίας.

Ωστόσο, η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό περιθώριο σφάλματος ως προς την άρδευση, λόγω της απουσίας υποστρώματος και της άμεσης έκθεσης των ριζών στον αέρα (Shinohara et al., 1996). Ακόμη και σύντομες διακοπές στην παροχή νερού μπορεί να οδηγήσουν σε υδατικό στρες, με συνέπειες στην ανάπτυξη και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Για τον λόγο αυτό, ο ακριβής προγραμματισμός της άρδευσης είναι καθοριστικός για την επιτυχία της καλλιέργειας.

Στην πράξη, η άρδευση στα περισσότερα αεροπονικά συστήματα εφαρμόζεται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, με τη διάρκεια και τη συχνότητα των κύκλων να καθορίζονται κυρίως εμπειρικά ή βάσει βιβλιογραφικών αναφορών (Resh, 2013; Montesano et al., 2016; Yang et al., 2018). Παρά τη διαδεδομένη εφαρμογή της, δεν υπάρχει σύγκληση στη διεθνή βιβλιογραφία ως προς το βέλτιστο διάστημα άρδευσης.

Προηγούμενες μελέτες σε υδροπονικές καλλιέργειες έχουν δείξει ότι μικρότερα διαστήματα άρδευσης ευνοούν την αύξηση βιομάζας, αλλά συνδέονται με υψηλότερη συσσώρευση νιτρικών στα φύλλα (Cho et al., 2007; Xu et al., 2012), ενώ μεγαλύτερα διαστήματα συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης νερού και στο καλύτερο έλεγχο των θρεπτικών στοιχείων (Michelon et al., 2020; Xu et al., 2012).

Το μαρούλι (Lactuca sativa L.) αποτελεί ιδανικό είδος για αξιολόγηση στρατηγικών άρδευσης σε συστήματα χωρίς υπόστρωμα, λόγω του μικρού κύκλου ανάπτυξης, του επιφανειακού ριζικού συστήματος και της υψηλής ευαισθησίας σε αλλαγές στη διαθεσιμότητα νερού και

θρεπτικών (Demšar et al., 2004; Jensen, 1997). Επιπλέον, η ποιότητά του, εκφρασμένη με παραμέτρους όπως η συγκέντρωση νιτρικών, σχετίζεται άμεσα με τη στρατηγική άρδευσης, γεγονός που καθιστά την επιλογή του ιδανική. (Yang et al., 2018; Demšar et al., 2004).

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη συγκριτική αξιολόγηση δύο διαφορετικών στρατηγικών άρδευσης (διάστημα 5 λεπτών και 10 λεπτών) σε αεροπονική καλλιέργεια μαρουλιού υπό ελεγχόμενο περιβάλλον. Η μελέτη εστιάζει σε παραμέτρους ανάπτυξης, ποιότητας και αποδοτικότητας χρήσης πόρων, ώστε να διερευνηθεί ο ρόλος της συχνότητας άρδευσης στην αεροπονία.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Περιβάλλον καλλιέργειας

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε καλλιεργητικό κύκλο διάρκειας 37 ημερών. Το πείραμα διεξήχθη σε κλειστό θάλαμο ελεγχόμενου περιβάλλοντος του ΕΛΓΟ– ΔΗΜΗΤΡΑ (Θεσσαλονίκη, Ελλάδα). Η θερμοκρασία αέρα διατηρήθηκε στους 23–25
°C, η σχετική υγρασία στο 65–70%, το VPD από 0.8-0.9 kPa ενώ εξασφαλίστηκε συνεχής ανανέωση αέρα μέσω μηχανικού εξαερισμού. Η φωτοσυνθετική ακτινοβολία παρεχόταν μέσω λαμπτήρων καλλιέργειας LED 720 W (LUMii Black, UK) με φωτοπερίοδο 16 ωρών και μέση ΄ένταση 300 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ στο ύψος της καλλιέργειας.

2.2 Αεροπονικό σύστημα

Χρησιμοποιήθηκαν δύο πανομοιότυπες αεροπονικές μονάδες τύπου X-Stream 120 (Nutriculture, UK). Κάθε μονάδα διαθέτει δεξαμενή 70 L, αντλία παροχής 1000 $L \cdot h^{-1}$ (36W) και 18 ακροφύσια νεφελοποίησης, που κατανέμουν το θρεπτικό διάλυμα απευθείας στη ριζόσφαιρα. Μεταξύ των ποτισμάτων, το διάλυμα επιστρέφει στη δεξαμενή, εξασφαλίζοντας κλειστό κύκλωμα και υψηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού.

2.3 Συστήματα Ελέγχου και Καταγραφής

Η λειτουργία των αντλιών των αεροπονικών μονάδων υποστηρίχθηκε από πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα βασισμένο σε μικροελεγκτή Arduino Mega 2560 (Arduino, Ιταλία). Ο μικροελεγκτής ήταν υπεύθυνος για την ενεργοποίηση των αντλιών άρδευσης μέσω δύο ρελέ 5V (Relay 1 για το TC5 και Relay 2 για το TC10). Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή, αναπτύχθηκε σε γλώσσα Arduino C/C++ και στηρίχθηκε σε χρονισμό με Real Time Clock (RTC DS3231) σε συνδυασμό με τη συνάρτηση millis(), ώστε να επιτυγχάνεται ακριβής διάρκεια και συχνότητα ποτίσματος.

Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα ενεργοποιούσε τα ρελέ για 60 s και στη συνέχεια ανέστειλε τη λειτουργία τους για 5 ή 10 λεπτά, αντίστοιχα, ανάλογα με τη μεταχείριση. Όλες οι εντολές εκτελούνταν με προγραμματισμό non-blocking logic, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα του συστήματος κατά τη μακροχρόνια λειτουργία.

Για τη διασφάλιση ακρίβειας και ιχνηλασιμότητας, τα δεδομένα λειτουργίας (ώρα ενεργοποίησης αντλιών, διάρκεια κύκλων, συνολικός αριθμός ποτισμάτων) καταγράφονταν σε κάρτα μνήμης microSD μέσω ειδικού εξαρτήματος σύνδεσης στο μικροελεγκτή (Waveshare, Κίνα). Η καταγραφή επέτρεψε τον έλεγχο της συνέπειας του προγράμματος και την εξαγωγή του συνολικού αριθμού ενεργοποιήσεων ανά καλλιεργητικό κύκλο.

2.4 Στρατηγικές άρδευσης

Μετά από τριήμερη φάση προσαρμογής των φυτών για την εγκατάσταση του ριζικού συστήματος (60 s ψεκασμός ανά 5 min και για τις δύο μεταχειρίσεις), εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά χρονοπρογράμματα άρδευσης:

- TC5: ψεκασμός διάρκειας 60 s κάθε 5 min.
- TC10: ψεκασμός διάρκειας 60 s κάθε 10 min.

2.5 Φυτικό υλικό και θρεπτικό διάλυμα

Τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μαρούλι romaine (Lactuca sativa L. var. longifolia). Οι σπόροι σπάρθηκαν σε δίσκους μείγματος τύρφης-κοκοφοίνικα και μεταφυτεύτηκαν σε υδροπονικά πλαστικά δοχεία (net pots) όταν εμφάνισαν το τρίτο πραγματικό φύλλο. Στα δοχεία-net pots προστέθηκε διογκωμένη άργιλος (expanded clay pebbles) για στήριξη των φυτών.

Σε κάθε αεροπονικό σύστημα μεταφυτεύτηκαν 40 φυτά και προστέθηκαν 20 L θρεπτικού διαλύματος Hoagland στο 50% της τυπικής σύστασης, παρασκευασμένου με νερό αντίστροφης όσμωσης (EC 0.02 $mS \cdot cm^{-1}$). Το τελικό διάλυμα είχε EC ~1.12 $mS \cdot cm^{-1}$ και pH 6.0. Η χημική σύσταση του διαλύματος περιλαμβάνεται στον Πίνακα

1. Το pH και η αγωγιμότητα παρακολουθούνταν καθημερινά με φορητό αισθητήρα μέτρησης αγωγιμότητας και pH (Bluelab Combo, Νέα Ζηλανδία). Η αναπλήρωση του διαλύματος έγινε τρεις φορές σε κάθε καλλιεργητικό κύκλο, με προσθήκη 10 L φρέσκου διαλύματος ανά δεξαμενή την φορά.

Πίνακας 1. Μακροστοιχεία- και ιχνοστοιχεία στο πλήρες και στο 50% διάλυμα Hoagland.

Μακροστοιχεία	Πλήρες (ppm)	50% της τυπικής σύστασης (ppm)
N	210	105
P	31	15.5
K	235	117.5
Ca	200	100
Mg	48	24
S	64	32
Ιχνοστοιχεία	**Πλήρες (ppm)**	**50% της τυπικής σύστασης (ppm)**
Fe	1.5	0.75
Mn	0.5	0.25
Zn	0.05	0.025
Cu	0.02	0.01
B	0.5	0.25
Mo	0.01	0.005

2.6 Μετρήσεις

Κατά τη συγκομιδή, όλα τα φυτά συλλέχθηκαν και αξιολογήθηκαν για μορφολογικές, φυσιολογικές και ποιοτικές παραμέτρους.

1. Νωπό βάρος φυτού (Fresh Plant Weight, g): Τα φυτά ζυγίστηκαν αμέσως μετά τη συγκομιδή σε ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας (Kern EMB 600-2, Γερμανία, ακρίβεια 0.01 g). Ο μέσος όρος ανά μονάδα χρησιμοποιήθηκε για τη στατιστική ανάλυση.
2. Ξηρό βάρος ρίζας (Root Dry Weight, g): Οι ρίζες απομακρύνθηκαν από κάθε φυτό, πλύθηκαν με απιονισμένο νερό για την απομάκρυνση υπολειμμάτων, και τοποθετήθηκαν σε φούρνο ξήρανσης (Memmert UF110, Γερμανία) στους 60 °C μέχρι σταθερού βάρους (~72 ώρες). Το ξηρό βάρος καταγράφηκε με ζυγαριά ακριβείας και εκφράστηκε σε g.
3. Συγκέντρωση νιτρικών (ppm): Λήφθηκε δείγμα 1 g φρέσκου φύλλου από 10 τυχαία φυτά ανά μονάδα. Τα δείγματα πολτοποιήθηκαν με 25 mL απιονισμένου νερού και διηθήθηκαν. Η συγκέντρωση νιτρικών προσδιορίστηκε με τη φασματοφωτομετρική μέθοδο σαλικυλικού οξέος, χρησιμοποιώντας φασματοφωτόμετρο UV-Vis (Shimadzu UV-1900, Ιαπωνία) στα 410 nm. Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε mg $NO_3^- \cdot kg^{-1}$ φρέσκου βάρους.
4. Συνολική κατανάλωση νερού ($L \cdot κύκλο^{-1} \cdot μονάδα^{-1}$): Υπολογίστηκε από το άθροισμα των όγκων αναπλήρωσης του θρεπτικού διαλύματος που καταγράφηκαν ανά δεξαμενή κατά τη διάρκεια του κύκλου.
5. Αποδοτικότητα χρήσης νερού (Water Use Efficiency, WUE, $g \cdot L^{-1}$): Υπολογίστηκε ως ο λόγος του μέσου νωπού βάρους φυτού προς τον συνολικό όγκο νερού που καταναλώθηκε ανά μονάδα (L) σε όλο τον κύκλο.
6. Αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών (Nutrient Use Efficiency, NUE-N, P, K, $g \cdot g^{-1}$): Υπολογίστηκε ως ο λόγος της βιομάζας (νωπό βάρος, g) προς τη συνολική ποσότητα αζώτου, φωσφόρου και καλίου (g) που εφαρμόστηκε σε κάθε δεξαμενή στη διάρκεια του κύκλου. Η περιεκτικότητα σε μακροστοιχεία προέκυψε από τη χημική σύσταση του θρεπτικού διαλύματος (Πίνακας 1) και την κατανάλωση διαλύματος.
7. Μετρήσεις Λειτουργίας Αντλιών και Ενέργειας: Ο μικροελεγκτής κατέγραφε τον ακριβή αριθμό ενεργοποιήσεων αντλιών (ON/OFF) σε κάθε κύκλο ποτίσματος, επιτρέποντας τον υπολογισμό της συνολικής διάρκειας λειτουργίας τους. Η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα εκτιμήθηκε με βάση τη σταθερή ισχύ της αντλίας (36 W) και τον συνολικό χρόνο λειτουργίας (h) ανά καλλιεργητικό κύκλο. Από τα δεδομένα αυτά προέκυψαν τόσο ο συνολικός αριθμός ενεργοποιήσεων, όσο και η συνολική ενεργειακή κατανάλωση ($kWh \cdot κύκλο^{-1}$).

Οι διαφορές μεταξύ μέσων όρων αξιολογήθηκαν με ανάλυση διακύμανσης (ANOVA), και οι μεταχειρίσεις συγκρίθηκαν με δοκιμή Tukey σε επίπεδο σημαντικότητας $p<0.05$.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Νωπό βάρος φυτού

Το νωπό βάρος φυτού επηρεάστηκε σημαντικά από τη στρατηγική άρδευσης (Πίνακας 2). Τα φυτά που καλλιεργήθηκαν υπό το TC5 εμφάνισαν μέσο βάρος 72.1 g, σημαντικά υψηλότερο από τα 66.8 g που καταγράφηκαν στο TC10. Η αύξηση αυτή (8%) υποδηλώνει ότι η υψηλότερη συχνότητα άρδευσης ευνόησε τη συσσώρευση βιομάζας στο υπέργειο τμήμα.

3.2 Ξηρό βάρος ρίζας

Σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν και στο ξηρό βάρος ρίζας (Πίνακας 2). Το TC10 παρουσίασε μέσο βάρος 1.06 g, περίπου 20% υψηλότερο σε σχέση με το 0.88 g του TC5. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η λιγότερο συχνή άρδευση προάγει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος.

Πίνακας 2. Νωπό βάρος φυτού και ξηρό βάρος ρίζας μαρουλιού υπό δύο στρατηγικές άρδευσης.

Στρατηγική	Νωπό βάρος φυτού (g)	Ξηρό βάρος ρίζας (g)
TC5	72.1 a	0.88 b
TC10	66.8 b	1.06 a

3.3 Συγκέντρωση νιτρικών

Η συγκέντρωση νιτρικών στα φύλλα διαφοροποιήθηκε σημαντικά μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων (Πίνακας 3). Στο TC5 καταγράφηκαν τιμές 1020 ppm, σημαντικά υψηλότερες από τις 615 ppm του TC10. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η αυξημένη συχνότητα ποτίσματος συνδέεται με εντονότερη πρόσληψη αζώτου και μεγαλύτερη συσσώρευση νιτρικών ιστών.

3.4 Αποδοτικότητα χρήσης νερού και θρεπτικών

Η αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) ήταν υψηλότερη στο TC10 (75.3 $g \cdot L^{-1}$) σε σχέση με το TC5 (68.5 $g \cdot L^{-1}$), αντιστοιχώντας σε βελτίωση κατά 9.9%. Αντίθετα, οι δείκτες αποδοτικότητας χρήσης θρεπτικών (NUE-N, NUE-P, NUE-K) ήταν υψηλότεροι στο TC5, με τιμές 549, 3720 και 491 $g \cdot g^{-1}$ αντίστοιχα, έναντι 509, 3448 και 455 $g \cdot g^{-1}$ στο TC10. Η μείωση κατά ~7.3% στο TC10 αποδίδεται στη χαμηλότερη συνολική βιομάζα που παρήχθη σε σχέση με την ποσότητα θρεπτικών που εφαρμόστηκε.

Πίνακας 3. Συγκέντρωση νιτρικών, συνολική κατανάλωση νερού, αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) και αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών (NUE) σε δύο στρατηγικές άρδευσης.

Συνολική Στρατηγική	Νιτρικά (ppm)	κατανάλωση νερού (L)	WUE ($g \cdot L^{-1}$)	NUE-N ($g \cdot g^{-1}$)	NUE-P ($g \cdot g^{-1}$)	NUE-K ($g \cdot g^{-1}$)
TC5	1020a	42.1	68.5	549	3270	491
TC10	615b	35.5	75.3	509	3448	455

3.5 Λειτουργία Αντλιών και Ενεργειακή Κατανάλωση

Η στρατηγική με αραιότερα ποτίσματα (TC10) μείωσε σημαντικά τον αριθμό ενεργοποιήσεων των αντλιών σε σχέση με το TC5. Συγκεκριμένα, στο TC5 καταγράφηκαν 10 656 ενεργοποιήσεις ανά καλλιεργητικό κύκλο, ενώ στο TC10 5 760 ενεργοποιήσεις, δηλαδή μείωση κατά 45,9%. Η εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης βασίστηκε στον αριθμό κύκλων που κατέγραψε ο μικροελεγκτής και στην ονομαστική ισχύ της αντλίας (36 W). Με τον τρόπο αυτό, η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα υπολογίστηκε σε 6,39 kWh για το TC5 και 3,46 kWh για το TC10, δηλαδή εξοικονόμηση 2,94 kWh (−45,9%) ανά κύκλο. Οι τιμές αυτές αποτελούν εκτιμήσεις υπό ιδανικές συνθήκες· στην πράξη η πραγματική κατανάλωση μπορεί να αποκλίνει λόγω διαφορών στην πίεση λειτουργίας, θερμοκρασία και συχνών εκκινήσεων/παύσεων. Η υψηλότερη συχνότητα ενεργοποιήσεων στο TC5 συνεπάγεται επίσης αυξημένη μηχανική καταπόνηση του εξοπλισμού, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη διάρκεια ζωής των αντλιών και των ρελέ. Αντίθετα, το TC10 συνδυάζει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας με μειωμένη φθορά του εξοπλισμού, βελτιώνοντας τη συνολική βιωσιμότητα του συστήματος.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης δείχνουν ότι η συχνότητα άρδευσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ανάπτυξη και την ποιότητα του μαρουλιού σε αεροπονικά συστήματα. Η μεταχείριση με μικρότερο διάστημα άρδευσης (TC5) οδήγησε σε υψηλότερο νωπό βάρος φυτού, επιβεβαιώνοντας ότι η συχνότερη παροχή θρεπτικού διαλύματος ενισχύει τη συσσώρευση βιομάζας. Παρόμοιες παρατηρήσεις έχουν αναφερθεί σε υδροπονικές καλλιέργειες μαρουλιού, όπου η αυξημένη συχνότητα άρδευσης συνδέθηκε με μεγαλύτερη ανάπτυξη και παραγωγή (Cho et al., 2007; Xu et al., 2012).

Ωστόσο, η αυξημένη ανάπτυξη στο TC5 συνοδεύτηκε από σημαντική συσσώρευση νιτρικών στα φύλλα. Η υπερβολική πρόσληψη αζώτου σε συνθήκες συνεχούς διαθεσιμότητας έχει περιγραφεί με τον όρο «luxury uptake» (Bar-Tal et al., 2001), η οποία δεν συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση της πρωτεϊνικής σύνθεσης αλλά οδηγεί σε αποθήκευση νιτρικών στα φύλλα. Τα επίπεδα που καταγράφηκαν στο TC5 παραμένουν χαμηλότερα από τα ανώτατα όρια που έχουν θεσπιστεί για το μαρούλι από την Ευρωπαϊκή Ένωση, ωστόσο η διαφορά σε σχέση με το TC10 είναι ενδεικτική της επίδρασης που ασκεί το πρόγραμμα άρδευσης στην ποιότητα του προϊόντος.

Αντίθετα, η στρατηγική άρδευσης TC10 βελτίωσε το ξηρό βάρος ρίζας, υποδηλώνοντας μεγαλύτερη κατανομή πόρων στο ριζικό σύστημα όταν η περίοδος μεταξύ αρδευτικών γεγονότων. Η διαφοροποίηση αυτή έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες μελέτες, όπου πιο αραιά ποτίσματα προήγαγαν την ανάπτυξη ρίζας έναντι της φυλλικής επιφάνειας (Michelon et al., 2020). Η ενίσχυση του ριζικού συστήματος μπορεί να βελτιώνει την ανθεκτικότητα των φυτών σε διακυμάνσεις της διαθεσιμότητας νερού, καθιστώντας τα πιο ανθεκτικά σε συνθήκες στρες (Yang et al., 2018).

Η αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) βρέθηκε σημαντικά υψηλότερη στο TC10 (75.3 $g \cdot L^{-1}$) σε σχέση με το TC5 (68.5 $g \cdot L^{-1}$), αντιστοιχώντας σε αύξηση κατά 9.9%. Η διαφοροποίηση αυτή σχετίζεται με τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης νερού από 42.1 L στο TC5 σε 35.5 L στο TC10 (εξοικονόμηση 6.6 L, −15.7%). Αντίθετα, οι δείκτες αποδοτικότητας χρήσης θρεπτικών (NUE-N, NUE-P, NUE-K) ήταν υψηλότεροι στο TC5 (549, 3720 και 491 $g \cdot g^{-1}$) έναντι του TC10 (509, 3448 και 455 $g \cdot g^{-1}$), παρουσιάζοντας μείωση περίπου 7.3% στο TC10. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η στρατηγική με συχνότερη άρδευση αξιοποίησε αποτελεσματικότερα τα εφαρμοζόμενα θρεπτικά στοιχεία, ενώ η αραιότερη άρδευση ενίσχυσε την αποδοτικότητα χρήσης νερού.

Παράλληλα, η στρατηγική TC10 οδήγησε σε 46% μείωση του αριθμού ενεργοποιήσεων και της κατανάλωσης ενέργειας των αντλιών (−2.94 kWh ανά καλλιεργητικό κύκλο), συμβάλλοντας σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και σε περιορισμό της μηχανικής φθοράς του εξοπλισμού.

Σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, προηγούμενες εργασίες έχουν δείξει ότι η στρατηγική άρδευσης με λιγότερους αλλά αποδοτικότερους κύκλους βελτιώνει την αξιοποίηση νερού και αζώτου χωρίς σημαντική απώλεια παραγωγής (Xu et al., 2012; Bar-Tal et al., 2001).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνολικά, τα ευρήματα καταδεικνύουν μία σαφή αντίθεση μεταξύ των δύο στρατηγικών: Η στρατηγική TC5 ενισχύει την παραγωγή βιομάζας, συνοδευόμενη όμως από υψηλότερη συγκέντρωση νιτρικών στα φύλλα καθώς επίσης εμφανίζει υψηλότερους δείκτες NUE. Η TC10 μειώνει την παραγωγή, αλλά βελτιώνει την ποιότητα και την αποδοτικότητα χρήσης νερού, ενώ συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της μηχανικής

καταπόνησης των αντλιών, ενισχύοντας περαιτέρω τη βιωσιμότητα του συστήματος. Η επιλογή στρατηγικής θα πρέπει επομένως να καθορίζεται από τον τελικό στόχο της καλλιέργειας: υψηλή παραγωγικότητα ή βελτιωμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά και αποδοτικότητα στη χρήση πόρων.

Συνολικά, η ακριβής ρύθμιση της άρδευσης μέσω μικροελεγκτή αποτελεί αποτελεσματική στρατηγική για την ενίσχυση της βιωσιμότητας των αεροπονικών καλλιεργειών, επιτυγχάνοντας βελτιστοποίηση της παραγωγής με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barak, P.; Smith, J. D.; Krueger, A. R.; Peterson, L. A. Measurement of Short-Term Nutrient Uptake Rates in Cranberry by Aeroponics. Plant, Cell & Environment, 1996, 19, 237–242. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1996.tb00246.x

Bar-Tal, A.; Aloni, B.; Karni, L.; Oserovitz, J.; Hazan, A.; Itach, M.; Gantz, S.; Avidan, A.; Posalski, I.; Tratkovski, N.; et al. Nitrogen Nutrition of Greenhouse Pepper. I. Effects of Nitrogen Concentration and NO_3^-:NH_4^+ Ratio on Yield, Fruit Shape, and the Incidence of Blossom-End Rot in Relation to Plant Mineral Composition. HortScience, 2001, 36, 1244–1251. DOI: 10.21273/HORTSCI.36.7.1244

Cho, Y. Y.; Oh, M. M.; Son, J. E. Growth and Nutrient Uptake of Lettuce as Affected by Irrigation Frequency in Nutrient Film Technique. HortScience, 2007, 42, 1413–1416. DOI: 10.21273/HORTSCI.42.6.1413

Demšar, J.; Osvald, J.; Vodnik, D. The Effect of Light-Dependent Application of Nitrate on the Growth of Aeroponically Grown Lettuce. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2004, 129, 570–575.DOI: 10.21273/JASHS.129.4.0570

Jensen, M. H. Hydroponics Worldwide. Acta Horticulturae, 1997, 481, 719 730.DOI: 10.17660/ActaHortic.1999.481.95

Michelon, N.; Bastos, L. M.; Stumpf, L.; Ferreira, R. A.; Moraes, D. M.; Camargo, F.; Schons, A.; Müller, L.; Lima, A. P. Strategies for Improved Water Use Efficiency of Field-Grown Lettuce under a Semi-Arid Climate. Agronomy, 2020, 10, 668. DOI: 10.3390/agronomy10050668

Montesano, F. F.; van Iersel, M. W.; Parente, A. Timer Versus Moisture Sensor-Based Irrigation Control of Soilless Lettuce: Effects on Yield, Quality, and Water Use Efficiency. Horticultural Science (Prague), 2016, 43 (2), 67–75. DOI: 10.17221/312/2014-HORTSCI

Resh, H. M. Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower; CRC Press, Boca Raton, FL, 2013.

Shinohara, Y.; Aoba, K.; Fujiwara, K. Studies on Aeroponics (1). A Fundamental Consideration on Aeroponics. Journal of Agricultural Meteorology, 1995, 51, 275–282. DOI: 10.2480/agrmet.51.275

Shinohara, Y.; Aoba, K.; Fujiwara, K. Studies on Aeroponics (2). Environmental Control and Growth of Lettuce Plants. J. of Ag. Met., 1996, 52, 33–39. DOI: 10.2480/agrmet.52.33

Stoner, R. J. Aeroponic Plant Growth Chamber. NASA Tech Briefs, 1983, 7, 23.

Xu, H.; Sun, X.; Su, J.; Zhang, S.; Wang, H. Nitrogen Use Efficiency and Yield of Lettuce under Different Irrigation Intervals in Hydroponics. Acta Horticulturae, 2012, 927, 93–100. DOI: 10.17660/ActaHortic.2012.927.96

Yang, L.; Yang, X.; Zhao, H.; Huang, D.; Tang, D. Ebb-and-Flow Subirrigation Strategies Increase Biomass and Nutrient Contents and Reduce Nitrate Levels in Lettuce. HortScience, 2018, 53, 1056–1061. DOI: 10.21273/HORTSCI13078-18

ΕΝΟΤΗΤΑ 5η

Εδαφικοί πόροι & Περιβάλλον

39. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ 1:5 (EC1:5)

Π.Α. Πετσετίδη, Μ. Νταλαμάγκα, Γ. Πίκουλας, Δ. Τσάμπρα, Π. Φιλιππίδης, Γ. Κάργας

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, tpetsetidi@aua.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η πρόβλεψη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εκχυλίσματος της πάστας κορεσμού, (EC_e) από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εκχυλίσματος σε αναλογία εδάφους-νερού 1:5 ($EC_{1:5}$) χρησιμοποιώντας διαφορετικές εξισώσεις συντελεστή μετατροπής, CF που ενσωματώνουν την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους, μέσω του ποσοστού κορεσμού, SP. Συλλέχθηκαν εδαφικά δείγματα απο περιοχές της Λακωνίας και του Άργους με διαφορετική μηχανική σύσταση και επίπεδα αλατότητας και προσδιορίστηκαν οι EC_e και $EC_{1:5}$, το ποσοστό κορεσμού (SP%), καθώς και η κοκκομετρική σύσταση αυτών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η EC_e μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη αξιοπιστία απο την μέθοδο των Gharaibeh et al. (2021) για όλους τους τύπους εδαφών, στα μη αλατούχα και ελαφρώς αλατούχα εδάφη (R^2 = 0.99, MAE= 0.39), ενώ σε λεπτόκκοκα και μέσης σύστασης εδάφη, με υψηλά επίπεδα αλατότητας (EC_e > 4.5 dSm^{-1}) προτείνεται η χρήση του συντελεστή CF με τις τιμές των Slavich and Petterson (1993) και η εξίσωση του ποσοστού κορεσμού SP%, όπως προσδιορίζεται απο τους Kargas et al., (2022) (R^2 = 0.99, MAE= 0.45).

Λέξεις κλειδιά: εδαφική αλατότητα, EC1:5, άμμος, άργιλος, συντελεστής μετατροπής, ποσοστό κορεσμού

INVESTIGATION OF SOIL SALINITY PREDICTION USING ELECTRICAL CONDUCTIVITY 1:5 (EC1:5)

P.A. Petsetidi, M. Dalamagka, G. Pikoulas, D. Tsabra, P. Filippidis, G. Kargas

Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering, Iera Odos 75, 11855, Athens, tpetsetidi@aua.gr

ABSTRACT

In the present study, the prediction of soil salinity (EC_e) from the electrical conductivity of the soil/water extract at 1:5 ratio ($EC_{1:5}$) was examined, using different conversion factor (CF) equations that incorporate soil texture, through the saturation percentage (SP). For the experiment, soil samples were collected from areas of Laconia and Argos with varying texture and salinity levels. The values of EC_e, $EC_{1:5}$, saturation percentage (SP%), and the soil particle size fractions (sand, clay) were determined. According to the results, EC_e can be reliably predicted using the equation of Gharaibeh et al. (2021) for all soil types in non-saline and slightly saline soils (R^2 = 0.99, MAE= 0.39), whereas in fine and medium-textured soils with high salinity levels (ECe > 4.5 dS m^{-1}), it is recommended to use the CF equation with the values proposed by Slavich and Petterson (1993), along with the SP% equation as determined by Kargas et al. (2022) (R^2 = 0.99, MAE= 0.45).

Keywords: soil salinity, EC1:5, sand, clay, conversion factor, saturation percentage

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκτεταμένη συσσώρευση των αλάτων στο έδαφος αποτελεί σήμερα μία απο τις μεγαλύτερες προκλήσεις της γεωργικής παραγωγής παγκοσμίως, με τις προβλέψεις να εκτιμούν πως μέχρι το 2050, το 50% των καλλιεργούμενων εκτάσεων θα έχει επηρεαστεί απο τις σοβαρές επιπτώσεις της εδαφικής αλατότητας (Butcher et al., 2016). Το πρόβλημα της αλάτωσης των εδαφών εντείνεται ιδιαίτερα στις αρδευόμενες ξηρές και ημίξερες περιοχές του πλανήτη, όπου το περιορισμένο ύψος βροχοπτώσεων και οι υψηλοί ρυθμοί εξάτμισης δυσχεραίνουν την έκπλυση των αλάτων απο το έδαφος και συντελούν στη αύξηση της συγκέντρωσής τους, απειλώντας την παραγωγικότητα των φυτών και τη βιωσιμότητα της γεωργικής γης. Για τη λήψη λοιπόν, άμεσων μέτρων πρόληψης και τη διασφάλιση της ποιότητας των φυσικών πόρων, η συστηματική παρακολούθηση και η έγκαιρη αξιολόγηση των επιπέδων της εδαφικής αλατότητας κρίνονται απαραίτητες.

Η πρότυπη μέθοδος για τη διάγνωση της αλατότητας του εδάφους στηρίζεται στην εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εκχυλίσματος της πάστας κορεσμού (EC_e), που αποτελεί μια χρονοβόρα, κοπιαστική και δαπανηρή διαδικασία (Corwin and Yemoto, 2017). Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές και ταχύτερες μεθοδολογίες που βασίζονται στην ανάμειξη εδάφους και νερού σε διαφορετικές αναλογίες κατά βάρος, όπως 1:1, 1:2, 1:2.5, 1:5 για την απόκτηση του εκχυλίσματος και την συσχέτισή του με την EC_e. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες αναλογίες εδάφους/νερού είναι οι 1:1 ($EC_{1:1}$) και 1:5 ($EC_{1:5}$), οι οποίες έχουν εφαρμοστεί κυρίως σε εδάφη της Αυστραλίας, της Κίνας και των ΗΠΑ (Rayment & Lyons, 2011; Wang et al., 2011; He et al., 2012).

Για την εκτίμηση της EC_e απο την $EC_{1:5}$ έχουν προταθεί διάφορες γραμμικές εξισώσεις με διαφορετικούς συντελεστές (conversion factors (CF)), οι οποίοι διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή και την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους, τον τύπο των αλάτων, την περιεκτικότητα του εδάφους σε γύψο καθώς και την μέθοδο απόκτησης του εκχυλίσματος (Sonmez et al., 2008; Kargas 2018). Οι Slavich and Petterson (1993) και πιο πρόσφατα, οι Gharaibeh et al. (2021) παρουσίασαν εμπειρικές σχέσεις μεταξύ του CF και του ποσοστού κορεσμού του εδάφους (SP%) (saturation percentage), με τη μορφή:

$$CF = m + k/SP\% \quad (1)$$

όπου m, k συντελεστές προσαρμογής. Οι τιμές των παραμέτρων που προσδιορίστηκαν απο τους συγγραφείς, για εδάφη της Αυστραλίας και της Ιορδανίας, είναι m=2.46, k=303 και m=1.054, k= 283.4, αντίστοιχα. Παράλληλα, έχει διαπιστωθεί πως το ποσοστό κορεσμού SP, ως δείκτης της μηχανικής σύστασης του εδάφους, μπορεί να συσχετιστεί εμπειρικά με την κοκκομετρική σύσταση και συγκεκριμένα με το ποσοστό της άμμου (Sand %) και της αργίλου (Clay %), με την ακόλουθη γραμμική εξίσωση:

$$SP\ \% = a + b\ (Clay\ \%) + c\ (Sand\ \%) \quad (2),$$

όπου οι τιμές των παραμέτρων σύμφωνα με τους Gharaibeh et al. (2021) είναι a=43.83, b=0.313, c=−0.303, ενώ για τα ελληνικά εδάφη, οι Kargas et al., (2022) προτείνουν τις τιμές a=49.699, b=0.524 και c=−0.339. Με αυτόν τον τρόπο, η επίδραση της κοκκομετρικής σύστασης του εδάφους, μέσω της παραμέτρου SP, μπορεί να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό του CF όταν χρησιμοποιείται η Εξίσωση (1), και να προκύψει το παρακάτω μοντέλο πρόβλεψης της EC_e από την $EC_{1:5}$:

$$EC_e = \left(m + \frac{k}{SP\,\%}\right) EC_{1:5} \quad (3).$$

Ωστόσο, η επίδοση του μοντέλου πρόβλεψης (Εξίσωση 3) εξαρτάται τόσο απο τις διαφορετικές σχέσεις CF που δύναται να χρησιμοποιηθούν, όσο και απο τις εξισώσεις SP και τον τύπο του εδάφους στο οποίο εφαρμόζονται, απαιτώντας περαιτέρω έρευνα για την αξιοπιστία τους σε εύρος εδαφών

Σκοπός λοιπόν της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η πρόβλεψη της εδαφικής αλατότητας, EC_e από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εκχυλίσματος σε αναλογία εδάφους-νερού 1:5 ($EC_{1:5}$) στα ελληνικά εδάφη, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα των Slavich and Petterson (1993) και Gharaibeh et al. (2021), που ενσωματώνουν την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους μέσω του ποσοστού κορεσμού, SP. Για την αξιολόγηση του μοντέλου των Slavich and Petterson (1993) εφαρμόζεται η εξίσωση πρόβλεψης για το SP% των Kargas et al., (2022).

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Συλλογή και επεξεργασία εδαφικών δειγμάτων

Για την πραγματοποίηση του πειράματος συλλέχθηκαν δείγματα βάθους 0-30 cm απο εδάφη της Λακωνίας και του Άργους με σκοπό την απόκτηση εδαφικών δειγμάτων με εύρος μηχανικής σύστασης. Συνολικά έγινε λήψη 130 εδαφικών δειγμάτων, τα οποία μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο, όπου αεροξηράνθηκαν και κοσκινίστηκαν (2mm) για να ακολουθήσουν οι εργαστηριακές αναλύσεις. Έγινε προσδιορισμός της κοκκομετρικής σύστασης των εδαφών με τη μέθοδο Βουγιούκου, του ποσοστού των ανθρακικών αλάτων, $CaCO_3$ με τη μέθοδο Bernard και εκτίμηση της EC_e και της $EC_{1:5}$ κατά την πρότυπη μέθοδο USDA (1954).

2.2 Μέτρηση της EC_e και της $EC_{1:5}$ και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Η μέτρηση της EC_e έγινε με τη παρασκευή κορεσμένης εδαφικής πάστας και τη λήψη του εκχυλίσματος κορεσμού όπου το αγωγιμόμετρο μετρά την EC_e (USDA 1954).

Συγκεκριμένα, σε πλαστικό δοχείο των 500mL τοποθετήθηκαν 350g αεροξηραθέντος εδάφους από το κάθε δείγμα και με τη βοήθεια ογκομετρικού κυλίνδρου προστίθονταν σταδιακά ποσότητες απιονισμένου νερού. Μετά από κάθε νέα προσθήκη, το έδαφος αναμιγνυόταν καλά με το νερό με τη βοήθεια σπάτουλας και στη συνέχεια γινόταν προσθήκη νέας ποσότητας νερού, μέχρι η πάστα να φτάσει στο σημείο κορεσμού. Η προσθήκη νερού σταματά όταν η επιφάνεια του εδάφους έχει αποκτήσει μία στίλβουσα όψη. Οι κορεσμένες πάστες εδάφους αφέθηκαν σε ισορροπία για 24 ώρες. Την επόμενη ημέρα, οι πάστες μεταφέρθηκαν σε χωνί Büchner, στη βάση του οποίου είχε τοποθετηθεί διηθητικό χαρτί και με την εφαρμογή αντλίας κενού, το εκχύλισμα της κάθε πάστας συλλέχθηκε σε φιάλη 250mL. Τέλος, η EC_e κάθε εκχυλίσματος μετρήθηκε στους 25°C χρησιμοποιώντας αγωγιμόμετρο (WTW, Cond 315i).

Για τον προσδιορισμό της $EC_{1:5}$ σύμφωνα με τη μέθοδο USDA (1954) προστέθηκαν 100mL απιονισμένου νερού σε 20g εδαφικού δείγματος και το αιώρημα ανακινήθηκε σε μηχανικό αναδευτήρα για 15 λεπτά. Στη συνέχεια, αφέθηκε σε πλήρη ηρεμία για 1 ώρα και έπειτα ανακινήθηκε ξανά για 5 λεπτά. Μετά την ολοκλήρωση της ανάδευσης, το αιώρημα τοποθετήθηκε σε χωνί Büchner και ακολουθώντας την προαναφερθείσα διαδικασία για την εκτίμηση της EC_e, έγινε λήψη του εκχυλίσματος και μετρήθηκε η $EC_{1:5}$ (USDA 1954).

Η συνολική ποσότητα του νερού που προστέθηκε στο κάθε δείγμα μαζί με την υγρασία του

ξηρού εδάφους εκφράζεται ως ποσοστό του βάρους του εδάφους και αντιπροσωπεύει το ποσοστό κορεσμού, SP % (saturation percentage).Για την αξιολόγηση των μοντέλων στην εκτίμηση της EC_e, υπολογίστηκαν ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 και το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Εδαφικές Ιδιότητες

Απο τις εργαστηριακές αναλύσεις προέκυψε πως τα περισσότερα εδάφη της έρευνας είναι κυρίως αργιλοπηλώδη (53.33%) και πηλώδη (34.44%), ενώ τα υπόλοιπα εδάφη ποικίλουν σε μικρότερο ποσοστό, σε μηχανική σύσταση. Επίσης, με εξαίρεση 4 εδαφικά δείγματα που εμφανίζουν ποσοστό κορεσμού, SP απο 29.94% έως 40%, όλα τα εδάφη παρουσιάζουν τιμές SP υψηλότερες απο 40%, υποδεικνύοντας πως τα εδάφη είναι κυρίως λεπτόκοκκα.

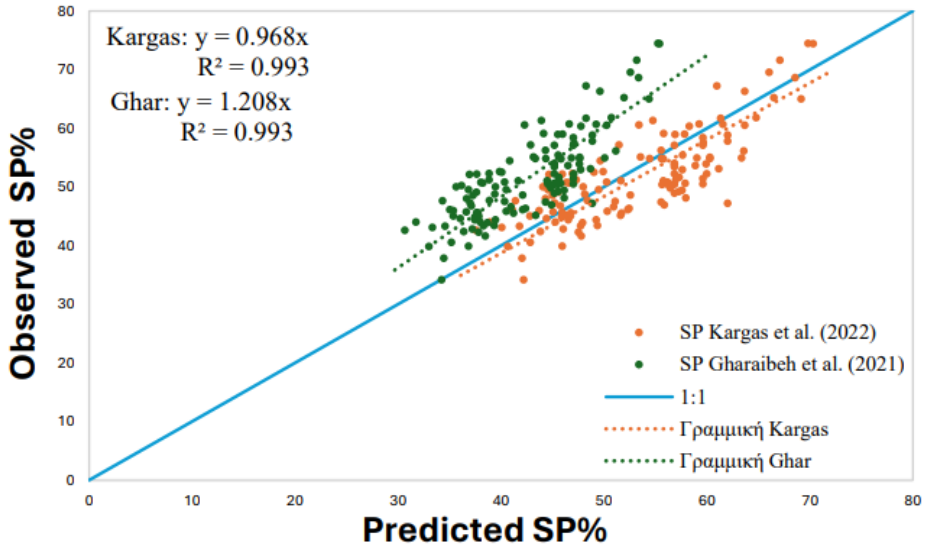
Πίνακας 1. Στατιστικά στοιχεία των εδαφικών ιδιοτήτων: ηλεκτρική αγωγιμότητα του εκχυλίσματος της πάστας κορεσμού (EC_e), ηλεκτρική αγωγιμότητα του εκχυλίσματος εδάφους/νερού 1:5 ($EC_{1:5}$), ποσοστό κορεσμού του εδάφους (SP%), περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο (Clay%) και άμμο (Sand%).

	EC_e (dS/m)	$EC_{1:5}$ (dS/m)	SP%	Clay%	Sand%
Μέσος όρος	2.77	0.37	50.83	26.95	33.52
Τυπική απόκλιση	4.01	0.58	8.23	9.54	11.27
Συντελεστής μεταβλητότητας (%)	144.77	156.76	16.2	35.4	33.62
Τυπικό σφάλμα	0.34	0.05	0.7	0.81	0.96
Ελάχιστη τιμή	0.38	0.1	29.94	7.06	6
Μέγιστη τιμή	22.3	3.11	74.48	47	66
Συντελεστής ασυμμετρίας	2.99	3.45	0.1	0.02	0.28

Οι τιμές της εδαφικής αλατότητας, EC_e (Πίνακας 1) μεταβάλλονται απο 0.38 έως 22.3 dSm^{-1}, με μέσο όρο 2.77 dSm^{-1}. Το 77.78% των δειγμάτων της μελέτης χαρακτηρίζονται ως μη αλατούχα, με EC_e <2 dSm^{-1}, ενώ τα εδάφη με υψηλότερες τιμές αλατότητας αποτελούν μικρότερο ποσοστό. Τέλος, η περιεκτικότητα των εδαφών σε ανθρακικό ασβέστιο, $CaCO_3$ κυμαίνεται σε σχετικά υψηλά επίπεδα, απο 4.72 έως και 38.3%.

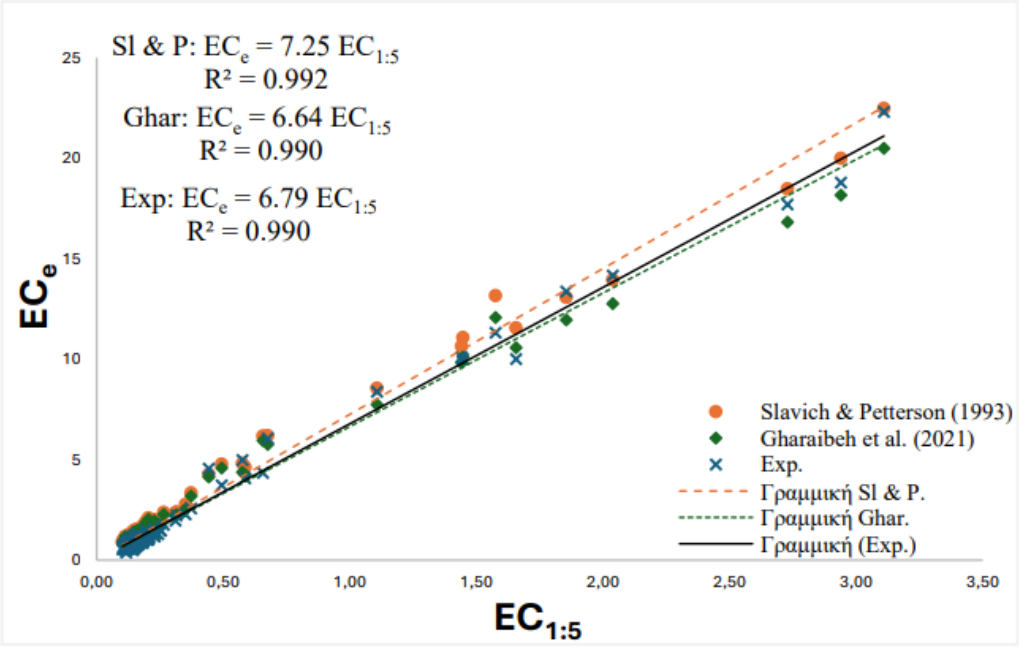
3.2 Πρόβλεψη της EC_e απο την $EC_{1:5}$ και τις εξισώσεις των Slavich and Petterson (1993) και Gharaibeh et al. (2021)

Εφαρμόζοντας τις τιμές των συντελεστών που προτάθηκαν απο τους Gharaibeh et al. (2021), στις εξισώσεις του συντελεστή μετατροπής CF (1) και του SP (2), πραγματοποιήθηκε η πρόβλεψη της EC_e απο την $EC_{1:5}$, σύμφωνα με την εξίσωση 3 (μοντέλο Ghar). Αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας τις τιμές m=2.46 και k=303 των Slavich and Petterson (1993) για την εκτίμηση του CF (Εξίσωση 1), και την εξίσωση για την πρόβλεψη του SP (Εξίσωση 2) με τιμές των συντελεστών που προτάθηκαν από τους Kargas et al., (2022), υπολογίστηκε η EC_e απο τις τιμές της $EC_{1:5}$ και την εξίσωση 3 (μοντέλο Sl &P). Το Σχήμα 1. δείχνει τη σχέση μεταξύ του SP% όπως εκτιμήθηκε πειραματικά (Observed SP%) και του SP% που προβλέφθηκε για τα εδάφη (Predicted SP%) απο την εξίσωση 2 και την εφαρμογή των τιμών στους συντελεστές, σύμφωνα με τους Kargas et al., (2022) και Gharaibeh et al. (2021).



Σχήμα 1. Η σχέση μεταξύ του πειραματικού SP% (Observed SP%) και του προβλεπόμενου SP% (Predicted SP%) απο την Εξίσωση 2 και τις τιμές συντελεστών των Kargas et al., (2022) (Kargas) και Gharaibeh et al. (2021) (Ghar).

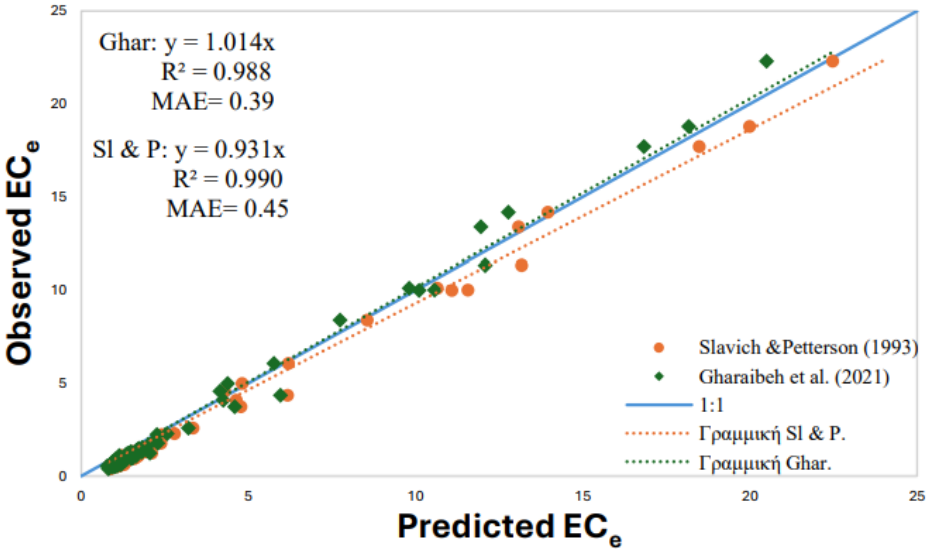
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, φαίνεται πως οι δύο εξισώσεις προβλέπουν την τιμή του SP με εξίσου μεγάλη αξιοπιστία (R^2 = 0.993), με την εξίσωση των Gharaibeh et al. (2021) ωστόσο, να δίνει χαμηλότερες τιμές SP απο τις πειραματικές (κλίση εξίσωσης=1.208), ενώ η εξίσωση με τις τιμές των Kargas et al. (2022) δίνει ελαφρώς υψηλότερες τιμές SP (κλίση εξίσωσης=0.968). Επιπλέον, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 2, η σχέση μεταξύ των μετρημένων τιμών της EC_e και της $EC_{1:5}$ είναι ισχυρά γραμμική, με συντελεστή συσχέτισης R^2=0.990.



Σχήμα 2. Η σχέση μεταξύ της $EC_{1:5}$ και της προβλεπόμενης EC_e απο την εξίσωση των Slavich and Petterson (1993) (Sl &P), των Gharaibeh et al. (2021) (Ghar) και της πειραματικής (Exp).EC_e.

Η τιμή του συντελεστή CF (6.64) που υπολογίστηκε σύμφωνα με τους Gharaibeh et al. (2021) για όλα τα εδάφη είναι αρκετά κοντά στην τιμή CF (6.79) της γραμμικής σχέσης (Exp) μεταξύ της EC_e που μετρήθηκε εργαστηριακά και της $EC_{1:5}$, ενώ για το μοντέλο των Sl&P, η τιμή του CF εμφανίζεται υψηλότερη (7.25). Παρόμοια αποτελέσματα μεταξύ των προβλεπόμενων CF και των τιμών CF των μοντέλων παρατηρήθηκαν κι απο τους Kargas et al. (2022), με τα χονδρόκοκκα εδάφη να εμφανίζουν υψηλότερες τιμές CF απο τα λεπτόκοκκα εδάφη και μέσης σύστασης εδάφη.

Απο τη συσχέτιση των προβλεπόμενων τιμών της EC_e (Predicted EC_e) των μοντέλων με τις πειραματικές (Observed EC_e) που απεικονίζεται στο Σχήμα 3, προέκυψε πως και τα δυο μοντέλα εμφανίζουν υψηλή ακρίβεια στην πρόβλεψη της εδαφικής αλατότητας, με τιμές συντελεστή συσχέτισης R^2 >0.988.



Σχήμα 3. Η σχέση μεταξύ της πειραματικής EC_e (Observed EC_e) και της προβλεπόμενης (Predicted EC_e) απο τις εξισώσεις των Slavich and Petterson (1993) (Sl &P), και Gharaibeh et al. (2021) (Ghar).

Αν και ο συντελεστής R^2 είναι υψηλότερος στο μοντέλο Sl&P (R^2=0.99), η μικρότερη τιμή του μέσου απόλυτου σφάλματος (MAE=0.39) και η κλίση της εξίσωσης (1.01) του μοντέλου Ghar, υποδηλώνουν πως το μοντέλο Ghar μπορεί να προβλέψει με ελαφρώς μεγαλύτερη αξιοπιστία τις εκτιμώμενες τιμές της εδαφικής αλατότητας, EC_e. Όπως παρατηρήθηκε, το μοντέλο Sl&P παρουσιάζει μια υπερεκτίμηση της EC_e σε όλο το εύρος των τιμών της, με συνολικά μεγαλύτερες τιμές σφάλματος MAE απο του μοντέλου Ghar, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στις υψηλότερες εκτιμήσεις CF. Ωστόσο, στα ιλυοαργιλώδη (SiC), ιλυοαργιλοπηλώδη (SiCL), ιλυοπηλώδη (SiL) και πηλώδη (L) εδάφη που εμφανίζουν τιμές αλατότητας, EC_e > 4.5 dSm^{-1}, το μοντέλο φαίνεται πως δίνει καλύτερες εκτιμήσεις της EC_e με μικρότερα σφάλματα MAE, συγκριτικά με το μοντέλο Ghar.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας έδειξαν πως το μοντέλο των Gharaibeh et al. (2021) είναι το πιο αξιόπιστο στις εκτιμήσεις της EC_e για όλους τους τύπους εδαφών που

εξετάστηκαν, με την επίδοσή του να υπερτερεί στις περιπτώσεις των μη αλατούχων και ελαφρώς αλατούχων εδαφών. Αντίθετα, σε λεπτόκκοκα και μέσης σύστασης εδάφη με υψηλά επίπεδα αλατότητας (EC_e > 4.5 dSm^{-1}) συνίσταται η χρήση της εξίσωσης CF με τις τιμές των Slavich and Petterson (1993) και η εξίσωση του ποσοστού κορεσμού SP%, όπως προσδιορίζεται απο τους Kargas et al. (2022).

Συμπερασματικά, η εδαφική αλατότητα (EC_e) μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία απο την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εκχυλίσματος σε αναλογία εδάφους-νερού 1:5 ($EC_{1:5}$) σε ελληνικά εδάφη, χρησιμοποιώντας απλές εμπειρικές σχέσεις και τη κοκκομετρική σύσταση του εδάφους. Η εφαρμογή του ποσοστού κορεσμού SP% που ενσωματώνει την περιεκτικότητα του εδάφους σε άμμο και άργιλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καλύτερη προσαρμογή του συντελεστή μετατροπής CF στα ειδικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής, βελτιώνοντας τις προβλέψεις της εδαφικής αλατότητας, EC_e και συμβάλλοντας στην ευκολότερη και ταχύτερη εκτίμηση της.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Butcher, K., Wick, A. F., De Sutter, T., Chatterjee, A., & Harmon, J. (2016). Soil salinity: a threat to global food security. Agronomy Journal, 108 (6), 2189–2200.

Corwin, D. L., & Yemoto, K. (2017). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. Methods of soil analysis, 2(1), 0.

He, Y., DeSutter, T., Prunty, L., Hopkins, D., Jia, X., & Wysocki, D. A. (2012). Evaluation of 1:5 soil to water extract electrical conductivity methods. Geoderma, 185–186, 12–17.

Gharaibeh, M.A., Albalasmeh, A.A. and Hanandeh, A.E. (2021). Estimation of saturated paste electrical conductivity using three modelling approaches: Traditional dilution extracts; saturation percentage and artificial neural networks. Catena, 200, 105141.

Kargas, G., Chatzigiakoumis, I., Kollias, A., Spiliotis, D., Massas, I., & Kerkides, P. (2018). Soil salinity assessment using saturated paste and mass soil: water 1:1 and 1:5 ratios extracts. Water, 10, 1589.

Kargas, G., Londra, P., & Sotirakoglou, K. (2022). The effect of soil texture on the conversion factor of 1: 5 soil/water extract electrical conductivity (EC 1: 5) to soil saturated paste extract electrical conductivity (ECe). Water, 14(4), 642.

Rayment, G. E., & Lyons, D. J. (2011). Soil chemical methods: Australasia (Vol. 3). Australian- Based Science and Technology Publishing

Slavich, P.G.; Petterson, G.H. (1993) Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1:5 soil, water suspensions and texture. Aust. J. Soil Res., 31, 73–81.

Sonmez, J. S., Buyuktas, D., Okturen, F., & Citak, S. (2008). Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2:5, 1:5) in soil salinity studies. Geoderma, 144, 361–369.

United States Salinity Laboratory. 1954. Diagnoses and Improvement of Saline and Alkali Soils; Agriculture Handbook No 60; USDA:Washington, DC, USA.

Wang, Y., Wang, Z. X., Lian, X. J., Xiao, H., Wang, L. Y., & He, H. D. (2011). Measurements of soil electrical conductivity in Tianjin coastal area. Tianjin Agricultural. Sci., 17, 18–21.

40. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ (INSECT FRASS ΚΑΙ ΚΟΠΡΙΑ ΠΟΥΛΕΡΙΚΩΝ) ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΜΑΚΡΟ- ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΤΥΠΟΥΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΜΕΛΙΤΖΑΝΑΣ (SOLANUM MELONGENA L.)

Ασπασία Γραμμένου[1], Νίκος Παπαδημητρίου[1], Χρίστος Ι. Ρούμπος[2], Χρήστος Γ. Αθανασίου[1], Γεώργιος Θαλασσινός[1], Έφη Λεβίζου[1] & Βασίλειος Αντωνιάδης[1]

[1] Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Φυτόκου, 38446, Βόλος e-mail: asgrammenou@uth.gr, athanassiou@uth.gr, thalassinosgeorgios@hotmail.gr, elevizou@uth.gr, antoniadis@uth.gr
[2] Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωπονίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, 30200, Μεσολόγγι e-mail: crumbos@upatras.gr

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη εξέτασε τις επιδράσεις δύο οργανικών εδαφοβελτιωτικών, των αποχωρημάτων εντόμων (insect frass) και της κοπριάς πουλερικών (poultry manure- PM), στη διαθεσιμότητα και απορρόφηση μακρο- και μικροθρεπτικών στοιχείων σε καλλιέργεια μελιτζάνας (*Solanum melongena* L.). Το πείραμα διεξήχθη σε γλάστρες με δύο ποικιλίες μελιτζάνας (Τσακώνικη και Λαγκαδά) που καλλιεργήθηκαν σε δύο διαφορετικούς τύπους εδαφών (πηλώδες και αμμώδες). Τα αποχωρήματα εντόμων εφαρμόστηκαν σε ποσοστά 0,5% και 1%, ενώ η PM σε 2,5% και 5%, ενώ χρησιμοποιήθηκαν ένας θετικός μάρτυρας (ανόργανο λίπασμα) και ένας αρνητικός μάρτυρας (χωρίς καμία προσθήκη). Και οι δύο μεταχειρίσεις αύξησαν τον οργανικό άνθρακα του εδάφους, με τη μεγαλύτερη αύξηση να παρατηρείται στο 5% PM στο πηλώδες έδαφος (3,19% έναντι 1,64% στον αρνητικό μάρτυρα). Η PM αύξησε σημαντικά την πρόσληψη Zn, ενώ τα αποχωρήματα εντόμων ενίσχυσαν την απορρόφηση Fe, ιδιαίτερα στην ποικιλία Λαγκαδά που καλλιεργήθηκε σε πηλώδες έδαφος. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα οργανικά εδαφοβελτιωτικά μπορούν να ενισχύσουν τη γονιμότητα του εδάφους και την πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων, ενώ παράλληλα αναδεικνύουν την ανάγκη για μακροπρόθεσμες έρευνες πεδίου για την πλήρη αξιολόγηση της ασφάλειάς τους σε καλλιεργούμενα εδάφη.

Αυτή η έρευνα χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα PRIMA της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έργο ADVAGROMED (PRIMA 2021 – Section 2).

Λέξεις κλειδιά: Ιχνοστοιχεία, μελιτζάνες, υγεία εδάφους, βιώσιμη γεωργία

IMPACT OF INSECT FRASS AND POULTRY MANURE ON MACRO- AND TRACE NUTRIENT AVAILABILITY IN TWO SOILS CULTIVATED WITH EGGPLANT (*SOLANUM MELONGENA* L.)

A. Grammenou[1*], N. Papadimitriou[1], C-I. Rumbos[2], C-G. Athanassiou[1], G Thalassinos[1], E. Levizou[1] & Vasileios Antoniadis[1]

*[1]Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446 Volos, Greece, * asgrammenou@uth.gr*
[2]Department of Agriculture, School of Agricultural Sciences, University of Patras, 30200, Messolonghi, Greece

ABSTRACT

This study examined the effects of two organic soil amendments, insect frass and poultry manure (PM), on the availability and uptake of macro- and micronutrients in eggplant (*Solanum melongena* L.) crops. The experiment was conducted in pots using two eggplant varieties (Tsakoniki and Lagada) grown in two different soil types (clay and sandy). Insect frass was applied at rates of 0.5% and 1%, while PM was applied at 2.5% and 5%. A positive control (inorganic fertilizer) and a negative control (no addition) were used. Both treatments increased soil organic carbon, with the largest increase observed in 5% PM in clay soil (3.19% vs. 1.64% in the negative control). The availability of macronutrients and their uptake by plants also improved in all treatments. PM significantly enhanced Zn uptake, while insect frass enhanced Fe absorption, particularly in the Lagada variety grown in clay soil. Overall, the findings suggest that organic soil amendments can enhance soil fertility and nutrient uptake, while also highlighting the need of long-term field studies to fully evaluate their safety in cultivated soils.
This research is funded by the European Union's PRIMA program, ADVAGROMED project (PRIMA 2021 – Section 2).

Keywords: trace elements; aubergines; soil health; sustainable agriculture

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιωσιμότητα και η ασφάλεια των τροφίμων αποτελούν παγκόσμια ανησυχία, καθώς η παρουσία δυνητικώς τοξικών στοιχείων (ΔΤΣ) στα τρόφιμα ενέχει κινδύνους για τη δημόσια υγεία. Τα ΔΤΣ, όπως βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή, είναι σημαντικοί ρύποι στα γεωργικά εδάφη λόγω της μη βιοαποικοδομησιμότητάς τους (Campos et al., 2021). Ο Fe, ο Zn και ο Cu είναι απαραίτητα μικροθρεπτικά για τα φυτά, ωστόσο σε αυξημένα επίπεδα προκαλούν τοξικότητα (Kaur et al., 2023). Η χρήση οργανικών υλικών συμβάλλει στη βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους, στη μείωση της βιοδιαθεσιμότητας των ΔΤΣ (De la Rosa et al., 2022). Μεταξύ αυτών, τα αποχωρήματα εντόμων, πλούσια σε N, P και K, προάγουν τη γονιμότητα και μειώνουν τη βιοδιαθεσιμότητα ιχνοστοιχείων, αν και η διαθέσιμη βιβλιογραφία παραμένει περιορισμένη (Antoniadis et al., 2023). Η PM αποτελεί επίσης πηγή θρεπτικών, βελτιώνει τις ιδιότητες του εδάφους αλλά μπορεί να προσθέσει ιχνοστοιχεία (Zhao et al., 2022).

Σκοπός της μελέτης ήταν η διερεύνηση της επίδρασης αποχωρημάτων εντόμων και PM στη διαθεσιμότητα Fe, Cu και Zn σε δύο τύπους εδάφους και στην πρόσληψή τους από δύο ποικιλίες μελιτζάνας, για την ανάπτυξη βιώσιμων στρατηγικών διαχείρισης εδάφους.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

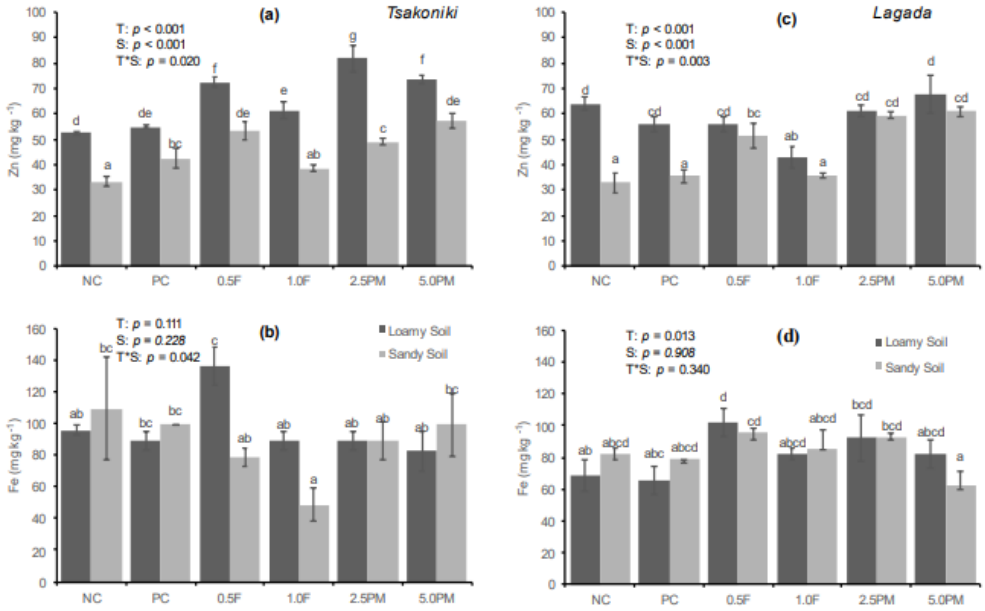
Το πείραμα πραγματοποιήθηκε για την αξιολόγηση της επίδρασης δύο τύπων εδάφους (πηλώδες και αμμώδες) και δύο οργανικών εδαφοβελτιωτικών (αποχωρήματα εντόμων και PM) στην ανάπτυξη δύο ποικιλιών μελιτζάνας (Λαγκαδά και Τσακώνικη). Σχεδιάστηκαν έξι μεταχειρίσεις: αρνητικός μάρτυρας (NC), θετικός μάρτυρας (PC) με ανόργανα λιπάσματα, εφαρμογές αποχωρημάτων εντόμων (0,5% και 1,0% w/v) και κοπριάς πουλερικών (2,5% και 5,0% w/v). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με 240 γλάστρες (12 L), σε εξωτερικό χώρο (Μάιος–Αύγουστος 2024). Κατά τη συγκομιδή συλλέχθηκαν φυτικά και εδαφικά δείγματα για αναλύσεις μακροθρεπτικών και ιχνοστοιχείων. Η στατιστική επεξεργασία έγινε με ANOVA δύο παραγόντων και δοκιμή Duncan.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σχετικά με τον οργανικό άνθρακα, παρατηρήθηκε αύξηση του ποσοστού OC% με τη μέγιστη βελτίωση να σημειώνεται μετά την προσθήκη 5% PM τόσο σε πηλώδες (3,19% έναντι 1,64% NC) όσο και σε αμμώδες έδαφος (1,92% έναντι 0,72% NC), αν και το μέγεθος της αλλαγής διέφερε. Η σημαντική αυτή αύξηση επιβεβαιώνει τη συμβολή οργανικών υλικών στην ενίσχυση της γονιμότητας του εδάφους.

Οι βιοδιαθέσιμες συγκεντρώσεις Zn, Fe και Cu επηρεάστηκαν τόσο από τη μεταχείριση όσο και από τον τύπο εδάφους Στην Τσακώνικη, ο Zn στο πηλώδες αυξήθηκε από 1,92 (NC) σε 14,59 και 22,01 mgkg^{-1} (2.5PM, 5.0PM) και στο αμμώδες από 0,80 σε 6,28 και 20,20 mg kg^{-1}. Ο Fe στο πηλώδες αυξήθηκε από 3,71 σε 11,07 mg kg^{-1} (5.0PM), 7,72 mg kg^{-1} (0.5F) και 11,74 mg kg^{-1} (1.0F), ενώ στο αμμώδες οι διαφορές ήταν περιορισμένες. Ο Cu παρουσίασε μικρές αυξήσεις με μέγιστο 1,07 mg kg^{-1} στο πηλώδες έδαφος. Στην ποικιλία Λαγκαδά, η τάση ήταν παρόμοια, με τον Zn να φτάνει 19,20 mg kg^{-1} (πηλώδες, 5.0PM) και Fe 17,77 mg kg^{-1}, ενώ ο Cu αυξήθηκε 0,91 mg kg^{-1} στο πηλώδες**.** Η υψηλή βιοδιαθέσιμη συγκέντρωση μετά την εφαρμογή PM αποδίδεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυτή οργανική ύλη και στη μείωση του pH, που ενισχύει την κινητικότητα των στοιχείων (Yang et al. 2024; Tzouvalekas et al. 2024). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί και σε καλλιέργεια καλαμποκιού μετά από εφαρμογή κοπριάς πουλερικών (Mohseni et al. 2022)

Η υπέργεια βιομάζα ακολούθησε παρόμοια τάση, με υψηλότερες τιμές Zn στο πηλώδες (μέγιστο 81,98 mg kg^{-1}, 2.5PM) (Σχήμα 1), αυτή η αύξηση πιθανόν να σχετίζεται με την αυξημένη διαθεσιμότητα Zn στο έδαφος μετά την εφαρμογή των οργανικών υλικών. Τα αποχωρήματα εντόμων βελτίωσαν την πρόσληψη Fe στο πηλώδες, 0.5F (102,23 mg kg^{-1}) έναντι NC (68,75 mg kg^{-1}) και PC (65,40 mg kg^{-1}), ενώ στο αμμώδες οι διαφορές δεν ήταν σημαντικές. Ο Cu δεν ανιχνεύθηκε σε καμία υπέργεια βιομάζα.



Σχήμα 1. Συγκέντρωση Zn και Fe στην υπέργειαβιομάζα υπό διαφορετικές μεταχειρίσεις για τις δύο ποικιλίες. Τσακώνικη: (a) Zn, (b) Fe και Λαγκαδά: (c) Zn, (d) Fe, σε mg kg^{-1}

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τόσο τα αποχωρήματα εντόμων όσο και η PM αύξησαν το %OC και τη διαθεσιμότητα ιχνοστοιχείων στο έδαφος. Και τα δύο υλικά βελτίωσαν τη διαθέσιμη μορφή Zn, Fe και Cu, με τη 2,5% PM να επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη πρόσληψη του Zn στην ποικιλία Τσακώνικη. Το 0,5F ενίσχυσε την πρόσληψη Fe από την ποικιλία Λαγκαδά σε πηλώδες έδαφος. Ο Cu δεν ανιχνεύθηκε στην υπέργεια βιομάζα των φυτών, υποδηλώνοντας περιορισμένη μεταφορά του στα υπέργεια μέρη. Συνολικά, τα οργανικά πρόσθετα βελτιώνουν τη γονιμότητα και τη θρέψη των φυτών.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Antoniadis, V., A. Molla, A. Grammenou, V. Apostolidis, C. G. Athanassiou, C. I. Rumbos, and E. Levizou. 2023. *Insect frass as a novel organic soil fertilizer for the cultivation of spinach (Spinacia oleracea): Effects on soil properties, plant physiological parameters, and nutrient status.* Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23(4):5935–5944

Campos, P., H. Knicker, A. Z. Miller, M. Velasco-Molina, and J. M. De la Rosa. 2021. *Biochar ageing in polluted soils and trace elements immobilisation in a 2-year field experiment.* Environmental Pollution, 290:118025.

De la Rosa, J. M., A. Santa-Olalla, P. Campos, R. López-Núñez, J. A. González-Pérez, G. Almendros, H. E. Knicker, A. Sánchez-Martín, E. Fernández-Boy. 2022. *Impact of biochar amendment on soil properties and organic matter composition in trace element-contaminated soil.* International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(4):Article 4

Kaur, H., H. Kaur, H. Kaur, and S. Srivastava. 2023. *The beneficial roles of trace and ultratrace elements in plants.* Plant Growth Regulation, 100(2):219–236.

Mohseni, A., S. Heidari, B. Raei, S. A. Moftakharzadeh, and S. Bidast. 2022. *Determination of poultry manure and plant residues effects on Zn bioavailable fraction in contaminated soil via dgt technique.* Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 82(1):72–81.

Tziouvalekas, M., C. Noulas, G. Thalassinos, S. M. Shaheen, J. Rinklebe, and V. Antoniadis. 2024. *Temperature-induced changes in DTPA-extractable trace elements: Predicting the potential impact of climate change on the availability of soil elements.* Chemosphere, 350: 141064.

Yang, W., Y. Zhu, Y. Jiang, J. Zhang, W. Wang, Y. Jin, X. Liu, and J. Qu. 2024. *Dissolve organic matter of mature chicken compost contributes to the protection of microorganisms from the stress of heavy metals.* Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(5):113590.

Zhao, W., J. Deng, S. Chi, W. Wang, L. Xu, Q. Huang, Y. Zhang, X. Yu, J. Xu, Y. Chen, and W. Xu. 2022. *Sustainability assessment of topsoil ecology in Chongqing, China based on the application of livestock and poultry manure.* Journal of Cleaner Production, 358:131969.

41. ΤΥΧΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΗΝ VADOSE ZONE: Ο ΧΑΛΚΟΣ ΣΕ ΕΛΑΙΩΝΑ ΩΣ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Ασνιέντα Ζίκα, Βασίλειος Σωτηρίου, Γεωργία Φούντα, Μαρία Παπαδάκη, Βλασούλα Μπεκιάρη & Ευάγγελος Γιαννακόπουλος

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωπονίας, Νέα Κτίρια, 30200,Μεσολόγγι, E-mail: vgiann@upatras.gr

Περίληψη

Στην σημερινή εποχή η μεγάλη γεωργική χρήση του Cu ως φυτοπροστατευτικό και η συσσώρευσή του στην εδαφική μήτρα έχει οδηγήσει σε αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με την τύχη του στο εδαφικό περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία διερευνάται η τύχη του Cu στην vadose zone με προσομοίωση της μεταφοράς του σε κατακόρυφη εδαφική κυλινδρική στήλη ύψους 10cm και κυκλικής διατομής 2.5cm που πληρώνεται με κονιοποιημένο εδαφικό δείγμα διαμέτρου κόκκων < 2mm που συλλέχθηκε από ελαιώνα στη Δυτική Ελλάδα. Οι φυσικοχημικές μετρήσεις του εδαφικού δείγματος έδειξαν ότι πρόκειται για πηλώδες ελαφρώς αλκαλικό έδαφος, pH=7.30. Για την παραγωγή των καμπυλών έκλουσης ως ιχνηθέτης χρησιμοποιήθηκε διάλυμα 0.3M KBr και ως ρύπος διάλυμα 0.2M $CuSO_4$. Η ροή με την οποία τιτλοδοτούνταν η στήλη από τα διαλύματα ήταν 7 σταγόνες/min. Για την παραγωγή των καμπυλών έκλουσης προσαρμόστηκε η εξίσωση Fick με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος STANMOD CXTFIT 2.0 στα πειραματικά σημεία συγκέντρωσης-χρόνου των διαλυμάτων έκλουσης τα οποία λαμβάνονταν κάθε ½ h από τη στήλη. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδωσαν για το Cu τιμές παραμέτρων: u=0.1cm/min, D=0.0017cm^2/min, R=0.815, b=0.7 και ω=874 h^{-1} περίπου ίδιες με αυτές που λαμβάνονταν για την περίπτωση του ιχνηθέτη, KBr. Αυτό αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι ο Cu δεν προσροφάται ισχυρά από την εδαφική μήτρα και εύκολα διαπερνά με μηχανισμό μεταγωγής την vadose zone κινούμενος προς τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Το γεγονός αυτό δύναται να αποδοθεί κυρίως στην υδρόλυση των ιόντων Cu^{2+} από το ελαφρώς αλκαλικό pH του εδάφους. Συμπερασματικά, η χρήση χαλκούχων σκευασμάτων ως φυτοπροστατευτικά σε καλλιέργειες που εγκαθίστανται σε αλκαλικά εδάφη πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή μιας και η τύχη του Cu επιβαρύνει τον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής απειλώντας συνολικά όλο το αγροβιοσύστημα συμπεριλαμβάνοντας και τον άνθρωπο ως τελικό αποδέκτη.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρύπανση του αέρα, του εδάφους και των υδάτων, από ανόργανους και οργανικούς ρύπους, αποτελεί επί του παρόντος ένα σοβαρό περιβαλλοντικό ζήτημα (Schnoor, 2016). Τα μη αποικοδομήσιμα στοιχεία, όπως τα βαρέα μέταλλα (Harmsen, 1977), είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα λόγω της βιοσυσσώρευσής τους στις εδαφικές και φυτικές μήτρες (Iskandar & Selim, 1999). Αυτό λαμβάνει χώρα στην περιοχή της ακόρεστης ζώνης (γνωστή ως vadose zone) που εκτείνεται από το φυτό έως τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα (Iskandar & Selim, 1999). Ο Cu, ως ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα βαρέα μέταλλα ως φυτοπροστατευτικό στη γεωργία, άλλοτε προσροφάται από εδάφη και άλλοτε μέσω μεταγωγής και διασποράς καταλήγει στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα (Schnoor, 1996). Η αξιολόγηση της προσρόφησης και η τύχη της μεταφοράς του Cu σε εδαφικές μήτρες προσομοιώνεται συνήθως μέσω πειραμάτων στήλης και προσαρμογής μοντέλων μεταγωγής-διασποράς (Barros, 2023), όπως της εξίσωσης Fick (εξ-1), με χρήση

κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων και στατικών κριτηρίων που επιλύουν αριθμητικά εξισώσεις μεταφοράς προσαρμόζοντας τις παραμέτρους μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και του αλγορίθμου Levenberg-Maquardt.

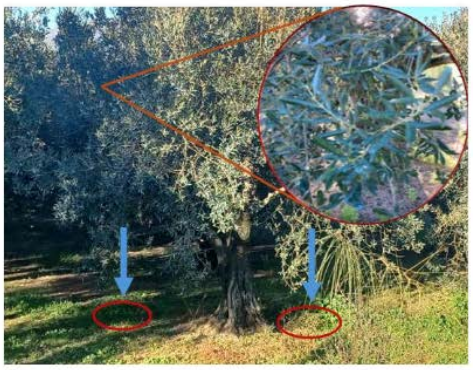
$$R\frac{\partial c_r}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c_r}{\partial z^2} - u\frac{\partial c_r}{\partial z} - \mu c_r + \gamma(x) \quad (\varepsilon\xi - 1)$$

όπου:

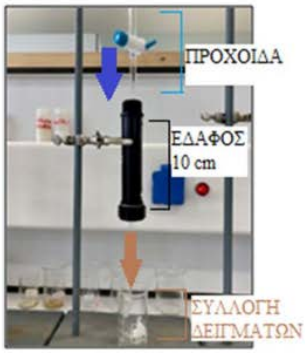
$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}, \qquad \beta = \frac{\theta + \rho_d f K_d}{\theta + \rho_d K_d}, \qquad \omega = \frac{\alpha(1-\beta)RL}{u}$$

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση της τύχης του Cu στην vadose zone για την περίπτωση ενός ελαιώνα (Holden & Fierer, 2005). Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης δύναται να αξιοποιηθούν για την εκτίμηση του βαθμού κινητικότητας και βιοσυσσώρευσης του Cu στην vadose zone αλλά και ως ένα μέτρο οικοτοξικότητας και υγείας του εδάφους στα πλαίσια της αειφόρου γεωργίας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ



Εικ. 1. Τοποθεσία δειγματοληψίας



Εικ. 2. Πειραματική εργαστηριακή διάταξη στήλης

Δείγματα εδάφους ελήφθησαν από ελαιώνα της περιοχής Κεφαλόβρυσου, Αιτωλικού στη Δυτική Ελλάδα (38° 27' 34", 21° 21' 54") (mapcarta.com). Η δειγματοληψία έγινε με τη μέθοδο «Z» χρησιμοποιώντας δειγματολήπτη χειρός 10cm (Εικ. 1). Τα δείγματα εδάφους μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο όπου ξηράθηκαν και κονιοποιήθηκαν για εδαφολογική ανάλυση και την πλήρωση της στήλης (Εικ.2). Η χρησιμοποιούμενη πειραματική εργαστηριακή διάταξη στήλης της Εικ 2 αποτελούνταν από μια κυλινδρική στήλη που πληρώνονταν με κονιοποιημένο έδαφος διαμέτρου κόκκων<2mm ιδίας πυκνότητας με αυτή του εδάφους ενώ η προχοΐδα πληρώνονταν με διαλύματα ιχνηθέτη και ρύπου. Για την παραγωγή των καμπυλών έκλουσης ως ιχνηθέτης χρησιμοποιήθηκε διάλυμα 0.3M KBr και ως ρύπος διάλυμα 0.2M $CuSO_4$. Η ροή με την οποία τιτλοδοτούνταν η στήλη από τα ανωτέρω διαλύματα ήταν 7 σταγόνες/min (ισοδύναμη με αυτή μιας ήπιας σταγονικής βροχόπτωσης) και η συλλογή των εκλουόμενων δειγμάτων γίνονταν κάθε 1/2h.

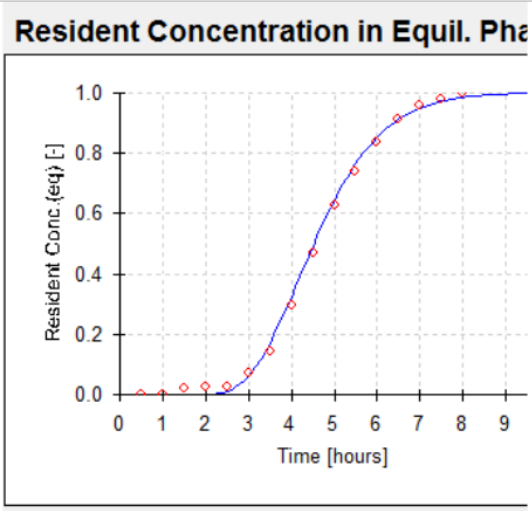
Για τη μελέτη της μεταφοράς του ιχνηθέτη και του ρύπου μέσα στη στήλη εφαρμόστηκε το κλασικό μοντέλο της μονοδιάστατης μεταφοράς διαλυμένων ουσιών σε ομογενή μήτρα (Convection-Dispersion Equation, CDE) (εξ-2), η οποία σύμφωνα με τους Radcliffe & Šimůnek (2018) αποτελεί τροποποίηση του Fick (εξ-1).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta c_r + \rho_b s) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\theta D \frac{\partial c_r}{\partial x} - J_w c_r\right) - \theta \mu_\ell c_r - \rho_b \mu_s + \theta \gamma_\ell(z) + \rho_b \gamma_s(z) \quad (\xi\xi - 2)$$

Στα πειραματικά σημεία συγκέντρωση-χρόνος έκλουσης για τον ιχνηθέτη KBr και τον Cu^{2+} προσαρμόστηκε το μοντέλο deterministic nonequlibrium (CDE), χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα STANMOD CXTFIT 2.0 (Toride et al., 1995)

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

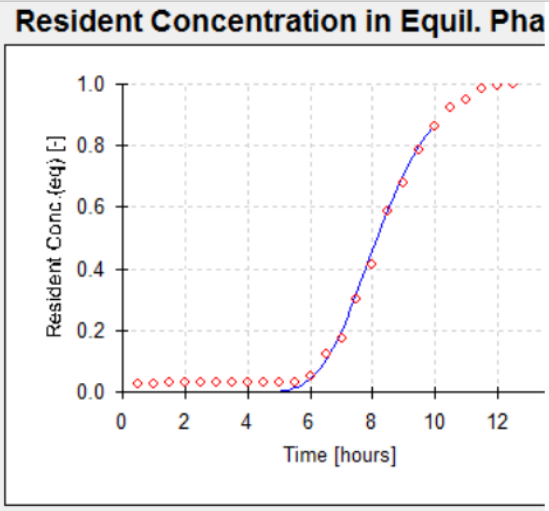
Η εδαφολογική ανάλυση των δειγμάτων έδωσε: μηχανική σύσταση (άμμος=19.26%, πηλός= 42.74%, ιλύ=38%), pH(1/2.5)=7.30 και πυκνότητα εδάφους 2.03 g/cm^3. Στο Διάγραμμα 1 & 2 απεικονίζεται η προσαρμογή της τροποποιημένης εξίσωσης Fick (εξ- 2) στα πειραματικά σημεία που αναπαριστούν τη χρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης στα εκλουόμενα δείγματα για την περίπτωση του ιχνηθέτη KBr και του μετάλλου Cu αντίστοιχα.



Διάγραμμα 1. Καμπύλη προσαρμογής της εξίσωσης Fick στα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση του ιχνηθέτη KBr μέσω χρήσης του προγράμματος STANMOD

Type of Model: Deterministic nonequilibrium

u= 0.1 (cm/min)
D= 0.0037 (cm^2/min)
R= 0.452 (αδιάστατο μέγεθος)
Beta= 0.61 (αδιάστατο μέγεθος)
Omega= 174 (1/h)



Διάγραμμα 2. Καμπύλη προσαρμογής της εξίσωσης Fick στα πειραματικά αποτελέσματα για την περίπτωση του ρύπου Cu με χρήση του προγράμματος STANMOD

Type of Model: Deterministic nonequillibrium

u= 0.1 (cm/min)
D= 0.0017 (cm^2/min)
R= 0.815 (αδιάστατο μέγεθος)
Beta= 0.7 (αδιάστατο μέγεθος)
Omega= 874 (1/h)

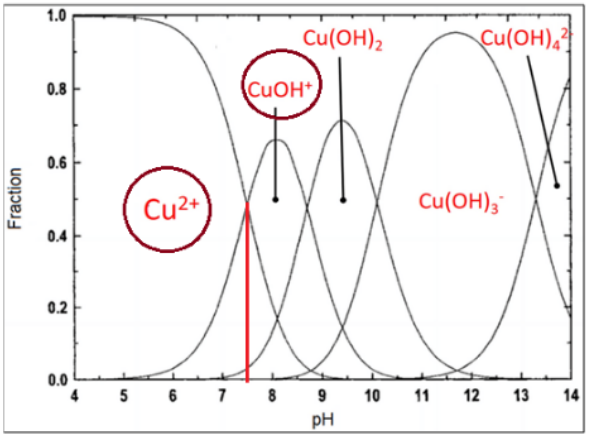
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι ο ιχνηθέτης KBr παρουσιάζει εύρος ζώνης μεταφοράς περίπου 3.5h ενώ ο Cu γύρω στις 5h, με την καμπύλη έκλουσης του Cu να είναι μετατοπισμένη χρονικά κατά 1.5h σε σχέση με αυτή του ιχνηθέτη. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Διάγραμμα 1 & 2) έδωσαν για το Cu τιμές παραμέτρων κινητικότητας και διασποράς: u=0.1cm/min, D=0.0017cm^2/min, R=0.815, b=0.7 και ω=874 h^{-1} περίπου ίδιες

με αυτές που λαμβάνονταν για την περίπτωση του ιχνηθέτη, KBr αποκαλύπτοντας ότι η τύχη του Cu, κατά την διέλευσή του μέσα από την εδαφική μήτρα είναι ίδια με αυτή του ιχνηθέτη KBr, κάτι το οποίο προμηνύεται από το ίδιο περίπου πλάτος ζώνης μεταφοράς (βλέπε Διάγραμμα 1 & 2).

Συνέπεια αυτού είναι ο Cu να προσροφάται ελάχιστα στην εδαφική μήτρα, και εύκολα να διαπερνά την vadose zone κινούμενος προς τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα κυρίως με μεταγωγή λόγω της εξαιρετικά μικρής τιμής D (Cao & Yang *et al.*,2021). Η μη προσρόφηση του Cu από την vadose zone μπορεί να αποδοθεί στην υδρόλυση (εξ-3) του Cu από το ελαφρώς αλκαλικό pH του εδάφους (Εικ. 3), όπου σε pH =7.30 το 50% του χαλκού είναι υδρολυμένο: $Cu^{2+} + H^{+}\text{-}OH^{-} \rightarrow (CuOH)^{+} + H^{+}$ (εξ-3)

Σύμφωνα με την Εικ. 3 η διαθεσιμότητα του Cu^{2+} σε ιοντική μορφή είναι αυξημένη σε όξινα εδάφη, ενώ μειώνεται δραματικά σε αλκαλικά περιβάλλοντα όπου υδρολύεται (εξ-3) δημιουργώντας $(CuOH)^{+}$ που δεν έχουν την ίδια χημική συγγένεια με αυτή των ιόντων Cu^{+} και αλληλεπιδρούν ασθενώς με την εδαφική μήτρα (Sharma et al., 2009).



Εικ. 3. Διαφοροποίηση του Cu με βάση το pH

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι το pH της εδαφικής μήτρας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την τύχη του Cu στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, σε αλκαλικά εδάφη η τύχη του Cu ακολουθεί αυτή του ιχνηθέτη, δηλαδή μεταφέρεται με μεταγωγή εντός της vadose zone απειλώντας τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Συμπερασματικά, η χρήση χαλκούχων σκευασμάτων ως φυτοπροστατευτικά σε αλκαλικά εδάφη πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή μιας και η συσσώρευση του συγκεκριμένου μετάλλου δύναται να επιβαρύνει τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής απειλώντας συνολικά όλο το αγροβιοσύστημα. Τα ευρήματα της έρευνας παρέχουν πολύτιμα δεδομένα για την κατανόηση της συμπεριφοράς και της αλληλεπίδρασης του ιχνηθέτη και του ρύπου με την εδαφική μήτρα

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Barros, V. H. D. O., Alves, A. T. A., Santos, S. M. D., Coutinho, A. P., Lassabatere, L., Gondim, M. V. S., & Antonino, A. C. D. (2023). Cadmium and copper transport in alluvial soils in the Brazilian semiarid region: column percolation and modeling. Rev Bras Cienc Solo. 2023;47:e0220153 https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220153

Cao, Y., Dong, S., Dai, Z., Zhu, L., Xiao, T., Zhang, X., ... & Soltanian, M. R. (2021). Adsorption model identification for chromium (VI) transport in unconsolidated sediments. Journal of Hydrology 598(1–3):126228, DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.126228

Harmsen, K. (1977) Behavior of Heavy Metals in Soils. Centre of Agriculture Publishing and Documentation. Wageninger, https://edepot.wur.nl/308779

Holden, P. A., & Fierer, N. (2005). Microbial Processes in the Vadose Zone. Vadose Zone

Journal (2005) 4 (1): 1–21. https://doi.org/10.2113/4.1.1
Skandar, I. K., & Selim, H. M. (1999). Fate and transport of heavy metals in the vadose zone. 1st Edition, Lewis Publishers
Schnoor J. (2016) Environmental Modeling. Fate and Transport of Pollutants in Water, Air and Soil, 2nd Edition
Sharma, S. K., Sehkon, N. S., Deswal, S., & John, S. (2009). Transport and fate of copper in soils. International Journal of Environmental Science and Engineering 1:1 2009

42. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ ΧΑΛΚΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΝΝΑΒΗ (CANNABIS SATIVA L.)

Δ. Αλεξιάδης[1], Ι. Μπεθάνης [1], Ρ. Βόγια[1], Α. Γιάννογλου[1], Χ. Αδαμαντίδου[1], Α. Βόκας[1], Ε. Τάτση[1], Π. Τζιούρρου [1], Β. Λιάβα [1,2], Σ. Παπαδήμου[1], Ι. Πανώρας[3], Ε. Τσαλίκη[3] & Ε. Ε. Γκόλια[1]

[1] *Εργαστήριο Εδαφολογίας, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πανεπιστημιούπολη, 54124 Θεσσαλονίκη, email: egolia@auth.gr*
[2] *Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 38446 Βόλος*
[3] *Ινστιτούτο Βελτίωσης Φυτών και Γενετικών Πόρων, ΕΛΓΟ Δήμητρα, Θέρμη 57001 Θεσσαλονίκη*

Περίληψη

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η επίδραση της παρουσίας γεωυφάσματος στην ικανότητα συσσώρευσης Cu από τη βιομηχανική κάνναβη και η πιθανή εφαρμογή της στη φυτοαποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε πλήρως τυχαιοποιημένο πείραμα, με έδαφος μέτρια ρυπασμένο με Cu, στο οποίο προστέθηκαν θραύσματα γεωυφάσματος (5–20 mm) καθώς και διαλύματα Cu σε συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στα ανώτατα επιτρεπτά όρια της ΕΕ. Η συσσώρευση του Cu εντοπίστηκε κυρίως στη ρίζα, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο βασικός μηχανισμός αποκατάστασης ήταν η φυτοσταθεροποίηση. Η παρουσία γεωυφάσματος αύξησε την ικανότητα συσσώρευσης του χαλκού έως και 5,69 φορές. Παράλληλα, καταγράφηκε αύξηση στην περιεκτικότητα σε κανναβιδιόλη (CBD) και τετραϋδροκανναβινόλη (THC), ιδιαίτερα στις μεταχειρίσεις με χαλκό. Η βιομηχανική κάνναβη αποδείχθηκε ανθεκτική στην καλλιέργεια υπό συνθήκες ρύπανσης με βαρέα μέταλλα και παρουσία γεωυφάσματος, παρουσιάζοντας υψηλή ικανότητα φυτοσταθεροποίησης και παράλληλα αυξημένη παραγωγή δευτερογενών μεταβολιτών.

EFFECT OF PLASTICS ON COPPER ACCUMULATION BY INDUSTRIAL HEMP

D. Alexiadis[1], I. Bethanis[1], R. Vogia[1], A. Giannoglou[1], C. Adamantidou[1], A. Vokas[1], E. Tatsi[1], P. Tziourou[1], V. Liava [1], S.G. Papadimou[1], I. Panoras[3], E. Tsaliki[3] & E. E. Golia[1]

[1]Soil Science Laboratory, Department of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, University Campus, 54124 Thessaloniki, email: egolia@auth.gr
[2]Department of Agriculture, Plant Production, University of Thessaly, 38446 Volos
[3]Institute of Plant Improvement and Genetic Resources, ELGO Dimitra, Thermi 57001 Thessaloniki

ABSTRACT

In this study, the effect of geotextile presence on the Cu accumulation capacity of industrial hemp and its potential application in the phytoremediation of contaminated soils was investigated. For this purpose, a completely randomized experiment was conducted with soil moderately contaminated with Cu, to which geotextile fragments (5–20 mm) and Cu solutions at concentrations corresponding to the maximum permissible limits of the EU were added. Cu accumulation was mainly detected in the roots, indicating that the main remediation mechanism was phytostabilization. The presence of geotextile increased the copper accumulation capacity by up to 5.69 times. At the same time, an increase in cannabidiol (CBD) and tetrahydrocannabinol (THC) content was recorded, particularly in copper treatments. Industrial hemp proved to be resistant to cultivation under conditions of heavy metal pollution and the presence of geotextile, exhibiting high phytostabilization capacity and increased production of secondary metabolites.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρύπανση του εδάφους με βαρέα μέταλλα αποτελεί σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα, καθώς επηρεάζει τη γονιμότητα του εδάφους και εγκυμονεί κινδύνους για τη δημόσια υγεία (Nagajyoti et al., 2010). Μέταλλα όπως το κάδμιο (Cd) και ο μόλυβδος (Pb) που είναι τοξικά, αλλά και ο χαλκός (Cu) και ο ψευδάργυρος (Zn) είναι δυνατό σε υψηλές συγκεντρώσεις να προκαλέσουν κινδύνους, καθώς μπορούν να συσσωρευτούν στην τροφική αλυσίδα. Παράλληλα, τα πλαστικά και ειδικά τα μικροπλαστικά, που προέρχονται από γεωργικά υλικά όπως γεωυφάσματα, αποτελούν νέο αναδυόμενο ρύπο, επηρεάζοντας τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, αλλά και τη διαθεσιμότητα των μετάλλων (Golia et al., 2024). Η συνύπαρξη βαρέων μετάλλων και πλαστικών δημιουργεί πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις που μεταβάλλουν τη βιοδιαθεσιμότητα των ρύπων. Η φυτοαποκατάσταση έχει αναδειχθεί σε πολλά υποσχόμενη μέθοδο για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, με τη βιομηχανική κάνναβη (*Cannabis sativa L.*) να ξεχωρίζει για την ικανότητα απορρόφησης και σταθεροποίησης μετάλλων χωρίς σημαντική μείωση της παραγωγικότητας (Quagliata et al., 2021).

2. ΘΕΩΡΙΑ

Η ρύπανση του εδάφους από βαρέα μέταλλα αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν τόσο από φυσικές πηγές όσο και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η εξόρυξη, η γεωργία και η βιομηχανική παραγωγή (Golia et al., 2023). Τα βαρέα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος (Pb), το κάδμιο (Cd), ο χαλκός (Cu) και το χρώμιο (Cr), είναι ιδιαίτερα τοξικά ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις, καθώς δεν βιοδιασπώνται και συσσωρεύονται στο περιβάλλον (Nagajyoti et al., 2010). Οι επιπτώσεις τους είναι πολλαπλές, επηρεάζοντας τη φωτοσύνθεση και τη θρεπτική ισορροπία των φυτών τη μικροβιακή δομή και τον κύκλο θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος (Wu et al., 2025), αλλά και τη δημόσια υγεία, μέσω της τροφικής αλυσίδας, προκαλώντας σοβαρές ασθένειες όπως καρκίνο και νευρολογικές διαταραχές (Nagajyoti et al., 2010). Παράλληλα, η παρουσία πλαστικών στο έδαφος αποτελεί έναν νέο αναδυόμενο κίνδυνο, καθώς αλλάζει τις φυσικοχημικές ιδιότητες, όπως το pH και η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων όπως το Cd και το Zn (Golia et al., 2024). Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορούν να προσροφήσουν τοξικές ουσίες και να μεταφέρουν παθογόνους μικροοργανισμούς, επιβαρύνοντας τη βιολογική δραστηριότητα και τη γονιμότητα του εδάφους (Tziourrou & Golia 2024).). Σε αυτό το πλαίσιο, η φυτοαποκατάσταση αναδεικνύεται σε μία από τις πιο βιώσιμες μεθόδους διαχείρισης, καθώς φυτά όπως η βιομηχανική κάνναβη μπορούν να συσσωρεύουν ρύπους, μειώνοντας την επικινδυνότητά τους και συμβάλλοντας στην αποκατάσταση μολυσμένων εδαφών (Quagliata et al., 2021).

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την εκπόνηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 66 γλάστρες με αγροτικό έδαφος προερχόμενο από την περιοχή της Θεσσαλονίκης, μέτρια ρυπασμένο με χαλκό (Cu). Στο έδαφος καλλιεργήθηκε βιομηχανική κάνναβη ποικιλίας *Fedora 17*. Προστέθηκαν θραύσματα γεωυφάσματος διαστάσεων 5–20 mm, ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες διάβρωσης πλαστικών υλικών που χρησιμοποιούνται για εδαφοκάλυψη. Παράλληλα, το έδαφος επιμολύνθηκε με διαλύματα μετάλλων (Cu, Zn, Cd) και συνδυασμών αυτών, σε συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στα ανώτατα επιτρεπτά όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Κατά την καλλιέργεια πραγματοποιήθηκαν αγρονομικές μετρήσεις (χλωροφύλλη, ύψος, μορφολογικά χαρακτηριστικά) και στη συνέχεια έγιναν εργαστηριακές αναλύσεις για τον προσδιορισμό συγκεντρώσεων μετάλλων στο έδαφος και στους φυτικούς ιστούς, καθώς και για την εκτίμηση των δευτερογενών μεταβολιτών (CBD, THC).

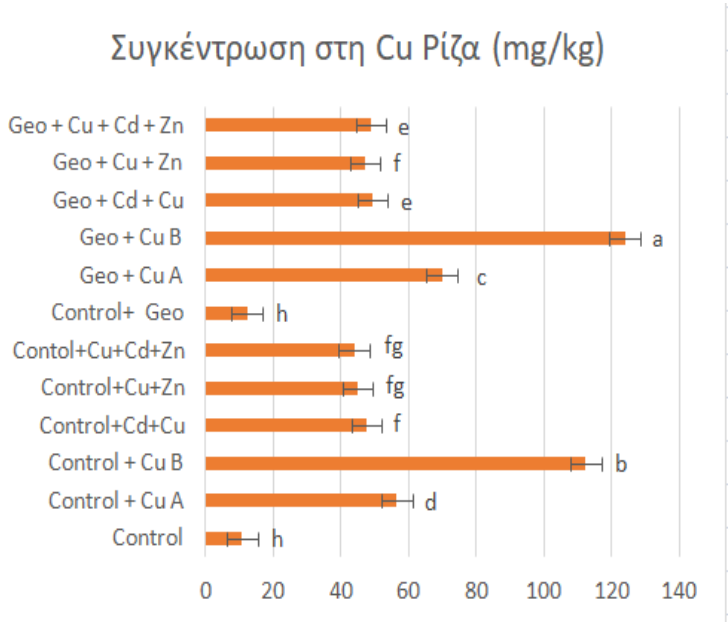
3.1 Εργαστηριακές αναλύσεις

Για την αξιολόγηση των εδαφικών και φυτικών δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σειρά εργαστηριακών αναλύσεων. Αρχικά, το pH του εδάφους μετρήθηκε σε αιώρημα εδάφους-νερού αναλογίας 1:2,5, με βαθμονόμηση του pH-μέτρου σε ρυθμιστικά διαλύματα (Walkley and Black, 1934). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) προσδιορίστηκε με αγωγιμόμετρο σε αιώρημα εδάφους-νερού 1:1, μετά από φυγοκέντρηση και διήθηση (Rhoades, 1996). Η κοκκομετρική σύσταση μετρήθηκε με τη μέθοδο του πυκνόμετρου Βουγιούκου, που επιτρέπει τον υπολογισμό των ποσοστών άμμου, ιλύος και αργίλου (Bouyoucos, 1962).

Για την εκτίμηση της ρύπανσης, οι ψευδο-ολικές συγκεντρώσεις των μετάλλων (Cu, Zn, Cd) προσδιορίστηκαν με εκχύλιση σε βασιλικό νερό και φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης (Golia et al., 2024). Παράλληλα, οι διαθέσιμες συγκεντρώσεις των ίδιων μετάλλων μετρήθηκαν μετά από εκχύλιση με διάλυμα DTPA (Dimirkou et al., 2009). Τέλος, η περιεκτικότητα της ξηρής βιομάζας των φύλλων σε κανναβινοειδή (CBD, THC) αναλύθηκε με αέρια χρωματογραφία, σύμφωνα με τα πρωτόκολλα της ΕΕ (Κανονισμός 809/2014) (Tsaliki et al., 2021).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην περίπτωση του χαλκού (Cu), τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βιομηχανική κάνναβη παρουσίασε σημαντικά αυξημένη ικανότητα συσσώρευσης στους ριζικούς ιστούς όταν συνυπήρχε γεωύφασμα στο έδαφος. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αύξηση της συσσώρευσης κατά 5,69 φορές σε σχέση με το μάρτυρα όταν υπήρχε μόνο χαλκός με γεωύφασμα, 3,85 φορές όταν συνυπήρχαν χαλκός και ψευδάργυρος, 4,01 φορές όταν υπήρχαν χαλκός και κάδμιο, και 3,98 φορές όταν το έδαφος περιείχε και τα τρία μέταλλα μαζί με γεωύφασμα. Τα δεδομένα αυτά καταδεικνύουν ότι ο χαλκός συσσωρεύεται κυρίως στις ρίζες, ενισχύοντας τον μηχανισμό της φυτοσταθεροποίησης, ενώ το υπέργειο τμήμα του φυτού παραμένει με χαμηλότερες συγκεντρώσεις, γεγονός που το καθιστά αξιοποιήσιμο για βιομηχανική χρήση.

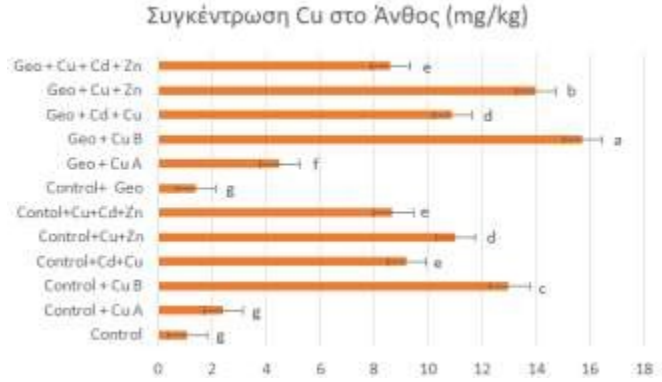


Εικόνα 1. Σύγκριση Cu (mg/kg) στις ρίζες μεταξύ δειγμάτων, με και χωρίς γεωύφασμα. Τα γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Στην παραπάνω εικόνα (1) η ανάλυση έδειξε ότι η συγκέντρωση χαλκού (Cu) στη ρίζα της κάνναβης ήταν υψηλότερη σε όλες τις μεταχειρίσεις όπου προστέθηκε γεωύφασμα, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες χωρίς. Διαπιστώθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο μεταξύ μονοστοιχειακής και πολυστοιχειακής επιμόλυνσης όσο και μεταξύ μεταχειρίσεων με ή χωρίς γεωύφασμα. Συνεπώς, το γεωύφασμα φαίνεται να ενισχύει την απορρόφηση χαλκού από τις ρίζες της *Cannabis sativa L.*

Εικόνα 2. Σύγκριση Cu (mg/kg) στους βλαστούς μεταξύ δειγμάτων, με και χωρίς γεωύφασμα. Τα γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Από την Εικόνα 2 παρατηρήθηκε πως στους βλαστούς της κάνναβης η συγκέντρωση χαλκού (Cu) εμφανίζεται γενικά υψηλότερη με την παρουσία γεωυφάσματος, αν και οι διαφορές με τις αντίστοιχες χωρίς είναι μικρότερες σε σχέση με τις ρίζες. Η μεγαλύτερη μετακίνηση χαλκού προς το βλαστό καταγράφηκε στις μονοστοιχειακές επιμολύνσεις (Control + Cu A, Geo + Cu A). Ωστόσο, το 50% των μεταχειρίσεων (6 από τις 12) δεν εμφάνισε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.



Εικόνα 3. Σύγκριση Cu (mg/kg) στα άνθη μεταξύ δειγμάτων, με και χωρίς γεωύφασμα. Τα γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων.

Η συγκέντρωση χαλκού (Cu) στα άνθη της κάνναβης ήταν στις περισσότερες περιπτώσεις υψηλότερη με την παρουσία γεωυφάσματος, επιβεβαιώνοντας τον ρόλο του στη μετακίνηση του μετάλλου προς τα αναπαραγωγικά όργανα. Εξαίρεση αποτέλεσε η μεταχείριση Geo + Cu+ Cd + Zn, όπου η τιμή ήταν ελαφρώς χαμηλότερη από την αντίστοιχη χωρίς γεωύφασμα. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο είναι ότι η μεταχείριση Geo + Cu + Zn εμφάνισε μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού σε σχέση με την εφαρμογή χαλκού στο επίπεδο Β χωρίς γεωύφασμα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε αργιλώδες, ελαφρώς αλκαλικό έδαφος (pH=7,6) με την προσθήκη γεωυφάσματος και διαλυμάτων Cu, Zn και Cd, ώστε να εξεταστούν οι επιδράσεις τους στις φυσικοχημικές ιδιότητες, στα αγρονομικά χαρακτηριστικά της κάνναβης, στη συσσώρευση μετάλλων και στην παραγωγή CBD και THC. Σε υψηλότερα επίπεδα ρύπανσης υπήρξε μικρή μείωση στο ύψος των φυτών.

Όσον αφορά τη συσσώρευση μετάλλων, το γεωύφασμα αύξησε σημαντικά τις ποσότητες Zn και Cd στη ρίζα, το βλαστό και τα άνθη, ενώ για τον Cu η επίδραση ήταν σημαντική μόνο σε υψηλότερη συγκέντρωση, όπου παρατηρήθηκε διπλασιασμός της απορρόφησής του από τις ρίζες. Στους συνδυασμούς μετάλλων καταγράφηκε συνεργιστική δράση μεταξύ Zn και Cu. Συνολικά, η κάνναβη έδειξε ότι ακολουθεί τον μηχανισμό της φυτοσταθεροποίησης, συγκρατώντας τα μέταλλα κυρίως στις ρίζες και αφήνοντας το υπέργειο τμήμα με χαμηλότερες συγκεντρώσεις.

Τέλος, η ταυτόχρονη παρουσία γεωυφάσματος και μετάλλων αύξησε την παραγωγή των δευτερογενών μεταβολιτών CBD και THC, με τον χαλκό να έχει την πιο καθοριστική επίδραση, ιδιαίτερα σε υψηλότερες συγκεντρώσεις.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bouyoucos, G. J. (1962). *Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils*. Agronomy Journal, 54(5), 464–465.

Golia, E. E., Bethanis, J., Ntinopoulos, N., Kaffe, G. G., Komnou, A. A., & Vasilou, C. (2023). Investigating the potential of heavy metal accumulation from hemp: The use of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) for phytoremediation of heavily and moderately polluted soils. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Article 100961.

Golia, E. E., Liava, V., Achilias, D. S., & Girousi, S. T. (2024). Micro- and nano-plastics in agricultural soils: A critical meta-analysis of their impact on plant growth, nutrition, metal accumulation in plant tissues and crop yield. *Waste Management Research*.

Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., & Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. *Environmental Chemistry Letters, 8*(3), 199–216.

Quagliata, G., Celletti, S., Coppa, E., Mimmo, T., Cesco, S., & Astolfi, S. (2021). Potential use of copper-contaminated soils for hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivation. *Environments, 8*(11), Article 110.

Rhoades, J. D. (1996). *Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids*. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* (pp. 417–435). Soil Science Society of America.

Tsaliki, E., Papadiamantopoulos, A., & Karkanis, A. (2021). *Gas chromatography determination of cannabinoids in hemp varieties cultivated in Greece in accordance with EU Regulation 809/2014*. Industrial Crops and Products, 172, 113997.

Tziourrou, P., & Golia, E. E. (2024). Plastics in agricultural and urban soils: Interactions with soil, plants, soil microbes, and pollutants. *Soil Systems, 8*(1), Article 23.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). *An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil Science, 37(1), 29–38.

43. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ (PE, PET,PP) ΣΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ CU ΣΕ ΦΥΤΑ ΜΑΡΟΥΛΙΟΥ

Π. Αντωνίου[1], Ρ. Βόγια[1], Κ. Παπαγεωργίου[1], Ι. Μπεθάνης[1], Π. Τζιούρρου [1], Β. Λιάβα [1,2], Α. Καραμανώλη[3] & Ε. Ε. Γκόλια[1]

[1] *Εργαστήριο Εδαφολογίας, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πανεπιστημιούπολη, 541 24 Θεσσαλονίκη, email: egolia@auth.gr*
[2] *Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παρ & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 38446 Βόλος*
[3] *Εργαστήριο Γεωργικής Χημείας, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 541 24 Θεσσαλονίκη*

Περίληψη

Η ρύπανση από μικροπλαστικά και βαρέα μέταλλα επηρεάζει τη γονιμότητα του εδάφους και τη φυτική ανάπτυξη, ωστόσο οι επιδράσεις τους σε μεσογειακά εδάφη παραμένουν περιορισμένα κατανοητές. Σκοπός της μελέτης ήταν η διερεύνηση της επίδρασης τριών μικροπλαστικών (PE, PET, PP) στη διαθεσιμότητα και συσσώρευση χαλκού (Cu) σε μαρούλι (Lactuca sativa). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε γλάστρες με προσθήκη 1% (v/v) μικροπλαστικών και καλλιέργεια διάρκειας 40 ημερών. Μετρήθηκαν οι εδαφολογικές και αγρονομικές παράμετροι, οι συγκεντρώσεις Cu σε έδαφος, ρίζες και φύλλα, καθώς και οι δείκτες μεταφοράς (TF, BAF, TC) και ρύπανσης (CF, Igeo). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μικροπλαστικά μεταβάλλουν τη βιοδιαθεσιμότητα του Cu και την κατανομή του στο σύστημα έδαφος–φυτό, με πιθανές συνέπειες για την ασφάλεια των τροφίμων και την υγεία του εδάφους.

EFFECT OF MICROPLASTICS (PE, PET, PP) PRESENCE ON Cu ACCUMULATION IN LETTUCE PLANTS

P. Antoniou[1], R. Vogia[1], K. Papageorgiou[1], I. Bethanis[1], P. Tziourrou [1], V. Liava [1,2], A. Karamanoli[3] & E. E. Golia*[1]

[1]*Soil Science Laboratory, Department of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, University Campus, 541 24 Thessaloniki, email: egolia@auth.gr*
[2]*Department of Agriculture, Crop Production & Environment, University of Thessaly, 38446 Volos*
[3]*Laboratory of Agricultural Chemistry, Department of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24 Thessaloniki*

ABSTRACT

Soil pollution regarding microplastics and heavy metals is a global environmental problem. The present study investigates the potential impact of three types of microplastics (PE, PET, PP) present in soils, the copper (Cu) availability and accumulation in lettuce. Soil and agronomic parameters, Cu concentrations in soil, roots, and leaves, as well as transfer (TF, BAF, TC) and pollution (CF, Igeo) indices were determined. Pot experiments showed that microplastics at 1% (v/v), after 40 days of cultivation, can alter Cu distribution in the soil–plant system, potentially impacting food safety and soil health.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρουσία πλαστικών στο περιβάλλον, που συνδέεται κυρίως με ανθρωπογενείς δραστηριότητες, έχει εξελιχθεί σε σημαντική περιβαλλοντική πρόκληση, με εκτιμήσεις να προβλέπουν έως και 12.000 εκατομμύρια τόνους πλαστικών αποβλήτων μέχρι το 2050 (Geyer et al., 2017). Τα μικροπλαστικά, συνθετικά πολυμερή μικρού μεγέθους, προέρχονται είτε από πρωτογενείς πηγές (π.χ. καλλυντικά, ρούχα), είτε από τη διάσπαση μεγαλύτερων πλαστικών, και έχουν την ικανότητα να συσσωρεύονται, αλλά και να αλληλεπιδρούν με άλλους ρύπους στα εδαφικά οικοσυστήματα (Yang et al., 2021). Η συγκέντρωσή τους στα χερσαία περιβάλλοντα είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή στα υδάτινα και προκύπτει κυρίως από αγροτικές πρακτικές, από τη χρήση ιλύος, κομπόστ, μετακινούνται με το αρδευτικό νερό ή εναποτίθενται στο έδαφος από την ατμόσφαιρα (Allen et al., 2019). Αφού εισέλθουν στο έδαφος, τα μικροπλαστικά είναι δυνατό να τροποποιήσουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες αυτών, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και να μεταβάλουν παραμέτρους, όπως το ποσοστό του οργανικού άνθρακα, την τιμή του pH και την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, ενώ μπορούν να προσροφούν και να μεταφέρουν βαρέα μέταλλα (Guo et al., 2020), εντείνοντας τη ρύπανση

Τα βαρέα μέταλλα, που προκύπτουν από λιπάσματα, φυτοφάρμακα και βιομηχανικές δραστηριότητες είναι γνωστό ότι αποτελούν σοβαρό περιβαλλοντικό και τοξικολογικό ζήτημα. Ο χαλκός (Cu), αν και απαραίτητο ιχνοστοιχείο για την ανάπτυξη των φυτών, μπορεί σε αυξημένες συγκεντρώσεις να προκαλέσει φυτοτοξικότητα, αναστολή ανάπτυξης και μείωση της χλωροφύλλης (Zhuang et al., 2009). Οι αλληλεπιδράσεις μικροπλαστικών–χαλκού επηρεάζονται από το εδαφικό pH, τη δοσολογία και τις ιδιότητες του πολυμερούς, καθώς τα μικροπλαστικά αποκτούν φορτία που καθορίζουν και μεταβάλλουν την προσρόφηση. Σε αλκαλικά περιβάλλοντα, η προσροφητική ικανότητα είναι δυνατό να μειωθεί σημαντικά αυξάνοντας την κινητικότητα του Cu και τη βιοδιαθεσιμότητά του (Li et al., 2020).

Το μαρούλι (*Lactuca sativa*), σημαντική καλλιέργεια λόγω της θρεπτικής του αξίας (USDA, 2016), έχει αναγνωριστεί ως υψηλός συσσωρευτής βαρέων μετάλλων (Li et al., 2015), γεγονός που το καθιστά κατάλληλο δείκτη για τη μελέτη της μεταφοράς και βιοδιαθεσιμότητας του χαλκού σε ρυπασμένα εδάφη. Η κατανόηση αυτών των αλληλεπιδράσεων είναι κρίσιμη για την εκτίμηση περιβαλλοντικών κινδύνων, την ασφάλεια των τροφίμων και τη βέλτιστη διαχείριση της γεωργικής γης.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε σε έδαφος που συλλέχθηκε από τις εγκαταστάσεις του ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ (Θέρμη, Θεσσαλονίκη) και υποβλήθηκε σε ξήρανση και Εδαφολογικές Αναλύσεις στο Εργαστήριο Εδαφολογίας του ΑΠΘ. Επιλέχθηκαν τρεις τύποι μικροπλαστικών: πολυαιθυλένιο (PE), τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και πολυπροπυλένιο (PP), και προστέθηκαν στο έδαφος σε συγκέντρωση 1% v/v. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε φυτοδοχεία και επωάστηκαν για 10 ημέρες πριν από τη φύτευση τριών φυταρίων μαρουλιού (*Lactuca sativa*) ανά γλάστρα. Το πείραμα ήταν πλήρως τυχαιοποιημένο και περιλάμβανε 1 τύπο εδάφους × 3 τύπους μικροπλαστικών + (1 μάρτυρα) και 3 επαναλήψεις σε κάθε περίπτωση. Οι συνθήκες θερμοκρασίας ήταν 25°C την ημέρα και 5°C τη νύχτα, ενώ πραγματοποιήθηκε πότισμα με 200mL νερού, όποτε απαιτούνταν, προκειμένου να διατηρηθεί η υγρασία του εδάφους ίση με 65%. Μετά από 40 ημέρες, τα υπέργεια και υπόγεια τμήματα των φυτών συλλέχθηκαν, αποξηράνθηκαν (90°C, 24h), αλέστηκαν

και προσδιορίστηκαν τα επίπεδα του Cu, μετά από εκχύλιση με βασιλικό νερό. Παράλληλα μετρήθηκε το ύψος του φυτού, το μήκος της ρίζας, το νωπό βάρος, η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη (SPAD CCM-200) και ο φθορισμός (FluorPen FP 100). Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του χαλκού χρησιμοποιήθηκαν τρεις δείκτες διαθεσιμότητας (BAF, TF, TC) και δύο δείκτες ρύπανσης εδάφους: ο παράγοντας ρύπανσης-CF και ο δείκτης γεωσυσσώρευσης-Igeo (Kabata-Pendias, 2010). Στα εδαφικά δείγματα πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της τιμής του pH, με αναλογία 1:2,5, της τιμής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC, της μηχανικής σύστασης, του ποσοστού του $CaCO_3$, καθώς και συγκεντρώσεων του Cu μετά από εκχύλιση με βασιλικό ύδωρ (Page et al. 1982). Ο ποσοτικός προσδιορισμός των συγκεντρώσεων του Cu, τόσο στα εδαφικά όσο και στα φυτικά δείγματα πραγματοποιήθηκε με φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης. Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με μονοπαραγοντική ANOVA (one-way ANOVA) και δοκιμή LSD ($p < 0,05$) στο λογισμικό IBM SPSS Statistics 29.0.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η αρχική φυσικοχημική ανάλυση του αλκαλικού εδάφους (pH 8,1, EC 2193 μS/cm, οργανική ουσία 2,1%, άργιλος 45,6%) αποτέλεσε τη βάση των πειραματικών μεταχειρίσεων με μικροπλαστικά (PE, PET, PP). Η προσθήκη τους δεν προκάλεσε στατιστικά σημαντικές μεταβολές στο pH (7,7–8,1), ωστόσο παρατηρήθηκε μικρή πτώση σε σχέση με τον μάρτυρα, πιθανώς λόγω απελευθέρωσης οργανικών οξέων. Η οργανική ουσία εμφάνισε μικρή αύξηση σε όλες τις μεταχειρίσεις με μικροπλαστικά, ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξήθηκε σημαντικά μόνο στην παρουσία PP, υποδεικνύοντας πιθανή τροποποίηση της αλατότητας του εδάφους. Οι δείκτες ρύπανσης ($CF < 1$, $Igeo < 0$) κατέταξαν όλα τα εδάφη ως «παρθένα», χωρίς ενδείξεις σημαντικής ανθρωπογενούς επιβάρυνσης σε χαλκό.

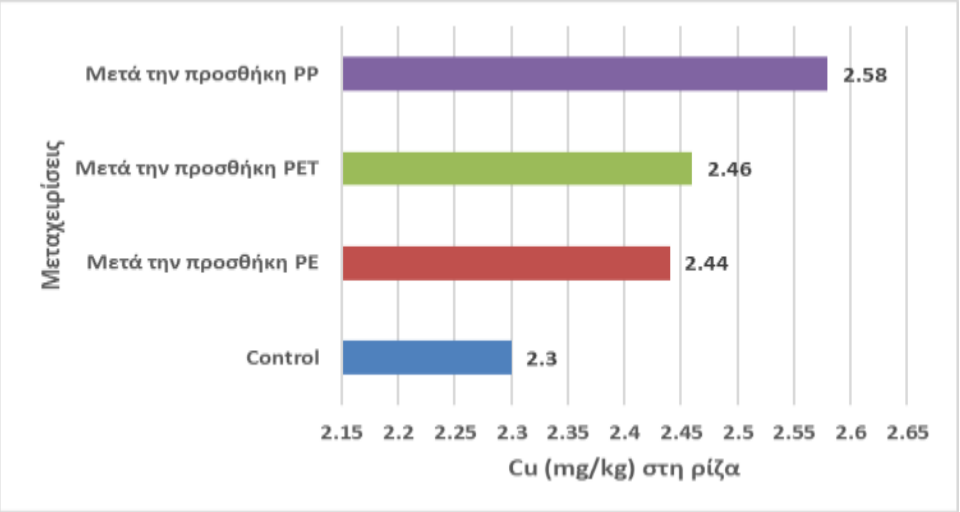
Μεταχειρίσεις	CF	Igeo
Control	0,1506	-0,9983
Μετά την προσθήκη PE	0,1490	-1,0030
Μετά την προσθήκη PET	0,1486	-1,0042
Μετά την προσθήκη PP	0,1486	-1,0042

Η ανάλυση των φυτικών δειγμάτων έδειξε ότι οι συγκεντρώσεις χαλκού στα φύλλα δεν επηρεάστηκαν σημαντικά από τα μικροπλαστικά, ενώ στις ρίζες παρατηρήθηκε τάση αύξησης, με το PP να οδηγεί στις υψηλότερες τιμές. Ο παράγοντας βιοσυσσώρευσης ($BAF > 6$) υποδήλωσε υψηλή ικανότητα συσσώρευσης χαλκού από το μαρούλι, ενώ ο παράγοντας μετατόπισης ($TF < 1$) έδειξε ότι το στοιχείο παρέμεινε κυρίως στο ριζικό σύστημα, κατατάσσοντας το φυτό ως «αποκλειστή». Ο συντελεστής μεταφοράς ($TC \approx 0,58–0,61$) ενίσχυσε τη διαπίστωση ότι η κίνηση του Cu προς τα υπέργεια μέρη είναι περιορισμένη.

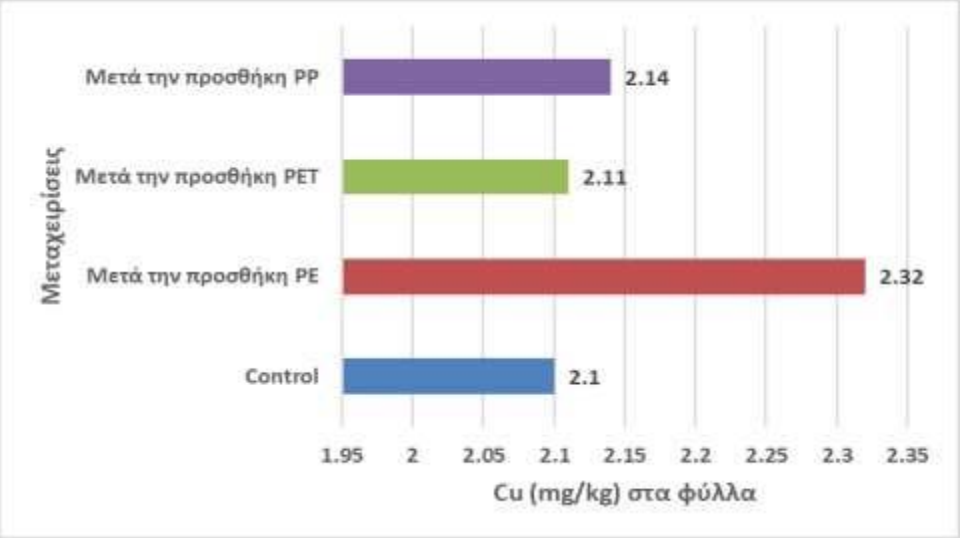
Μεταχειρήσεις	TC	BAF	TF
Control	0,568	6,479	0,913
Μετά την προσθήκη PE	0,607	6,703	0,910
Μετά την προσθήκη PET	0,578	6,814	0,858
Μετά την προσθήκη PP	0,586	6,954	0,829

Όσον αφορά στα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά, ο δείκτης SPAD αποκάλυψε διαφοροποιήσεις μεταξύ των μεταχειρίσεων: το PP μείωσε τη συγκέντρωση χλωροφύλλης, υποδεικνύοντας πιθανή ενίσχυση της φυτοτοξικότητας του χαλκού, ενώ το PET παρουσίασε τάσεις μετριασμού της τοξικότητας.

Στις παρακάτω Εικόνες 1, 2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του Cu στο μάρτυρα (control), δηλ στα φυτά του καλλιεργήθηκαν χωρίς την παρουσία πλαστικών, αλλά και μετά την προσθήκη των τριών τύπων πλαστικών.



Εικόνα 1: Συγκεντρώσεις Cu στο υπόγειο μέρος των φυτών



Εικόνα 2: Συγκεντρώσεις Cu στο υπέργειο μέρος των φυτών

Από τη μελέτη των παραπάνω Εικόνων προκύπτουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα, καθώς φαίνεται η παρουσία των τριών διαφορετικών τύπων των πλαστικών να διαφοροποιεί τη συγκέντρωση του Cu που μετακινείται από το έδαφος προς το φυτό. Συγκεκριμένα, το PP φαίνεται να προκαλεί μεγαλύτερη συσσώρευση του Cu στο υπόγειο μέρος, δηλ ο εδαφικός Cu φαίνεται να συγκρατείται εντός του εδάφους και να μην κατευθύνεται προς το εδώδιμο

μέρος του μαρουλιού. Αντίθετα, παρουσία του PE, ο χαλκός μετακινείται σε ποσοστό 10,5% περισσότερο από τον μάρτυρα προς τα φύλλα του μαρουλιού. Το ποσοστό αυτό ανέρχεται μόλις στο 0,5% παρουσία του PET και στο 1,9% παρουσία του PP στο έδαφος που μελετήθηκε.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρουσία των μικροπλαστικών στο έδαφος που μελετήθηκε, φαίνεται να προκαλεί σημαντικές μεταβολές τόσο στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, όσο και στην κινητικότητα του Cu που υπάρχει στο έδαφος και μετακινείται προς τα φυτά του μαρουλιού. Περισσότερα πειράματα είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν, σε διαφορετικούς τύπους εδάφους και με διαφορετικές πειραματικές συνθήκες, προκειμένου οι ρύποι αυτοί να διαχειριστούν κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο στα γεωργικά, και όχι μόνο, εδάφη.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Jimenez, P. D., Simonneau, A., Binet, S., and Galop, D., 2019. *Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment.* Nature Geoscience, 12, 339–344.

Geyer, R., Jambeck, J. R., and Law, K. L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7), e1700782.

Guo, X., Hu, G., Fan, X., & Jia, H., 2020. *Sorption properties of cadmium on microplastics: The common practice experiment and a two-dimensional correlation spectroscopic study.* Ecotoxicology and Environmental Safety, 190, 110118.

Kabata-Pendias, A., 2010. *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.

Li, J., Qiu, Y., Zhao, Q., Chen, D., Wu, Z., Peng, A., Niazi, N. K., Trakal, L., Sakrabani, R., Gao, B., Wang, H., and Wu, W., 2020. *Lead and copper-induced hormetic effect and toxicity mechanisms in lettuce (Lactuca sativa L.) grown in a contaminated soil*. Science of the Total Environment, *741*, 140440.

Li, N., Kang, Y., Pan, W., Zeng, L., Zhang, Q., and Luo, J., 2015. *Concentration and transportation of heavy metals in vegetables and risk assessment of human exposure to bioaccessible heavy metals in soil near a waste-incinerator site, South China.* Science of the Total Environment, *521–522*, 144–151.

Page, A.L., 1982. Methods of Soil Analysis. Part 2. *Chemical and Microbiological Properties*, 1st ed.; American Society of Agronomy, Soil Science Society of America: Madison, WI, USA.

U.S. Department of Agriculture., 2016. USDA nutrient database. USDA.

Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., and Wu, C., 2021. *Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk.* Science of the Total Environment, 780, 146546.

Zhuang, P., McBride, M. B., Xia, H., Li, N., and Li, Z., 2009. *Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China*. Science of the Total Environment, *407*, 1551–1561.

44. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΤΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΣΕ ΧΩΡΟΥΣ ΑΣΤΙΚΟΥ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Ι. Παπαδόπουλος, Ε. Ε. Γκόλια, Ο. Δ. Κάντζου, Σ. Γ. Παπαδήμου & Α. Μπουρλίβα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Πανεπιστημιούπολη, 54624, Θεσσαλονίκη

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την μελέτη της αστικής εδαφικής ρύπανσης από βαρέα μέταλλα σε χώρους πρασίνου της Θεσσαλονίκης σε μια περίοδο δύο ετών (2023 – 2024). Συνολικά συλλέχθηκαν 208 δείγματα εδάφους από 52 τοποθεσίες διαφορετικών χρήσεων γης (πάρκα, χώρους αναψυχής, πλατείες και διαζώματα). Παράλληλα με τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb και Zn) αναλύθηκαν και οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα, υφή, οργανική ύλη και περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο). Οι εκτιμήσεις κινδύνου για την υγεία, με βάση τα μοντέλα της USEPA, αξιολόγησαν τους μη καρκινογόνους και καρκινογόνους κινδύνους τόσο για ενήλικες όσο και για παιδιά μέσω της κατάποσης και της δερματικής επαφής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, ενώ οι περισσότερες περιοχές παρουσιάζουν σχετικά χαμηλούς κινδύνους για την υγεία, σε αντίθεση με συγκεκριμένες τοποθεσίες με έντονη βιομηχανική και μεταφορική δραστηριότητα, ενέχουν αυξημένους κινδύνους. Τα ευρήματα της έρευνας υπογραμμίζουν την ανάγκη για στοχευμένη και συστηματική παρακολούθηση και αποκατάσταση προκειμένου να μειωθούν οι οικολογικοί κίνδυνοι και οι κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία.

Λέξεις κλειδιά: αστικά εδάφη, βαρέα μέταλλα, κατανομή πηγών, κίνδυνος για την υγεία

EXPLORING HEAVY METALS EXPOSURE AND HEALTH RISK ASSESSMENTS IN URBAN GREEN ZONES OF THESSALONIKI

I. Papadopoulos, E. E. Golia, O. D. Katsou, S. G. Papadimou & A. Bourliva

Aristotle University of Thessaloniki, Department of Agriculture, University Campus, 54624, Thessaloniki

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine urban soil pollution from heavy metals in green spaces in Thessaloniki over a two-year period (2023–2024). A total of 208 soil samples were collected from 52 sites with different land uses (parks, recreational areas, squares, and interstices). Along with the concentrations of heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, and Zn), the soil physicochemical properties (pH, electrical conductivity, texture, organic matter, and calcium carbonate content) were also analyzed. Health risk assessments, based on USEPA models, evaluated non-carcinogenic and carcinogenic risks for both adults and children through ingestion and skin contact. The results show that while most areas present relatively low health risks, certain locations with intense industrial and transportation activity pose increased risks. The research findings underscore the need for targeted and systematic monitoring and remediation to reduce ecological and human health risks.

Keywords: urban soils, heavy metals, source apportionment, health risk

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρύπανση του περιβάλλοντος στο οποίο ζουν οι άνθρωποι και αναπτύσσουν όλες τις λειτουργίες της ζωής τους, συμπεριλαμβανομένης της επαγγελματικής εξέλιξης και της διαβίωσης, είναι ένα κρίσιμο ζήτημα που επηρεάζει όλους τους τομείς της ύπαρξής τους (Awewomom et al. 2024). Είναι γνωστό ότι ο ρυπασμένος αέρας επηρεάζει άμεσα την ανθρώπινη υγεία, καθώς λόγω της εισπνοής, οι τοξικοί ρύποι μπορούν να εισέλθουν στον οργανισμό και να προκαλέσουν μια σειρά προβλημάτων που απειλούν την ασφαλή και υγιεινή διαβίωση (Xu et al. 2025). Τα βαρέα μέταλλα (ΒΜ) συγκαταλέγονται μεταξύ των πιο επικίνδυνων και ανθεκτικών ρύπων στο περιβάλλον και ιδιαίτερα στα εδάφη (Dawam et al. 2025). Αποτελούν μια σημαντική πρόκληση για τους επιστήμονες που ασχολούνται με περιβαλλοντικές μελέτες τα τελευταία 50 χρόνια, οι οποίοι προσπαθούν να προσδιορίσουν τις πιθανές πηγές τους, τη χημική τους συμπεριφορά και τους πιθανούς μηχανισμούς για τη μείωση της συγκέντρωσής τους ή της διαθεσιμότητάς τους (Ondrasek et al. 2025). Η παρουσία βαρέων μετάλλων παραμένει τόσο στα γεωργικά όσο και στα αστικά εδάφη λόγω μιας ποικιλίας ανθρώπινων δραστηριοτήτων στις γεωργικές πρακτικές ή στις αστικές πράσινες περιοχές σε πολλές πόλεις σε όλο τον κόσμο (Tang et al. 2024). Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Τέλος, με τη βοήθεια κατάλληλων δεικτών που σχετίζονται με τον κίνδυνο για την υγεία των κατοίκων της Θεσσαλονίκης, επισημάνθηκε η χωρική κατανομή τους με τη δημιουργία αντίστοιχων χαρτών.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1.Περιοχή μελέτης

Η δειγματοληψία εδάφους πραγματοποιήθηκε στην ευρύτερη αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης κατά τη διάρκεια μιας διετούς περιόδου (2023 – 2024), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Συνολικά συλλέχθηκαν 208 σύνθετα δείγματα εδάφους (104 δείγματα ανά έτος). Τα δείγματα εδάφους συλλέχθηκαν από 52 σημεία δειγματοληψίας που κατανέμονται στρατηγικά σε διαφορετικούς τύπους χρήσης γης, συμπεριλαμβανομένων δρόμων με υψηλή κυκλοφορία, βιομηχανικών ζωνών, κατοικημένων περιοχών, πάρκων και περιοχών μικτής χρήσης. Κάθε χρόνο, η δειγματοληψία εδάφους πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια δύο διακριτών περιόδων: μία φορά τον Μάρτιο, μετά την περίοδο των βροχών, και ξανά τον Σεπτέμβριο, μετά την περίοδο ξηρασίας. Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν πέντε υποδείγματα από τις τέσσερις γωνίες και το κέντρο ενός τετραγώνου 1 m × 1 m.

2.2.Φυσικοχημικές αναλύσεις

Πραγματοποιήθηκε μια σειρά από φυσικοχημικές αναλύσεις στα δείγματα εδάφους, όπως το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και η υφή σύμφωνα με πρότυπα εργαστηριακά πρωτόκολλα (ISO 10390 2005). Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων προσδιορίστηκαν με το φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης (Shimadzu 6300). Πριν την ανάλυση, τα δείγματα εκχυλίστηκαν σε μείγμα 3:1 πυκνού υδροχλωρικού και πυκνού νιτρικού οξέος σε συσκευή πέψης. Στο τέλος της διαδικασίας, τα εκχυλίσματα αραιώθηκαν και τοποθετήθηκαν σε πλαστικά φιαλίδια προκειμένου να αναλυθούν.

2.3.Συντελεστής ρύπανσης (Cf)

Ο συντελεστής ρύπανσης εισήχθη από τον Hakanson το 1980 και είναι:

$$C_f^i = \frac{C_n^i}{B_n^i} \qquad (1)$$

όπου C_f^i είναι η συγκέντρωση του ρύπου σε αστικό έδαφος, C_n^i είναι η συγκέντρωση του ρύπου στο δείγμα εδάφους και B^i η γεωχημική τιμή αναφοράς του ρύπου. Η εξίσωση αυτή χρησιμεύει ως παράγοντας του βαθμού ρύπανσης σε σχέση με τα φυσικά επίπεδα όπου οι χαμηλές τιμές υποδεικνύουν χαμηλά επίπεδα μόλυνσης και οι υψηλές τιμές, τα υψηλά επίπεδα (Hakanson 1980).

2.4.Αξιολόγηση κινδύνων υγείας

Οι πιθανοί κίνδυνοι (καρκινογενείς και μη) για την υγεία ενηλίκων και παιδιών προσδιορίστηκαν από μοντέλα αξιολόγησης κινδύνου του Υπουργείου Περιβαλλοντικής Προστασίας των Ηνωμένων Πολιτειών. Η έκθεση του ανθρώπου προσδιορίστηκε με τους δείκτες κινδύνου (Hazard Quotient) ή αλλιώς HQ και δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\mathbf{HQ_{ing}} = \frac{\mathbf{ADD_{ing}}}{\mathbf{RfD_{ing}}} \qquad \mathbf{(2)}$$

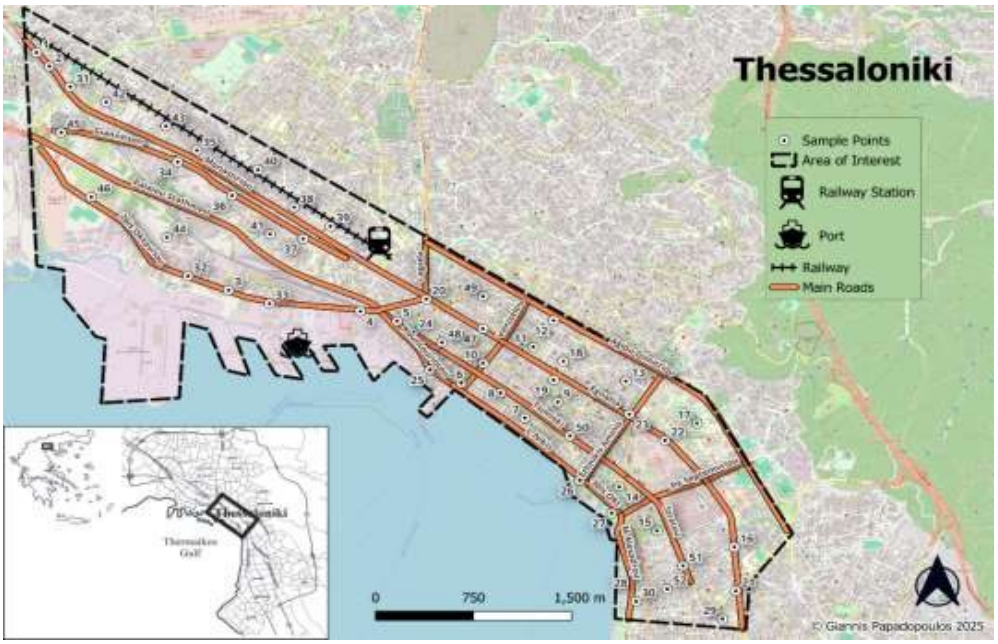
$$\mathbf{HQ_{derm}} = \frac{\mathbf{ADD_{derm}}}{\mathbf{RfD_{derm}}} \qquad \mathbf{(3)}$$

όπου:
ADD_{ing}: Μέση ημερήσια δόση μέσω κατάποσης
ADD_{derm}: Μέση ημερήσια δόση μέσω επαφής με το δέρμα
RfD_{ing}: Δόση αναφοράς μέσω κατάποσης
RfD_{derm}: Δόση αναφοράς μέσω επαφής με το δέρμα

Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η κατάποση και η επαφή με το δέρμα ως οδοί της έκθεσης σε βαρέα μέταλλα μιας και είναι ευρέως αναγνωρισμένες ως οι πιο επικίνδυνες για την υγεία του ανθρώπου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που προκύπτουν οι μέσες ημερήσιες δόσεις όπου οι παράμετροι τους προέρχονται από τις οδηγίες αξιολόγησης κινδύνου της USEPA και παρατίθενται στον Πίνακα 1 (Epa n.d.).

$$\boldsymbol{ADD_{ing}} = \frac{\boldsymbol{C_{soil} \times IR \times EF \times ED}}{\boldsymbol{BW \times TA}} \times \boldsymbol{CF} \qquad \mathbf{(4)}$$

$$\boldsymbol{ADD_{derm}} = \frac{\boldsymbol{C_{soil} \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}}{\boldsymbol{BW \times TA}} \times \boldsymbol{CF} \qquad \mathbf{(5)}$$



Σχήμα 1: Περιοχή μελέτης και σημεία δειγματοληψίας

2.5.Χρήση χαρτών για την παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η χωρική κατανομή των αποτελεσμάτων απεικονίστηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό QGIS 3. Συγκεκριμένα η μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι η Ordinary Kriging, η οποία είναι μια γεωστατιστική μέθοδος παρεμβολής όπου εκτιμά μια τιμή μιας μεταβλητής σε μία θέση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα με βάση τις τιμές σε γειτονικά σημεία όπου υπάρχουν δεδομένα. Το μοντέλο υποθέτει πως ο μέσος όρος της μεταβλητής είναι σταθερός αλλά άγνωστος στην περιοχή παρεμβολής. Η Ordinary Kriging βασίζεται σε ένα βαριογράφημα το οποίο περιγράφει την χωρική συσχέτιση μεταξύ σημειακών δεδομένων για τον καθορισμό της βαρύτητας που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση.

3. Αποτελέσματα

Πίνακας 1. Τιμές των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις που έγιναν:

	pH	EC	Cd		Co		Cr		Cu		Mn		Ni		Pb		Zn	
Sampling period			**S**	**W**	**S**	**W**	**S**	**W**	**S**	**W**	**S**	**W**	**S**	**W**	**S**	**W**	**S**	**W**
Min	7.5	95.6	0.5	0.5	7.7	6.6	21.7	19.5	18.1	17.5	199.1	183.6	20	17.4	9.4	9.5	33.2	29
Max	9.0	1431.5	1.8	1.6	33.5	27.4	112.4	100.7	93.6	84.9	985.6	949.7	71.1	62	61.7	55.6	302.6	266.3
Mean	8.2	481.6	1.0	0.9	15.5	13.3	59.7	53.1	49.7	45.6	545.9	501.3	39.3	33.8	34.4	30.7	132.3	116.5
Total Mean content (n=104)	**8.2**	**481.6**	**0.9**		**14.4**		**56.4**		**47.7**		**523.6**		**36.6**		**32.6**		**124.4**	
Median	**8.2**	**349.7**	**0.9**		**13.3**		**51.3**		**43.5**		**482.7**		**33.8**		**31.8**		**98.4**	
SD	0.4	361.6	0.4	0.3	6.6	5.5	28.8	25.5	24.0	21.5	262.0	240.8	15.7	13.5	16.5	14.6	90.1	79.2

3.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες

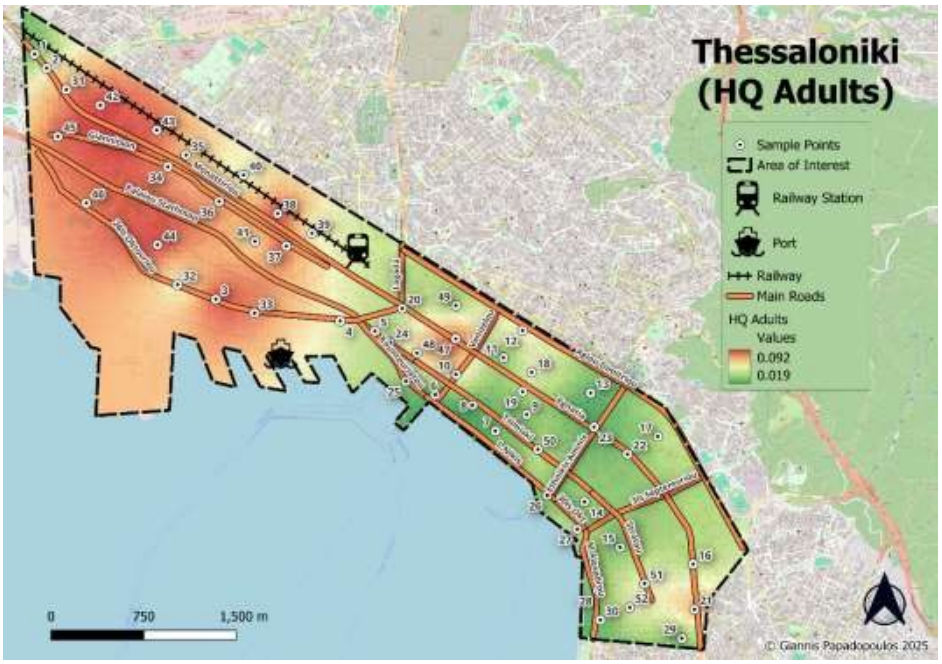
Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές καθώς επίσης και οι μέσοι όροι από τις μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο. Έτσι τα εδάφη έχουν ελάχιστη τιμή pH το 7.5 επομένως παρατηρούμε γενικά μετρίως αλκαλικά εδάφη στον αστικό ιστό της πόλης. Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρουσιάζουν έντονη παραλλακτικότητα καθώς οι τιμές κυμαίνονται από 95,6 έως 1431,5 μS cm^{-1}. Επομένως μιλάμε για μετρίως νατριωμένα εδάφη μιας και περίπου το 11,5% των δειγμάτων παρουσιάζουν EC μεγαλύτερη από 1000 μS cm^{-1}. Ωστόσο μια υψηλή τιμή pH σε συνδυασμό με αυξημένες τιμές EC αποτελεί λόγο ανησυχίας, ειδικά αν τα εδάφη λιπαίνονται συνεχώς από τον δήμο για την βελτίωση της αισθητικής των χώρων πρασίνων της πόλης (Sager 2020). Αναφορικά με την υφή του εδάφους, το 46,2% ανήκει στην κατηγορία αμμοπηλώδες, ενώ το 32,7% χαρακτηρίζεται ως πηλώδες.

3.2 Αξιολόγηση κίνδυνου για την υγεία του ανθρώπου

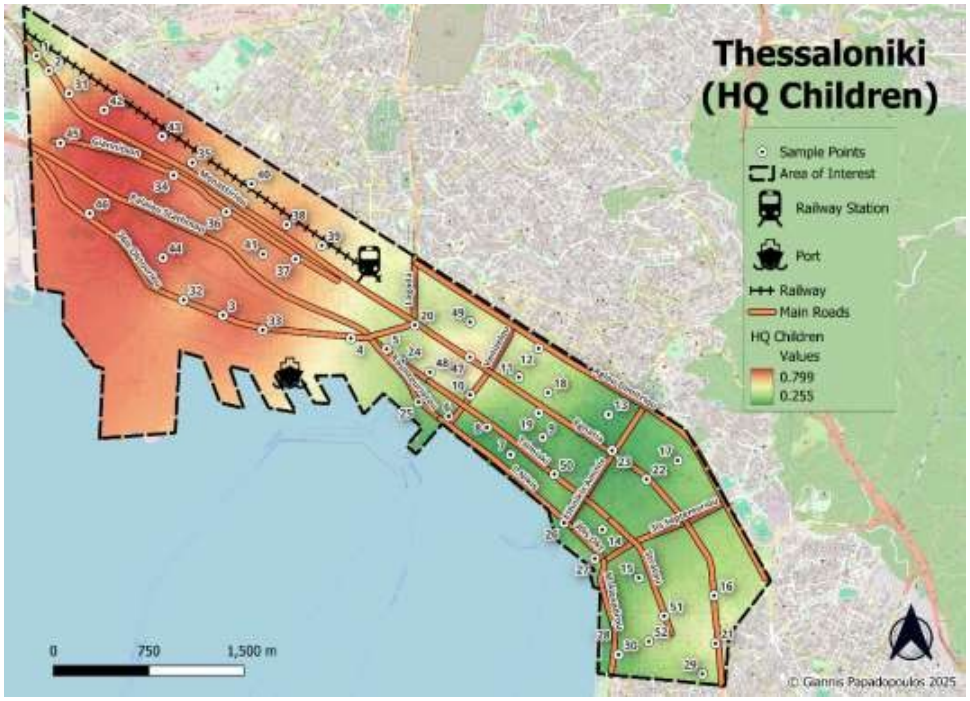
Οι κίνδυνοι για την υγεία έχουν άμεση σύνδεση με την έκθεση σε βαρέα μέταλλα στα εδάφη που μελετήθηκαν. Στην έρευνα λήφθηκαν υπόψη οι ενήλικες και τα παιδιά με τα αποτελέσματα να αποκαλύπτουν σαφής διαφορές σχετιζόμενες με την ηλικία όπου τα παιδιά παρουσιάζουν σταθερά υψηλότερες τιμές HQ από τους ενήλικες σε όλους τους ρύπους που μετρήθηκαν όπως έδειξαν και προηγούμενες μελέτες (Baltas et al. 2020; Bourliva et al. 2018).

3.3. Θεματικοί χάρτες αξιολόγησης κινδύνου

Όσο αφορά την χωρική κατανομή των μη καρκινογόνων ρύπων HQ μέσω της κατάποσης (κύρια οδός έκθεσης) για ενήλικες και παιδιά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2 και Σχήμα 3 αντίστοιχα. Αν και οι τιμές βρίσκονται κάτω από το όριο, ο χάρτης παρουσιάζει περιοχές που κινούν το ενδιαφέρον για την δημόσια υγεία. Συγκεκριμένα, οι τιμές φτάνουν τα 0.873 και συγκεντρώνονται στις βορειοδυτικές περιοχές της πόλης μίας και εκεί υπάρχει έντονη βιομηχανική δραστηριότητα. Παρά το γεγονός ότι οι τιμές HQ υποδηλώνουν σχετικά χαμηλούς κινδύνους για την υγεία, η ύπαρξη υψηλών επιβαρύνσεων ρύπανσης, υποδηλώνει συσσώρευση που θα μπορούσε να επηρεάσει ευάλωτους πληθυσμούς και κυρίως τα παιδιά.



Σχήμα 2: Χωρική παρεμβολή του HQ για ενήλικες



Σχήμα 3: Χωρική παρεμβολή του HQ για παιδιά

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤ

Τα συμπεράσματα αυτής της μελέτης αποκαλύπτουν πως τα αστικά εδάφη της Θεσσαλονίκης, υπόκεινται σε σημαντική ρύπανση από βαρέα μέταλλα. Οι εκτιμήσεις κινδύνου για την υγεία δείχνουν ότι οι μη καρκινογόνοι κίνδυνοι για ενήλικες και παιδιά παραμένουν γενικά κάτω από τα κρίσιμα όρια. Ωστόσο, σε περιοχές με την υψηλότερη ρύπανση, τα παιδιά διατρέχουν αυξημένο κίνδυνο λόγω της μεγαλύτερης έκθεσης. Συνολικά, τα αποτελέσματα αυτά υπογραμμίζουν την επείγουσα ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση και στοχευμένη αποκατάσταση σε εντοπισμένα σημεία υψηλής συγκέντρωσης, προκειμένου να μετριαστούν οι οικολογικοί και υγειονομικοί κίνδυνοι. Η μελέτη αυτή παρέχει μια κρίσιμη βάση για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη πολιτικών με στόχο τη διαχείριση της ρύπανσης του αστικού εδάφους και την προστασία της δημόσιας υγείας.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Awewomom, Jonathan, Felicia Dzeble, Yaw Doudu Takyi, Winfred Bediakoh Ashie, Emil Nana Yaw Osei Ettey, Patricia Eyram Afua, Lyndon N. A. Sackey, Francis Opoku, and Osei Akoto. 2024. “Addressing Global Environmental Pollution Using Environmental Control Techniques: A Focus on Environmental Policy and Preventive Environmental Management.” *Discover Environment* 2(1). doi:10.1007/s44274-024-00033-5.

Baltas, Hasan, Murat Sirin, Emre Gökbayrak, and Ali Erdem Ozcelik. 2020. “A Case Study on Pollution and a Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils around Sinop Province, Turkey.” *Chemosphere* 241. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125015.

Bourliva, A., N. Kantiranis, L. Papadopoulou, E. Aidona, C. Christophoridis, P. Kollias, M. Evgenakis, and K. Fytianos. 2018. “Seasonal and Spatial Variations of Magnetic Susceptibility and Potentially Toxic Elements (PTEs) in Road Dusts of Thessaloniki City, Greece: A One-Year Monitoring Period.” *Science of the Total Environment* 639:417–27. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.170.

Dawam, Mohamed, Mohamed Gobara, Hussein Oraby, Mahmoud Y. Zorainy, and Islam M. Nabil. 2025. “Advances in Membrane Technologies for Heavy Metal Removal from Polluted Water: A Comprehensive Review.” *Water, Air, and Soil Poll.* 236(7).

Epa, Us. n.d. *Child-Specific Exposure Factors Handbook United States Environmental Protection Agency*. http://www.epa.gov/ncea.

Hakanson, Lars. 1980. “An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control.a Sedimentological Approach.” *Water Research* 14(8):975–1001. doi:10.1016/0043-1354(80)90143-8. ISO 10390 Second edition. 2005. www.iso.org.

Ondrasek, Gabrijel, Jonti Shepherd, Santosha Rathod, Ramesh Dharavath, Muhammad Imtiaz Rashid, Martin Brtnicky, Muhammad Shafiq Shahid, Jelena Horvatinec, and Zed Rengel. 2025. “Metal Contamination - a Global Environmental Issue: Sources, Implications & Advances in Mitigation.” *RSC Advances* 15(5):3904–27.

Sager, Manfred. 2020. “Urban Soils and Road Dust—Civilization Effects and Metal Pollution—A Review.” *Environments* 7(11):98. doi:10.3390/environments7110098.

Tang, Shuya, Chunhui Wang, Jing Song, Stanley Chukwuemeka Ihenetu, and Gang Li. 2024. “Advances in Studies on Heavy Metals in Urban Soil: A Bibliometric Analysis.” *Sustainability* 16(2):860. doi:10.3390/su16020860.

Xu, Xiaocang, Yanglin Zhong, Shuangshuang Cai, Lei Lei, and Jian Peng. 2025. “Does Air Pollution Aggravate Health Problems in Low-Income Countries? Verification from Countries Along the Belt and Road.” *Sustainability (Switzerland)* 17(5).

45. ΑΠΟ ΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ: Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΑΤΡΑΚΤΥΛΙΔΑΣ ΣΕ ΑΚΡΑΙΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΜΟΛΥΣΝΗΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΥΣ

C. Kikis[1], K. A. Jarosch[2], M. Wiggenhauser[3], V. Antoniadis[1]

[1] *Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, 38446 Βόλος, Ελλάδα, chkikis@uth.gr antoniadis@uth.gr*
[2] *Τμήμα Αγροοικολογίας και Περιβάλλοντος, Agroscope, Reckenholz 191, CH-8046 Ζυρίχη, Ελβετία*
[3] *Ινστιτούτο Γεωπονικών Επιστημών, ETH Zurich, Eschikon 33, CH-8315, Lindau, Ελβετία*

Περίληψη

Η ατρακτυλίδα (Carthamus tinctorius) έχει τραβήξει την προσοχή για την παραγωγή βιοντίζελ και την αποκατάσταση βαρέων μετάλλων στο έδαφος, μια διαδικασία γνωστή ως φυτοδιαχείριση. Στην παρούσα μελέτη, εξετάσαμε αν η ατρακτυλίδα μπορεί να αναπτυχθεί υπό αλκαλικότητα με ακραία επίπεδα ρύπανσης του εδάφους με Cd (κάδμιο) ή Pb (μόλυβδο). Διεξήχθη πείραμα σε γλάστρες διάρκειας 20 εβδομάδων χρησιμοποιώντας αλκαλικό μεσογειακό έδαφος (pH = 8,2 ± 0.4, $CaCO_3$ = 20%, οργανική ύλη = 2.2%). Στο έδαφος εφαρμόστηκε 0, 50 και 100 mg Cd/kg και 0, 1500 και 3000 mg Pb/kg εδάφους. Η ατρακτυλίδα παρήγαγε ξηρή βιομάζα βλαστού 3,51 g/φυτό και 0,67 g για τις ρίζες στον μάρτυρα, ενώ στα 50 mg Cd/kg μειώθηκε σε 2,32 g/φυτό. Στα 100 mg Cd/kg η βιομάζα μειώθηκε κατά 88,3% λόγω της τοξικότητας του Cd. Αντίθετα, στα 1500 mg Pb/kg η βιομάζα των βλαστών αυξήθηκε σε σύγκριση με τον μάρτυρα, δηλαδή 4,1 g/φυτό για τους βλαστούς και 0,63 g για τις ρίζες· πιθανώς η συσσώρευση Pb ενίσχυσε τη δραστηριότητα των αντιοξειδωτικών και προώθησε την ανάπτυξη της βιομάζας. Οι συγκεντρώσεις Cd κυμάνθηκαν από 12,9 έως 268 mg/kg στους βλαστούς και 154 έως 443 mg/kg στις ρίζες, ενώ οι συγκεντρώσεις Pb κυμάνθηκαν από 58,8 έως 100 mg/kg και 72,3 έως 331 mg/kg αντίστοιχα. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να διευκρινιστεί η σχέση μεταξύ της παραγωγής βιομάζας και της δραστηριότητας των αντιοξειδωτικών που συμμετέχουν στην αντιμετώπιση του στρες στην ατρακτυλίδα. Συμπεραίνουμε ότι η καλλιέργεια ατρακτυλίδας για τη φυτοδιαχείριση των μεσογειακών περιβαλλόντων αποτελεί μια βιώσιμη επιλογή. Μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να ελέγξουν την ανάπτυξη της ατρακτυλίδας σε πεδία με φυσικά ρυπασμένα εδάφη.

Λέξεις κλειδιά: Φυτοδιαχείριση, ρύπανση εδαφών, κυκλική οικονομία, αποκλεισμός μετάλλων, κλιματική αλλαγή

TURNING POLLUTION INTO BIODIESEL: GROWTH OF *CARTHAMUS TINCTORIUS UNDER* SEVERE HEAVY METAL SOIL CONTAMINATION

C. Kikis[1]*[*], K. A. Jarosch[2], M. Wiggenhauser[3], V. Antoniadis[1]*[*]

*A[1] Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446 Volos, Greece chkikis@uth.gr; * antoniadis@uth.gr*
[2] Department of Agroecology and Environment, Agroscope, Reckenholz 191, CH-8046 Zurich, Switzerland
*[3] Institute of Agricultural Sciences, ETH Zurich, Eschikon 33, CH-8315 Lindau, Switzerland **

ABSTRACT

Safflower (*Carthamus tinctorius*) has gained attention for biodiesel production and remediation of heavy metals in soils, a process known as phytomanagement. In this study, we tested if safflower can grow under alkalinity with extreme levels of soil Cd or Pb contamination. A 20-week pot experiment was conducted using alkaline Mediterranean soil (pH = 8.2 ± 0.4, $CaCO_3$ = 20%, organic matter = 2.2%). Soil was treated with 0, 50, and 100 mg Cd/kg and 0, 1500, and 3000 mg Pb/kg soil. Safflower produced a shoot dry yield of 3.51 g/plant and 0.67 g for roots at control, while at 50 mg Cd/kg it was decreased to 2.32 g/plant. At the 100 mg Cd/kg biomass was reduced by 88.3%, as a result of Cd toxicity. In contrast, at the 1500 mg Pb/kg shoot biomass increased compared to the control, i.e., 4.1 g/plant for shoots and 0.63 g for roots; it is possibly that Pb accumulation stimulated antioxidant activity and promoted biomass growth. The Cd concentrations were in the range of 12.9 – 268 mg/kg in shoot and 154 – 443 mg/kg in roots, while Pb concentrations ranged from 58.8 to 100 mg/kg and 72.3 – 331 mg/kg respectively. Ongoing research is necessary to elucidate the relationship between biomass production and the activity of antioxidants involved in stress mitigation in safflower. We conclude that cultivating safflower for the phytomanagement of Mediterranean environments is a viable option. Future research should test safflower under natural contaminated soils.

Keywords: Phytomanagement, soil contamination, circular economy, metal exclusion, climate change

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρύπανση του εδάφους μπορεί να προέλθει από βαρέα μέταλλα, όπως το κάδμιο (Cd) και ο μόλυβδος (Pb). Πολλές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί για την απορρύπανση των εδαφών, ωστόσο οι συμβατικές φυσικοχημικές μέθοδοι συχνά είναι δαπανηρές και διαταράσσουν το έδαφος. Η φυτοεξυγίανση, δηλαδή η χρήση φυτών που απορροφούν, σταθεροποιούν ή αποδομούν ρύπους, αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση (Kikis et al., 2024). Πέραν της παραδοσιακής φυτοεξυγίανσης, έχει αναδειχθεί η έννοια της «φυτοδιαχείρισης» ως μια ολιστική και βιώσιμη στρατηγική αντιμετώπισης της εδαφικής ρύπανσης. Η φυτοδιαχείριση συνίσταται στην καλλιέργεια κατάλληλων μη εδώδιμων φυτών σε ρυπασμένες εκτάσεις με στόχο τόσο τη μείωση της ρύπανσης και την ταυτόχρονη παραγωγή ωφέλιμων προϊόντων από τη βιομάζα (Antoniadis et al., 2019). Σε αυτό το πλαίσιο, η ατρακτυλίδα (*Carthamus tinctorius* L.) αναδεικνύεται ως ένα πολλά υποσχόμενο φυτό για την αξιοποίηση υποβαθμισμένων εδαφών. Οι σπόροι του περιέχουν 26–45% έλαιο πλούσιο σε ελαϊκό και λινελαϊκό οξύ, γεγονός που τη καθιστά ελκυστική πρώτη ύλη για παραγωγή βιοντίζελ (Ciaramella et al., 2022). Παρομοίως, το φαρμακευτικό χαμομήλι (*Matricaria recutita* L.) θεωρείται μια ενδιαφέρουσα μη εδώδιμη καλλιέργεια για σκοπούς φυτοδιαχείρισης. Μελέτες έδειξαν ότι το αιθέριο έλαιο που αποστάχθηκε από άνθη χαμομηλιού τα οποία είχαν καλλιεργηθεί σε έδαφος ρυπασμένο με Cd και Pb δεν περιείχε ανιχνεύσιμες ποσότητες αυτών των μετάλλων (Száková et al., 2018).

Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμένα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την αποτελεσματικότητα του χαμομηλιού και της ατρακτυλίδας στην αντιμετώπιση της ρύπανσης από Cd και Pb. Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να καλύψει αυτό το ερευνητικό κενό, διερευνώντας πειραματικά την ανάπτυξη, τη βιομάζα και την πρόσληψη Cd και Pb από φυτά χαμομηλιού και ατρακτυλίδας καλλιεργούμενα σε ρυπασμένο έδαφος.

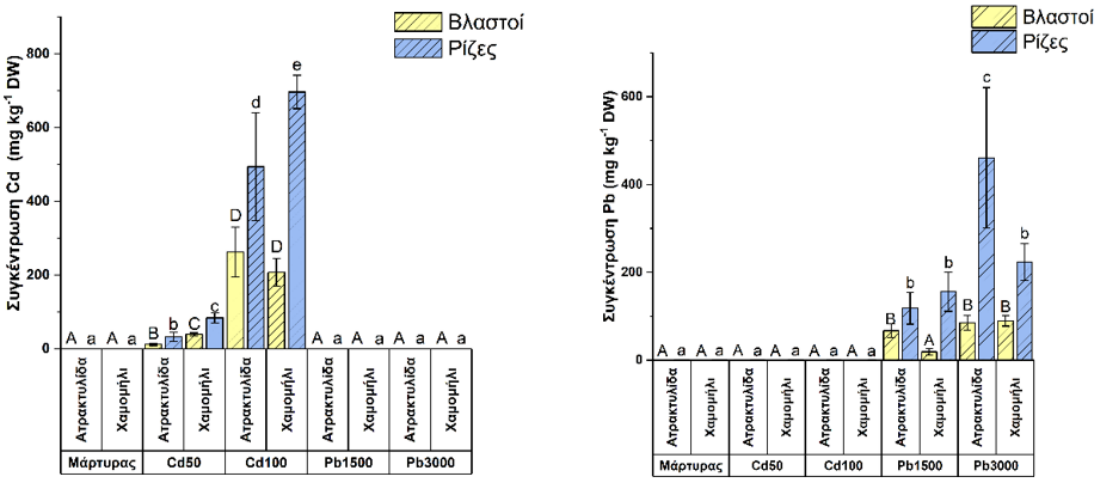
2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα διεξήχθη στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο και διήρκησε 6 μήνες. Τα δύο επιλεγμένα φυτά, χαμομήλι (*Matricaria recutita*) και ατρακτυλίδα (*Carthamus tinctorius*) φυτεύτηκαν σε γλάστρες με μη ρυπασμένο έδαφος, το οποίο συλλέχθηκε από το Βελεστίνο σε βάθος 0-30 cm. Στη συνέχεια, προσθέσαμε στις γλάστρες μόλυβδο (Pb) και κάδμιο (Cd) σε 3 κλιμακούμενες συγκεντρώσεις, ως εξής: μηδέν, μεσαία και υψηλή. Το Cd προστέθηκε σε επίπεδα 0 (Control), 50 (Cd50) και 100 (Cd100) mg ανά kg εδάφους, ενώ το Pb θα προστεθεί σε επίπεδα 0 (Control), 1500 (Pb 1500) και 3000 (Pb 3000) mg ανά kg εδάφους. Αυτό οδήγησε σε ένα σύνολο 120 γλαστρών (3 επίπεδα ρύπανσης × 2 είδη φυτών × 2 μέταλλα × 10 επαναλήψεις).

Με την ολοκλήρωση του πειράματος μετρήθηκε ο Pb και το Cd στο έδαφος και στα υπέργεια μέρη των φυτών, καθώς και παράμετροι ανάπτυξης και φυσιολογίας των φυτών. Η μέτρηση των μετάλλων πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Αγροοικολογίας και Περιβάλλοντος, Agroscope, Ελβετία με τη χρήση Thermo ICP-MS ICAPTQ (Massachusetts, USA).

«Λευκά» δείγματα (blanks) συμπεριλήφθηκαν σε όλες τις παρτίδες εκχύλισης για να ληφθεί υπόψη πιθανή επιμόλυνση στο εργαστήριο. Για την ανάλυση των δεδομένων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SPSS (IBM SPSS Statistics v.29). Τα δεδομένα υποβλήθηκαν σε ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την αξιολόγηση της επίδρασης Cd και Pb στις εξαρτώμενες μεταβλητές. Για τον εντοπισμό σημαντικών διαφορών μεταξύ των μέσων τιμών ($p < 0,05$) χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση Post-hoc κατά Duncan.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ



Σχήμα 1. Συγκέντρωση καδμίου και μολύβδου στους βλαστούς και στις ρίζες του χαμομηλιού και της ατρακτυλίδας στις διαφορετικές μεταχερίσεις. Τα γράμματα πάνω από τις μπάρες υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων όρων ($p < 0,05$).

Η συσσώρευση Cd στην ατρακτυλίδα και το χαμομήλι αυξήθηκε σημαντικά με την αύξηση των συγκεντρώσεων Cd, με τις ρίζες να περιέχουν σταθερά υψηλότερα επίπεδα Cd από τους βλαστούς και τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται στο Cd100. Η

συσσώρευση Pb ήταν μεγαλύτερη στις ρίζες και για τα δύο είδη, με περιορισμένη μεταφορά στους βλαστούς, και αυξήθηκε αναλογικά από το Pb1500 στο Pb3000 (**Σχ 1**).

Η συνολική ποσότητα Cd στους βλαστούς αυξήθηκε απότομα στις προσθήκες με Cd, ιδιαίτερα στο Cd100, ενώ η συνολική ποσότητα Pb στους βλαστούς παρέμεινε σχετικά χαμηλή ακόμη και στο Pb3000, γεγονός που αντικατοπτρίζει τη χαμηλή κινητικότητα του Pb εντός των φυτών. Η παραγωγή βιομάζας μειώθηκε σημαντικά και στα δύο είδη υπό συνθήκες καταπόνησης, με τις μεγαλύτερες μειώσεις να καταγράφονται στο Cd100 και το Pb3000, όπου οι τιμές ξηρού βάρους ήταν σχεδόν μηδενικές. Ακόμη και στα μεσαία επίπεδα ρύπανσης (Cd50, Pb1500), η ανάπτυξη των φυτών ήταν αισθητά μειωμένη σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Η ατρακτυλίδα διατήρησε γενικά ελαφρώς υψηλότερη βιομάζα από το χαμομήλι υπό καταπόνηση από Pb, αν και τα δύο είδη παρουσίασαν σημαντική μείωση ανάπτυξης σε υψηλή έκθεση σε Cd και Pb. Ωστόσο, στη μεταχείριση Pb1500 η ατρακτυλίδα αύξησε σημαντικά την παραγωγή βιομάζας σε σχέση με το μάρτυρα, γεγονός που υποδεικνύει πιθανώς μεγάλη ανοχή του φυτού στο συγκεκριμένο μέταλλο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ατρακτυλίδα εμφάνισε υψηλή ικανότητα πρόσληψης και μεταφοράς του Cd στους βλαστούς, γεγονός που υποδεικνύει το δυναμικό της για εφαρμογές φυτοεξαγωγής, ενώ ο Pb παρέμεινε κυρίως στις ρίζες, περιορίζοντας τη δυνατότητα απομάκρυνσής του μέσω υπέργειας βιομάζας. Και τα δύο μέταλλα προκάλεσαν έντονη μείωση στη βιομάζα και στις παραμέτρους ανάπτυξης, με τις μεγαλύτερες επιδράσεις να καταγράφονται στις υψηλότερες συγκεντρώσεις. Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ατρακτυλίδα μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά για την φυτοδιαχείριση εδαφών με Cd, ενώ για τον Pb απαιτούνται εναλλακτικές ή συμπληρωματικές στρατηγικές διαχείρισης.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Antoniadis, V., Shaheen, S. M., Levizou, E., Shahid, M., Niazi, N. K., Vithanage, M., and Rinklebe, J., 2019. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment?-A review. Environment international, 127, 819-847.

Kikis, C., Thalassinos, G., and Antoniadis, V., 2024. Soil phytomining: recent developments—a review. Soil Systems, 8, 8.

Moreira, H., Pereira, S. I., Mench, M., Garbisu, C., Kidd, P., & Castro, P. M., 2021. Phytomanagement of metal (loid)-contaminated soils: options, efficiency and value. Frontiers in Environmental Science, 9, 661423.

Száková, J., Dziaková, M., Kozáková, A., and Tlustoš, P., 2018. The risk element uptake by chamomile (*Matricaria recutita* (L.) Rauschert) growing in four different soils. Archives of Environmental Protection, 44.

46. ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΚΑΙ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ ΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τ. Μήνος, Α. Σταματάκης, Ε. Γκόλια

Εργαστήριο Εδαφολογίας, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη, email: egolia@agro.auth.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση των πυρκαγιών και πλημμυρών στην υποβάθμιση του εδάφους, εστιάζοντας στους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) και στα βαρέα μέταλλα (ΒΜ), ρύποι οι οποία σχετίζονται άμεσα με τοξικές ιδιότητες και με την ικανότητα τους να εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα. Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται στην βιβλιογραφική ανασκόπηση πρόσφατων δημοσιευμένων μελετών σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι κύριες μορφές των ρύπων, οι πηγές προέλευσής τους και η επιφανειακή τους απόθεση, η συμπεριφορά – μεταφορά – κινητικότητα τους και η διάρκεια παραμονής τους στο έδαφος, σε συνδυασμό με τις μεταβολές που προκαλούν στις φυσικοχημικές ιδιότητες των μεταπυρικών και μεταπλημμυρικών εδαφών (εδαφικό pH, ΙΑΚ, οργανική ουσία, πορώδες, ορυκτολογικές μεταβολές κτλ.). Τα αποτελέσματα των εργασιών αναλύθηκαν εκ νέου με στατιστικά εργαλεία και νέα συμπεράσματα προέκυψαν, ακολουθώντας τη μεθοδολογία μιας έρευνας μετα- ανάλυσης. Καταληκτικό γεγονός είναι πως η αύξηση της συγκέντρωσης των PAHs στα μεταπυρικά εδάφη είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα μεταπλημμυρικά, ενώ για τα βαρέα μέταλλα ισχύει το αντίθετο.

WILDFIRES AND FLOODS AS FACTORS OF SOIL DEGRADATION

T. Minos, A. Stamatakis, E. Golia

Aristotle University of Thessaloniki, Agriculture Department, 54124, Thessaloniki, email: egolia@agro.auth.gr

ABSTRACT

The present research focuses on the impact of wildfires and floods on soil degradation, regarding polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals (HMs). The methodological approach is based on a literature review of recent published papers following a meta-analysis plan. The main forms of PAHs and HMs present in soils, their behavior – transport – mobility, and their persistence in the soil are analyzed, along with changes caused in the physicochemical properties of post-fire and post-flood soils (soil pH, CEC, organic matter, porosity, mineralogical changes, etc.). The conclusive finding is that the increase in PAHs concentration in post-fire soils is greater than in post-flood soils, whereas the opposite is observed regarding HMs concentrations.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πυρκαγιές και οι πλημμύρες αποτελούν βασικό αίτιο για την υποβάθμιση των εδαφών. Η Ελλάδα καταγράφει από τις υψηλότερες μέσες καμένες εκτάσεις στην Ευρωπαϊκή Ένωση (EFFIS), ενώ από το 2018 έως και το 2024 έχουν συμβεί συνολικά 70 πλημμύρες, με αξιοσημείωτη την κακοκαιρία Daniel. Οι πυρκαγιές και οι πλημμύρες μεταβάλουν σημαντικά τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, ενώ είτε το εμπλουτίζουν με βαρέα μέταλλα (ΒΜ) και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs), είτε τα μεταφέρουν σε γειτονικές περιοχές με πολυάριθμους μηχανισμούς.

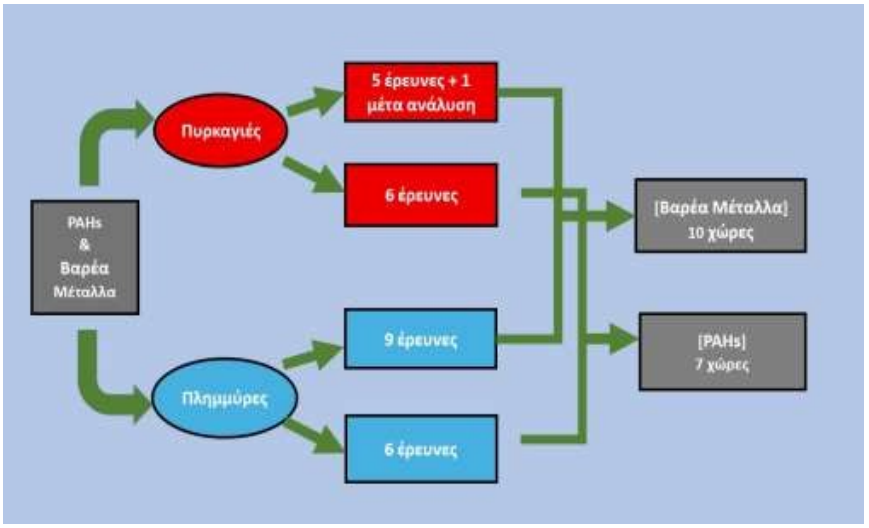
Στην περίπτωση των πυρκαγιών, η στάχτη που προέρχεται από την καμένη οργανική ύλη είναι ο βασικός φορές ΒΜ και PAHs, όπου είτε προσροφώνται στο έδαφος, είτε μεταφέρονται μέσω της επιφανειακής απορροής σε γειτονικά εδάφη. Παράλληλα, η μακροχρόνια και χαμηλής έντασης καύση της τύρφης ευνοεί σημαντικά την παραγωγή PAHs (Chandler et al. 1983), οι οποίοι κυρίως μεταφέρονται με τρεις μηχανισμούς: Την εξάτμιση, την έκπλυση και την μικροβιακή διάσπαση (Harper et al., 2019). Τα ΒΜ αντίθετα από τους PAHs, θεωρούνται επίμονοι ρύποι και καταλήγουν στο έδαφος είτε μέσω της στάχτης, όπου στην συνέχεια προσροφώνται ισχυρά, είτε εξαιτίας της θερμικής μεταβολής των ορυκτών (Johnston et al., 2019).

Οι πλημμύρες αντίστοιχα, λειτουργούν περισσότερο ως φορείς ΒΜ και PAHs. Βασικό χαρακτηριστικό είναι η πρόσδεση των PAHs σε κολλοειδή τεμαχίδια ή οργανικά υλικά που βρίσκονται στο πλημμυρικό νερό. Επίσης, η έλλειψη οξυγόνου και η καταστροφή των ριζών ενισχύουν την αναερόβια μικροβιακή δραστηριότητα, με αποτέλεσμα να ευνοείται η σύνθεση PAHs στο έδαφος (Oleszcszuk et al., 2007). Σε ότι αφορά στα ΒΜ, σημαντικό είναι το φαινόμενο της επανενεργοποίησης τους. Η διαταραχή των επιφανειακών και βυθισμένων ιζημάτων προκαλεί την αποδέσμευσή τους και την εκ νέου εισαγωγή τους στο υδάτινο περιβάλλον, είτε ως διαλυμένες ενώσεις, είτε προσροφημένες σε στερεά υλικά (Förstner & Salomons, 1980).

Παράλληλα, η συσσώρευση οργανικού άνθρακα και η απουσία οξυγόνου δημιουργούν αναγωγικές συνθήκες, οι οποίες ευνοούν την αποικοδόμηση μεταλλικών οξειδίων, όπως αυτών του σιδήρου και του μαγγανίου, επιτρέποντας την απελευθέρωση των μεταλλικών ιόντων. Είναι επομένως, κατανοητό πως και οι δύο φυσικές καταστροφές, μπορούν να επιβαρύνουν τα εδαφικά οικοσυστήματα με ποικίλους τρόπους, απειλώντας την εμφάνιση τοξικότητας στην τροφική αλυσίδα.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

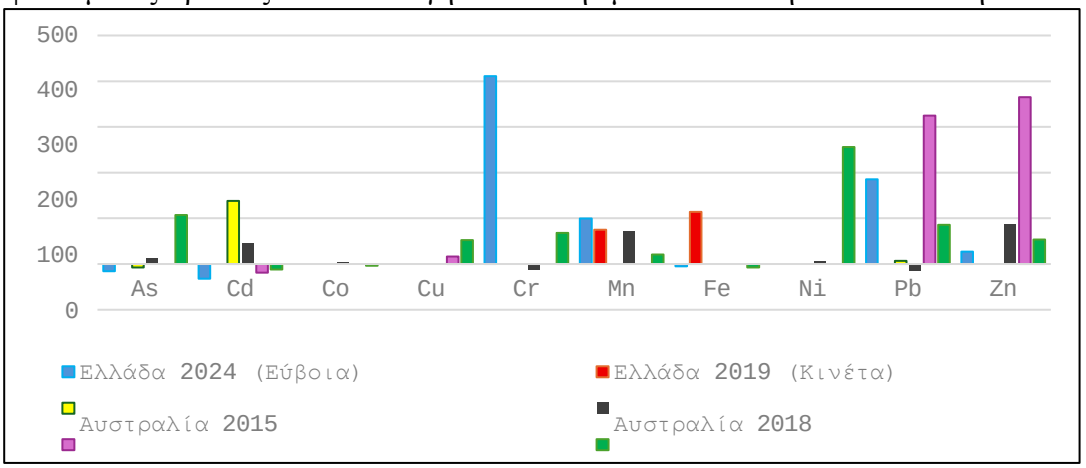
Για την συλλογή δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν ως βάσεις δεδομένων το Scopus, το Google Scholar και το PubMed. Αναζητήθηκαν άρθρα της εθνικής και παγκόσμιας βιβλιογραφίας, που αναφέρονται σε πληροφορίες σχετικά με τις μεταβολές των επιπέδων των ΒΜ και PAHs των εδαφών, που έχουν επηρεαστεί από πυρκαγιές και πλημμύρες. Για τα αποτελέσματα που προέκυψαν ακολουθήθηκε η φιλοσοφία της ερευνητικής μεθοδολογίας της μέτα-ανάλυσης (meta-analysis).



Εικόνα 1. Απεικόνιση της μεθοδολογίας της έρευνας (δεδομένα από Scopus, Google Scholar και PubMed)

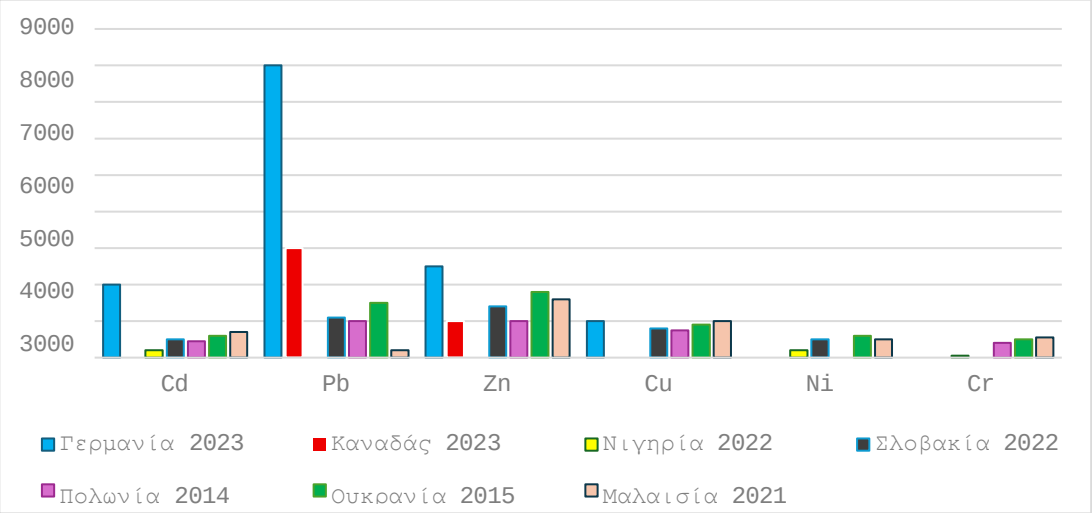
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η μέση ποσοστιαία μεταβολή των ολικών συγκεντρώσεων των ΒΜ μετά από μια πυρκαγιά (Εικόνα 2) και πλημμύρα (Εικόνα 3) παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα σύμφωνα με τις έρευνες που συνελέγησαν και την μέτα-ανάλυση που ακολούθησε.



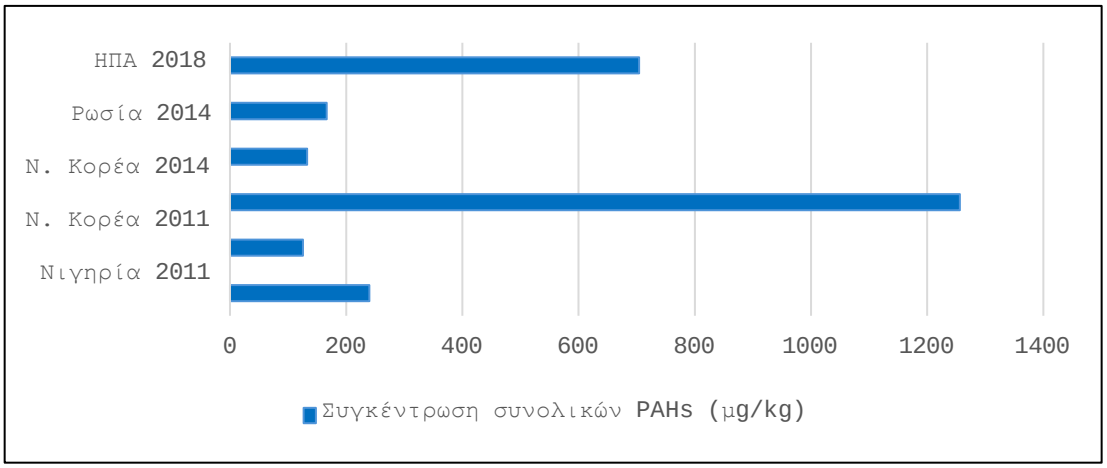
Εικόνα 2. Μεταβολή (%) ολικών συγκεντρώσεων ΒΜ σε μεταπυρικά εδάφη

Όπως προκύπτει από τη μελέτη των διαγραμμάτων, μετά από μια πυρκαγιά οι αναμενόμενες συγκεντρώσεις ΒΜ μπορεί να εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις καθώς η επιρροή εξωγενών παραγόντων έχουν μεγάλη σημασία (τύπος καύσης, καιρικές συνθήκες, καύσιμη ύλη). Η μείωση των συγκεντρώσεων ορισμένων ΒΜ πιθανόν οφείλεται στην διάβρωση του εδάφους εξαιτίας της πυρκαγιάς και την μετέπειτα απομάκρυνση των ΒΜ μέσω στάχτης και επιφανειακής απορροής. Στο διάγραμμα φαίνεται πως στοιχεία όπως το Ni, ο Pb, το Cr και ο Zn μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να αυξηθούν σε δραματικό βαθμό. Από την άλλη, στοιχεία όπως το Cd και ειδικά το Mn παρουσιάζουν μικρότερες διακυμάνσεις αλλά αισθητή αύξηση. Οι αναφορές σε στοιχεία όπως Fe, Co και Cu είναι λιγότερες και μικρότερης σημασίας καθώς δεν συμβάλλουν σημαντικά στην ρύπανση του εδάφους.

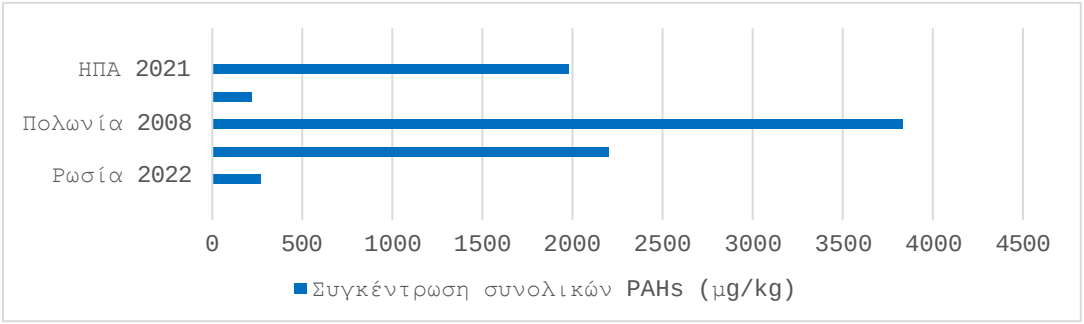


Εικόνα 3. Μεταβολή (%) ολικών συγκεντρώσεων σε μεταπλημμυρικά εδάφη

Στην Εικόνα 3 είναι κατανοητό πως τα μεταπλημμυρικά εδάφη είναι πολύ πιο επιβαρυμένα σε ΒΜ από τα μεταπυρικά. Αυτό πιθανόν οφείλεται στους διάφορους μηχανισμούς μιας πλημμύρας που επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά των ΒΜ από γειτονικές περιοχές που πιθανόν, είναι βασικές πηγές ΒΜ (εξορυκτικές περιοχές, βιομηχανικές ζώνες, αστικές περιοχές κτλ.).



Εικόνα 4. Συγκέντρωση (μg/kg) των συνολικών PAHs σε μεταπυρικά εδάφη



Εικόνα 5. Συγκέντρωση (μg/kg) των συνολικών PAHs σε μεταπλημμυρικά εδάφη

Στο Εικόνα 4 φαίνεται η προσθήκη σε μg/kg PAHs στο έδαφος μετά από μια πυρκαγιά. Αντίστοιχα με τα ΒΜ, έτσι και οι συγκεντρώσεις των PAHs εξαρτούνται σημαντικά από εξωγενείς παράγοντες. Βέβαια, βασική διαφορά των δύο είναι πως ενώ τα ΒΜ είναι επίμονοι ρύποι και δεσμεύονται στο έδαφος ισχυρη συγκέντρωση των PAHs ελαττώνεται σημαντικά εντός ενός χρόνου (Kim et al., 2011).

Στην Εικόνα 5 φαίνεται πως η συγκέντρωση των PAHs στα μεταπλημμυρικά εδάφη δεν διαφέρει ιδιαίτερα συγκριτικά με τα μεταπυρικά με την μόνη διαφορά να είναι πως σημειώνει υψηλότερα μέγιστα. Αυτό οφείλεται διότι η επίδραση της πλημμύρας στην ρύπανση του εδάφους επηρεάζεται δραματικά από περιοχές όπως βιομηχανικές και αστικές ζώνες που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις PAHs.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τόσο η πυρκαγιές, όσο και οι πλημμύρες επιβαρύνουν σημαντικά τα εδάφη με ρύπους, όπως ΒΜ και PAHs. Στην περίπτωση των ΒΜ, οι πλημμύρες φαίνεται πως επηρεάζουν περισσότερο το έδαφος συγκριτικά με τις πυρκαγιές, καθώς όχι μόνο η ποσοστιαία μεταβολή των συγκεντρώσεων των ΒΜ είναι μεγαλύτερη, αλλά δεν υπάρχει και μείωση στην συγκέντρωση τους. Οι πυρκαγιές «δημιουργούν» τους ρύπους αυτούς, ενώ οι πλημμύρες τους μεταφέρουν. Αν και οι πλημμύρες ενδέχεται να επιβαρύνουν τα εδάφη με ρύπους περισσότερο από τις πυρκαγιές, αυτό δεν συνεπάγεται απαραίτητα ότι αποτελούν και την μεγαλύτερη απειλή. Η διαφορά αυτή βασίζεται στο γεγονός πως η συχνότητα των δύο φαινομένων διαφέρει σημαντικά, με τις πυρκαγιές να εμφανίζονται συχνότερα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Gómez-Rey, M.X. and González-Prieto, S.J., 2014. *Short and medium-term effects of a wildfire and two emergency stabilization treatments on the availability of macronutrients and trace elements in topsoi*l. Science of the total environment, 493, 251-261.

Fernandez-Marcos, M.L., 2022. *Potentially toxic substances and associated risks in soils affected by wildfires: A review*. Toxics, 10(1),31

Oleszczuk, P., Baran, S. and Baranowska, E., 2007. *Influence of long-term soils flooding by distilled and post-sewage water on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) changes*. Water, Air, and Soil Pollution, 180(1), 237-248.

Ciszewski, D. and Grygar, T.M., 2016. *A review of flood-related storage and remobilization of heavy metal pollutants in river systems*. Water, Air, & Soil Pollution, 227(7), 239.

Rao, J.N. and Parsai, T., 2025. *Pollution and toxicity of heavy metals in wildfires-affected soil: A review and meta-analysis*. Environmental Pollution, p.125845.

47. ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ FE ΚΑΙ ΜΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΦΥΤΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΠΛΟΥΣΙΟ ΣΕ ΟΞΕΙΔΙΑ ΜΝ

Μ. Αληφραγκή, Α. Κεφαλίδης & Μ. Ορφανουδάκης

Δ.Π.Θ., Τμήμα Δασολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, 68200, Ορεστιάδα, mariaalifragki@yahoo.com

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι βιογεωχημικές μεταβολές των οξειδίων Fe και Mn σε πείραμα φυτοαποκατάστασης όπου χρησιμοποιήθηκε υπόστρωμα πλούσιο σε οξείδια Mn, προερχόμενα από επεξεργασία πυρολουσίτη. Στο εν λόγω υπόστρωμα εγκαταστάθηκαν τρία φυτικά είδη (*Pinus brutia, Cupressus sempervirens* και *Spartium junceum*) και σταδιακά εγκαταστάθηκε αυτοφυής βλάστηση. Αξιολογήθηκαν οι μεταβολές του υποστρώματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας των φυτικών ειδών και στο υπόλοιπο υπόστρωμα που καλύφτηκε με αυτοφυή βλάστηση μελετώντας τα ποσοστά των άμορφων και ελεύθερων οξειδίων Fe και Mn, σε συνδυασμό με το βάρος της ξηρής φυτομάζας και την ενζυμική δραστηριότητα των φωσφατασών. Μετά από 3,5 έτη φυσικής εξέλιξης και ανάπτυξης της βλάστησης παρατηρήθηκε σε σχέση με τον Μάρτυρα (αρχή πειραματικού χρόνου) στατιστικώς σημαντική αύξηση των άμορφων και των ελεύθερων οξειδίων Fe και Mn τόσο στην περιοχή της ριζόσφαιρας των τριών φυτικών χειρισμών όσο και στο υπόλοιπο υπόστρωμα. Οι συγκρίσεις μεταξύ των φυτικών χειρισμών στην περιοχή της ριζόσφαιρας δεν έδειξαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές ως προς την ανάπτυξη της αυτοφυούς βλάστησης, αλλά ούτε και για τα οξείδια Fe και Mn και την ενζυμική δραστηριότητα. Στο υπόλοιπο υπόστρωμα διαπιστώθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των φυτικών χειρισμών σε όλες τις παραπάνω παραμέτρους εκτός από τα ποσοστά των ελεύθερων οξειδίων Fe και Mn. Για να διερευνηθεί η επίδραση των τριών φυτικών ειδών έγιναν συγκρίσεις μεταξύ των ριζοσφαιρών τους και του υπόλοιπου υποστρώματος. Βρέθηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μόνο στον χειρισμό του *Spartium junceum* για το άμορφα οξείδια Fe (4,10 %) και τα ελεύθερα οξείδια Fe και Mn (6,11 και 7,56 %, αντίστοιχα) όπου στην ριζόσφαιρά του τα ποσοστά είχαν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές. Στον συγκεκριμένο χειρισμό εκτός από το ποσοστό των άμορφων οξειδίων Mn δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές ούτε και στο ξηρό βάρος της αυτοφυούς βλάστησης. Τέλος, ο λόγος ενεργού Fe (άμορφα οξείδια Fe /ελεύθερα οξείδια Fe) στην περιοχή της ριζόσφαιρας του *Pinus brutia* (0,63) ήταν σημαντικά μικρότερος από του υπολοίπου υποστρώματος (0,70), υποδεικνύοντας πιθανή εξέλιξη - ωρίμανση στο υπόστρωμα με την επίδραση της βλάστησης, διαφορετική ανάλογα με το φυτικό είδος. Τα ευρήματα αυτά υποδεικνύουν χημική και βιολογική ωρίμανση του υποστρώματος, επηρεαζόμενη από την ανάπτυξη της βλάστησης και τις ιδιότητες κάθε φυτικού είδους.

Λέξεις κλειδιά: οξείδια Fe και Mn, φυτοαποκατάσταση, ριζόσφαιρα

CHANGES IN Fe AND Mn OXIDES DURING PHYTOREMEDIATION USING A SUBSTRATE RICH IN Mn OXIDES

M. Alifragki✉, A. Kefalidis & M. Orfanoudakis

D.U.Th., Department of Forestry and Management of the Environment and Natural Resources, 68200, Orestiada, Greece, ✉mariaalifragki@yahoo.com

ABSTRACT

In this study was investigated the biogeochemical changes of Fe and Mn oxides in a phytoremediation experiment using a substrate rich in Mn oxides, derived from pyrolusite processing. Three plant species (*Pinus brutia*, *Cupressus sempervirens* and *Spartium junceum*) were established on this substrate along with the gradual development of native vegetation. The changes of the substrate in the rhizosphere area of the plant species and in the rest of the substrate covered with native vegetation were evaluated by studying the percentages of amorphous and free Fe and Mn oxides, in combination with the weight of the dry plant mass and the enzymatic activity of phosphatases. After 3.5 years of native evolution and vegetation development, a statistically significant increase in both amorphous and free Fe and Mn oxides was observed compared to the Control (beginning of the experimental period), both in the rhizospheres and in the rest of the substrate. No statistically significant differences were detected between the three plant treatments regarding native vegetation development, oxide concentrations, or enzymatic activity in the rhizosphere. In contrast, in the rest of the substrate, statistically significant differences were found between the plant treatments in all the above parameters except for the percentages of free Fe and Mn oxides. Comparisons between the rhizospheres and the remaining substrate showed statistically significant increases in amorphous Fe oxides (4.10 %) and free Fe and Mn oxides only in the *Spartium junceum* treatment (6.11 και 7.56 %, respectively). In this case, no significant differences were found in the amorphous Mn oxides or in the dry biomass of native vegetation. Finally, the ratio of active Fe (amorphous Fe oxides/free Fe oxides) in the rhizosphere of *Pinus brutia* (0.63) was significantly lower than in the rest of the substrate (0.70), indicating potential substrate maturation driven by vegetation and differing among plant species. These findings indicate chemical and biological maturation of the substrate, influenced by vegetation development and the properties of each plant species, highlighting their role in effective phytoremediation strategies.

Keywords: Fe and Mn oxides, phytoremediation, rhizosphere

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ελεύθερα οξείδια Fe προέρχονται από την αποσάθρωση των πετρωμάτων και έχουν την μορφή των άμορφων ή κρυσταλλικών οξειδίων, που δεν είναι μέρος των πρωτογενών ορυκτών του εδάφους (Al-Hamawandi et al., 2023). Τα άμορφα οξείδια Fe δεν έχουν καλά οργανωμένη κρυσταλλική δομή και με την πάροδο του χρόνου και υπό ευνοϊκές συνθήκες μετατρέπονται σε κρυσταλλικά. Είναι αυτά που αποτελούν το ενεργό κλάσμα του Fe, λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειας και των σημαντικών θέσεων προσρόφησης που κατέχουν (Schwertmann and Taylor, 1989). Η παρουσία και η κατανομή των διαφορετικών μορφών οξειδίων Fe στο έδαφος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τον βαθμό εξέλιξης του εδάφους, τις συνθήκες βλάστησης και καλλιέργειας κλπ (Trivedi and Axe, 2001; Al-Mahanna and Alabadi, 2025).

Δεδομένου ότι τα άμορφα οξείδια Fe μετασχηματίζονται σε κρυσταλλικά με την πάροδο του χρόνου ή την εξέλιξη των εδαφών χρησιμοποιείται ο λόγος ενεργού Fe (άμορφα οξείδια Fe /ελεύθερα οξείδια Fe), ως δείκτης των διαδικασιών σχηματισμού των εδαφών, των συνθηκών εδαφογένεσης και την εκτίμηση της ηλικίας των εδαφών (Al-Hamawandi et al., 2023). Αποτελεί δηλαδή κριτήριο του βαθμού γήρανσης και κρυσταλλοποίησης των ελεύθερων οξειδίων Fe (McFadden and Hendricks, 1985; Moody and Graham, 1995;

Jaworska et al., 2016). Οι τιμές του λόγου ενεργού Fe κυμαίνονται από 0 μέχρι 1 και όσο μικρότερος είναι τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός εξέλιξης του εδάφους (Gasparatos et al., 2004). Αυτό συμβαίνει γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός εξέλιξης ενός εδάφους, τόσο μεγαλύτερος γίνεται ο παρονομαστής του κλάσματος (άθροισμα των άμορφων και κρυσταλλικών οξειδίων) και αντίστοιχα τόσο μικραίνει ο αριθμητής (άμορφα οξείδια) (Al-Mahanna and Alabadi, 2025).

Το Mn στη φύση βρίσκεται κυρίως με τη μορφή οξειδίων (MnO_2) σε ορυκτά όπως ο πυρολουσίτης, μαγγανίτης κά. Τα οξείδια του μαγγανίου (Mn) έχουν πολλαπλές και σημαντικές χρήσεις τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και σε εφαρμογές τεχνολογίας και βιομηχανίας. Ομοίως με τα οξείδια Fe, και τα οξείδια Mn, βρίσκονται στο έδαφος ως άμορφα, κρυσταλλικά και ελεύθερα (Ross et al., 1976; Dixon and White, 2002; Zhu et al., 2012; Ettler et al., 2015).

Η μεταβολή από άμορφες προς κρυσταλλικές μορφές των οξειδίων Mn συνδέεται με το βαθμό ωρίμανσης του εδάφους υπό την επίδραση των κλιματικών και λοιπών εδαφικών συνθηκών και την παρουσία βλάστησης (Misra and Mishra, 1969; Howe et al., 2004; Li et al., 2021).

Η χρήση υλικών και παραπροϊόντων διαφόρων μορφών ως υπόστρωμα για την φυτοαποκατάσταση είναι γνωστή πρακτική. Ένας τρόπος για την παρακολούθηση των μεταβολών των υποστρωμάτων αυτών είναι η μελέτη της βιολογικής δραστηριότητά τους. Ιδιαίτερα η ενζυμική δραστηριότητα (π.χ. φωσφατασών) των εδαφών είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στις βραχυχρόνιες μεταβολές των συνθηκών τους, καθώς σχετίζεται με τις ιδιότητες του εδάφους και την επίδραση της βλάστησης (Hebrien and Neal, 1990; Alifragki et al., 2018; Alifragki et al., 2021).

Η δραστηριότητα των φωσφατασών στο έδαφος προέρχεται από: α) τις ρίζες των φυτών (Dinkelaker and Marschner, 1992), β) τους μύκητες (Tarafdar et al., 1988), γ) τους μύκητες που σχηματίζουν μυκόρριζες (Tarafdar and Marschner, 1994) και δ) τα βακτήρια (Tarafdar and Claassen, 1988). Αν και οι Eivazi και Tabatabai (1977) αναφέρουν ότι οι όξινες φωσφατάσες κυριαρχούν στα όξινα εδάφη, ενώ οι αλκαλικές στα αλκαλικά, υπάρχει κι άλλη προσέγγιση διαχωρισμού τους ανάλογα με την προέλευσή τους. Οι μικροοργανισμοί και κυρίως τα βακτήρια είναι η κύρια πηγή αλκαλικών φωσφατασών στο έδαφος, ενώ οι όξινες φωσφατάσες μπορεί να προέρχονται από φυτά, μύκητες και βακτήρια (Hebrien and Neal 1990; Tabatabai 1994; Tarafdar and Marschner 1994).

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη των μεταβολών των οξειδίων Fe και Mn υποστρώματος πλούσιο σε οξείδια Mn σε σχέση με την ανάπτυξης της βλάστησης σε συνθήκες φυτοαποκατάστασης.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Οξείδια Fe και Mn

Τα οξείδια του σιδήρου (Fe) και του μαγγανίου (Mn) αποτελούν σημαντικά συστατικά των εδαφών και παίζουν καθοριστικό ρόλο στις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Εμφανίζονται κυρίως ως προϊόντα αποσάθρωσης πρωτογενών ορυκτών και συμμετέχουν ενεργά στις διεργασίες οξείδωσης–αναγωγής, επηρεάζοντας τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων και ιχνοστοιχείων για τα φυτά. Τα οξείδια του σιδήρου, όπως η αιματίτης (Fe_2O_3) και η γκαιτίτης (FeOOH), προσδίδουν στα εδάφη χαρακτηριστικές κόκκινες ή κίτρινες αποχρώσεις, ενώ τα οξείδια του μαγγανίου, όπως η πυρολουσίτης (MnO_2), έχουν συνήθως μαύρο ή σκούρο γκρι χρώμα. Επιπλέον, τα οξείδια αυτά λειτουργούν ως επιφάνειες προσρόφησης για ανόργανα

και οργανικά μόρια, επηρεάζοντας την κινητικότητα μετάλλων βαρέων και ρύπων στο περιβάλλον. Οι συνθήκες οξείδωσης, το pH και η υγρασία του εδάφους καθορίζουν τη μορφή και τη σταθερότητά τους, κάνοντάς τα βασικούς δείκτες των εδαφικών διεργασιών.

2.2 Φυτοαποκατάσταση

Η φυτοαποκατάσταση είναι η διαδικασία εξυγίανσης του περιβάλλοντος με τη χρήση φυτών, αλλά και των μικροοργανισμών που συνδέονται μαζί τους. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι φυτοαποκατάστασης που είναι ικανές να καθαρίσουν ρυπασμένα περιβάλλοντα (εδάφη, νερά, ιζήματα), ή να επαναφέρουν την οικολογική ισορροπία διαταραγμένων περιοχών, με χαμηλό κόστος. Ειδικά επιλεγμένα φυτά απορροφούν, διασπούν ή σταθεροποιούν τους ρύπους (π.χ. βαρέα μέταλλα, φυτοφάρμακα). Επίσης, πολλά φυτικά είδη είναι ικανά να αναπτυχθούν σε φτωχά, διαβρωμένα εδάφη. Μπορούν να συμβάλλουν στη σταθεροποίηση των πρανών, τη μείωση της διάβρωσης, τον εμπλουτισμό του εδάφους με οργανική ουσία και άζωτο, καθώς και τη δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών για την επανεγκατάσταση της φυσικής βιοποικιλότητας

3. ΥΛΙΚΑ - ΜΕΘΟΔΟΙ

Η εγκατάσταση του πειράματος φυτοαποκατάστασης έγινε σε λατομείο ασβεστόλιθου στην Βόρεια Ελλάδα. Χρησιμοποιήθηκαν τρία φυτικά είδη (*Pinus brutia, Cupressus sempervirens και Spartium junceum*) σε τρεις επαναλήψεις το καθένα, τα οποία τοποθετήθηκαν σε τεχνητό υπόστρωμα. Το υπόστρωμα αυτό αποτελείτο κυρίως (70%) από παραπροϊόντα ηλεκτρολυτικής επεξεργασίας πυρολουσίτη (MnO_2), υλικό πλούσιο σε οξείδια Mn. Επίσης, περιείχε έδαφος (10%), άμμο (10%) και ρυζοφλοιό (10%).

Ελήφθησαν δείγματα του μίγματος υποστρώματος από την περιοχή της ριζόσφαιρας των φυτών που εγκαταστάθηκαν και από περιοχές μεταξύ δύο γειτονικών φυτών, που στο εξής θα αναφέρεται ως «υπόλοιπο υπόστρωμα». Οι δειγματοληψίες έγιναν στην αρχή του πειραματικού χρόνου (Μάρτυρας) και 3,5 έτη μετά την εγκατάσταση της βλάστησης.

Σε δείγματα υποστρώματος που αεροξηράνθηκαν προσδιορίσθηκαν το ποσοστό των άμορφων (μέθοδος όξινου οξαλικού αμμωνίου σε σκοτάδι) και των ελεύθερων οξειδίων (με την μέθοδο Citrate-bicarbonate-dithionite) Fe και Mn (Loeppert and Inskeep, 1996). Κατόπιν υπολογίστηκε ο λόγος ενεργού Fe (άμορφα οξείδια Fe /ελεύθερα οξείδια Fe) ως πηλίκο του ποσοστού των άμορφων οξειδίων Fe προς του ποσοστού των ελεύθερων οξειδίων Fe. Επίσης, προσδιορίσθηκε η δραστηριότητα των όξινων (pH=6,5) και αλκαλικών (pH=11) φωσφατασών σε δείγματα μίγματος που διατηρούσαν την υγρασία τους (συνθήκες αγρού) (Tabatabai, 1994). Οι αναλύσεις όλων των δειγμάτων του μίγματος υποστρώματος έγιναν σε τρεις επαναλήψεις.

Επίσης, στο τέλος του πειραματικού χρόνου έγινε δειγματοληψία υπέργειας φυτομάζας αυτοφυούς βλάστησης με τη χρήση πλαισίου διαστάσεων 50 x 50 cm. Ελήφθησαν δείγματα από την επιφάνεια κοντά στη ρίζα των δασοπονικών φυτικών ειδών (ριζόσφαιρα) και στο διάκενο δύο γειτονικών φυτών (υπόλοιπο υπόστρωμα).

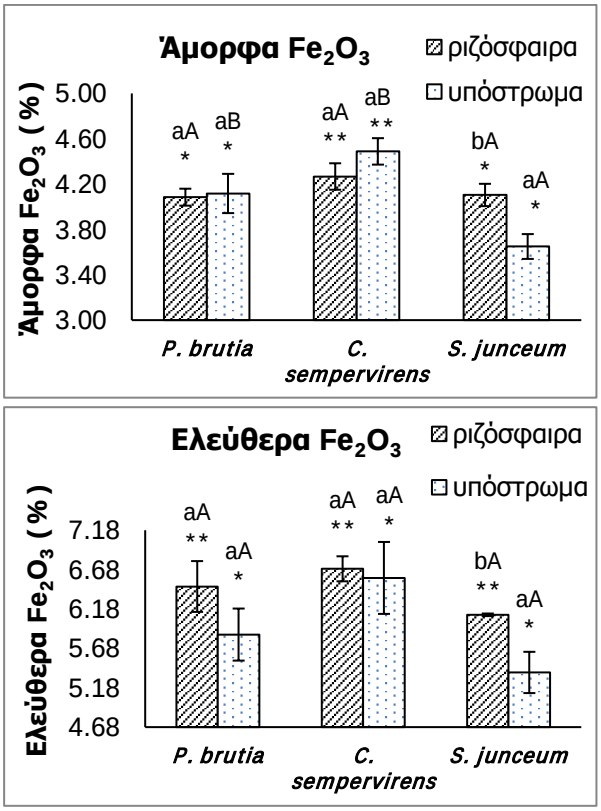
Με τη χρήση του προγράμματος Statgraphics έγινε η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων με ανάλυση παραλλακτικότητας κατά ένα παράγοντα (ANOVA). Ο έλεγχος των σημαντικών διαφορών εξετάστηκε με τη δοκιμασία της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς (LSD-test), για επίπεδο σημαντικότητας 95% ($p<0,05$).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά στον Μάρτυρα (αρχή πειραματικού χρόνου) το ποσοστό των άμορφων οξειδίων Fe ήταν 3,00% και των ελεύθερων οξειδίων Fe ήταν 4,68%. Στο τέλος του πειραματικού χρόνου τα ποσοστά των άμορφων και ελεύθερων οξειδίων Fe του μίγματος κυμάνθηκαν μεταξύ 3,65% - 4,49% και 5,37% - 6,69%, αντίστοιχα (Σχήμα 1). Διαπιστώθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν τα ποσοστά των οξειδίων Fe αυξήθηκαν στατιστικών σημαντικά σε σχέση με του Μάρτυρα.

Από τη σύγκριση της ριζόσφαιρας με το υπόλοιπο υπόστρωμα προέκυψε ότι στατιστικώς σημαντικές διαφορές υπήρχαν στον χειρισμό του *Spartium junceum*, όπου στην περιοχή της ριζόσφαιρας τα ποσοστά των άμορφων και ελεύθερων οξειδίων Fe (4,10% και 6,11%, αντίστοιχα) ήταν σημαντικά υψηλότερα από του υπόλοιπου υποστρώματος (3,65% και 5,37%, αντίστοιχα) (Σχήμα 1).

Οι συγκρίσεις μεταξύ των φυτικών χειρισμών στην περιοχή της ριζόσφαιρας δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές στα οξείδια Fe (Σχήμα 1). Στο υπόλοιπο υπόστρωμα βρέθηκε ότι το ποσοστό των άμορφων οξειδίων Fe στον χειρισμό του *Spartium junceum* (3,65%) ήταν σημαντικά μικρότερο από ότι στους χειρισμούς του *Pinus brutia* (4,12%) και *Cupressus sempervirens* (4,49%).



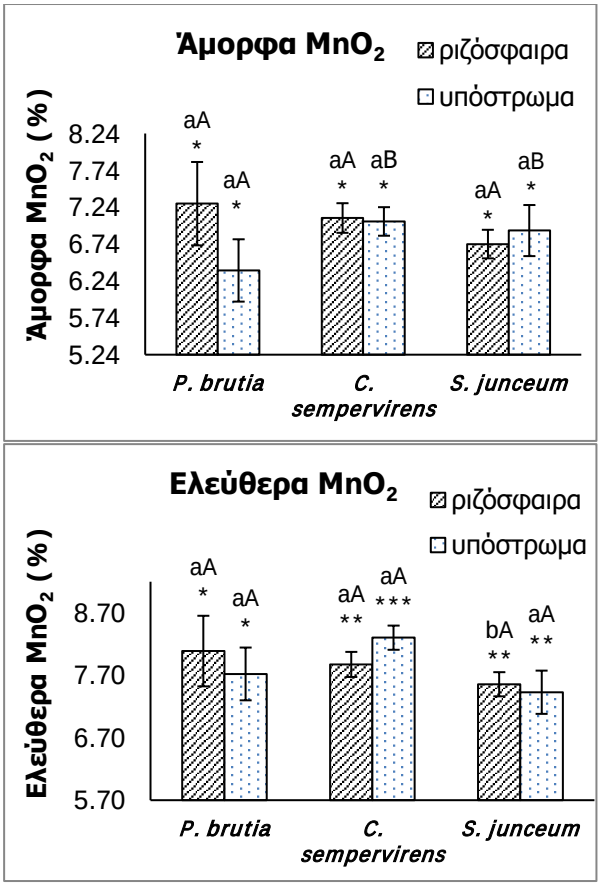
Σχήμα 1. Μέσος όρος ποσοστών (%) των άμορφων και ελεύθερων οξειδίων Fe (Fe_2O_3) του μίγματος α) στην περιοχή της ριζόσφαιρας και β) στο υπόλοιπο υπόστρωμα των χειρισμών *Pinus brutia, Cupressus sempervirens* και *Spartium junceum,* 3,5 έτη από την εγκατάσταση της βλάστησης, σε σχέση με του Μάρτυρα (τιμή τομής αξόνων). Οι μπάρες δείχνουν το τυπικό σφάλμα. * σημαντικές διαφορές σε σχέση με το Μάρτυρα, σε p<0,05. Τιμές με το ίδιο μικρό γράμμα δεν παρουσιάζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ ριζόσφαιρας και υποστρώματος, σε p<0,05. Τιμές με το ίδιο κεφαλαίο γράμμα, δεν παρουσιάζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτικών χειρισμών, σε p<0,05.

Ο λόγος ενεργού Fe (άμορφα οξείδια Fe /ελεύθερα οξείδια Fe) είχε τιμές μεταξύ 0,63 και 0,70 (Πίνακας 1). Γενικά στην περιοχή της ριζόσφαιρας είχε μικρότερες τιμές απ' ότι στο υπόλοιπο υπόστρωμα. Από τη στατιστική επεξεργασία βρέθηκε ότι η τιμή του λόγου αυτού στην περιοχή της ριζόσφαιρας του *Pinus brutia* (0,63) ήταν σημαντικά μικρότερος από του υπολοίπου υποστρώματος (0,70), ενώ δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές διαφορές του λόγου του ενεργού Fe μεταξύ των φυτικών χειρισμών (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Μέσοι όροι των λόγων ενεργού Fe (άμορφα οξείδια Fe /ελεύθερα οξείδια Fe) του μίγματος υποστρώματος (Υπ.) και του μίγματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας (Ριζ.), για τα *Pinus brutia, Cupressus sempervirens* και *Spartium junceum*.

Fe_2O_3	**Λόγος ενεργού Fe**		
	Pinus brutia	*Cupressus sempervirens*	*Spartium junceum*
Υπ.	0,70 b A	0,69 a A	0,68 a A
Ριζ.	0,63 a A	0,64 a A	0,67 a A

Τιμές στην ίδια στήλη με το ίδιο μικρό γράμμα και στην ίδια γραμμή με το ίδιο κεφαλαίο γράμμα, δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά, σε επίπεδο σημαντικότητας $p<0,05$.



Σχήμα 2. Μέσος όρος ποσοστών (%) των άμορφων και ελεύθερων οξειδίων Mn (MnO_2) του μίγματος α) στην περιοχή της ριζόσφαιρας και β) στο υπόλοιπο υπόστρωμα των χειρισμών *Pinus brutia, Cupressus sempervirens*και *Spartium junceum*, 3,5 έτη από την εγκατάσταση της βλάστησης, σε σχέση με του Μάρτυρα (τιμή τομής αξόνων). Οι μπάρες δείχνουν το τυπικό σφάλμα. * σημαντικές διαφορές σε σχέση με το Μάρτυρα, σε $p<0,05$. Τιμές με το ίδιο μικρό γράμμα δεν παρουσιάζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ ριζόσφαιρας και υποστρώματος, σε $p<0,05$. Τιμές με το ίδιο κεφαλαίο γράμμα, δεν παρουσιάζουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτικών χειρισμών, σε $p<0,05$.

Ομοίως με τα οξείδια του Fe, και τα άμορφα και ελεύθερα οξείδια Mn παρουσίασαν στατιστικώς σημαντική αύξηση στα ποσοστά τους σε σχέση με του Μάρτυρα (Σχήμα 2). Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό των άμορφων οξειδίων Mn αρχικά (Μάρτυρα) ήταν 5,24% και των ελεύθερων οξειδίων Mn ήταν 5,70%. Μετά από 3,5 έτη από την εγκατάσταση της βλάστησης, οι τιμές των άμορφων οξειδίων Mn κυμάνθηκαν από 6,38% έως 7,29% και των ελεύθερων οξειδίων Mn από 7,43% έως 8,30%.

Στην περιοχή της ριζόσφαιρας του *Spartium junceum* το ποσοστό των ελεύθερων οξειδίων Mn (7,56%) ήταν σημαντικά υψηλότερο από του υπόλοιπου υποστρώματος (7,43%) (Σχήμα 2).

Μεταξύ των φυτικών χειρισμών διαπιστώθηκε ότι σημαντικές διαφορές υπήρξαν μόνο για τα άμορφα οξείδια Mn στο υπόλοιπο υπόστρωμα, όπου το ποσοστό τους στον χειρισμό του *Pinus brutia* (6,38%) ήταν σημαντικά μικρότερο από ότι στους χειρισμούς του *Cupressus sempervirens* (7,05%) και *Spartium junceum* (6,92%) (Σχήμα 2).

Πίνακας 2. Μέσοι όροι του ξηρού βάρους (g/πλαίσιο) της υπέργειας βιομάζας της αυτοφυούς βλάστησης και των όξινων και αλκαλικών φωσφατασών του μίγματος υποστρώματος (Υπ.) και του μίγματος στην περιοχή της ριζόσφαιρας (Ριζ.), για τα *Pinus brutia, Cupressus sempervirens* και *Spartium junceum*.

	Ξηρό βάρος αυτοφυούς βλάστησης (g/πλαίσιο)		
	Pinus brutia	*Cupressus sempervirens*	*Spartium junceum*
Υπ.	19,83 a A	26,00 a A	40,34 a B
Ριζ.	43,01 b A	43,32 b A	37,58 a A
	Όξινες φωσφατάσες (μg *p*-nitrophenol g^{-1} h^{-1})		
	Pinus brutia	*Cupressus sempervirens*	*Spartium junceum*
Υπ.	133,28 b B	77,13 a A	85,16 a A
Ριζ.	93,75 a A	113,62 a A	98,86 a A
	Αλκαλικές φωσφατάσες (μg *p*-nitrophenol g^{-1} h^{-1})		
	Pinus brutia	*Cupressus sempervirens*	*Spartium junceum*
Υπ.	138,76 a B	91,55 a A	117,57 a A
Ριζ.	198,92 b A	176,89 b A	173,88 b A

Τιμές στην ίδια στήλη με το ίδιο μικρό γράμμα και στην ίδια γραμμή με το ίδιο κεφαλαίο γράμμα, δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά, σε επίπεδο σημαντικότητας $p<0,05$.

Η ανάπτυξη της αυτοφυούς βλάστησης δεν παρουσίασε διαφορές μεταξύ των ριζοσφαιρών των φυτικών χειρισμών (Πίνακας 2). Ωστόσο, φάνηκε ότι ήταν πιο έντονη η ανάπτυξη των φυτών στις ριζόσφαιρες του *Pinus brutia* (43,01 g/πλαίσιο) και του *Cupressus sempervirens* (43,32 g/πλαίσιο) σε σχέση με το υπόλοιπο υπόστρωμα στους χειρισμούς αυτούς (19,83 και 26,00 g/πλαίσιο, αντίστοιχα).

Στο υπόλοιπο υπόστρωμα βρέθηκε ότι το βάρος της αυτοφυούς βλάστησης στον χειρισμό του *Spartium junceum* (40,34 g/πλαίσιο) ήταν σημαντικά μεγαλύτερο απ' ότι στους χειρισμούς των *Pinus brutia* (19,83 g/πλαίσιο) και *Cupressus sempervirens* (26,00 g/πλαίσιο) (Πίνακας 2).

Η ενζυμική δραστηριότητα προσδιορίστηκε μέσω των όξινων και αλκαλικών φωσφατασών (Πίνακας 2). Οι τιμές των όξινων φωσφατασών στις ριζόσφαιρες των τριών φυτικών ειδών

κυμάνθηκαν από 93,75 και 113,62 μg *p*-nitrophenol g^{-1} h^{-1} και δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Αντίθετα, στο υπόλοιπο υπόστρωμα στον χειρισμό του *Pinus brutia* (113,28 μg *p*-nitrophenol g^{-1} h^{-1}) η τιμή των όξινων φωσφατασών ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από των άλλων δύο χειρισμών. Επίσης στην περίπτωση αυτή η δραστηριότητα των όξινων φωσφατασών ήταν σημαντικά μεγαλύτερη απ' ότι στη ριζόσφαιρα του *Pinus brutia*.

Η δραστηριότητα των αλκαλικών φωσφατασών ήταν σημαντικά μεγαλύτερη στην περιοχή της ριζόσφαιρας των τριών φυτικών ειδών, σε σχέση με του υπόλοιπου υποστρώματος (Πίνακας 2). Δεν υπήρξαν διαφορές μεταξύ των φυτικών χειρισμών στην περιοχή της ριζόσφαιρας, παρά μόνο στο υπόλοιπο υπόστρωμα, όπου στον χειρισμό του *Pinus brutia* η δραστηριότητα των αλκαλικών φωσφατασών (138,76 μg *p*-nitrophenol g^{-1} h^{-1}) ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από του *Cupressus sempervirens* και του *Spartium junceum* (91,55 και 117,57 μg *p*-nitrophenol g^{-1} h^{-1}, αντίστοιχα).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στις συγκεκριμένες συνθήκες που διεξήχθη η φυτοαποκατάσταση αυξήθηκαν σημαντικά τα άμορφα και ελεύθερα οξείδια Fe και Mn σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ακολουθώντας την εγκατάσταση της βλάστησης και την ανάπτυξη της βιολογικής δραστηριότητας στο υπόστρωμα. Επίσης, δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στις προς εξέταση παραμέτρους μεταξύ των τριών φυτικών χειρισμών στην περιοχή της ριζόσφαιράς τους. Ωστόσο, στις συγκρίσεις μεταξύ ριζόσφαιρας και υπόλοιπου υποστρώματος παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε κάποιες περιπτώσεις που σχετίζονται με την ανάπτυξη του κάθε φυτού που χρησιμοποιήθηκε, την επακόλουθη εγκατάσταση αυτοφυούς βλάστησης γύρω του και την ανάπτυξης της μικροβιολογίας στο υπόστρωμα.

Οι μεταβολές του υποστρώματος ανάλογα με το φυτικό είδος καταδεικνύονται και από τη μελέτη του λόγου ενεργού Fe ο οποίος ήταν σημαντικά μικρότερος στην περιοχή της ριζόσφαιρας του *Pinus brutia* από του υπολοίπου υποστρώματος, υποδεικνύουν μεγαλύτερο βαθμό εξέλιξης του μίγματος υποστρώματος σε αυτή την περίπτωση.

Συνολικά, τα ευρήματα υποδεικνύουν χημική και βιολογική ωρίμανση του συγκεκριμένου μίγματος υποστρώματος, η οποία επηρεάζεται από την ανάπτυξη της βλάστησης και την επακόλουθη αύξηση της βιολογικής (ενζυμικής) δραστηριότητας του υποστρώματος που ήταν πλούσιο σε οξείδια Mn.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Al-Hamawandi, M.J., Azeez, D.R. and Ali, D.K., 2023. *Behavior and Distribution of Free Iron Oxides in Some Soil Orders in Iraq*. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science . IOP Publishing, 1252, 012067. doi: 10.1088/1755-1315/1252/1/012067.

Al-Mahanna, R.H.A. and Alabadi, L.A.S., 2025. *Study of Environmental and Geochemical Effects on The Distribution and Transformations of Iron Oxides in Some Soils*. Journal of Environmental and Earth Sciences, 7(02), 129-137. doi: 10.30564/jees.v7i2.7674.

Alifragki, M., Pavlatoy-Ve, A. and Orfanoudakis, M., 2018. *Phytoremediation affects microbial development on a limestone quarry*. International Journal of Phytoremediation, 20 (9): 957-963. doi: 10.1080/15226514.2018.1452183.

Alifragki, M., Pavlatoy-Ve, A. and Orfanoudakis, M., 2021. *Effect of Plant Species on Microbial Activity of a Substrate Used in Phytoremediation*. In: J. Flores (eds.) The Future of Phytoremediation. Nova Science Publishers, 193-220.

Dinkelaker, B. and Marschner, H., 1992. *In vivo demonstration of acid phosphatase activity in the rhizosphere of soil grown plants*. Plant and Soil, 144, 199–205. doi: 10.1007/BF00012876.

Dixon, J. B. and White, G.N., 2002. *Manganese oxides*. Soil mineralogy with environmental applications, 7, 367-388. doi: 10.2136/sssabookser7.c11.

Eivazi, F. and Tabatabai, M.A., 1977. *Phosphatases in soils*. Soil Biology and Biochemistry, 9,167-172. doi: 10.1016/0038-0717(77)90070-0.

Ettler, V., Tomasova, Z., Komarek, M., Mihaljevic, M. and Sebek, O., 2015. *Using amorphous manganese oxide for remediation of smelter-polluted soils: a pH-dependent long-term stability study*. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, 3291.

Gasparatos, D., Haidouti, C. and Tarenidis, D., 2004. *Characterization of iron oxides in Fe-rich concretions from an imperfectly drained Greek soil: A study by selective-dissolution techniques and X-ray diffraction*. Archives Agronomy and Soil Science, 50, 485-493. doi: 10.1080/0365034042000216149.

Hebrien, S.A. and Neal, J.L., 1990. *Soil pH and phosphatase activity*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 21, 439–456. doi: 10.1080/00103629009368244.

Howe, P., Malcolm, H. and Dobson, S., 2004. *Manganese and its compounds: environmental aspects*. World Health Organization.

Jaworska, H., Dąbkowska-Naskręt, H. and Kobierski, M., 2016. *Iron oxides as weathering indicator and the origin of Luvisols from the Vistula glaciation region in Poland*. Journal of Soils and Sediments, 16(2), 396-404. doi: 10.1007/s11368-015-1201-8.

Li, H., Santos, F., Butler, K. and Herndon, E., 2021. *A critical review on the multiple roles of manganese in stabilizing and destabilizing soil organic matter*. Environmental science and technology, 55(18), 12136-12152. doi: 10.1021/acs.est.1c00299.

Loeppert, H.R. and Inskeep, P.W., 1996. *Iron*. In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Summer (eds.), Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Madison, WI: SSSA Book Series No. 5, Soil Science Society of America, 639-664. doi: 10.2136/sssabookser5.3.

McFadden, L. D. and Hendricks, D.M., 1985. *Changes in the content and composition of pedogenic iron oxyhydroxides in a chronosequence of soils in southern California*. Quaternary Research, 23(2), 189-204. doi:10.1016/0033-5894(85)90028-6.

Misra, S.G. and Mishra, P.C., 1969. *Forms of manganese as influenced by organic matter and iron oxide*. Plant and Soil, 30(1), 62-70. doi: 10.1016/j.gca.2011.12.006.

Moody, L.E. and Graham, R.C., 1995. *Geomorphic and pedogenic evolution in coastal sediments, central California*. Geoderma, 67(3-4), 181-201. doi:10.1016/0016-7061(94)00078-O.

Ross Jr, S.J. Franzmeier, D.P., and Roth, C.B., 1976. *Mineralogy and chemistry of manganese oxides in some Indiana soils*. Soil Science Society of America Journal, 40(1), 137-143. doi: 10.2136/sssaj1976.03615995004000010037x.

Schwertmann, U. and Taylor, R.M., 1989. *Iron Oxides*. In: J.B. Dixon, and S.B. Weed (eds), Minerals in Soil Environments, (2nd ed.). Madison, WI: Soil Science Society of America, 380-438. doi: 10.2136/sssabookser1.2ed.c8.

Tabatabai M.A., 1994. *Soil enzymes*. In: R.W. Weaver, J.S. Angle and P.S. Bottomley (eds), Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. SSSA Book Series, No 5. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA, 775-859. doi: 10.2136/sssabookser5.2.c37.Tarafdar, J.C., 1988. *Activity of urease and phosphatase in the root–soil interface of vegetable crops*. Journal of Horticultural Science, 63, 605-608. doi: 10.1080/14620316.1988.11515899.

Tarafdar, J.C. and Claassen, N., 1988. *Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatise produced by plant roots and microorganisms*. Biology and Fertility of Soils, 5, 308-312. doi: 10.1007/BF00262137.

Tarafdar, J.C. and Marschner, H., 1994. *Phosphatase activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus*. Soil Biology and Biochemistry, 26,387-395. doi: 10.1016/0038-0717(94)90288-7.

Trivedi, P. and Axe, L., 2001. *Ni and Zn sorption to amorphous versus crystalline iron oxides: macroscopic studies*. Journal of Colloid and Interface Science, 244(2), 221-229. doi: 10.1006/jcis.2001.7970.

Zhu, M., Farrow, C.L., Post, J.E., Livi, K.J., Billinge, S.J., Ginder-Vogel, M. and Sparks, D.L., 2012. *Structural study of biotic and abiotic poorly-crystalline manganese oxides using atomic pair distribution function analysis*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 81, 39-55. doi: 10.1016/j.gca.2011.12.006.

ΕΝΟΤΗΤΑ 6η

Συστήματα αειφόρου γεωργικής παραγωγής

48. ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΟΙΚΙΛΙΩΝ ΩΣ ΚΡΙΣΙΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Α. Μιχαλίτσης, Π. Παπακαλούδης, Ε. Δεληγιάννης, Φ. Σ. Α. Αλεξάνδρου, Χ. Δόρδας

Σχολή Γεωπονίας, Τμήμα Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, chdordas@agro.auth.gr

Περίληψη

Η συγκαλλιέργεια αποτελεί μια βιώσιμη γεωργική πρακτική, η οποία συμβάλλει στην ενίσχυση της βιοποικιλότητας στα καλλιεργητικά συστήματα. Παρατηρείται η ανάγκη για υιοθέτηση πρακτικών όπως η συγκαλλιέργεια, οι οποίες ενισχύουν τις υπηρεσίες του οικοσυστήματος, ενώ διατηρούν υψηλή παραγωγικότητα και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να αξιολογηθεί η χρήση δεικτών βλάστηση μέσω drone στη συγκαλλιέργεια διαφορετικών ποικιλιών μαλακού σιταριού και μπιζελιού με ή χωρίς την εφαρμογή αζωτούχου λίπανσης. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε κατά τη καλλιεργητική περίοδο 2023–2024, στον πειραματικό αγρό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Για τη μελέτη εφαρμόστηκε το πειραματικό σχέδιο των πλήρως τυχαιοποιημένων ομάδων (RCBD) με τέσσερις επαναλήψεις, στο οποίο αξιολογήθηκαν δύο ποικιλίες μαλακού σιταριού (Elissavet, Flamenko) και δύο ποικιλίες μπιζελιού (Arvika, Furious). Οι επεμβάσεις λίπανσης περιλάμβαναν α) απουσία εφαρμογής αζωτούχου λίπανσης και β) προσθήκη ποσότητας αζωτούχου λίπανσης με τη μορφή NH_4NO_3. Καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου πραγματοποιήθηκαν καταγραφές μορφολογικών και φυσιολογικών χαρακτηριστικών των φυτών χρησιμοποιώντας μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones) εξοπλισμένα με αισθητήρες τριών φασμάτων (κόκκινου, πράσινου και μπλε). Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν το ύψος των φυτών καθώς και τους δείκτες πλεονάζοντος πράσινου χρώματος των φυτών (Excess Green Index - ExG) και βλαστικότητας (Vegetativen Index - VEG). Από τα αποτελέσματα φαίνεται πως η συγκαλλιέργεια οδηγεί σε αυξημένες τιμές ύψους της φυτοστοιβάδας και στον δείκτη ExG, ενώ για τον δείκτη VEG οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρήθηκαν για τη μονοκαλλιέργεια σιταριού με το 100% της λίπανσης. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones) επομένως μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην καταγραφή της ανάπτυξης της φυτοστοιβάδας, ωστόσο είναι σημαντική η χρήση και η αξιολόγηση διαφορετικών δεικτών.

Λέξεις κλειδιά: μη επανδρωμένα αεροσκάφη, δείκτης βλάστησης, απόδοση.

CULTIVAR SELECTION AS AN IMPORTANT OPTIMIZATION FACTOR IN INTERCROPPING

A. Michalitsis, P. Papakaloudis, E. Deligiannis, F.S.A. Alexandrou, C. Dordas

School of Agriculture, Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece,
chdordas@agro.auth.gr

ABSTRACT

Intercropping is a sustainable agricultural practice that helps to enhance biodiversity in farming systems. There is a need to adopt practices such as intercropping, which enhance ecosystem services while maintaining high productivity and environmental sustainability. The objective of this study was to evaluate the use of drone-based vegetation indicators in intercropping of different bread wheat and pea varieties with or without the application of

nitrogen fertilization. The experiment was conducted during the growing season 2023-2024, in the experimental field of the Aristotle University of Thessaloniki. For the study, the experimental design of fully randomized block (RCBD) with four replications was used, in which two varieties of soft wheat (Elissavet, Flamenko) and two varieties of peas (Arvika, Furious) were evaluated. Fertilization treatments included a) absence of nitrogen fertilization application and b) addition of nitrogen fertilization in the form of NH_4NO_3. Throughout the growing season, recordings of morphological and physiological characteristics of the plants were made using drones equipped with sensors of three spectra (red, green and blue). The measurements made were related to plant height and the plant's Excess Green Index (ExG) and Vegetativen Index (VEG). The results showed that intercropping led to increased values of height and ExG, while for the vegetativen index the highest values were observed for wheat monoculture with 100% fertilization. Drones can therefore make an important contribution to the recording of the growth of the canopy, but it is important to use and evaluate different indicators.

Keywords: drones, vegetativen index, yield.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύγχρονη γεωργία βασίζεται σε εντατικά συστήματα μονοκαλλιέργειας με τη χρήση υψηλών εισροών. Η πρακτική αυτή έχει οδηγήσει σε υποβάθμιση των εδαφικών πόρων, σε μείωση της βιοποικιλότητας και σε περιορισμό των υπηρεσιών του αγροοικοσυστήματος με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Tilman et al., 2002). Η συγκαλλιέργεια που είναι η ταυτόχρονη καλλιέργεια δύο ή και περισσότερων ειδών στον ίδιο χώρο, μπορεί να βοηθήσει στον μετριασμό των συνεπειών της μονοκαλλιέργειας, διατηρώντας παράλληλα υψηλές αποδόσεις με χαμηλές εισροές (Stomph et al., 2020). Ωστόσο, οι σύγχρονες ποικιλίες έχουν βελτιωθεί ώστε να αποδίδουν υψηλά σε συνθήκες μονοκαλλιέργειας και υψηλών εισροών (Michalitsis et al., 2024).

Οι παραδοσιακές μέθοδοι παρακολούθησης και μέτρησης της ανάπτυξης μίας καλλιέργειας είναι χρονοβόρες και κοστοβόρες, ενώ πολλές φορές απαιτούν και την καταστροφή μέρους της καλλιέργειας για την πραγματοποίηση των μετρήσεων (Lu et al., 2019; Ji et al., 2022). Η χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών (drones) συμβάλλει στην απομακρυσμένη καταγραφή χαρακτηριστικών ανάπτυξης της καλλιέργειας. Με τη χρήση τους μπορεί να γίνει ταχεία καθημερινή καταγραφή δεδομένων περιορίζοντας σημαντικά τον χρόνο σε ανθρώπινη εργασία (Tsouros et al., 2019). Σε αυτό το πλαίσιο αξιοποιούνται δείκτες βλάστησης και υγείας των φυτών, που στη βιβλιογραφία συσχετίζονται θετικά τόσο με την υπόγεια όσο και την υπέργεια βιομάζα και συχνά με την τελική απόδοση σε σπόρο (Lu et al., 2019; Ji et al., 2022).

Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η μη καταστροφική παρακολούθηση της παραγωγής υπέργειας βιομάζας σε σύστημα συγκαλλιέργειας σιταριού-μπιζελιού με τους φυτικούς δείκτες πλεονάζοντος πράσινου χρώματος των φυτών (Excess Green Index - ExG) και βλαστικότητας (Vegetativen Index - VEG) από μη επανδρωμένα αεροσκάφη (RGB drone).

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα εγκαταστάθηκε στο Αγρόκτημα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης την καλλιεργητική περίοδο 2023-2024. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δυο ποικιλίες μαλακού σιταριού (Elissavet, Flamenko) και δυο ποικιλίες μπιζελιού (Arvika, Furious) σε μονοκαλλιέργεια και σε συγκαλλιέργεια σιταριού-μπιζελιού με αναλογία 25:75.

Το πειραματικό σχέδιο ήταν οι πλήρεις τυχαιοποιημένες ομάδες σε ελεύθερη διάταξη με 14 πειραματικά τεμάχια, έκτασης 7,5 m^2, σε 4 επαναλήψεις και περιλάμβαναν τις επεμβάσεις: μονοκαλλιέργεια σιταριού χωρίς και με 120kg /ha NH_4NO_3, μονοκαλλιέργεια μπιζελιού χωρίς λίπανση και συγκαλλιέργεια χωρίς και με 60kg /ha NH_4NO_3. Η μελέτη περιλάμβανε μετρήσεις εκτίμησης των αποδόσεων σε βιομάζα μέχρι και τη φυσιολογική ωρίμανση των φυτών, γι' αυτό και πραγματοποιήθηκαν εβδομαδιαίες λήψεις μετά το αδέλφωμα (Weeks After Tillering - WAT) με το drone ANAFI Thermal εξοπλισμένο με κάμερα RGB. Οι λήψεις των φωτογραφιών πραγματοποιήθηκαν σε ύψος 20m υπό αίθριες συνθήκες. Στη συνέχεια, για τη δημιουργία του ορθομωσαϊκού χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Pix4Dmapper. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε το QGIS στο οποίο υπολογίστηκε το ύψος των φυτών, ο δείκτης πλεονάζοντος πράσινου χρώματος (Excess Green Index, ExG) και ο δείκτης βλάστησης (Vegetativen, VEG).

Οι δείκτες ExG και VEG υπολογίζονται με τους ακόλουθους τύπους (García-Fernández et al., 2021):

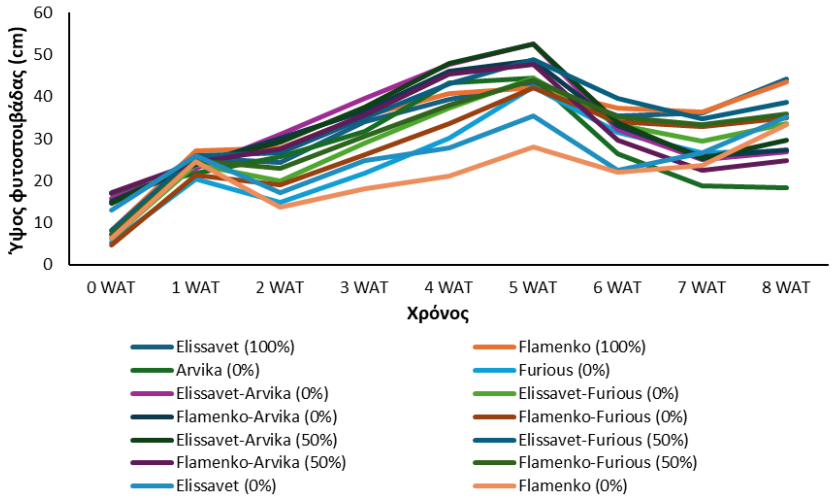
$$ExG = (2 \times Green - Red - Blue)$$

$$VEG = Green / [Red^a * Blue^{(1-a)}], a = 0{,}667$$

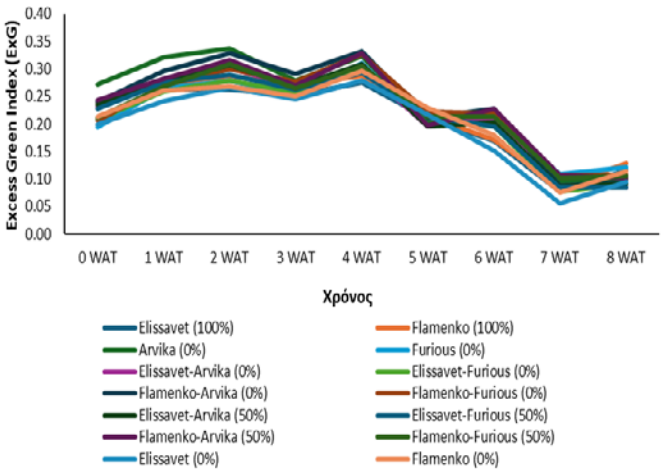
Στη συνέχεια έγινε εξαγωγή των μέσων όρων των δεικτών και πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση με το SPSS. Οι συγκρίσεις των μέσων όρων έγιναν με το κριτήριο της Ελάχιστης Σημαντικής Διαφοράς (LSD) σε επίπεδο σημαντικότητας α=0.05.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το ύψος της φυτοστοιβάδας παρατηρήθηκε χαμηλότερο στα περισσότερα στάδια ανάπτυξης για τις μονοκαλλιέργειες σιταριού χωρίς λίπανση. Στα περισσότερα στάδια ανάπτυξης το ύψος ήταν μεγαλύτερο στις συγκαλλιέργειες με εξαίρεση τα στάδια του ξεσταχυάσματος (7WAT) και της άνθισης (8WAT) (Σχήμα 1). Παρόμοια τάση παρατηρήθηκε και σε άλλα συστήματα συγκελλιέργειας (Demie et al., 2022; Michalitsis et al., 2024).

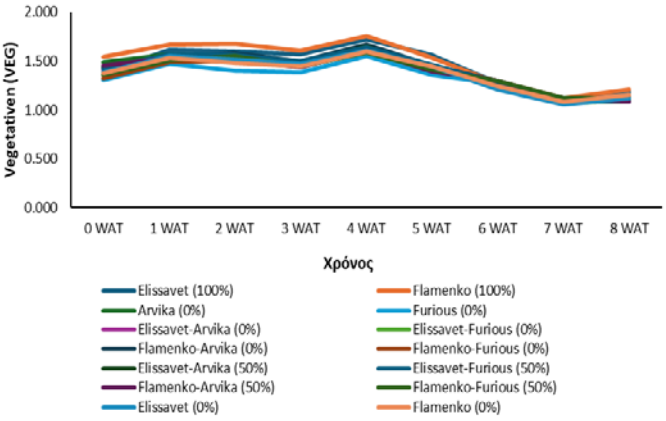


Σχήμα 1. Ύψος φυτοστοιβάδας στα 8 στάδια ανάπτυξης που λήφθηκαν οι εναέριες φωτογραφίες.



Σχήμα 2. Δείκτης πλεονάζοντος πράσινου χρώματος (Excess Green Index, ExG) στα 8 στάδια ανάπτυξης που λήφθηκαν οι εναέριες φωτογραφίες.

Οι μεγαλύτερες τιμές για τον δείκτη ExG παρατηρήθηκαν στη μονοκαλλιέργεια της ποικιλίας Arvika και στη συγκαλλιέργεια Flamenko-Arvika ανεξαρτήτου λίπανσης. Μεταξύ των ποικιλιών σιταριού οι συγκαλλιέργειες με την ποικιλία Flamenko είχαν μεγαλύτερες τιμές στον δείκτη ExG σε σύγκριση με την ποικιλία Elissavet. Αντίστοιχα, η συγκαλλιέργεια με την ποικιλία Arvika οδήγησε και για τις δύο ποικιλίες σιταριού σε μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με την ποικιλία Furious (Σχήμα 2) στοιχείο που έρχεται σε συμφωνία με μελέτες που καταλήγουν ότι μεταξύ των συγκαλλιεργούμενων ειδών μπορεί να εμφανιστεί συμπληρωματικότητα ως προς τη χρήση των πόρων, οδηγώντας τελικά σε υψηλότερες αποδόσεις βιομάζας (Stomph et al., 2020; Michalitsis et al., 2024).



Σχήμα 3. Δείκτης βλάστησης (Vegetativen Index, VEG) στα 8 στάδια ανάπτυξης που λήφθηκαν οι εναέριες φωτογραφίες.

Οι μονοκαλλιέργειες σιταριών με το 100% της λίπανση παρουσίασαν μεγαλύτερες τιμές για τον δείκτη VEG σε όλα τα στάδια ανάπτυξης. Ακολούθησαν οι συγκαλλιέργειες με σχετικά υψηλές τιμές και μεγαλύτερες από τις τιμές των μονοκαλλιεργειών χωρίς λίπανση (Σχήμα 3). Οι μεγαλύτερες τιμές VEG στις μονοκαλλιέργειες σιταριού με 100% λίπανση υποδηλώνουν ικανοποιητική αζωτούχο θρέψη και πυκνότερη φυλλική επιφάνεια, χαρακτηριστικά που συσχετίζονται με υψηλότερη παραγωγή βιομάζας και επομένως αύξηση της απόδοσης μιας και η θρέψη αποτελεί συχνά τον κύριο περιοριστικό παράγοντα (Ji et al., 2022).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, φαίνεται πως φαινόμενα συνεργισμού και συμπληρωματικότητας οδηγούν σε αυξημένη παραγωγή βιομάζας στη συγκαλλιέργεια σε σύγκριση με τη μονοκαλλιέργεια. Επομένως, η συγκαλλιέργεια σιταριού με μπιζέλι είναι ένα σύστημα που μπορεί να εφαρμοστεί σε συνθήκες μειωμένων εισροών και να οδηγήσει σε υψηλές αποδόσεις. Η χρήση μη επανδρωμένα αεροσκάφη (drones) μπορεί να βοηθήσει στην καταγραφή δεδομένων και στην αξιολόγηση των αλληλεπιδράσεων που αναπτύσσονται στη συγκαλλιέργεια, ωστόσο είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται και να αξιολογούνται διαφορετικοί δείκτες.

Ευχαριστίες: Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε από το ερευνητικό έργο IntercropValuES « Developing Intercropping for agrifood Value chains and Ecosystem Services delivery in Europe and Southern Countries» στο πλαίσιο του Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης – του Προγράμματος-Πλαισίου για την Έρευνα και την Καινοτομία (2021-2027) με το συμφωνητικό αριθ. 101081973.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Demie, D. T., Döring, T. F., Finckh, M. R., van der Werf, W., Enjalbert, J., & Seidel, S. J. (2022). *Mixture× genotype effects in cereal/legume intercropping*. Frontiers in Plant Science, *13*, 846720.

García-Fernández, M., Sanz-Ablanedo, E., & Rodríguez-Pérez, J. R. (2021). *High-resolution drone-acquired RGB imagery to estimate spatial grape quality variability*. Agronomy, *11*(4), 655.

Ji, Y., Chen, Z., Cheng, Q., Liu, R., Li, M., Yan, X., ... & Yang, T. (2022). *Estimation of plant height and yield based on UAV imagery in faba bean (Vicia faba L.)*. Plant Methods, *18*(1), 26.

Lu, N., Zhou, J., Han, Z., Li, D., Cao, Q., Yao, X., ... & Cheng, T. (2019). *Improved estimation of aboveground biomass in wheat from RGB imagery and point cloud data acquired with a low-cost unmanned aerial vehicle system*. Plant Methods, *15*(1), 17.

Michalitsis, A., Papakaloudis, P., Pankou, C., Lithourgidis, A., Menexes, G., & Dordas, C. (2024). *Effect of Cultivar on Faba Bean–Wheat Intercrop Productivity under a Mediterranean Environment*. Agronomy, *14*(1), 70.

Stomph, T., Dordas, C., Baranger, A., de Rijk, J., Dong, B., Evers, J., ... & van Der Werf, W. (2020). *Designing intercrops for high yield, yield stability and efficient use of resources: Are there principles*?. Advances in agronomy, *160*(1), 1-50.

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). *Agricultural sustainability and intensive production practices*. Nature, *418*(6898), 671-677.

Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). *A review on UAV-based applications for precision agriculture.* Information, *10*(11), 349.

49. ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΑΓΡΟΟΙΚΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΙΤΑΡΙΟΥ

Π. Παπακαλούδης, Α. Μιχαλίτσης, Ε. Δεληγιάννης, Φ. Σ. Α. Αλεξάνδρου, Χ. Δόρδας, Γ. Μάνεσης, Ζ. Μπασδαγιάννη, Ι. Μπόσης, Χ. Δόρδας

Σχολή Γεωπονίας, Τμήμα Γεωπονίας, Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη, chdordas@agro.auth.gr

Περίληψη

Το σιτάρι αποτελεί βασική καλλιέργεια για τη διατροφή του δυτικού πολιτισμού. Ένα από τα βασικά προβλήματα είναι η διαχείριση ζιζανίων που βασίζεται κυρίως στη χρήση συνθετικών ζιζανιοκτόνων, παρά τις ανησυχητικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και την υγεία, καθώς και την αυξανόμενη εμφάνιση ανθεκτικών ειδών ζιζανίων σε ζιζανιοκτόνα. Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και η νέα Κοινή Αγροτική Πολιτική προωθούν την ενίσχυση της βιοποικιλότητας, ενθαρρύνοντας την υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας και αγροοικολογικών πρακτικών για την επίτευξη των περιβαλλοντικών και κλιματικών στόχων της ΕΕ. Επιπλέον, η χρήση Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAVs) στη γεωργία επιτρέπει την ταχεία, μη καταστρεπτική παρακολούθηση της παρουσίας και της ανάπτυξης των ζιζανίων, προσφέροντας σημαντικές δυνατότητες στο κομμάτι λήψης αποφάσεων και μείωσης των εισροών. Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η συνδυασμένη χρήση προηγμένων τεχνολογιών παρακολούθησης (Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη – UAVs) και αγροοικολογικών πρακτικών (συστήματα μονοκαλλιέργειας και συγκαλλιέργειας) για τον προσδιορισμό της ανάπτυξης ζιζανίων και την ενίσχυση της βιοποικιλότητας σε χειμερινές καλλιέργειες. Το πείραμα διεξήχθη κατά την καλλιεργητική περίοδο 2023–2024 στον πειραματικό αγρό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (40°32'07.7"N 22°59'20.5"E), εφαρμόζοντας το πειραματικό σχέδιο των Πλήρως Τυχαιοποιημένων Ομάδων (RCBD) με τρεις επαναλήψεις. Οι καλλιεργητικές επεμβάσεις περιλάμβαναν μονοκαλλιέργειες μαλακού σιταριού, σκληρού σιταριού, κτηνοτροφικού μπιζελιού και κουκιού, καθώς και τις αντίστοιχες συγκαλλιέργειές τους, χωρίς την εφαρμογή ζιζανιοκτόνων και λιπασμάτων. Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου πραγματοποιήθηκαν λήψεις φωτογραφιών με UAVs για τον υπολογισμό φυσιολογικών δεικτών, ενώ συμπληρωματικά συλλέχθηκαν δεδομένα πεδίου που αφορούσαν τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) και τη βιομάζα τόσο των καλλιεργούμενων φυτών, όσο και των ζιζανίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκαλλιέργειες του σκληρού σιταρίου με το κτηνοτροφικό μπιζέλι και το κτηνοτροφικό κουκί, κατέγραψαν υψηλότερες τιμές LAI και ξηρής βιομάζας έναντι των συγκαλλιεργειών του μαλακού σιταριού. Επιπλέον, η συγκαλλιέργεια μαλακό σιτάρι-μπιζέλι μείωσε την παρουσία των ζιζανίων. Συμπερασματικά, η χρήση νέων τεχνολογιών ακριβείας και αγροοικολογικών μεθόδων μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βιώσιμη διαχείριση των ζιζανίων και στη διατήρηση της βιοποικιλότητας, ενισχύοντας την αειφορία των καλλιεργητικών συστημάτων.

Λέξεις-κλειδιά: σύστημα συγκαλλιέργειας, μη επανδρωμένο αεροσκάφος, απόδοση, βιωσιμότητα

INNOVATIVE AGROECOLOGICAL APPROACHES FOR IMPROVED WEED MANAGEMENT AND BIODIVERSITY CONSERVATION IN WHEAT CULTIVATION

P. Papakaloudis, A. Michalitsis, E. Deligiannis, F. S. A. Alexandrou, C. Dordas, G. Manesis, Z. Basdagianni, I. Bosis, C. Dordas

School of Agriculture, Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece
chdordas@agro.auth.gr

ABSTRACT

Wheat is a staple crop in the diet of Western societies. One of the main challenges in its cultivation is weed management, which largely relies on synthetic herbicides, despite their alarming environmental and health impacts, as well as the increasing emergence of herbicide resistant weed species. Moreover, the European Green Deal and the new Common Agricultural Policy promote biodiversity enhancement by encouraging the adoption of precision agriculture technologies and agroecological practices to achieve the EU's environmental and climate goals. The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in agriculture further enables rapid and non-destructive monitoring of weed presence and development, offering significant advantages for decision-making and input reduction. The aim of this study was to combine advanced monitoring technologies (UAVs) with agroecological practices (monocropping and intercropping systems) to assess weed development and enhance biodiversity in winter crops. The experiment was conducted during the 2023–2024 growing season at the experimental farm of Aristotle University of Thessaloniki (40°32'07.7"N 22°59'20.5"E), using a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications. The cropping treatments included monocultures of bread wheat, durum wheat, field pea, and faba bean, as well as their respective intercrops, without the application of herbicides or fertilizers. Throughout the growing season, UAV images were captured to calculate physiological indices, while additional field measurements were collected regarding the Leaf Area Index (LAI) and biomass of both cultivated plants and weeds. The results showed that both durum wheat intercrops with field pea and faba bean recorded higher LAI and dry biomass values compared to bread wheat intercrops. Moreover, bread wheat-pea intercrop reduced weed presence. In conclusion, the integration of precision technologies and agroecological approaches can significantly contribute to sustainable weed management and biodiversity conservation, thus strengthening the sustainability of cropping systems.

Keywords: intercropping system, unmanned aerial vehicle, yield, sustainability

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εντατική μονοκαλλιέργεια, αν και συνέβαλε σημαντικά στην αύξηση των αποδόσεων των καλλιεργειών, οδήγησε ταυτόχρονα σε υποβάθμιση της βιοποικιλότητας και ενίσχυσε τη χρήση συνθετικών εισροών όπως τα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα (Bourke et al., 2021). Ως αποτέλεσμα, έχει αναπτυχθεί έντονο ενδιαφέρον για την υιοθέτηση εναλλακτικών καλλιεργητικών συστημάτων που προάγουν τη βιωσιμότητα.

Η συγκαλλιέργεια αποτελεί μια βασική αγροοικολογική πρακτική, σύμφωνα με την οποία δύο ή περισσότερα φυτικά είδη καλλιεργούνται ταυτόχρονα στο ίδιο χωράφι (Wezel et al., 2014; Gaba et al., 2014). Αυτή η πρακτική εφαρμόζεται ευρέως από μικρούς παραγωγούς

με στόχο την αύξηση της παραγωγής, τη μείωση των κινδύνων και τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων (Ghosh, 2004; Li et al., 2020; Bybee-Finley και Ryan, 2018). Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της συγκαλλιέργειας είναι η αποτελεσματική καταστολή της ανάπτυξης ζιζανίων (Huss et al., 2022).

Η μακροχρόνια και εντατική χρήση ζιζανιοκτόνων έχει πλέον καταδείξει τις αρνητικές της συνέπειες όχι μόνο για την καλλιέργεια, αλλά και για την περιβαλλοντική ισορροπία και τη βιοποικιλότητα των αγροοικοσυστημάτων (Pavlović et al., 2022). Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η αγροοικολογία αναδεικνύεται ως μια αποτελεσματική προσέγγιση στον τομέα της γεωργίας και της παραγωγής τροφίμων. Βασίζεται σε φυσικές διαδικασίες, ενισχύει τη συνεργατική δημιουργία γνώσης και την καινοτομία, ενώ συνδυάζει την εμπειρία με την επιστημονική γνώση (Wezel et al., 2009; Michalitsis et al., 2024). Οι αγροοικολογικές πρακτικές στοχεύουν στη μείωση ή αντικατάσταση των συνθετικών εισροών, όπως τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα, ενώ ταυτόχρονα διατηρούν ή και ενισχύουν την παραγωγικότητα (Nicholls et al., 2016).

Η παρούσα μελέτη αποσκοπούσε στην αξιολόγηση της ανάπτυξης των ζιζανίων και την προώθηση της βιοποικιλότητας σε χειμερινά καλλιεργητικά συστήματα μέσα από τη χρήση καινοτόμων τεχνολογικών συστημάτων, όπως Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAVs), σε συνδυασμό με τις αγροοικολογικές πρακτικές της μονοκαλλιέργειας και της συγκαλλιέργειας.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πειραματικό μέρος της μελέτης υλοποιήθηκε κατά την καλλιεργητική περίοδο 2023–2024 στον πειραματικό αγρό του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (40°32'07.7"N, 22°59'20.5"E). Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε ήταν Πλήρως Τυχαιοποιημένων Ομάδων (RCBD) με τρεις επαναλήψεις, προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η στατιστική ισχύς των αποτελεσμάτων, ενώ η έκταση του κάθε πειραματικού τεμαχίου ήταν 10 m^2. Οι καλλιεργητικές επεμβάσεις περιλάμβαναν μονοκαλλιέργειες (μαλακό σιτάρι, σκληρό σιτάρι, κτηνοτροφικό μπιζέλι και κουκί), καθώς και όλους τους πιθανούς συνδυασμούς αυτών σε σύστημα συγκαλλιέργειας σιτηρών-ψυχανθών. Η πυκνότητα σποράς ήταν στα 200 kg/ha και για τα σιτηρά και για τα ψυχανθή στις μονοκαλλιέργειές τους, ενώ για τις επεμβάσεις συγκαλλιέργειας η πυκνότητα ορίστηκε στα 25/75 σιτηρό/ψυχανθές, επί των αντίστοιχων μονοκαλλιεργειών τους. Όλες οι καλλιέργειες εγκαταστάθηκαν χωρίς την εφαρμογή λιπασμάτων και ζιζανιοκτόνων, ώστε να προσομοιάζουν συνθήκες χαμηλών εισροών και να αξιολογηθεί η επίδραση της αγροοικολογικής διαχείρισης.

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες λήψεις εναέριων εικόνων με Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAVs), προκειμένου να υπολογιστούν σημαντικοί φυσιολογικοί δείκτες όπως ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI). Οι εναέριες λήψεις πραγματοποιήθηκαν με το DJI Mavic 3 Multispectral, το οποίο συνδυάζει RGB κάμερα 20 MP (4/3″ CMOS, μηχανικό κλείστρο) και τετρακάναλη (green, red, red edge, near infrared) πολυφασματική κάμερα 5 MP. Οι πτήσεις έγιναν σε ύψος 20 m υπό αίθριες συνθήκες, με μία πτήση ανά 15 ημέρες από την έναρξη της άνθισης μέχρι τη φυσιολογική ωρίμανση των φυτών. Για την εξαγωγή των ορθομωσαϊκών χαρτών, των ανακλάσεων και των φυτικών δεικτών χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Pix4Dmapper και QGIS. Παράλληλα, συλλέχθηκαν συμπληρωματικά δεδομένα πεδίου για τον υπολογισμό του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index, LAI) με τη βοήθεια του επιστημονικού οργάνου ACCUPAR

LP-80, καθώς και για την εκτίμηση της ξηρής βιομάζας τόσο των καλλιεργούμενων φυτών όσο και των ζιζανίων.

Ο υπολογισμός των δεικτών NDVI και LAI βασίστηκε στους εξής τύπους:

1. LAI = −[ln(L/L0)]/k (1),

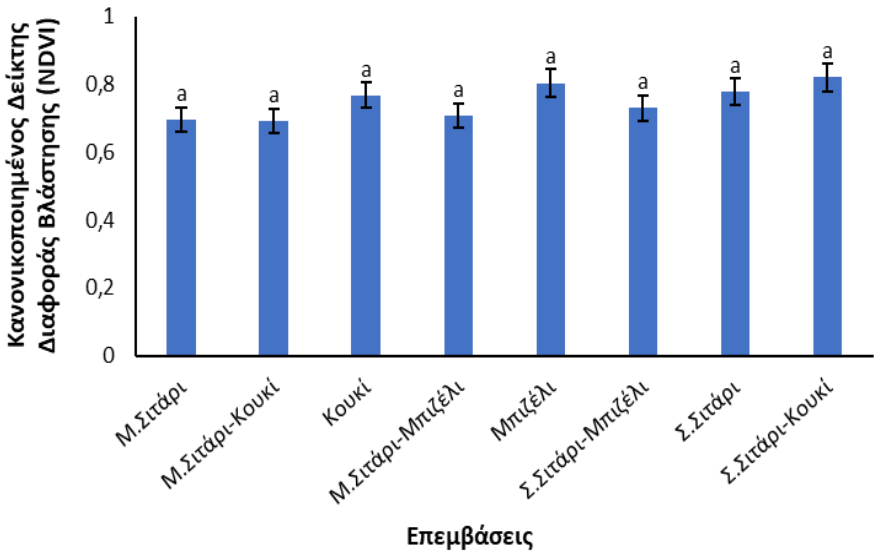
   όπου το L0 είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία στη φυτοστοιβάδα, το L είναι η ακτινοβολία εντός της φυτοστοιβάδας το k είναι ο συντελεστής απορρόφησης, που εξαρτάται από την καλλιέργεια (De Wit, 1965)

2. (NIR-RED)/ (NIR+RED) (2),

   όπου NIR είναι η ανάκλαση στο κοντινό υπέρυθρο και RED, η ανάκλαση στο ερυθρό (Rouse et al., 1974).

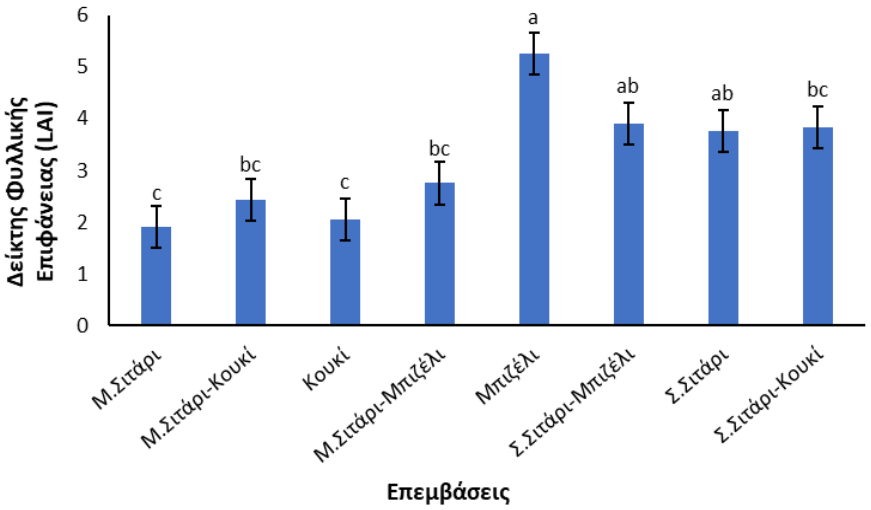
Η εξαγωγή των μέσων όρων των δεικτών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του στατιστικού πακέτου IBM SPSS και η σύγκριση αυτών με το κριτήριο του Tukey σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0,05$.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ



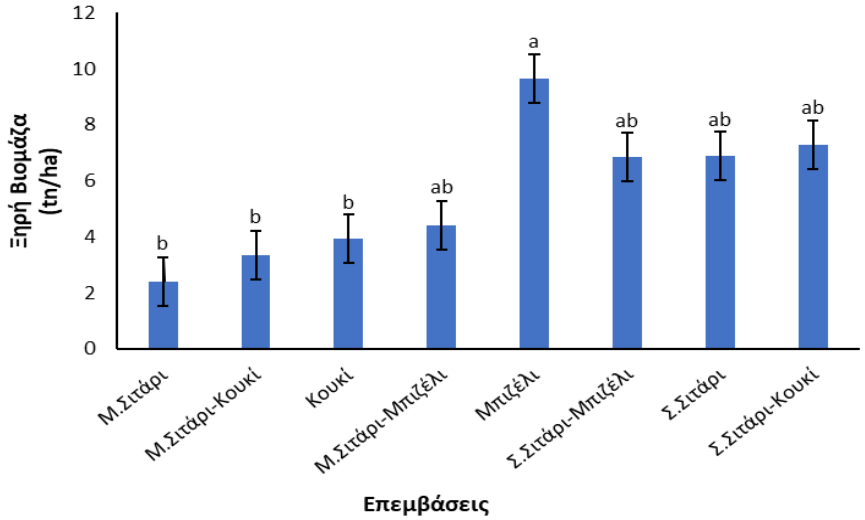
Σχήμα 1. Κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης (NDVI) των διάφορων επεμβάσεων μονοκαλλιέργειας και συγκαλλιέργειας.

Τα αποτελέσματα από τις λήψεις των εναέριων φωτογραφιών για τον υπολογισμό του κανονικοποιημένου δείκτη διαφοράς βλάστησης (NDVI) (Σχήμα 1), έδειξαν ότι η μεγαλύτερη τιμή του δείκτη παρουσιάστηκε στη συγκαλλιέργεια σκληρού σιταριού με κουκί (0,81), ενώ η μικρότερη στην επέμβαση μαλακό σιτάρι-κουκί (0,69). Ωστόσο δεν υπήρξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων συγκαλλιέργειας. Παρομοίως και στην αντίστοιχη έρευνα των Michalitsis et al. (2024).



Σχήμα 2. Δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) των διάφορων επεμβάσεων μονοκαλλιέργειας και συγκαλλιέργειας.

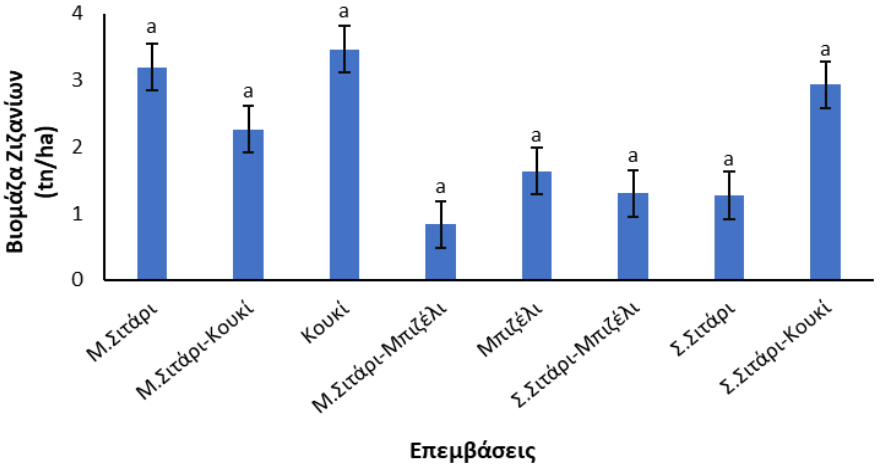
Όσον αφορά στον δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) (Σχήμα 2), η μεγαλύτερη τιμή καταγράφηκε στη μονοκαλλιέργεια μπιζελιού (5,24) ενώ η μικρότερη σε αυτή του μαλακού σιταριού (1,89). Επίσης οι μεγαλύτερες τιμές LAI στις επεμβάσεις συγκαλλιέργειας εντοπίστηκαν σε αυτές του σκληρού σιταριού με μπιζέλι (3,9) και με κουκί (3,84) ενώ η μικρότερη στην επέμβαση μαλακό σιτάρι-κουκί (2,43). Στατιστικά σημαντικές διαφορές υπήρξαν μεταξύ των επεμβάσεων του μπιζελιού με τις μονοκαλλιέργειας του μαλακού σιταριού και του κουκιού και τις συγκαλλιέργειες με μαλακό σιτάρι. Επίσης, οι επεμβάσεις μαλακό σιτάρι και κουκί διαφέρουν στατιστικά με τις επεμβάσεις σκληρό σιτάρι-μπιζέλι και σκληρό σιτάρι.



Σχήμα 3. Απόδοση σε ξηρή βιομάζα (tn/ha) των διάφορων επεμβάσεων μονοκαλλιέργειας και συγκαλλιέργειας.

Σύμφωνα με το Σχήμα 3, η μεγαλύτερη τιμή στην ξηρή βιομάζα καταγράφθηκε στη μονοκαλλιέργεια του μπιζελιού (9,63 tn/ha), ενώ η μικρότερη στη μονοκαλλιέργεια του μαλακού σιταριού (2,4 tn/ha). Εξίσου σημαντικές αποδόσεις παρουσίασαν και οι επεμβάσεις συγκαλλιέργειας σκληρού σιταριού με κουκί (7,26 tn/ha) και σκληρού σιταριού με μπιζέλι

(6,86 tn/ha), ενώ η μικρότερη απόδοση σε βιομάζα όσον αφορά τα συστήματα συγκαλλιέργειας εντοπίστηκε στην επέμβαση μαλακό σιτάρι-κουκί (3,36 tn/ha). Στατιστικά σημαντικές διαφορές υπήρξαν μεταξύ της μονοκαλλιέργειας του μπιζελιού με τις επεμβάσεις μαλακό σιτάρι, κουκί και μαλακό σιτάρι-κουκί. Παρόμοια αποτελέσματα είχε και η αντίστοιχη έρευνα των Nelson et al. (2021), όσον αφορά τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας και την ξηρή βιομάζα.



Σχήμα 4. Βιομάζα ζιζανίων (tn/ha) των διάφορων επεμβάσεων μονοκαλλιέργειας και συγκαλλιέργειας.

Τέλος, όσον αφορά τη βιομάζα των ζιζανίων (Σχήμα 4), η μεγαλύτερη απόδοση βρέθηκε στη μονοκαλλιέργεια κουκιού (3,46 tn/ha), ενώ η μικρότερη απόδοση στη συγκαλλιέργεια μαλακού σιταριού και μπιζελιού (0,83 tn/ha). Ωστόσο, δεν υπήρξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεμβάσεων. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν ομοιότητες με την αντίστοιχη έρευνα των Kristó et al. (2022).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι συγκαλλιέργειες σκληρού σιταριού με κουκί και σκληρού σιταριού με μπιζέλι ανέδειξαν τη μεγαλύτερη παραγωγή βιομάζας σε σύγκριση με τις συγκαλλιέργειες που περιλάμβαναν μαλακό σιτάρι, σύμφωνα με τις τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) και τις μετρήσεις ξηρής βιομάζας. Παράλληλα, η συγκαλλιέργεια μαλακού σιταριού με μπιζέλι εμφάνισε τη χαμηλότερη πίεση από ζιζάνια. Τέλος, ο συνδυασμός τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, όπως η χρήση UAVs, με αγροοικολογικές πρακτικές συγκαλλιέργειας, μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βιώσιμη διαχείριση των ζιζανίων και στη διατήρηση της βιοποικιλότητας, ενισχύοντας την αειφορία των καλλιεργητικών συστημάτων.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Έρευνας στο πλαίσιο του προγράμματος έρευνας και καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο του έργου «Conserwa», αριθμός επιχορήγησης 101081802. Ωστόσο, οι απόψεις και οι απόψεις που εκφράζονται είναι μόνο των συγγραφέων και δεν αντικατοπτρίζουν απαραίτητα εκείνες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ή του REA. Ούτε η Ευρωπαϊκή Ένωση ούτε ο REA μπορούν να θεωρηθούν υπεύθυνοι για αυτές».

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bourke, P. M., Evers, J. B., Bijma, P., van Apeldoorn, D. F., Smulders, M. J. M., Kuyper, T. W., Mommer, L., and Bonnema, G., 2021. *Breeding beyond monoculture: Putting the "intercrop" into crops.* Frontiers in Plant Science, 12, 734167.

Bybee-Finley, K. A., and Ryan, M. R., 2018. *Advancing intercropping research and practices in industrialized agricultural landscapes.* Agriculture, 8(6), 80.

Gaba, S., Fried, G., Kazakou, E., Chauvel, B., and Navas, M. L., 2014. *Agroecological weed control using a functional approach: a review of cropping systems diversity.* Agronomy for sustainable development, *34*(1), 103-119.

Ghosh, P. K., 2004. *Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India.* Field Crops Research, 88(2-3), 227–237.

Huss, C. P., Holmes, K. D., and Blubaugh, C. K., 2022. *Benefits and risks of intercropping for crop resilience and pest management.* Journal of economic entomology, *115*(5), 1350-1362.

Kristó, I., Vályi-Nagy, M., Rácz, A., Tar, M., Irmes, K., Szentpéteri, L., and Ujj, A., 2022. *Effects of weed control treatments on weed composition and yield components of winter wheat (Triticum aestivum L.) and winter pea (Pisum sativum L.) intercrops*. Agronomy, 12(10), 2590.

Li, C., Hoffland, E., Kuyper, T. W., Yu, Y., Zhang, C., Li, H., Zhang, F., & van der Werf, W., 2020. *Syndromes of production in intercropping impact yield gains.* Nature Plants, 3, 17092.

Michalitsis, A., Papakaloudis, P., Pankou, C., Lithourgidis, A., Menexes, G., and Dordas, C., 2024. *Effect of cultivar on faba bean–wheat intercrop productivity under a Mediterranean environment.* Agronomy, 14(1), 70.

Nelson, W. C. D., Siebrecht-Schöll, D. J., Hoffmann, M. P., Rötter, R. P., Whitbread, A. M., and Link, W. 2021. *What determines a productive winter bean–wheat genotype combination for intercropping in central Germany?* European Journal of Agronomy, 128, 126294.

Nicholls, C. I., Altieri, M. A., and Vázquez, L., 2016. *Agroecology: Principles for the conversion and redesign of farming systems.* Journal of Ecosystem & Ecography, S5(010), 1–8.

Pavlović, I., Pavlović, D., Vrbničanin, S., Anđelković, A., Božić, D., Rajković, M., and Malidža, G., 2022. *Non-chemical weed control for plant health and environment: Ecological integrated weed management (EIWM). Agronomy, 12*(5), 1091.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., and David, C., 2009. *Agroecology as a science, a movement and a practice: A review.* Agronomy for Sustainable Development, 29(4), 503–515.

Wezel, A., David C., Ferrer, A., Letort A., Feret S., Peigne J., Vian J. F., and Celette F., 2014. *Agroecological practices supporting the provision of goods and services in agriculture: Examples from France and Europe.* Agroecology and Sustainable Food Systems, 38(1), 113–132.

50. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΜΑΤΙΝΙΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΚΖ

Σ. Κωνσταντινίδη & Α. Βατσανίδου

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αγροτικής Ανάπτυξης, Αγροδιατροφής και Διαχείρισης Φυσικών Πόρων, Συγκρότημα Ευρίπου, 34400, Ψαχνά, Ευβοίας stellakonst@agro.uoa.gr

Περίληψη

Η θερμοκηπιακή καλλιέργεια προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς ενισχύει την αγροτική παραγωγή, αυξάνει την αποδοτικότητα της καλλιέργειας και επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση των φυσικών πόρων. Στις μέρες μας, η αυξανόμενη ζήτηση για επαρκή και ασφαλή διατροφικά προϊόντα, σε συνδυασμό με την ανάγκη μετάβασης σε πιο βιώσιμα αγροδιατροφικά συστήματα, αναδεικνύουν την ανάγκη για συστηματική αξιολόγηση και βελτιστοποίηση των παραγωγικών συστημάτων. Η παρούσα μελέτη εφαρμόζει τη μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) για την ποσοτικοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος θερμοκηπιακής & υδροπονικής καλλιέργειας τοματινών σε μονάδα της Ιεράπετρας, η οποία εφαρμόζει καινοτόμες, βιολογικές πρακτικές φυτοπροστασίας. Η μελέτη είναι σύμφωνη με τα πρότυπα ISO 14040/44, ακολουθεί την προσέγγιση "from cradle-to- gate" και εφάρμοσε τις μεθόδους ReCiPe 2016 και USEtox 2.14 για την εκτίμηση των επιπτώσεων σε κατηγορίες όπως η κλιματική αλλαγή, η εξάντληση ορυκτών πόρων, η οξίνηση, ο ευτροφισμός και η κατανάλωση νερού, καθώς και για την τοξικότητα στην ανθρώπινη υγεία και στα υδάτινα οικοσυστήματα. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τη χρήση λιπασμάτων, νερού και ενέργειας ως τους κυριότερους παράγοντες περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, ενώ αντίθετα κατέδειξε ότι η φυτοπροστασία και η θέρμανση εμφάνισαν πολύ μικρές ή αμελητέες επιπτώσεις.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Θερμοκηπιακή Καλλιέργεια, Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα , Υδροπονία

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF GREENHOUSE CHERRY TOMATO PRODUCTION USING THE LIFE CYCLE ASSESSMENT METHOD

S. Konstantinidi* & A. Vatsanidou

National and Kapodistrian University of Athens, Department of Department of Agricultural Development, Agri-Food & Management of Natural Resources, 34400, Psachna, Evia, Greece.

** stellakonst@agro.uoa.gr*

ABSTRACT

Greenhouse cultivation offers significant advantages, as it enhances agricultural production, increases crop efficiency, and enables better utilization of natural resources. Nowadays, the growing demand for sufficient and safe food products, combined with the need to transition towards more sustainable agri-food systems, highlights the importance of systematically assessing and optimizing production systems. This study applies the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to quantify the environmental footprint of greenhouse and hydroponic tomato cultivation in a facility located in Ierapetra, Crete, which implements innovative biological plant protection practices. The study complies

with ISO 14040/44 standards, follows a cradle-to-gate approach, and applies the ReCiPe 2016 and USEtox 2.14 methods to assess impacts in categories such as climate change, fossil resource depletion, acidification, eutrophication, and water consumption, as well as to evaluate toxicity impacts on human health and aquatic ecosystems. The results identified the use of fertilizers, water, and energy as the main contributors to environmental burdens, whereas plant protection and heating showed very small or negligible impacts

Keywords: Life Cycle Assessment, Environmental Footprint, Greenhouse Cultivation, Hydroponics

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θερμοκηπιακή καλλιέργεια έχει αναδειχθεί σε θεμελιώδες παράγοντα της σύγχρονης γεωργικής παραγωγής, προσφέροντας υψηλής δυναμικότητας παραγωγικότητα και αποδοτικότητα σε σύγκριση με την καλλιέργεια σε υπαίθριο έδαφος. Λειτουργώντας σε ελεγχόμενο περιβάλλον, επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση των κλιματικών συνθηκών, τον έλεγχο των παρασίτων και την αποδοτική χρήση των πόρων, καθιστώντας την μια καίρια στρατηγική για την ενίσχυση της επισιτιστικής ασφάλειας και τη διασφάλιση της βιωσιμότητας του αγροτικού τομέα (Boulard et al., 2011). Ωστόσο, η λειτουργία των θερμοκηπίων απαιτεί σημαντικές εισροές, όπως ενέργεια, λιπάσματα, υλικά υποδομής και προϊόντα φυτοπροστασίας, οι οποίες επιβαρύνουν το συνολικό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα (Savvas et al., 2018). Παράλληλα, τα συστήματα αυτά παράγουν εκπομπές με τη μορφή αερίων του θερμοκηπίου (Audsley et al., 2009), διαλυμάτων απορροής που περιέχουν υπολείμματα λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων (Katsoulas et al., 2015), καθώς και άλλα παραπροϊόντα και φυτικά υπολείμματα.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) αποτελεί αναγνωρισμένη μεθοδολογία για την ολιστική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων γεωργικών συστημάτων, επιτρέποντας τον εντοπισμό κρίσιμων σημείων (“hotspots”) και την προώθηση βέλτιστων πρακτικών. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται σε μια θερμοκηπιακή μονάδα παραγωγής τοματινιών στην Ιεράπετρα, η οποία έχει επιλεγεί καθώς εφαρμόζει φιλικές προς το περιβάλλον στρατηγικές φυτοπροστασίας, βασισμένες στη χρήση βιολογικών και πράσινων σκευασμάτων χαμηλής επιβάρυνσης σε συνδυασμό με καινοτόμες πρακτικές ολοκληρωμένης διαχείρισης. Η επιλογή της συγκεκριμένης μονάδας επιτρέπει την αξιολόγηση ενός παραγωγικού συστήματος που επιχειρεί να ισορροπήσει μεταξύ υψηλής παραγωγικότητας και μειωμένου περιβαλλοντικού αποτυπώματος, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες μετάβασης σε πιο βιώσιμα αγροδιατροφικά συστήματα.

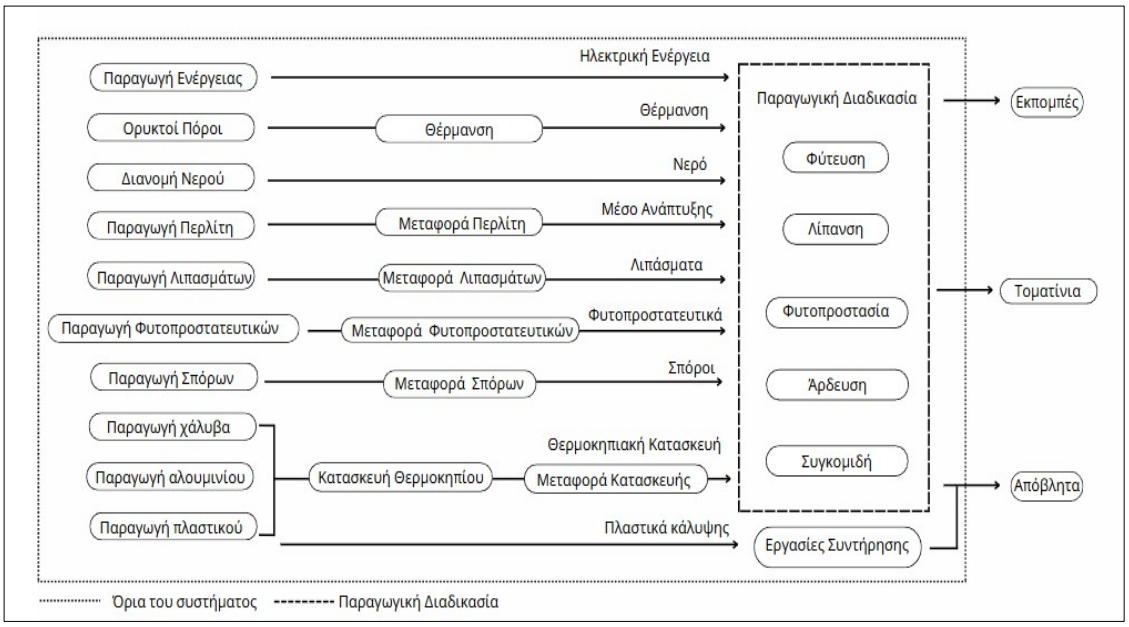
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Σκοπός και Πεδίο Εφαρμογής της Μελέτης

Η παρούσα μελέτη βασίστηκε στη μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και 14044 (ISO International Organization for Standardization, 2006b, 2006a). Στόχος της είναι η ποσοτικοποίηση και ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων θερμοκηπιακής καλλιέργειας τοματινιών, με σκοπό τον εντοπισμό των κύριων πηγών περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (“hotspots”) και την ανάδειξη δυνατοτήτων βελτιστοποίησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγικής διαδικασίας.

Για την υλοποίηση της μελέτης πραγματοποιήθηκε καταγραφή και ανάλυση όλων των εισροών και εκροών του συστήματος, ώστε να συνταχθεί ο πίνακας ροών που αποτέλεσε τη βάση για την ανάλυση απογραφής και την εκτίμηση των επιπτώσεων. Ως λειτουργική μονάδα ορίστηκε «η παραγωγή ενός κιλού τοματινιών, μη συσκευασμένων, στην πύλη της θερμοκηπιακής μονάδας», η οποία χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για την έκφραση των αποτελεσμάτων και τη συγκρισιμότητα με άλλες μελέτες.

Η ανάλυση ακολουθεί την προσέγγιση "cradle-to-gate" και περιλαμβάνει εντός των ορίων της όλες τις διεργασίες που σχετίζονται με την παραγωγή των τοματινιών. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει την κατανάλωση ενέργειας, τη χρήση νερού, τη χρήση μέσων ανάπτυξης, την εφαρμογή λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, τη σπορά, τη θέρμανση, καθώς και την κατασκευή του θερμοκηπίου. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη οι διεργασίες παραγωγής και μεταφοράς των παραπάνω εισροών προς τη μονάδα, αλλά και η αξιολόγηση των εκπομπών αερίων ρύπων (π.χ. CO_2, N_2O, NH_3) που εκλύονται από την εφαρμογή λιπασμάτων, την καύση του πυρήνα ελιάς που χρησιμοποιείται ως μέσο θέρμανσης, καθώς και τα παραγόμενα απόβλητα που προκύπτουν. Η μελέτη ολοκληρώνεται στην «πύλη» της μονάδας, χωρίς να περιλαμβάνει στάδια συσκευασίας, διανομής, κατανάλωσης και διάθεσης του τελικού προϊόντος.



Σχήμα 1. Τα όρια του συστήματος της μελέτης

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων στις κατηγορίες Κλιματική αλλαγή (GWP), Ευτροφισμός (EP), Χερσαία οικοτοξικότητα (TETP), Χρήση νερού (WF), Χρήση γης (LU) και Εξάντληση ορυκτών πόρων (FRS), εφαρμόστηκε η μέθοδος ReCiPe 2016, η οποία παρέχει αποτελέσματα τόσο σε ενδιάμεσο (midpoint) όσο και σε τελικό (endpoint) επίπεδο και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη σε μελέτες γεωργικών συστημάτων. Η τοξικότητα σε ανθρώπους (HT) και οικοσυστήματα (ET) αξιολογήθηκε με τη μέθοδο USEtox 2.14, η οποία θεωρείται επιστημονικά πιο αξιόπιστη για την εκτίμηση τοξικών επιπτώσεων. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη μεταφορά και την τύχη των χημικών ουσιών στα περιβαλλοντικά διαμερίσματα (αέρας, νερό, έδαφος), τις οδούς έκθεσης και τις επιπτώσεις τους. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SimaPro 10.3 με χρήση των βάσεων δεδομένων Ecoinvent (Ecoinvent, 2009) και Agribalyse (Koch & Salou, 2020), οι οποίες εξασφαλίζουν την ποιότητα και συγκρισιμότητα των δεδομένων με διεθνείς μελέτες.

2.2. Ανάλυση Απογραφής

Η ανάλυση απογραφής περιλαμβάνει τη συλλογή και επεξεργασία των απαραίτητων δεδομένων για την προσομοίωση του συστήματος. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη είναι κατά κύριο λόγο πρωτογενή, καθώς προέρχονται από τη θερμοκηπιακή μονάδα και αντιπροσωπεύουν τα δύο τελευταία έτη λειτουργίας της. Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν στοιχεία που αφορούν τις γεωργικές πρακτικές, τη χρήση πόρων (ενέργεια, νερό), τα λιπάσματα, τα υλικά, τα προϊόντα φυτοπροστασίας καθώς και την απόδοση της καλλιέργειας.

Για τη μοντελοποίηση των διεργασιών που δεν πραγματοποιούνται άμεσα εντός της θερμοκηπιακής πρακτικής, αλλά σχετίζονται με την παραγωγή των απαιτούμενων εισροών (όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, νερού, λιπασμάτων, φυτοπροστατευτικών προϊόντων και υλικών κατασκευής ή καλλιέργειας), αξιοποιήθηκαν δευτερογενή δεδομένα έτοιμων διεργασιών από τη βιβλιοθήκη της βάσης δεδομένων Ecoinvent. Ο συνδυασμός πρωτογενών και δευτερογενών δεδομένων επιτρέπει την αξιόπιστη αποτύπωση του συστήματος και την ολοκληρωμένη ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

2.3. Ανάπτυξη Μοντέλων Κύκλου Ζωής

Πίνακας 1. Ομαδοποίηση και Περιγραφή των Διαδικασιών της Μελέτης

Ομάδα Διαδικασιών	Περιγραφή
Υποδομές	• Υλικά κατασκευής και δόμησης (γαλβανισμένος χάλυβας, πλαστικά LDPE κάλυψης, δίχτυ εντομοκάλυψης κλπ) • Υδροπονικό Σύστημα (Αντλίες, σωληνώσεις, υποστρώμα φύτευσης)
Λειτουργία	• Χρήση ενέργειας (ενεργειακό μείγμα και κατανάλωση) • Χρήση νερού (προέλευση και κατανάλωση)
Θέρμανση	• Καύση πυρήνα ελιάς σε λέβητα
Λίπανση	• Τύποι και ποσότητες λιπασμάτων • Μέθοδος και συχνότητα εφαρμογής • Υπολογισμός εκπομπών NH3-N, N2O-N, NOx-N στον αέρα και στο νερό κατά την εφαρμογή των λιπασμάτων • Υπολογισμός εκπομπών αέριων ρύπων κατά την παραγωγή των λιπασμάτων
Φυτοπροστασία	• Προϊόντα και δραστικές ουσίες προϊόντων φυτοπροστασίας • Συχνότητα και τρόπος εφαρμογής τους • Προσομοίωση κατανομής των ουσιών στα περιβαλλοντικά διαμερίσματα (νερό, έδαφος, αέρας)
Μεταφορές	• Μέσα μεταφοράς (φορτηγό, πλοίο, IX κλπ), αποστάσεις και φορτίο για την προμήθεια των υλικών και του εξοπλισμού

Η μοντελοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SimaPro 10.3, με τη δημιουργία διακριτών ομάδων διαδικασιών που αντιπροσωπεύουν τα επιμέρους υποσυστήματα της θερμοκηπιακής καλλιέργειας. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν ξεχωριστές ομάδες για τις υποδομές του θερμοκηπίου, τη λειτουργία του (ενέργεια και νερό), τη θέρμανση, τις μεταφορές, τη λίπανση και τη φυτοπροστασία, καθεμία από τις οποίες περιλάμβανε όλες τις σχετικές εισροές και εκπομπές, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη μονάδα η φυτοπροστασία βασίζεται κυρίως στη χρήση βιολογικών σκευασμάτων και στην εφαρμογή φυσικών εχθρών για την αντιμετώπιση ασθενειών και παρασίτων, γεγονός που διαφοροποιεί τη συγκεκριμένη καλλιέργεια από άλλες συμβατικές πρακτικές.

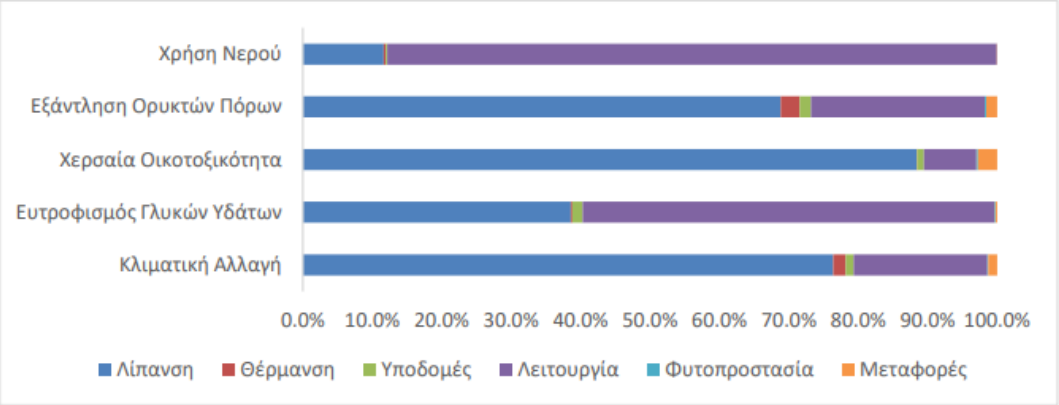
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Αποτελέσματα Εκτίμησης Επιπτώσεων και Ανάλυσης Συνεισφοράς με τη Μέθοδο Recipe 2016

Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων πραγματοποιήθηκε για τη λειτουργική μονάδα «η παραγωγή ενός κιλού τοματινιών, μη συσκευασμένων, στην πύλη της θερμοκηπιακής μονάδας». Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της εκτίμησης, καθώς και την ποσοστιαία συνεισφορά των επιμέρους ομάδων διαδικασιών στο τελικό αποτέλεσμα για κάθε κατηγορία επίπτωσης όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου ReCiPe 2016 κατά το στάδιο του χαρακτηρισμού. Η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων δίνεται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα Χαρακτηρισμού: Εκτίμηση Επιπτώσεων και Συνεισφορά Διαδικασιών στα Συνολικά Αποτελέσματα Επίπτωσης με τη μέθοδο Recipe 2016.

Κατηγορία Επίπτωσης	Unit	Σύνολο	Λίπανση	Θέρμανση	Υποδομές	Λειτουργία	Φυτοπροστασία	Μεταφορές
Κλιματική Αλλαγή	kg CO2 eq	9.21E-01	76.4%	1.8%	1.1%	19.3%	0.1%	1.3%
Ευτροφισμός Γλυκών Υδάτων	kg P eq	9.76E+00	38.6%	0.2%	1.5%	59.3%	0.2%	0.2%
Χερσαία Οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	2.21E-01	88.4%	0.1%	1.0%	7.6%	0.2%	2.8%
Εξάντληση Ορυκτών Πόρων	kg oil eq	3.81E-04	68.8%	2.7%	1.6%	25.0%	0.2%	1.6%
Χρήση Νερού	m3	6.97E-02	11.6%	0.3%	0.2%	87.8%	0.0%	0.0%



Σχήμα 2. Σχηματική Απεικόνιση της Ανάλυσης Συνεισφοράς των Διαδικασιών με τη μέθοδο Recipe 2016.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι τα στάδια της λίπανσης και της λειτουργίας του θερμοκηπίου αποτελούν τις κυριότερες πηγές περιβαλλοντικής επιβάρυνσης στις περισσότερες από τις κατηγορίες που αξιολογήθηκαν. Αντίθετα, οι υποδομές και οι μεταφορές παρουσίασαν πολύ μικρή συνεισφορά, ενώ η φυτοπροστασία εμφάνισε αμελητέες έως μηδενικές επιπτώσεις σε όλες τις κατηγορίες.

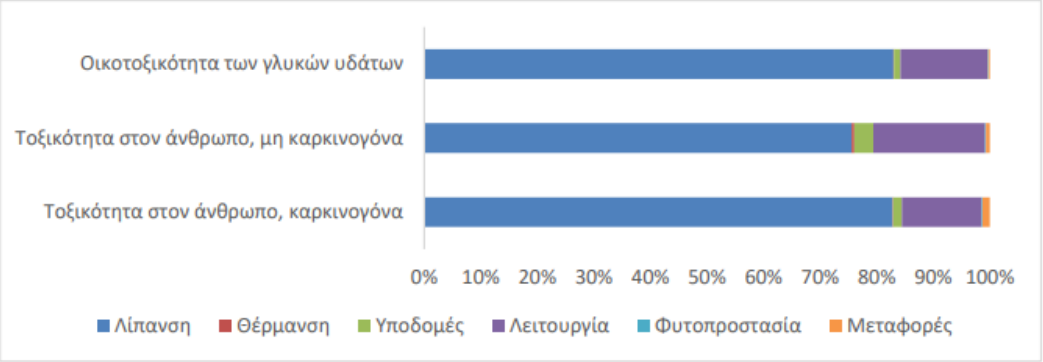
3.2.Αποτελέσματα Εκτίμησης Επιπτώσεων και Ανάλυσης Συνεισφοράς με τη Μέθοδο USEtox 2.14

Στον Πίνακα 3 και στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού για τις κατηγορίες επίπτωσης «Οικοτοξικότητα των γλυκών υδάτων», «Τοξικότητα στον

άνθρωπο – καρκινογόνα» και «Τοξικότητα στον άνθρωπο – μη καρκινογόνα», όπως υπολογίστηκαν με τη μέθοδο USEtox. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι τα στάδια της λίπανσης και της λειτουργίας του θερμοκηπίου συνιστούν τους κυριότερους παράγοντες επιβάρυνσης τόσο για την οικοτοξικότητα όσο και για την τοξικότητα στον άνθρωπο. Αντίθετα, η λίπανση, η φυτοπροστασία και οι μεταφορές είχαν αμελητέα συνεισφορά στις επιπτώσεις που αξιολογήθηκαν.

Πίνακας 3. Εκτίμηση Επιπτώσεων και Συνεισφορά Διαδικασιών στα Συνολικά Αποτελέσματα Επίπτωσης με τη μέθοδο USEtox.

Κατηγορία Επίπτωσης	Unit	Σύνολο	Λίπανση	Θέρμανση	Υποδομές	Λειτουργία	Φυτοπροστασία	Μεταφορές
Τοξικότητα στον άνθρωπο, καρκινογόνα	cases	2.08E-07	82.8%	0.1%	1.6%	14.1%	0.1%	1.3%
Τοξικότητα στον άνθρωπο, μη καρκινογόνα	cases	2.03E-07	75.6%	0.5%	3.4%	19.8%	0.1%	0.7%
Οικοτοξικότητα των γλυκών υδάτων	PAF.m3.day	6.21E+03	82.9%	0.1%	1.2%	15.3%	0.2%	0.3%



Σχήμα 3. Σχηματική Απεικόνιση της Ανάλυσης Συνεισφοράς των Διαδικασιών με τη μέθοδο Usetox.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η μελέτη έδωσε έμφαση στις κατηγορίες της Κλιματικής Αλλαγής και της Τοξικότητας, καθώς αποτελούν κρίσιμες πτυχές της περιβαλλοντικής αξιολόγησης. Η επίπτωση στην κλιματική αλλαγή βρίσκεται στο επίκεντρο των στρατηγικών και κανονισμών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με στοχευμένα μέτρα μείωσης εκπομπών. Από την άλλη, η τοξικότητα σχετίζεται άμεσα με τη χρήση λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, δηλαδή εισροών που η ΕΕ έχει θέσει ως στόχο την μείωσή τους εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ασφάλεια για την υγεία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος. Για τους λόγους αυτούς, η συζήτηση εστιάζει στην ανάλυση της επίπτωσης στις συγκεκριμένες κατηγορίες.

Τα αποτελέσματα για την κλιματική αλλαγή κατέδειξαν ότι η λίπανση αποτελεί το κυριότερο στάδιο επιβάρυνσης, κυρίως λόγω των εκπομπών αζωτούχων ενώσεων (N_2O, NH_3 και NO_3^-) που παράγονται κατά την εφαρμογή τους στο έδαφος, αλλά και λόγω των εκπομπών αέριων ρύπων που σχετίζονται με την παραγωγή τους. Επιπλέον, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία του θερμοκηπίου εμφανίστηκε ως σημαντική πηγή εκπομπών CO_2, γεγονός που συνδέεται με το ενεργειακό μίγμα που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα. Ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων εξηγεί γιατί οι κατηγορίες της λίπανσης και της λειτουργίας του θερμοκηπίου συγκεντρώνουν τη

μεγαλύτερη συνεισφορά στο ανθρακικό αποτύπωμα. Όσον αφορά τις επιπτώσεις στην τοξικότητα, η ανάλυση με το μοντέλο USEtox έδειξε ότι οι επιπτώσεις προέρχονται κυρίως από εκπομπές βαρέων μετάλλων και ιόντων που σχετίζονται με τα λιπάσματα, ενώ η φυτοπροστασία είχε αμελητέα έως μηδενική συμβολή. Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς η συγκεκριμένη θερμοκηπιακή μονάδα εφαρμόζει στρατηγικές φυτοπροστασίας με βιολογικά, χαμηλής επιβάρυνσης σκευάσματα, γεγονός που περιορίζει τον κίνδυνο τοξικών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα και στην ανθρώπινη υγεία.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε η μεθοδολογία AKZ για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων θερμοκηπιακής καλλιέργειας τοματινιών με υδροπονικό σύστημα, με στόχο τον εντοπισμό των κυριότερων πηγών επιβάρυνσης. Η ανάλυση ανέδειξε ότι η λίπανση αποτελεί τον σημαντικότερο συντελεστή περιβαλλοντικού αποτυπώματος, ιδίως ως προς την κλιματική αλλαγή, την τοξικότητα και τον ευτροφισμό, κυρίως λόγω της βιομηχανικής παραγωγής και εφαρμογής των λιπασμάτων. Η ενεργειακή κατανάλωση συνεισέφερε επίσης σε ορισμένες κατηγορίες, επηρεαζόμενη από το ενεργειακό μίγμα που χρησιμοποιήθηκε στα δεδομένα απογραφής. Αντίθετα, η φυτοπροστασία, βασισμένη σε βιολογικά σκευάσματα και φυσικούς εχθρούς, εμφάνισε μηδενική ή αμελητέα συνεισφορά σε όλες τις επιπτώσεις που αξιολογήθηκαν, επιβεβαιώνοντας τον περιβαλλοντικά φιλικό της χαρακτήρα. Συνολικά, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την ανάγκη για βελτιστοποίηση της στρατηγικής λίπανσης προκειμένου να ενισχυθεί περαιτέρω η περιβαλλοντική απόδοση της καλλιέργειας. Ωστόσο, η εφαρμογή βιολογικών και χαμηλής επιβάρυνσης μεθόδων φυτοπροστασίας αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική και περιβαλλοντικά ασφαλής, αποτελώντας παράδειγμα προς υιοθέτηση και από άλλες καλλιέργειες με στόχο την ενίσχυση της βιωσιμότητας του αγροδιατροφικού τομέα. Περαιτέρω βελτίωση θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής πρακτικών κυκλικής οικονομίας, όπως η αξιοποίηση του πυρήνα ελιάς από τα γειτονικά ελαιόδεντρα ως καύσιμο στο λέβητα θέρμανσης, μειώνοντας έτσι την ανάγκη προμήθειας από τρίτους, αλλά και η χρήση του διαλύματος απορροής του θερμοκηπίου, πλούσιου σε θρεπτικά συστατικά, για την άρδευση και λίπανση του συγκεκριμένου ελαιώνα. Οι προτάσεις αυτές θα μπορούσαν να συμβάλουν στη μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος της θερμοκηπιακής καλλιέργειας τοματινιών και να ενισχύσουν τον κυκλικό χαρακτήρα της παραγωγής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα υποστηρίχτηκε από την εμβληματική δράση «Καινοτόμες λύσεις για τη βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική φυτοπροστασία των οπωροκηπευτικών της Ελλάδας στην Ευρώπη του μέλλοντος - Κωδικός Πράξης: TAEDR-053567» στο πλαίσιο του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας Ελλάδα 2.0, με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης- NextGeneration EU.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Audsley, E., Stacey, K., Parsons, D. J., & Williams, A. G. (2009). *Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use*. Cranfield University.

Boulard, T., Raeppel, C., Brun, R., Lecompte, F., Hayer, F., Carmassi, G., & Gaillard, G. (2011). Environmental impact of greenhouse tomato production in France. *Agronomy for Sustainable Development*, *31*(4), Article 4. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0031-3

Ecoinvent. (2009). *Ecoinvent Data v 2.1* (No. Swiss Centr for Life Cycle Inventories) [Dataset].

ISO International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14040 International Standard. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. In: International Organization for Standardization (Hrsg.), Geneva, Switzerland, pp. 44*.

ISO International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14044 International Standard. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and guidelines. In: International Organization for Standardization (Hrsg.), Geneva, Switzerland, pp. 84*.

Katsoulas, N., Savvas, D., Kitta, E., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2015). Extension and evaluation of a model for automatic drainage solution management in tomato crops grown in semi-closed hydroponic systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, *113*, 61–71. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.01.014

Koch, P., & Salou, T. (2020). *AGRIBALYSE®: Methodology, Agricultural stage – Version 3.0. June 2020. Ed ADEME. Angers. France. 303 p.*

Savvas, D., Gruda, N., & Department of Horticulture, University of Bonn, Germany. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry – A review. *European Journal of Horticultural Science*, *83*(5), Article 5. https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2

51. ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Α. Καραμπούλα[1], Β. Λιάκος[1], Ι. Γκίζα[1], Π. Βύρλας[2] & Ι. Γράβαλος[3]

[1]*Εργαστήριο Γεωργίας Ακριβείας, Τμήμα, Γεωπονίας Αγροτεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Γαιόπολις Λάρισα, Πόλη, e-mail:* karamboun@yahoo.gr
[2]*Εργαστήριο Αρδευτικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα, Γεωπονίας Αγροτεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Γαιόπολις Λάρισα*
[3]*Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα, Γεωπονίας Αγροτεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Γαιόπολις, Λάρισα*

Περίληψη

Η Αναγεννητική Γεωργία είναι μια ολιστική προσέγγιση της Γεωργίας όπου στόχος της είναι να επαναφέρει την υγεία του εδάφους, την ανθεκτικότητα των καλλιεργειών και των θρεπτικών στοιχείων, αξιοποιώντας τη δύναμη της φωτοσύνθεσης στα φυτά για να κλείσει τον κύκλο του άνθρακα. Η χρήση πρακτικών που αυξάνουν την οργανική ύλη του εδάφους οδηγεί και στην αύξηση της βιοποικιλότητας του. Ταυτόχρονα αυξάνει την υδατοϊκανότητα και την απομόνωση άνθρακα σε μεγαλύτερα βάθη μειώνοντας τα επίπεδα C02. Παραδείγματα τέτοιων πρακτικών είναι η χρήση καλλιεργειών κάλυψης και η φύτευση βασικών γραμμών. Παράλληλα δεν χρησιμοποιούνται φυτοφάρμακα, τα τεχνητά λιπάσματα και βοηθάει τους παραγωγούς να έχουν σταθερή παραγωγή τροφίμων με υψηλή θρεπτικότητα. Εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρει η αναγεννητική γεωργία ενισχύει και την οικονομική σταθερότητα των αγροτών. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε συλλογή δείγματος ερωτηματολογίων σε παραγωγούς στη Θεσσαλία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 54% από τους ερωτηθέντες παραγωγούς δεν χρησιμοποιούν νέες τεχνολογίες, το 45% των παραγωγών γνωρίζει την έννοια της αναγεννητικής γεωργίας και μόνο το 5% των ερωτηθέντων εφαρμόζει κάποιες από τις πρακτικές της αναγεννητικής γεωργίας όπως καλλιέργειες κάλυψης. Συνολικά, οι πρακτικές αναγεννητικής γεωργίας μαζί με τις νέες επιστημονικές τεχνικές στην παραγωγή τροφίμων παρέχουν μια πολλά υποσχόμενη λύση για αυξημένη βιωσιμότητα στη γεωργική βιομηχανία.

Λέξεις κλειδιά: ερωτηματολόγιο, Θεσσαλία, δημογραφικά, εξοπλισμός, εφαρμογές

REGENERATIVE AGRICULTURE AND ADOPTION IN GREECE

Karaboula[1], V. Liakos[1], I. Gkiza[1], P. Vyrlas[2], I. Gravalos[3]

[1]*Precision Agriculture Lab, Department of Agrotechnology, University of Thessaly, Gaiopolis, Larissa, Greece*
[2]*Agricultural Engineering and Technology Lab, Department of Agrotechnology, University of Thessaly, Gaiopolis, Larissa, Greece*
[3]*Irrigation Engineering and Technology Lab, Department of Agrotechnology, University of Thessaly, Gaiopolis, Larissa, Greece*

ABSTRACT

Regenerative Agriculture is a holistic approach to agriculture that aims to restore soil health, crop resilience and nutrient availability by harnessing the power of photosynthesis in plants to

close the carbon cycle. The use of practices that increase soil organic matter also leads to increased biodiversity. At the same time, it increases water capacity and carbon sequestration at greater depths, reducing C02 levels. Examples of such practices are the use of cover crops and the planting of baselines. At the same time, there is no use of pesticides, artificial fertilizers and helps producers to have stable food production with high nutritional value. In addition to the environmental benefits that regenerative agriculture offers, it also enhances the economic stability of farmers. In the present study, a sample of questionnaires was collected from producers in Thessaly. The results showed that 54% of the surveyed producers do not use new technologies, 45% of the producers are familiar with the concept of regenerative agriculture, and only 5% of the respondents apply some of the practices of regenerative agriculture, such as cover cropping. Overall, regenerative agriculture practices together with new scientific techniques in food production provide a promising solution for increased sustainability in the agricultural industry.

Keywords: questionnaires, Thessaly, demography, equipment, applications

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία, ως βασικός πυλώνας της οικονομίας και της διατροφικής ασφάλειας, βρίσκεται τα τελευταία χρόνια στο επίκεντρο μιας αυξανόμενης συζήτησης γύρω από τη βιωσιμότητα και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. Η εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής, σε συνδυασμό με την εκτεταμένη χρήση χημικών εισροών, έχει οδηγήσει σε σοβαρές επιπτώσεις, όπως η υποβάθμιση των εδαφών, η μείωση της βιοποικιλότητας και η επιβάρυνση των υδάτινων πόρων. Σε αυτό το πλαίσιο, αναδύονται νέες προσεγγίσεις που επιχειρούν να αναδιαμορφώσουν τον τρόπο με τον οποίο παράγουμε και καταναλώνουμε τρόφιμα.

Μία από τις πιο καινοτόμες προσεγγίσεις είναι η αναγεννητική γεωργία (Regenerative agriculture), η οποία δεν περιορίζεται στην αποφυγή βλαβερών πρακτικών, αλλά επιδιώκει την ενεργή αποκατάσταση των οικοσυστημάτων. Οι πρακτικές που εφαρμόζονται – όπως οι καλλιέργειες κάλυψης, η ελάχιστη κατεργασία εδάφους, η ενσωμάτωση οργανικής ύλης και η αγροδασοπονία – στοχεύουν στην ενίσχυση της γονιμότητας του εδάφους, στη βελτίωση της συγκράτησης του νερού και στην αύξηση της ανθεκτικότητας απέναντι σε κλιματικές πιέσεις.

Στην Ελλάδα, όπου η γεωργία καλύπτει περίπου το 30% της συνολικής έκτασης της χώρας, η ανάγκη για μετάβαση σε πιο βιώσιμα μοντέλα είναι ιδιαίτερα έντονη. Η χώρα χαρακτηρίζεται από μεσογειακό κλίμα με συχνές ξηρασίες, έντονες βροχοπτώσεις και αυξανόμενα φαινόμενα ερημοποίησης, που απειλούν τη μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα των αγροτικών περιοχών. Επιπλέον, η υιοθέτηση ευρωπαϊκών πολιτικών, όπως η Πράσινη Συμφωνία και η νέα Κοινή Αγροτική Πολιτική (ΚΑΠ), ενισχύει την ανάγκη στροφής σε πρακτικές που ευθυγραμμίζονται με την προστασία του περιβάλλοντος και την ενίσχυση της βιωσιμότητας.

Ωστόσο, η έννοια της αναγεννητικής γεωργίας παραμένει σχετικά νέα στην ελληνική πραγματικότητα και δεν έχει μελετηθεί συστηματικά, τόσο σε επίπεδο επιστημονικής τεκμηρίωσης όσο και σε επίπεδο εφαρμογής από τους παραγωγούς. Αυτό δημιουργεί ένα ερευνητικό κενό, το οποίο το παρόν paper επιδιώκει να καλύψει.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει την έννοια της αναγεννητικής γεωργίας, να εξετάσει την υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα και να εντοπίσει τις προοπτικές αλλά και τις προκλήσεις που συνδέονται με την εφαρμογή της. Μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση υπαρχόντων παραδειγμάτων, επιχειρείται να δοθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα του πώς η αναγεννητική γεωργία μπορεί να συμβάλει σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον για τον ελληνικό αγροτικό τομέα.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Αναγεννητική Γεωργία

Η αναγεννητική γεωργία δεν αποτελεί απλώς μια εναλλακτική μορφή γεωργικής παραγωγής, αλλά ένα ολιστικό πλαίσιο που συνδέει τις οικολογικές διαδικασίες με την κοινωνικοοικονομική ευημερία των αγροτικών κοινοτήτων. Ο όρος «regenerative agriculture» εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980, ωστόσο άρχισε να αποκτά δυναμική κυρίως μετά το 2010, όταν η παγκόσμια επιστημονική και πολιτική κοινότητα ανέδειξε την ανάγκη για πιο ανθεκτικά και οικολογικά συστήματα παραγωγής (LaCanne & Lundgren, 2018).

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι οι πρακτικές της αναγεννητικής γεωργίας μπορούν να προσφέρουν πολλαπλά οφέλη όπως:

- Περιβαλλοντικά οφέλη: αποκατάσταση της οργανικής ύλης του εδάφους, μείωση εκπομπών CO_2, αύξηση βιοποικιλότητας (Rhodes, 2017).
- Οικονομικά οφέλη: μείωση κόστους εισροών, βελτίωση παραγωγικότητας σε βάθος χρόνου (Gosnell et al., 2019).
- Κοινωνικά οφέλη: ενίσχυση αγροτικών κοινοτήτων, αύξηση ανθεκτικότητας σε κρίσεις τροφίμων.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, αρκετές μελέτες έχουν αποδείξει ότι η μετάβαση σε αναγεννητικά συστήματα συνδέεται με μακροπρόθεσμη αύξηση εισοδήματος για τους αγρότες, παρότι απαιτεί αρχικές επενδύσεις και αλλαγή καλλιεργητικών συνηθειών (Darnhofer et al. 2010; Francis 2020; Robertson et al. 2022). Στην Αυστραλία, χώρες της Λατινικής Αμερικής και στη Βόρεια Ευρώπη, έχουν ήδη δημιουργηθεί οργανωμένα δίκτυα αγροτών που εφαρμόζουν αναγεννητικές πρακτικές σε μεγάλη κλίμακα.

2.2 Σχέση με άλλες μορφές βιώσιμης γεωργίας

Η Αναγεννητική Γεωργία και η βιωσιμότητα συνδέονται στενά. Ωστόσο, η αναγεννητική γεωργία είναι μια ολιστική προσέγγιση διαχείρισης γης που υπερβαίνει τις βιώσιμες γεωργικές πρακτικές. Εστιάζει στην αποκατάσταση της υγείας του εδάφους και των οικοσυστημάτων, με έμφαση στη βελτίωση των λειτουργιών της γεωργικής παραγωγής και όχι στην επιστροφή στην εγγενή παραγωγική τους κατάσταση. Αντίθετα, η βιωσιμότητα επιδιώκει κυρίως τη διατήρηση των υφιστάμενων συστημάτων (Hes & Rose, 2019; Brown et al. 2021), εστιάζοντας στη βελτιστοποίηση των ευεργετικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ εδάφους και φυτών, στη μείωση των εξωτερικών εισροών και στην υιοθέτηση οικολογικών γεωργικών μεθόδων (Francis et al. 1985; Massy 2020). Η γονιμότητα και η ανθεκτικότητα του εδάφους παίζουν κεντρικό ρόλο στη γεωργική παραγωγή, με στόχο τη βελτιστοποίηση των βιογεωχημικών κύκλων, την ενίσχυση της αντοχής στις ασθένειες και την αύξηση της παραγωγικότητας, διατηρώντας παράλληλα ισχυρές συμβιωτικές σχέσεις εδάφους-φυτού (Lal, 2020; McLennon et al. 2021).

Επιπλέον, η αναγεννητική γεωργία συχνά συγχέεται και με τη βιολογική γεωργία, ωστόσο υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές (Πίνακας 1). Η βιολογική γεωργία επικεντρώνεται στην αποφυγή χημικών εισροών και στην προστασία του περιβάλλοντος, ενώ η αναγεννητική στοχεύει στην ενεργητική αποκατάσταση των οικοσυστημάτων. Παράλληλα, συνδέεται με πρακτικές της αγροοικολογίας και της συντηρητικής γεωργίας, αλλά υπερβαίνει τα όρια αυτών καθώς θέτει ως στόχο την «αναγέννηση» του φυσικού κεφαλαίου (Giller et al., 2021).

2.3 Η περίπτωση της Ελλάδας

Στην Ελλάδα, η έρευνα και η εφαρμογή γύρω από την αναγεννητική γεωργία βρίσκονται σε αρχικά στάδια. Ορισμένα πιλοτικά έργα έχουν ξεκινήσει σε περιοχές όπως η Θεσσαλία, η Κρήτη και η Στερεά Ελλάδα, με έμφαση στην αποκατάσταση υποβαθμισμένων εδαφών μέσω καλλιεργειών κάλυψης και μείωσης της κατεργασίας. Ωστόσο, σε επίπεδο βιβλιογραφίας, τα περισσότερα έργα εστιάζουν ακόμη στη βιολογική ή στην αειφορική γεωργία, με περιορισμένες μελέτες που αφορούν αποκλειστικά την «αναγεννητική» διάσταση (Καραγιάννης et al. 2022).

Η απουσία συστηματικής έρευνας και οργανωμένων πολιτικών υποστήριξης δείχνει το υφιστάμενο ερευνητικό κενό. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί, η συμμετοχή της Ελλάδας σε διεθνείς πρωτοβουλίες, όπως το πρόγραμμα 4 per 1000 στόχος του οποίου είναι η αύξηση του οργανικού άνθρακα στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, το "4 per 1000" είναι μια διεθνής πρωτοβουλία που στοχεύει στην αύξηση του οργανικού άνθρακα στο έδαφος κατά 0,4% ετησίως, θέτοντας τη γεωργία ως κινητήρια δύναμη για την κλιματική αλλαγή και την επισιτιστική ασφάλεια. Η πρωτοβουλία αυτή αποδεικνύει το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη πρακτικών που βελτιώνουν την υγεία του εδάφους, καθώς και τη δέσμευση πολλών φορέων για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την ενίσχυση της βιώσιμης γεωργίας., αποδεικνύει ότι υπάρχει ενδιαφέρον για την ανάπτυξη αυτής της προσέγγισης.

Πίνακας 1. Συγκριτικός πίνακας που δείχνει τις διαφορές ανάμεσα στη Συμβατική, Βιολογική και Αναγεννητική Γεωργία.

Χαρακτηριστικά	**Συμβατική Γεωργία**	**Βιολογική Γεωργία**	**Αναγεννητική Γεωργία**
Στόχος	Μέγιστη παραγωγικότητα και κέρδος	Παραγωγή χωρίς χημικές εισροές	Αποκατάσταση οικοσυστημάτων & παραγωγικότητας
Χρήση εισροών	Υψηλή χρήση χημικών λιπασμάτων & φυτοφαρμάκων	Απαγόρευση συνθετικών χημικών, χρήση οργανικών	Ελάχιστη χρήση εισροών, αξιοποίηση φυσικών διεργασιών
Διαχείριση εδάφους	Εντατική κατεργασία, μονοκαλλιέργειες	Ήπια κατεργασία, εναλλαγή καλλιεργειών	Ελάχιστη κατεργασία, καλλιέργειες κάλυψης, κομποστοποίηση
Προσέγγιση στη βιοποικιλότητα	Δευτερεύουσα σημασία	Διατήρηση βιοποικιλότητας	Ενεργή αύξηση βιοποικιλότητας (φυτών, ζώων, εδάφους)
Εστίαση στο περιβάλλον	Περιορισμένη, συχνά αρνητική	Προστασία εδάφους & οικοσυστημάτων	Αναστροφή κλιματικής αλλαγής μέσω δέσμευσης άνθρακα
Μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα	Υποβάθμιση εδάφους, μείωση ανθεκτικότητας	Σταθεροποίηση περιβάλλοντος, περιορισμένη αναγέννηση	Αύξηση γονιμότητας, ανθεκτικότητας και παραγωγικότητας

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το ερωτηματολόγιο είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος συλλογής δεδομένων και αποτελεί πολύ κρίσιμο μέρος της έρευνας. Κατά την διεξαγωγή της παρούσας έρευνας, ως μέθοδος συγκέντρωσης δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το δομημένο ερωτηματολόγιο. Η χρήση ενός έγκυρου και αξιόπιστου ερωτηματολογίου αποτελεί ένα σημαντικό μέρος μιας μελέτης.

Στην παρούσα έρευνα η συγκέντρωση των δεδομένων έγινε με συνεντεύξεις πρόσωπο με πρόσωπο καθώς και με αποστολή του ερωτηματολογίου μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Συνολικά ερωτήθηκαν 100 παραγωγοί από την περιοχή της Θεσσαλίας. Οι ερωτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα ήταν κλειστού τύπου, λαμβάνοντας υπόψη το εκπαιδευτικό επίπεδο των αγροτών που συμπεριλαμβάνονταν στην έρευνα. Οι περισσότεροι αγρότες εξαιτίας του χαμηλού μορφωτικού επιπέδου θα ήταν δύσκολο να απαντήσουν σε ερωτήσεις ανοιχτού τύπου, οπότε επιλέχθηκαν ερωτήσεις κλειστού τύπου. Οι ερωτήσεις κλειστού τύπου είναι εύκολο να αριθμηθούν και να κωδικοποιηθούν άλλα συχνά εμφανίζουν αδυναμία να διατυπωθούν στον ερωτώμενο.

Για τις ανάγκες της έρευνας δημιουργήθηκαν 28 ερωτήσεις, κλειστού τύπου και πολλαπλής επιλογής. Το ερωτηματολόγιο διαρθρώνεται στις εξής τέσσερις ενότητες:

3.1 Προσωπικά στοιχεία - Δημογραφικά χαρακτηριστικά

Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει πέντε ερωτήσεις που αναφέρονται στα δημογραφικά στοιχεία των αγροτών (φύλο, ηλικία, οικογενειακή κατάσταση, μορφωτικό επίπεδο και αγροτική εκπαίδευση).

3.2 Στοιχεία γεωργικής εκμετάλλευσης

Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει οκτώ ερωτήσεις που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της γεωργικής εκμετάλλευσης. Πιο συγκεκριμένα ερωτάται το έτος έναρξης της γεωργικής εκμετάλλευσης, ώστε να υπολογιστεί ή η προϋπηρεσία και η εμπειρία που διαθέτουν πάνω σε αγροτικά θέματα. Επίσης υπάρχουν ερωτήσεις που σχετίζονται με το μέγεθος της γεωργικής εκμετάλλευσης όπως, ο συνολικός αριθμός στρεμμάτων, πόσα στρέμματα είναι ενοικιαζόμενα και ιδιόκτητα, το είδος καλλιέργειας, το ετήσιο οικογενειακό εισόδημα, το ποσοστό εισοδήματος από την γεωργία καθώς και στοιχεία που αφορούν την οικογενειακή και την ξένη εργασία.

3.4 Γενικά στοιχεία για την γεωργία ακριβείας

Στην τρίτη ενότητα αναφέρεται ο ορισμός της αναγεννητικής γεωργίας, ώστε όλοι οι ερωτώμενοι να έχουν μια ολοκληρωμένη άποψη για την αναγεννητική γεωργία. Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει έξι ερωτήσεις που σχετίζονται με το επίπεδο των γνώσεων, το ενδιαφέρον για ενημέρωσης αλλά και για υιοθέτηση τεχνολογιών αναγεννητικής γεωργίας. Επίσης, ερωτήθηκαν ποιο είναι το μέσο με το οποίο ενημερώνονται για θέματα γεωργίας ακριβείας και που κατατάσσουν τον εαυτό τους ως προς τον βαθμό υιοθέτησης νέων τεχνολογιών.

3.5 Υιοθέτηση νέων τεχνολογιών

Στην τελευταία ενότητα συμπεριλήφθηκαν δυο ερωτήσεις που αναφέρονται στις νέες τεχνολογίες. Στην πρώτη ερώτηση ο ερωτώμενος πρέπει να επιλέξει τις τεχνολογίες που υιοθετεί και η επόμενη ερώτηση αναφέρει όλες τις τεχνολογίες που σκοπεύουν να υιοθετήσουν οι αγρότες τα επόμενα πέντε χρόνια. Στην συνέχεια ακολουθούν επτά ερωτήσεις που αναφέρονται στον αντιληπτό κίνδυνο, στις βασικές προϋποθέσεις υιοθέτησης νέων τεχνολογιών, στο αντιληπτό καθαρό όφελος, στα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπίσουν

‘άμεσα οι εταιρείες, τα μέτρα πολιτικής υποδομής που πρέπει να λάβουν άμεσα οι κυβερνήσεις και τέλος η αντιληπτή χρησιμότητα και η αντιληπτή ευκολία χρήσης.

Μετά τη συλλογή των πρωτογενών δεδομένων και την κωδικοποίηση των ερωτηματολογίων δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων στο στατιστικό πρόγραμμα SPSS . Τα δεδομένα κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με τη μορφή των μεταβλητών σε ονομαστικές (nominal), τακτικές (ordinal) και αριθμητικές (scale) μεταβλητές, και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην Π.Ε. Τρικάλων και στην Π.Ε. Καρδίτσας την περίοδο από 01 Απριλίου 2024 έως 15 Αυγούστου 2024 η συντριπτική πλειονότητα των παραγωγών του δείγματος είναι άντρες σε ποσοστό 82%, με ηλικία που κυμαίνεται από 46 εώς 55 ετών σε ποσοστό 30% και 30% με ηλικία 36-45, με μέσο όρο εμπειρίας 24 χρόνια.

Ένα μεγάλο ποσοστό (60%) έχει αποφοιτήσει από την δευτεροβάθμια εκπαίδευση και πιο συγκεκριμένα το 50% έχει τελειώσει το Λύκειο και το 10% το Γυμνάσιο, αυτά είναι πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα γιατί φαίνεται ότι οι αγρότες μας θέλουν να έχουν την βασική εκπαίδευση ώστε να μπορέσουν να εξελίξουν την γεωργική τους εκμετάλλευση με τις βασικές γνώσεις. Αντίθετα ένα μεγάλο ποσοστό 65% δεν έχουν αποκτήσει κάποια αγροτική εκπαίδευση.

Όσον αφορά το μέγεθος της γεωργικής εκμετάλλευσης ένα μεγάλο ποσοστό περίπου 61% διαθέτει μια μικρή γεωργική εκμετάλλευση που κυμαίνεται από 51-200 στρέμματα και ένα μικρό ποσοστό 4% καλλιεργούν πάνω από 601 στρέμματα. Όσον αφορά το σύνολο των ενοικιαζόμενων και των ιδιόκτητων αγροτεμαχίων μπορεί να επισημανθεί ότι ο μέσος όρος των ενοικιαζόμενων εκτάσεων είναι 89 στρέμματα με μέγιστο αριθμό στρεμμάτων 600 στρέμματα και ελάχιστο 0 στρέμματα. Ενώ ο μέσος όρος των ιδιόκτητων εκτάσεων είναι 121 στρέμματα με μέγιστη τιμή τα 700 στρέμματα και ελάχιστη τα 0 στρέμματα.

Εξαιτίας του πολυτεμαχισμού των γεωργικών εκμεταλλεύσεων καθώς και του χαμηλού μορφωτικού επιπέδου των αγροτών το οικογενειακό εισόδημα κατανέμεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Το 35% έχει εισόδημα από 10.000 – 20.000 ευρώ. Ενώ το 20% έχει εισόδημα 20.001-30.000 ευρώ, ενώ ένα μόνο μικρό ποσοστό 8% έχει εισόδημα μεγαλύτερο από 50.001 ευρώ. Αυτά τα χαμηλά εισοδήματα επηρεάζουν αρνητικά την οικονομική βιωσιμότητά τους.

Πιο συγκεκριμένα το σιτάρι στην περιοχή μελέτης καταλαμβάνει την μεγαλύτερη έκταση και καλλιεργείται σε ποσοστό 27% αναλυτικότερα με βάση το δείγμα μας οι 73 από τους 100 παραγωγούς καλλιεργούσαν σιτάρι. Ο αριθμός των ατόμων που καλλιεργούν βαμβάκι κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Το βαμβάκι καταλαμβάνει ποσοστό 25% που αντιστοιχεί σε 70 γεωργούς. Ακολουθεί ο αραβόσιτος και η ντομάτα με 20% και 27% αντίστοιχα και τέλος λιγότεροι αγρότες καλλιεργούν όσπρια, κτηνοτροφικά και αρωματικά φυτά.

Η ακριβής ενημέρωση των αγροτών για τη γεωργία μπορεί να προέλθει από διάφορες πηγές. Είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι οι περισσότεροι αγρότες ενημερώνονται πλέον από το διαδίκτυο, το δεύτερο μέσο ενημέρωσης είναι ο αγροτικός τύπος και ένα μεγάλο ποσοστό των αγροτών προσπαθεί να ενημερωθεί για τις τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας από συγγενείς και φίλους. Μέσω του διαδικτύου, οι αγρότες μπορούν να παραμένουν ενημερωμένοι για τις εξελίξεις και τις νέες τεχνολογίες στον τομέα της γεωργίας. Επίσης ο Αγροτικός Τύπος είναι μια εξαιρετική πηγή ενημέρωσης για τους αγρότες, καθώς προσφέρει αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με τις τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας. Το μεγάλο ποσοστό των αγροτών που ενημερώνονται από συγγενείς και φίλους οφείλεται στο χαμηλό επίπεδο εκπαίδευσης των

αγροτών αλλά και στην περιορισμένη εκπαίδευση πάνω στον αγροτικό τομέα. Σε περιοχές όπου το επίπεδο εκπαίδευσης είναι χαμηλότερο, οι αγρότες συχνά καταφεύγουν σε παραδοσιακές μεθόδους ενημέρωσης, όπως είναι οι συζητήσεις με συγγενείς και φίλους.

Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τις τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας που χρησιμοποιούνται αυτήν την στιγμή από τους αγρότες που συμμετείχαν στην έρευνα. Ένας μεγάλος αριθμός των ερωτώμενων δεν χρησιμοποιούν καμία τεχνολογία. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε έναν μεγάλο αριθμό είναι το GPS, με μεγάλη διαφορά από τις άλλες τεχνολογίες. Αυτήν η τεχνολογία χρησιμοποιείται από τους περισσότερους γεωργούς γιατί πλέον οι καινούργιοι γεωργικοί ελκυστήρες το GPS είναι στον βασικό τους εξοπλισμό. Επίσης, μια ακόμη τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι οι διαδικτυακές πλατφόρμες και οι εφαρμογές, αυτά χρησιμοποιούνται ώστε να συλλέγουν οι αγρότες κάποια δεδομένα. Στη συνέχεια ακολουθούν τα drones, οι τεχνολογίες που αποσκοπούν στον στοχευμένο ψεκασμό και ακολουθούν οι ψηφιακοί μετεωρολογικοί σταθμοί.

Πίνακας 2. Χρήση νέων τεχνολογιών στον πρωτογενή τομέα

Νέες Τεχνολογίες	Ποσοστό (%)
Καμία	54
Χάρτες Παραγωγής	5
Μεταβλητές δόσεις	5
Στοχευμένος Ψεκασμός	11
Ιπτάμενα μη Επανδρωμένα Οχήματα (Drones)	11
Ψηφιακές Εφαρμογές	8
Κάμερες, τηλεπισκόπηση	3
Σπορά Ακριβείας	4
Μετεωρολογικούς σταθμούς	5
Αισθητήρες Υγρασίας	3
Φωτεινή Μπάρα Πλοήγησης	1
GPS	36
Ρομπότ	0

Σχετικά με την εφαρμογή της αναγεννητικής γεωργίας, το 45% των παραγωγών γνώριζε την έννοια της αναγεννητικής γεωργίας και μόνο το 5% των ερωτηθέντων εφαρμόζει κάποιες από τις πρακτικές της αναγεννητικής γεωργίας όπως καλλιέργειες κάλυψης. Τέλος το 85% των παραγωγών πιστεύει θεωρεί ότι η μετάβαση απαιτεί αρχικές επενδύσεις σε εξοπλισμό αλλά μακροπρόθεσμα τα οφέλη είναι πολλά.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη έρευνα έγινε προσπάθεια να προσδιοριστεί η υφιστάμενη κατάσταση στον πρωτογενή τομέα σχετικά με τη χρήση της αναγεννητικής γεωργίας, τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται αλλά και άλλα δημογραφικά χαρακτηριστικά των παραγωγών. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκαν ερωτηματολόγια τα οποία στάλθηκαν σε δημόσιες υπηρεσίες στη περιοχή της Καρδίτσας και των Τρικάλων. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι η αναγεννητική γεωργία στην Ελλάδα βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο, με περιορισμένη εξοικείωση των παραγωγών σε πρακτικές αναγεννητικής γεωργίας. Όσον αφορά τον γεωργικό εξοπλισμό οι από τους ερωτηθέντες δεν χρησιμοποιεί νέες τεχνολογίες ενώ από αυτούς που χρησιμοποιούν νέες τεχνολογίες ένα μεγάλο ποσοστό χρησιμοποιεί μόνο GPS στις γεωργικές εργασίες. Λίγοι παραγωγοί χρησιμοποιούν εναέρια μη επανδρωμένα οχήματα. Η δημογραφική έρευνα έδειξε

ότι η συντριπτική πλειονότητα των παραγωγών του δείγματος είναι άντρες σε ποσοστό, με ηλικία που κυμαίνεται από 46 εώς 55 ετών. Ένα μεγάλο ποσοστό των παραγωγών έχει αποφοιτήσει από την δευτεροβάθμια εκπαίδευση αλλά δεν έχουν αποκτήσει κάποια αγροτική εκπαίδευση.

Οι Έλληνες παραγωγοί είναι πρόθυμοι να υιοθετήσουν πρακτικές αναγεννητικής γεωργίας, υπό την προϋπόθεση ύπαρξης υποστηρικτικού πλαισίου. Η αναγεννητική γεωργία μπορεί να αποτελέσει στρατηγική επιλογή για μια πιο βιώσιμη και ανθεκτική ελληνική γεωργία, ευθυγραμμισμένη με τις ευρωπαϊκές και διεθνείς κατευθύνσεις. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να επικεντρωθεί η πολιτεία στους παρακάτω πέντε πυλώνες.

1. **Εκπαίδευση και Ενημέρωση**
    - Οργάνωση προγραμμάτων κατάρτισης σε συνεργασία με πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και γεωπονικούς συλλόγους.
    - Δημιουργία διαδικτυακών πλατφορμών γνώσης και ανταλλαγής εμπειριών.

2. **Οικονομική Στήριξη**
    - Χρηματοδοτικά κίνητρα για την υιοθέτηση πρακτικών (π.χ. επιδοτήσεις, πρόσβαση σε μικροχρηματοδοτήσεις).
    - Ενσωμάτωση των πρακτικών της αναγεννητικής γεωργίας σε προγράμματα της ΚΑΠ (Κοινής Αγροτικής Πολιτικής).

3. **Πιλοτικά Προγράμματα και Δίκτυα Αγροτών**
    - Ανάπτυξη πιλοτικών αγροκτημάτων για την επίδειξη καλών πρακτικών.
    - Δημιουργία δικτύων συνεργασίας αγροτών για την ανταλλαγή τεχνογνωσίας.

4. **Ερευνητική Υποστήριξη**
    - Προώθηση ερευνητικών έργων σε τοπικό επίπεδο για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων.
    - Συνεργασία με διεθνείς ερευνητικούς φορείς για την ανταλλαγή τεχνογνωσίας.

5. **Πολιτικές Βιωσιμότητας**
    - Ενσωμάτωση της αναγεννητικής γεωργίας στις εθνικές στρατηγικές για την κλιματική αλλαγή και τη βιώσιμη ανάπτυξη.
    - Σύνδεση των αγροτικών προϊόντων που παράγονται με αναγεννητικές πρακτικές με πιστοποιήσεις και αγορές υψηλής προστιθέμενης αξίας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Brown, K.; Schirmer, J.; Upton, P. (2021). Regenerative farming and human wellbeing: Are subjective wellbeing measures useful indicators for sustainable farming systems? *Environ. Sustain. Indic.*, *11*, 100132.

Darnhofer, I.; Lindenthal, T.; Bartel-Kratochvil, R.; Zollitsch, W. (2010). Conventionalisation of organic farming practices: From structural criteria towards an assessment based on organic principles. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, *30*, 67–81.

Francis, C.A.; Harwood, R.R.; Liebhardt, W.C.; Kauffman, C.R.; Barker, T.C.(1985). Resource efficient farming systems and technologies. Regen. Farming Syst., 19, 21–31.

Francis, J. (2020). *Regenerative Agriculture—Quantifying the Cost*; Occasional Paper No. 20.01; Australian Farm Institute: Sydney, Australia; p. 1.

Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A., & Sumberg, J. (2021). Regenerative agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture, 50*(1), 13–25. https://doi.org/10.1177/0030727021998063

Gosnell, H., Gill, N., & Voyer, M. (2019). Transformational adaptation on the farm: Processes of change and persistence in regenerative agriculture. *Global Environmental Change, 59*, 101965. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101965

Hes, D.; Rose, N. (2019). Shifting from farming to tending the earth: A discussion paper. *J. Org., 6*, 3–22.

LaCanne, C. E., & Lundgren, J. G. (2018). Regenerative agriculture: Merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ, 6*, e4428. https://doi.org/10.7717/peerj.4428

Lal, R. (2020). Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of Soil and Water Conservation, 75*(5), 123A–124A. https://doi.org/10.2489/jswc.75.5.123A

Massy, C. (2020). *Call of the Reed Warbler: A New Agriculture—A New Earth*; University of Queensland Press: Brisbane, Australia.

McLennon, E.; Dari, B.; Jha, G.; Sihi, D.; Kankarla, V. (2021). Regenerative agriculture and integrative permaculture for sustainable and technology driven global food production and security. *Agron. J., 113*, 4541–4559.

Rhodes, C. J. (2017). The imperative for regenerative agriculture. *Science Progress, 100*(1), 80–129. https://doi.org/10.3184/003685017X14876775256135

Robertson, M.; Macdonald, B.; Farrell, M.; Norman, H.; Macdonald, L.; Vadakattu, G.; Taylor, J. (2022).*What Can Science Offer the Proponents of Regenerative Agriculture Practices?* Australian Farm Institute: Sydney, Australia.

Καραγιάννης, Ι., Παπαδόπουλος, Σ., & Δημητρίου, Μ. (2022). Αναγεννητική γεωργία στην Ελλάδα: Πρώτες εμπειρίες και πρακτικές. *Ελληνικό Περιοδικό Αγροτικής Οικολογίας, 12*(2), 45–63.

Σταυρίδης, Θ., & Μαντζουράνης, Γ. (2021). Βιώσιμη γεωργία και αναγεννητικές πρακτικές στη Μεσόγειο. *Αγροτική Ανάπτυξη & Περιβάλλον, 15*(3), 10–28.

Τσιούρης, Κ., & Λαζαρίδης, Α. (2020). Πρακτικές αναγεννητικής γεωργίας στη Θεσσαλία: Προκλήσεις και προοπτικές. *Ελληνική Γεωργική Έρευνα, 33*(1), 25–38.

Παπαδόπουλος, Δ., & Κωνσταντίνου, Ε. (2019). Κλιματική αλλαγή και γεωργία: Προοπτικές για αναγεννητικές μεθόδους στην Ελλάδα. *Πρακτικά Ελληνικής Εταιρείας Αγροοικολογίας, 7*, 55–70.

Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (ΥΠΑΑΤ). (2021). *Κατευθυντήριες γραμμές για την αειφόρο και αναγεννητική γεωργία*. Αθήνα: ΥΠΑΑΤ.

52. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΙΤΗΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Μ. Κωστή[1], Μ. Μωραΐτης[1], Χ. Καραμούτης[2], Α. Κυπαρίσσης[2], Χ. Καβαλάρης[3], Α. Ζαμίδης[4], Χ. Λαμπρόπουλος[5] & Α. Μπαλαφούτης[1]

[1] *Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης/ Ινστιτούτο Βιο-οικονομίας και Αγρο-Τεχνολογίας, Δημάρχου Γεωργιάδου 118, 38333, Βόλος, Ελλάδα*
[2] *Ειδικός Λογαριασμός Κονδυλίων Έρευνας Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Γιαννιτσών & Λαχανά, Συγκρότημα Τσαλαπάτα 38334, Βόλος, Ελλάδα*
[3] *Εταιρεία Προώθησης Αειφορικών Καλλιεργητικών Συστημάτων, Πανεπιστημιούπολη ΑΠΘ Σχολή Γεωπονίας 54124, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα*
[4] *Agromet ΙΚΕ, Γεωργίου Κατεχάκη 1, 54627, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα 5Λαμπρόπουλος Χαρίσιος-Παραγωγός, Κρόκος, 50010, Κοζάνη, Ελλάδα*

Περίληψη

Στην εργασία αυτή διεξήχθη αξιολόγηση της συνδυασμένης εφαρμογής της Γεωργίας Διατήρησης και της Γεωργίας Ακριβείας υπό πραγματικές συνθήκες σε δύο παραδοσιακές ελληνικές γεωργικές περιοχές παραγωγής σκληρού σίτου (Κοζάνη και Λάρισα), όπου υπάρχει υψηλός κίνδυνος υποβάθμισης των γεωργικών εκτάσεων. Οι πιλοτικές εφαρμογές περιλάμβαναν μεθόδους γεωργίας διατήρησης δηλαδή ελάχιστη ή μηδενική κατεργασία εδάφους, μόνιμη κάλυψη εδάφους με φυτικά υπολείμματα και αμειψισπορές και τεχνικές γεωργίας ακριβείας συγκεκριμένα εφαρμογή λίπανσης με μεταβλητό ρυθμό και ελεγχόμενη διέλευση των μηχανημάτων με παράλληλη εκτίμηση των βέλτιστων διαδρομών μέσα και έξω από τα αγροτεμάχια. Μετά από τρεις καλλιεργητικές περιόδους τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο συνδυασμός των πρακτικών Γεωργίας Διατήρησης και Γεωργίας Ακριβείας συνέβαλαν στη διατήρηση ή και αύξηση της οργανικής ουσίας του εδάφους έως και 25,5% σε σχέση με την αρχική τιμή. Όσον αφορά τις αποδόσεις των καλλιεργειών, παρ' όλο που υπήρξαν αριθμητικές διαφοροποιήσεις, με ελαφρώς χαμηλότερες αποδόσεις στις καλλιεργητικές τεχνικές που εφαρμόσθηκαν σε σύγκριση με την συμβατική καλλιέργεια, οι διαφορές αυτές δεν ήταν στατιστικά σημαντικές. Επίσης, καταγράφηκε τριετής εξοικονόμηση αζώτου (N) σε ποσοστό έως και 7,37% και τέλος η μεταχείριση με τον χαμηλότερο δείκτη αποτυπώματος άνθρακα αποδείχτηκε ότι είναι ο συνδυασμός Γεωργίας Ακριβείας και Γεωργίας Διατήρησης.

Λέξεις κλειδιά: Γεωργία Διατήρησης, Γεωργία Ακριβείας, ακατεργασία, διαφορική λίπανση, σιτηρά

IMPACT OF CONSERVATION AND PRECISION AGRICULTURE MANAGEMENT PRACTICES ON PRODUCTION OF CEREALS IN GREECE

M. Kosti[1], M. Moraitis[1], C. Karamoutis[2], A. Kyparissis[2], C. Cavalaris[3], A. Zamidis[4], C. Lampropoulos[5], Balafoutis A.T.[1]

[1]*Centre for Research and Technology Hellas, Institute for Bio-Economy and Agri-Technology, Dimarchou Georgiadou 118, 38333, Volos, Greece *m.kosti@certh.gr*
[2]*Special Account of Research Funds University of Thessaly, Giannitson & Lahana Streets, Palea,*

Tsalapata Complex, 38334, Volos, Greece
[3]Hellenic Association for Promotion of Conservation Agriculture, Campus AUTH School of Agriculture, 54124, Thessaloniki, Greece
[4]Agromet, Georgiou Katechaki 1, 54627, Thessaloniki, Greece
[5]Lampropoulos Charisios-Producer, Krokos, 50010, Kozani, Greece

ABSTRACT

In this study, the combined implementation of Conservation Agriculture and Precision Agriculture was evaluated under real farming conditions in two traditional durum wheat–producing regions of Greece (Kozani and Larissa), both characterized by a high risk of agricultural land degradation. The pilot applications encompassed conservation agriculture practices, namely minimum or zero tillage, permanent soil cover with crop residues and crop rotations, as well as precision agriculture practices specifically variable rate fertilization and controlled machinery traffic, with parallel assessment of optimal routes within and around the fields. After three growing seasons, the results showed that the combination of Conservation Agriculture and Precision Agriculture practices contributed to the maintenance or even increase of soil organic matter by up to 25.5% compared to the initial value. Regarding crop yields, although numerical differences were observed, with slightly lower yields under the applied management techniques compared to conventional cultivation, these differences were not statistically significant. Also, a three-year nitrogen (N) saving was recorded of up to 7.37% and finally the treatment that achieved the lowest carbon footprint was found to be the combined application of Conservation Agriculture and Precision Agriculture.

Keywords: Conservation Agriculture, Precision Agriculture, no tillage, variable rate fertilization, cereals

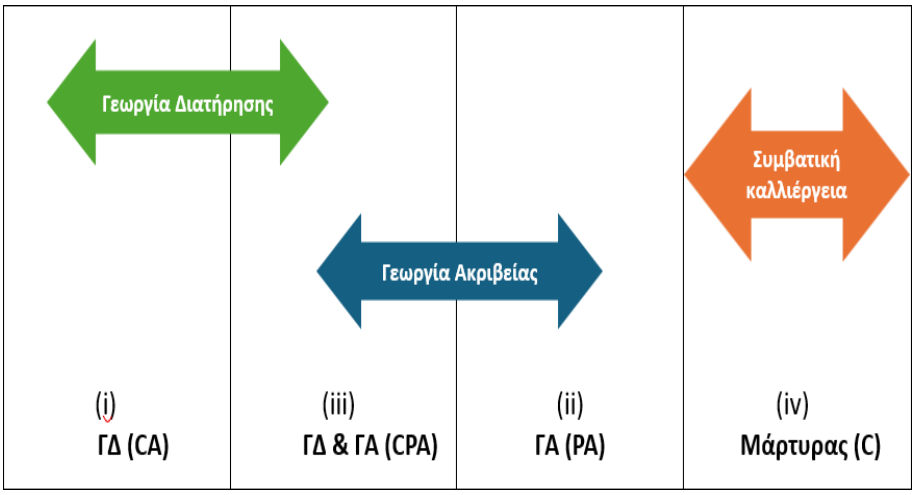
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ελληνική γεωργία αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα όσον αφορά την υποβάθμιση του εδάφους και τη ρύπανση από νιτρικά. Πιο συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι η οικονομική απώλεια παραγωγής λόγω της διάβρωσης του εδάφους στην ΕΕ φτάνει το 0,43% ετησίως, ενώ η Ελλάδα βρίσκεται στην τρίτη θέση όσον αφορά τον κίνδυνο (ετήσια απώλεια εδάφους 4,2 t/ha γεωργικής γης και μείωση της παραγωγής κατά 0,95%). Πρέπει να σημειωθεί ότι ένα ποσοστό απώλειας εδάφους >1 t/ha θεωρείται μη αναστρέψιμο σε μια περίοδο 50-100 ετών (Panagos et al, 2018). Επιπλέον, το 36% της γεωργικής γης της ΕΕ, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, διατρέχει υψηλό κίνδυνο συμπίεσης λόγω της τακτικής διέλευσης γεωργικών μηχανημάτων (Jones et al., 2012), με αποτέλεσμα τη μείωση της διήθησης του νερού, της βιολογικής δραστηριότητας και του αερισμού, πράξεις που επιδεινώνουν τη διάβρωση (Alaoui et al., 2018; Alaoui & Diserens, 2018). Οι συμβατικές πρακτικές μειώνουν επίσης την οργανική ύλη του εδάφους, με αποτέλεσμα το 74% των εδαφών στις μεσογειακές χώρες της ΕΕ να έχουν οργανική ύλη κάτω του 2% (Jones et al., 2012), με αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, τη μείωση της γονιμότητας, της ικανότητας συγκράτησης νερού και της παραγωγικότητας του εδάφους, την αύξηση των κινδύνων συμπίεσης και διάβρωσης και την αύξηση της εξάρτησης από ανόργανα λιπάσματα (Johnston et al., 2009). Η ακατάλληλη χρήση ανόργανων λιπασμάτων οδηγεί σε αύξηση του κόστους παραγωγής, χαμηλή αξιοποίηση του αζώτου, ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων από νιτρικά και αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Grizzetti et al., 2021; Stuart et al., 2014).

Στην παρούσα εργασία, η συνδυασμένη εφαρμογή της Γεωργίας Διατήρησης (Conservation Agriculture - CA) και της Γεωργίας Ακριβείας (Precision Agriculture - PA) αξιολογήθηκε υπό πραγματικές συνθήκες σε δύο παραδοσιακές ελληνικές περιοχές παραγωγής σκληρού σίτου με υψηλό κίνδυνο υποβάθμισης των γεωργικών εκτάσεων (Κρόκος Κοζάνης και Νίκαια Λάρισας). Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η ακατεργασία, η ελάχιστη κατεργασία, η στρώση με φυτικά υπολείμματα και η αμειψισπορά συνδυάστηκαν με την εφαρμογή θρεπτικών ουσιών με μεταβλητό ρυθμό.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι πιλοτικές εκμεταλλεύσεις εντοπίζονταν στον Κρόκο Κοζάνης, στη Δυτική Μακεδονία, και στη Νίκαια Λάρισας, στη Θεσσαλία, περιοχές που παρουσιάζουν υψηλό κίνδυνο υποβάθμισης γεωργικής γης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Κέντρο Εδαφικών Δεδομένων (ESDAC) (European Commission, Joint Research Centre; Panagos et al., 2012). Σε κάθε περιοχή επιλέχθηκαν δύο πιλοτικά αγροτεμάχια, τα οποία χωρίστηκαν σε 4 τμήματα με τις εξής πρακτικές διαχείρισης: (i) ΓΔ (Conservation Agriculture - CA), (ii) ΓΑ (Precision Agriculture - PA), (iii) ΓΔ & ΓΑ (Conservation Precision Agriculture - CPA) και (iv) Συμβατική καλλιέργεια ως μάρτυρας (Control - C). Στην Κοζάνη, η έκταση του 1ου πιλοτικού αγρού (Αεροδρόμιο) καλύπτει έκταση 5,59 ha, του 2ου (Άνω Κώμη) 3,08 ha, ενώ στη Λάρισα ο 1ος αγρός (Ραχούλα) καλύπτει 2,68 ha και ο 2ος (Νίκαια) 2,03 ha.



Εικόνα 1. Πρότυπη διάταξη των τεμαχίων στους πιλοτικούς αγρούς.

Οι μέθοδοι CA περιλάμβαναν ελάχιστη ή μηδενική κατεργασία του εδάφους, μόνιμη κάλυψη του εδάφους με βλάστηση και υπολείμματα καλλιεργειών (mulching) καθώς και αμειψισπορές με κριθάρι, καλύπτοντας και τις τρεις βασικές αρχές της CA όπως ορίζονται από τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας (FAO). Η απευθείας σπορά πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο μηχανών απευθείας σποράς, μιας Kuhn SD-Liner 3000 που χρησιμοποιήθηκε στα δύο αγροτεμάχια της Λάρισας και μιας Gaspardo Diretta που χρησιμοποιήθηκε στα πιλοτικά αγροτεμάχια της Κοζάνης. Οι αγροί της συμβατικής καλλιέργειας C και PA σπάρθηκαν με τις παραδοσιακές σπαρτικές μηχανές των γεωργών, που προϋπέθεταν ποικίλες καλλιεργητικές εργασίες. Στην Κοζάνη (Αεροδρόμιο και Άνω Κώμη), κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους οι κατεργασίες εδάφους περιλάμβαναν δισκοσβάρνισμα, ρίπερ (υπεδαφοκαλλιεργητή), ελαφρύ καλλιεργητή, σβάρνισμα με οδοντωτή σβάρνα και κύλινδρο συμπίεσης. Στη Λάρισα στην περιοχή της Ραχούλας, κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους, οι καλλιεργητικές εργασίες περιλάμβαναν άροση με

αναστρεφόμενο άροτρο, δισκοσβάρνισμα, ελαφρύ καλλιεργητή και κύλινδρο συμπίεσης με εξαίρεση την χρονιά 2024- 2025, όπου δεν χρησιμοποιήθηκε δισκοσβάρνα και αντί για ελαφρύ καλλιεργητή χρησιμοποιήθηκε μέσος καλλιεργητής. Στη Νίκαια κατά τις τρεις καλλιεργητικές περιόδους, οι καλλιεργητικές εργασίες ήταν άροση με αναστρεφόμενο άροτρο, δισκοσβάρνισμα και ελαφρύ καλλιεργητή. Επίσης, οι αμειψισπορές που ακολουθήθηκαν ανά πιλοτικό αγρό ήταν οι εξής: 1) Αεροδρόμιο (σιτάρι-σιτάρι-κριθάρι), 2) Άνω Κώμη (σιτάρι-σιτάρι-κριθάρι), 3) Νίκαια (σιτάρι-κριθάρι-σιτάρι), 4) Ραχούλα (σιτάρι-σιτάρι-σιτάρι).

Η PA εφαρμόστηκε ως μεταβλητή επιφανειακή αζωτούχος λίπανση, που αφορούσε τις επιφανειακές εαρινές εφαρμογές αζώτου και όχι τη βασική λίπανση, η οποία εφαρμόστηκε κατά τη σπορά. Στην Κοζάνη, η εφαρμογή της διαφορικής λίπανσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός εμπορικού συστήματος μεταβλητής δόσης (Augmenta Field Analyzer, Raven Industries Inc.). Η συσκευή χρησιμοποιεί έναν πολυφασματικό αισθητήρα και τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης, που καταγράφει σε πραγματικό χρόνο έναν δείκτη βλάστησης που ορίζεται από την εταιρεία και ονομάζεται «Augmenta index», είναι ευαίσθητος στη χλωρή βλάστηση αποφασίζοντας ανάλογα με την διακύμανση που ανιχνεύει στον αγρό την ποσότητα του λιπάσματος που θα εφαρμοστεί. Το στοιχείο της τεχνητής νοημοσύνης χρησιμοποιείται για τη διάκριση των φυτών από το έδαφος.

Στη Λάρισα η διαφορική λίπανση εφαρμόστηκε ημι-αυτόματα με τη βοήθεια χαρτών εφαρμογής, οι οποίοι αποκτήθηκαν από τις ψηφιακές πλατφόρμες υποβοήθησης λήψης αποφάσεων (Decision Support Systems – DSS) One Soil [https://onesoil.ai/en] και FarmB (https://farm-b.com/el/) με βάση τις πιο πρόσφατες διαθέσιμες πληροφορίες NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Πριν από κάθε εφαρμογή επιφανειακών αζωτούχων λιπασμάτων, χρησιμοποιήθηκε ο πλέον πρόσφατα διαθέσιμος χάρτης του δείκτη NDVI του αγρού, από τον οποίο προέκυψε ένα χάρτης εφαρμογής με κλασικοποίηση του NDVI. Δημιουργήθηκαν τρεις ζώνες εφαρμογής λιπάσματος, ζώνη με 20% μειωμένη δόση, ζώνη με κανονική δόση και ζώνη με 20% υψηλότερη δόση. Οι χάρτες φορτώθηκαν σε μορφή shapefile σε ένα βοηθό πλοήγησης του γεωργικού ελκυστήρα και ο χειριστής άλλαζε με χειροκίνητο τρόπο τη ταχύτητα μετακίνησης κάθε φορά που εισερχόταν σε διαφορετική ζώνη, έτσι ώστε να εφαρμόζεται η προβλεπόμενη ποσότητα του λιπάσματος.

Η χρήση ενέργειας και οι ροές άνθρακα εκτιμήθηκαν με το Cool Farm Tool (v2.11.0) [https://coolfarm.org/]. Το λογισμικό παρέχει επιστημονικά αξιόπιστες εκτιμήσεις για τους κύκλους αερίων θερμοκηπίου, το αποτύπωμα νερού, τη βιοποικιλότητα, την απώλεια τροφίμων και τα απόβλητα για την ανοιχτή γεωργία και την κτηνοτροφία. Στην παρούσα μελέτη αξιολογήθηκαν τα αέρια του θερμοκηπίου. Ένα λεπτομερές μητρώο όλων των εισροών της εκμετάλλευσης σχετικά με τις καλλιέργειες, τις εργασίες στον αγρό, τα λιπάσματα, τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα, την άρδευση και τη διαχείριση των υπολειμμάτων εισήχθη στο εργαλείο, για κάθε εκμετάλλευση. Εκτός από αυτό, εντάχθηκαν επίσης απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τη χρήση της γης και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Τα δεδομένα λήφθηκαν από δειγματοληψία εδάφους και ανάλυση εδάφους κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους για τον καθορισμό των βασικών συνθηκών. Τα δεδομένα απόδοσης αποκτήθηκαν με τη συγκομιδή κάθε αγροτεμαχίου ξεχωριστά και τη ζύγιση της παραγωγής σιτηρών. Τα όρια του συστήματος ορίστηκαν στην πύλη του αγρού, οπότε η μεταφορά εξαιρέθηκε από την απογραφή. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις εκπομπές CO_2, N_2O και CH_4, όλες εκφρασμένες ως ισοδύναμα CO_2 (CO_2eq) ανά εκτάριο και ανά τόνο προϊόντος.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Έδαφος

Με την έναρξη της ερευνητικής περιόδου πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες εδάφους σε κάθε πειραματικό αγρό για την αποτύπωση της αρχικής κατάστασης (συνθήκες βάσης). Λήφθηκαν μεικτά δείγματα (>5 ανά τεμάχιο) από τις μεταχειρίσεις CA & CPA και C & PA. Δεν κρίθηκε σκόπιμο να ληφθούν δείγματα ξεχωριστά από όλες τις μεταχειρίσεις καθότι οι εφαρμογές της PA ξεκίνησαν την άνοιξη και επομένως δεν ήταν αναμενόμενη κάποια πρότερη επίδραση. Το βάθος δειγματοληψίας ήταν 0-30 cm. Τα αποτελέσματα των εδαφικών αναλύσεων παρουσιάζονται στον **Πίνακας 1.**

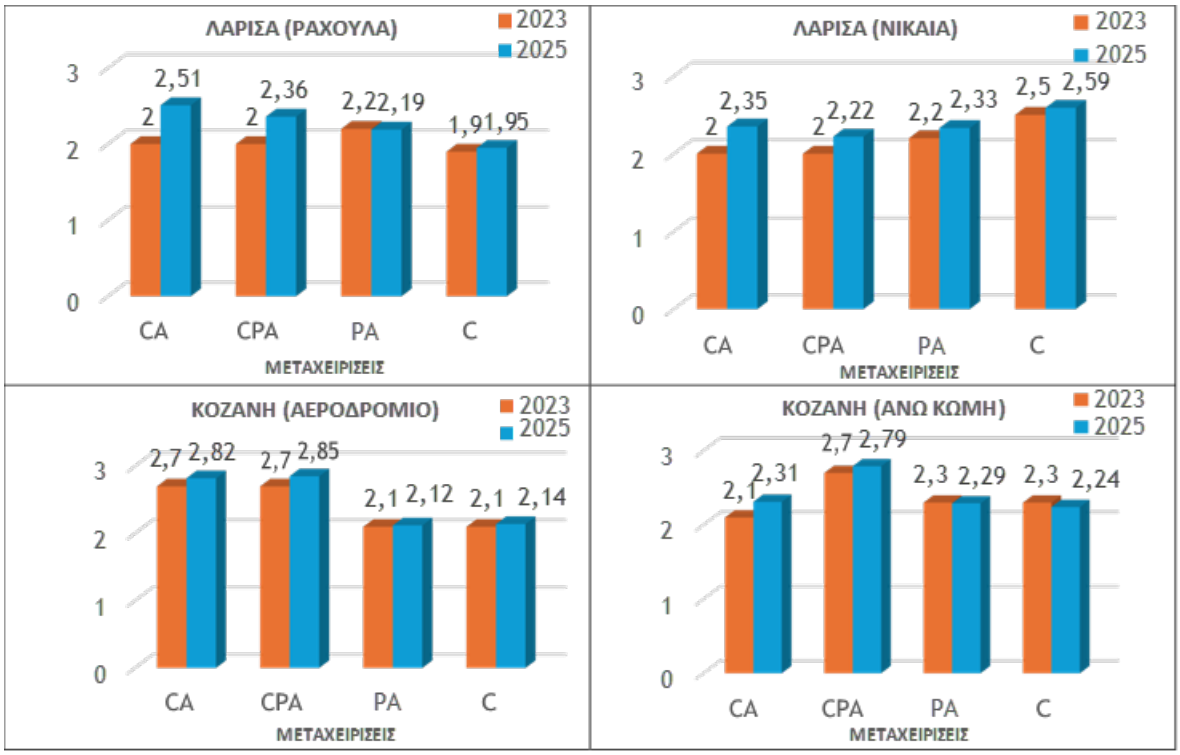
Πίνακας 1. Αποτελέσματα αρχικής εδαφολογικής ανάλυσης πιλοτικών αγρών.

	Νίκαια		Ραχούλα		Άνω Κόμη		Αεροδρόμιο	
	CA-CPA	PA-C	CA-CPA	PA-C	CA-CPA	PA-C	CA-CPA	PA-C
Άμμος (%)	32	30	41	47	18	16	32	30
Άργιλος (%)	29	31	32	31	50	52	42	44
Ιλύς (%)	39	39	27	22	32	32	26	26
Χαρακτηρισμός Εδάφος	CL	CL	CL	SCL	C	C	C	C
pH (H O 1:1) (25OC)	7.9	6	8.15	7.9	7.7	7.8	7.7	7.6
Ισοδύναμο CaCO 3 (%)	13	16	21.5	19	38	15	11	27
Οργανική ουσία (%)	2.1	2.6	1.5	1.65	2.1	2.0	2.5	1.9
Φώσφορος (P Olsen) (mg/kg)	7.1	8.9	5.2	6.95	2.5	2.7	4.6	2.8
Ανταλλάξιμο κάλιο (cmol+/kg εδ.)	0.58	0.76	0.42	0.425	7	5.7	4.2	4.6
Ανταλλάξιμο Μαγνήσιο (cmol+/kg εδ.)	0.58	0.65	0.845	0.66	0.57	0.91	0.74	0.57

Ο Πίνακας 1 αποκαλύπτει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των τεσσάρων αγρών (Νίκαια, Ραχούλα, Αεροδρόμιο, Άνω Κώμη), τόσο ως προς τη μηχανική σύσταση, όσο και σε χημικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την παραγωγικότητα. Ξεκινώντας από τη μηχανική σύσταση, η Νίκαια χαρακτηρίζεται ως βαρύ αργιλοπηλώδες έδαφος (CL), στη Ραχούλα το έδαφος είναι πιο ελαφρύ, κάτι που σημαίνει καλύτερη στράγγιση αλλά μικρότερη ικανότητα συγκράτησης θρεπτικών. Στο Αεροδρόμιο τα εδάφη είναι πιο βαριά-αργιλώδη (C), γεγονός που ενισχύει τη συγκράτηση νερού και κατιόντων αλλά μπορεί να δυσχεραίνει τον αερισμό. Η Άνω Κώμη έχει το βαρύτερο έδαφος (έως 52% άργιλος), με καθαρά αργιλώδη χαρακτήρα (C), και υψηλό κίνδυνο συμπίεσης.

Όσον αφορά το pH, παρατηρείται μεγάλη διαφοροποίηση. Η Νίκαια εμφανίζει έντονα όξινο χαρακτήρα (pH 6,0 στο PA–C), ενώ στο CA–CPA φτάνει το 7,9, πιθανόν λόγω τοπικής ετερογένειας. Στη Ραχούλα τα εδάφη είναι ελαφρά αλκαλικά (7,9–8,15), ενώ στο Αεροδρόμιο και την Άνω Κώμη κινούνται γύρω στο 7,6–7,8, δηλαδή σε σχεδόν ουδέτερο έως αλκαλικό επίπεδο. Το υψηλό ισοδύναμο $CaCO_3$ (έως 38% στην Άνω Κώμη, 27% στο Αεροδρόμιο) επιβεβαιώνει την παρουσία ασβεστούχων εδαφών, που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα φωσφόρου και ιχνοστοιχείων.

Εξετάζοντας την οργανική ουσία, κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, με τη Νίκαια να έχει υψηλότερες τιμές (2,6% στο PA–C), ενώ στη Ραχούλα χαμηλότερες (1,5–1,65%). Το Αεροδρόμιο και η Άνω Κώμη κινούνται ενδιάμεσα (2,0–2,5%), με μικρές διαφορές ανά μεταχείριση. Οι τεχνικές CA προσέφεραν αύξηση της περιεκτικότητας της οργανικής ουσίας στο έδαφος, και στους τέσσερις πιλοτικούς αγρούς, όπως έδειξαν οι δειγματοληψίες εδάφους που πραγματοποιήθηκαν μετά το πέρας του έργου. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των τριών ετών, στη Λάρισα (Ραχούλα) η οργανική ουσία παρουσίασε αύξηση, με τη μεγαλύτερη μεταβολή να καταγράφεται στο αγροτεμάχιο CA, όπου έφτασε το 25,5%, στη Νίκαια αυξήθηκε έως και 17,5% στο αγροτεμάχιο CA, στην Κοζάνη (Αεροδρόμιο) έως 5,5% στο αγροτεμάχιο CPA και στην Άνω Κώμη η μεγαλύτερη αύξηση παρουσιάστηκε στο αγροτεμάχιο CA, όπου η οργανική ουσία αυξήθηκε κατά 10%. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιεκτικότητες οργανικής ουσίας και στους τέσσερις πιλοτικούς αγρούς, στην αρχή του έργου (2023) και στο τέλος του έργου (2025) (**Γράφημα** 1).

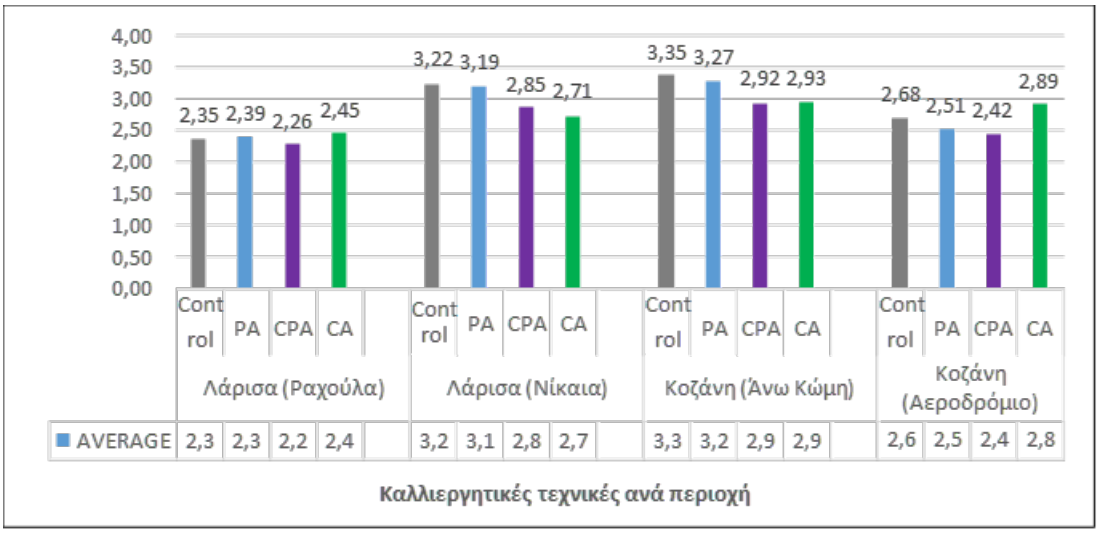


Γράφημα 1. Περιεκτικότητα οργανικής ουσίας εδάφους σε βάθος 0-15cm στη Λάρισα και στην Κοζάνη κατά τις καλλιεργητικές περιόδους 2023 και 2025.

Αποδόσεις καλλιεργειών

Όσον αφορά τις μέσες αποδόσεις (t/ha) κατά τη διάρκεια των τριών καλλιεργητικών περιόδων, τα αποτελέσματα έδειξαν τα εξής: Στην Κοζάνη, στον πρώτο πιλοτικό αγρό (Άνω Κώμη), οι εφαρμογές στο αγροτεμάχιο CA μείωσαν την απόδοση κατά 12,5% σε σχέση με τον μάρτυρα (C), όπως και οι εφαρμογές PA μείωσαν κατά 2,5% και ο συνδυασμός των μεθόδων CPA κατά 12,9%. Στον δεύτερο πιλοτικό αγρό στην Κοζάνη (Αεροδρόμιο), οι τεχνικές στο αγροτεμάχιο CA αύξησαν τις αποδόσεις κατά 7,8%, ενώ οι τεχνικές PA και CPA μείωσαν τις αποδόσεις κατά 6,3% και 9,7% αντίστοιχα σε σχέση με τον μάρτυρα. Στη Λάρισα, στον πρώτο πιλοτικό αγρό (Ραχούλα) οι τεχνικές CA και PA προσέφεραν αύξηση της απόδοσης κατά 4,3% και 1,8% αντίστοιχα σε σύγκριση με τον

μάρτυρα, ενώ ο συνδυασμός αυτών (CPA) έφερε μείωση της απόδοσης κατά 3,8%. Τέλος, όσον αφορά τον δεύτερο πιλοτικό αγρό (Νίκαια), οι τεχνικές στο CA έφεραν μείωση της απόδοσης κατά 15,8%, οι τεχνικές στο PA κατά 1% και ο συνδυασμός αυτός (CPA) μείωσε την απόδοση κατά 11,5%. Τα αποτελέσματα περιγράφονται παρακάτω στον **Γράφημα** 2.



Γράφημα 2. Μέση απόδοση (t/ha) ανά περιοχή και ανά καλλιεργητική τεχνική κατά τη διάρκεια τριών καλλιεργητικών περιόδων 2023-2024-2025.

Στατιστική ανάλυση των αποδόσεων

Προκειμένου να εξεταστεί αν οι διαφορετικές τεχνικές καλλιέργειας επηρέασαν σημαντικά τα αποτελέσματα, διεξήχθη στατιστική αξιολόγηση των αποδόσεων με τη μέθοδο One-Way ANOVA. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) για τις τέσσερις πειραματικές περιοχές (Ραχούλα, Νίκαια Λάρισας, Άνω Κώμη και Αεροδρόμιο Κοζάνης) έδειξαν ότι δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις μέσες αποδόσεις μεταξύ των τεσσάρων καλλιεργητικών τεχνικών ($p > 0,05$), όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 2.**

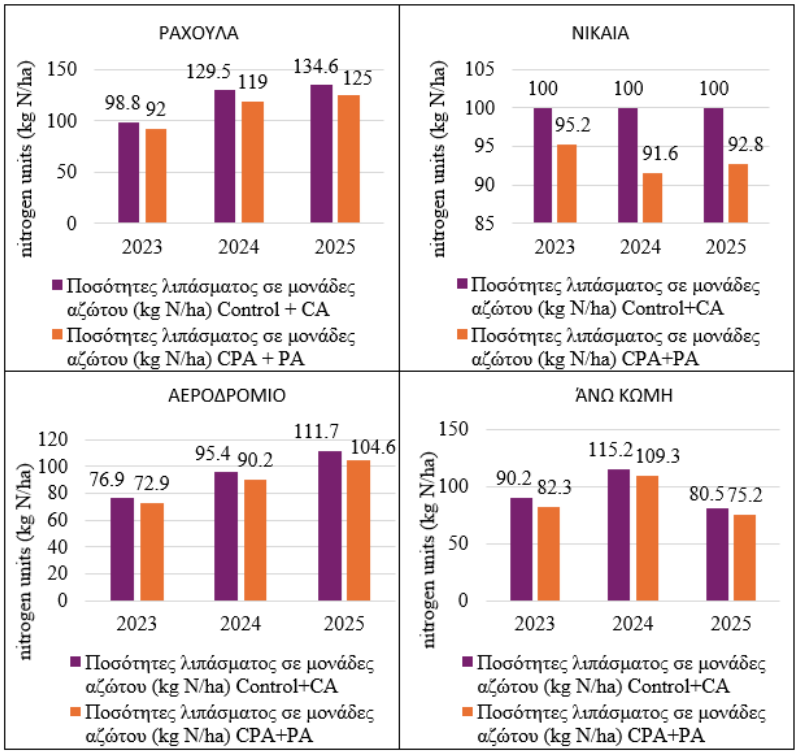
Πίνακας 2. Στατιστική αξιολόγηση των αποδόσεων με την μέθοδο ANOVA για την Λάρισα και την Κοζάνη.

Περιοχή	***F value***	***p-value***	***Significance (p < 0.05)***
Λάρισα (Ραχούλα)	0,365077	0,780261	**Όχι**
Λάρισα (Νίκαια)	0,481049	0,704478	**Όχι**
Κοζάνη (Άνω Κώμη)	0,062046	0,978405	**Όχι**
Κοζάνη (Αεροδρόμιο)	0,161105	0,919544	**Όχι**

Παρότι σε ορισμένες περιπτώσεις καταγράφηκαν αριθμητικές διαφοροποιήσεις, με ελαφρώς χαμηλότερες αποδόσεις στις καλλιεργητικές τεχνικές που εφαρμόσθηκαν σε σύγκριση με την συμβατική καλλιέργεια, οι διαφορές αυτές δεν ήταν στατιστικά σημαντικές. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι, στο χρονικό διάστημα και υπό τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες, οι ποσοτικές διαφορές των αποδόσεων δεν είναι δυνατό να αποδοθούν αποκλειστικά στην εκάστοτε καλλιεργητική τεχνική και πιθανόν οφείλονται και σε επιπλέον παράγοντες όπως είναι οι καιρικές συνθήκες.

Εξοικονόμηση λιπασμάτων

Όσον αφορά την εξοικονόμηση λιπάσματος μέσω των πρακτικών διαχείρισης PA και CPA, τα αποτελέσματα έδειξαν πως καταγράφηκε τριετής εξοικονόμηση αζώτου (N) σε ποσοστό 7,37% στην περιοχή της Ραχούλας, 6,8% στη Νίκαια, 5,74% στην περιοχή Αεροδρόμιο Κοζάνης και 6,81% στην Άνω Κώμη. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, και στις τέσσερις περιοχές παρατηρήθηκε ετήσια εξοικονόμηση αζώτου στα αγροτεμάχια CPA και PA όπου εφαρμόσθηκε διαφοροποιημένη λίπανση **(Γράφημα** 3).

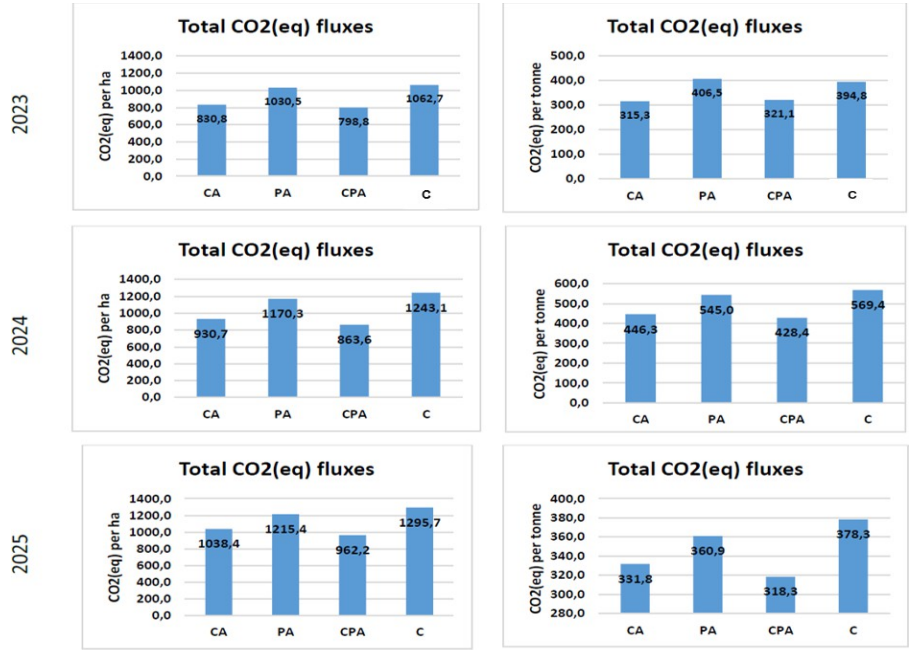


Γράφημα 3. Ποσότητες λιπασμάτων (kg N/ha) στη Λάρισα και στην Κοζάνη κατά τη διάρκεια τριών καλλιεργητικών περιόδων.

Αποτύπωμα άνθρακα

Στον **Γράφημα** 4 παρουσιάζεται η σύγκριση όλων των αγροτεμαχίων ανά χρονιά και αναλύεται το αποτύπωμα άνθρακα με ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα ανά εκτάριο και ανά παραγόμενο προϊόν. Σχεδόν σε όλα τα αγροτεμάχια, για κάθε έτος έρευνας, παρατηρείται ότι η μεταχείριση με τον χαμηλότερο δείκτη είναι ο συνδυασμός CPA. Ακολουθεί η CA, στη συνέχεια η PA, ενώ το υψηλότερο αποτύπωμα καταγράφεται στη συμβατική πρακτική/μάρτυρα (C). Η ανάλυση αναδεικνύει την καθοριστική συμβολή της CA στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα, κυρίως μέσω της αύξησης της αποθήκευσης άνθρακα στο έδαφος. Συνοπτικά, οι μέσες τιμές όλων των αγροτεμαχίων για κάθε έτος ανά μεταχείριση **(Γράφημα 4)** κυμάνθηκαν από 798,8 έως 962,2 CO_2(eq)/ha για την CPA, από 830,8 έως 1.038,4 CO_2(eq)/ha για την CA, από 1.030,5 έως 1.215,4 CO_2(eq)/ha για την PA και από 1.062,7 έως 1.295,7 CO_2(eq)/ha για την συμβατική (C). Η μέθοδος CPA παρουσίασε τη μεγαλύτερη μείωση, εξοικονομώντας περίπου 25% εκπομπών, ενώ η CA ακολούθησε με μείωση γύρω στο 21%. Αντίθετα, η PA προσέφερε σχετικά περιορισμένο όφελος, της τάξης του 5%. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα ανά εκτάριο, οι μειώσεις είναι σαφώς μεγαλύτερες και αποτυπώνουν την περιβαλλοντική αξία των μεθόδων. Ωστόσο, όταν οι εκπομπές υπολογίζονται ανά παραγόμενο τόνο, οι διαφορές περιορίζονται, καθώς

οι μέθοδοι με CA και CPA εμφάνισαν ελαφρώς χαμηλότερες αποδόσεις, γεγονός που αυξάνει το σχετικό αποτύπωμα ανά μονάδα προϊόντος. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ οι μέθοδοι αυτές βελτιώνουν σημαντικά το περιβαλλοντικό ισοζύγιο ανά εκτάριο, η μέγιστη αξιοποίηση των ωφελειών απαιτεί παράλληλη σταθεροποίηση ή και αύξηση της παραγωγικότητας. Συνολικά, η CPA ξεχώρισε ως η πλέον αποδοτική μέθοδος, συνδυάζοντας τα υψηλότερα ποσοστά μείωσης εκπομπών με καλύτερη ισορροπία ανάμεσα σε εκτάριο και προϊόν.



Γράφημα 4. Συνολικό αποτύπωμα άνθρακα όλων των αγροτεμαχίων ανά έτος.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο συνδυασμός των πρακτικών Γεωργίας Διατήρησης και Γεωργίας Ακριβείας έδειξε να έχει δυνατότητες βελτίωσης της παραγωγικότητας των καλλιεργειών, με παράλληλη μείωση χρήσης των εισροών, διατήρηση ή αύξηση της οργανικής ουσίας του εδάφους και μείωση του αποτυπώματος άνθρακα. Συγκεκριμένα με την ολοκλήρωση του έργου, σε όλους τους πιλοτικούς αγρούς, στις μεθόδους της CA και στη συνδυαστική της εφαρμογή με την PA, η οργανική ουσία του εδάφους διατηρήθηκε ή αυξήθηκε. Όσον αφορά τις μέσες αποδόσεις των καλλιεργειών για τους τέσσερις πιλοτικούς αγρούς και τα τρία έτη, δεν παρουσιάζουν στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων CA, CPA, PA και συμβατικής καλλιέργειας (C). Υπάρχει ωστόσο μεγάλη ετερογένεια μεταξύ των αγρών. Επιπλέον, και στις τέσσερις περιοχές παρατηρήθηκε ετήσια εξοικονόμηση αζώτου στα αγροτεμάχια CPA και PA όπου εφαρμόσθηκε διαφοροποιημένη λίπανση και τέλος, σημειώθηκε σημαντική μείωση στο αποτύπωμα άνθρακα τόσο με τον συνδυασμό CA και PA αλλά και με μεμονωμένες τις πρακτικές αυτές συγκριτικά με τις συμβατικές πρακτικές. Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της τριετούς μελέτης υποδεικνύουν ότι ο συνδυασμός των πρακτικών της Γεωργίας Διατήρησης και της Γεωργίας Ακριβείας μπορεί να αποτελέσει μια ολοκληρωμένη, βιώσιμη και αποδοτική προσέγγιση διαχείρισης των καλλιεργειών, η οποία ενισχύει την παραγωγικότητα, μειώνει την κατανάλωση εισροών και το αποτύπωμα άνθρακα, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη διατήρηση της γονιμότητας και της υγείας του εδάφους, έχοντας πάντοτε υπόψιν την παραλλακτικότητα των εδαφών και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις καλλιέργειες.

Ευχαριστίες

Η έρευνα χρηματοδοτήθηκε από τη Δράση «Πρόγραμμα Αγροτικής Ανάπτυξης της Ελλάδας 2014–2020», στο πλαίσιο του Μέτρου 16 «Συνεργασία», Υπομέτρων 16.1–16.2, η οποία συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Αγροτικής Ανάπτυξης και εθνικούς πόρους, μέσω του έργου «PreConAgri» – Εφαρμογές τεχνικών αειφορικής διαχείρισης του εδάφους και γεωργίας ακριβείας για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας των αροτραίων καλλιεργειών» (Κωδικός έργου: Μ16ΣΥΝ2-00257).

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alaoui, A., Diserens, E. (2018). Mapping soil compaction – A review. (2018). Curr. Opin. Environ. Sci. Heal. 5, 60–66. doi:10.1016/j.coesh.2018.05.003

Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S., Blöschl, G. (2018). Does soil compaction increase floods ? A review. J. Hydrol. 557, 631–642. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.12.052

European Soil Data Centre (ESDAC), esdac.jrc.ec.europa.eu, European Commission, Joint Research Centre

FAO. *Conservation Agriculture*. Retrieved from FAO: https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/

Grizzetti, B. O. Vigiak, A. Udias, A. Aloe, M. Zanni, F. Bouraoui, A. Pistocchi, C. Dorati, R. Friedland, A. De Roo, C. Benitez Sanz, A. Leip, M. Bielza, (2021). How EU policies could reduce nutrient pollution in European inland and coastal waters, Global Environmental Change, Volume 69, 2021,102281, doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102281.

Jones A., Panagos P., Barcelo S., Bouraoui F., Bosco C., Dewitte O., Gardi C., Erhard M., Hervás J., Hiederer R., Jeffery S., Lükewille A., Marmo L., Montanarella L., Olazábal C., Petersen J., Penizek V., Strassburger T., Tóth G., Eeckhaut M. Van Den (2012). The State of Soil in Europe. doi:10.2788/77361

Johnston, A.E., Poulton, P.R., Coleman, K. (2009). Chapter 1 Soil Organic Matter. Its Importance in Sustainable Agriculture and Carbon Dioxide Fluxes. Adv. Agron. 101, 1–57. doi:10.1016/S0065-2113(08)00801-8

Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L., (2012). "European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements", Land Use Policy, 29 (2), pp. 329-338. doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003

Panagos P., Standardi G., Borrelli P., Lugato E., Montanarella L., Bosello F. (2018) Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models Land Degradation & 29 (3), 471-484 https://doi.org/10.1002/ldr.2879

Porter, J. R., & Gawith, M. (1999, January). Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy*, *10*(1), 23-36. doi: https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00047-1

Späti, K., Huber, R., Logar, I., Finger, R. (2022). Data on the stated adoption decisions of Swiss farmers for variable rate nitrogen fertilization technologies. Data Br., 41, 107979, doi:10.1016/j.dib.2022.107979.

Stuart, D., Schewe, R.L., McDermott, M. (2014). Reducing nitrogen fertilizer application as a climate change mitigation strategy: Understanding farmer decision-making and potential barriers to change in the US. Land use policy, 36, 210–218, doi:10.1016/j.landusepol.2013.08.011.

53. IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WINTER WHEAT WATER STRESS IN THE REGION OF THESSALY, GREECE

Angeliki Elvanidi[1], Nikolaos Katsoulas[1], Georgios Papadopoulos[2], Dimitrios Melas[2], Konstantinos Douvis[3], Ioannis Faraslis[4], Stavros Keppas[2], Ioannis Stergiou[2], Anastasia Poupkou[3], Dimitrios Voloudakis[3], Ioannis Kapsomenakis[3], Persefoni Maletsika[1], Dimitris K. Papanastasiou[4]

[1] *University of Thessaly, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, Volos, Greece, email: nkatsoul@uth.gr*
[2] *Aristotle University of Thessaloniki, School of Physics, Thessaloniki, Greece, email: melas@auth.gr*
[3] *Academy of Athens, Research Centre for Atmospheric Physics and Climatology, Athens, Greece, email: apoupkou@academyofathens.gr*
4 *University of Thessaly, Department of Environmental Sciences, Larissa, Greece, email: dkpanan@uth.gr*

Abstract

Climate change poses a major global threat, directly affecting agriculture and food security through more frequent and severe weather events. This study examined its impact on winter wheat production in Thessaly, Greece, a key agricultural region. Emphasis was placed on water stress, which is a decisive factor in yield reduction under future climate scenarios. Crop water stress was assessed using the Crop Water Stress Index (CWSI), which is a widely recognized indicator of plant water deficit. The analysis relied on high-resolution simulations produced by the Weather Research and Forecasting (WRF) model, providing climate data for Thessaly at 10 km spatial and 1 h temporal resolution. Simulations refer to the intermediate emission scenario SSP2-4.5. Future projections covered the period 2046–2055, while 2005–2014 was considered as the reference period. Results showed that water stress increased from the early growth stages, while during the final grain-filling stage (GS3), CWSI rose by 3–6% across approximately 56% of Thessaly's area.

Keywords: Climate Change, WRF model, Water Stress, Crop Water Stress Index (CWSI)

1. Introduction

Climate change is increasingly recognized as one of the most pressing global challenges, with far-reaching consequences for ecosystems, economies and human well-being. Among the sectors most vulnerable to its impacts is agriculture, which is directly affected by shifts in temperature, precipitation patterns, and the frequency and intensity of extreme weather events. These climatic alterations not only disrupt crop development and reduce productivity but also threaten the stability of global food systems—particularly in regions already exposed to environmental and socio-economic stressors (Zhang et al., 2024).

Wheat (*Triticum aestivum* L.) plays a crucial role in global food security, covering approximately 29% of global dietary requirements. In Greece, average annual production between 2013 and 2022 reached 812,000 tons for durum wheat and 379,000 tons for soft wheat, according to Eurostat. Among Greek regions, Thessaly stands out as one of the major wheat-producing areas, due to its favorable agroclimatic conditions and long-standing agricultural tradition. Figure 1 presents the distribution of cultivated wheat areas across regional units, classified into five size categories. The distribution of cultivated wheat areas in Greece exhibits notable geographical differences. The largest concentrations are found mainly in Northern and Central Greece, with Thessaly showing particularly high density. Within Thessaly, cultivated wheat areas reach up to 44,395 hectares in Larissa, up to 16,318 hectares in Karditsa, up to 8,565 hectares in Volos, and up to 5,138 hectares in Trikala. This region is

especially important for national wheat production due to its extensive arable plains, favorable climate, and high cultivation intensity. In contrast, southern regions and the islands have significantly smaller wheat-growing areas, indicating lower agricultural intensity in these areas. According to ELSTAT (2023), over 738,000 hectares of wheat are cultivated in Greece, 72% of them in Eastern Macedonia, Thrace, Central Macedonia, and Thessaly.

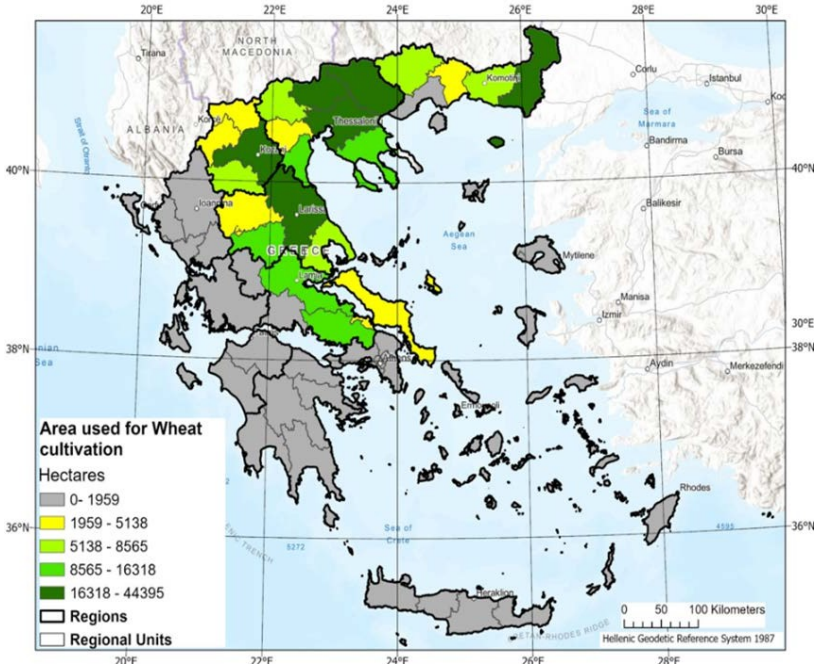


Figure 1. Distribution of cultivated winter wheat area across regional units, classified into five size categories.

The dependence on regional climate patterns makes wheat cultivation increasingly vulnerable to the effects of climate change. Rising temperatures, prolonged dry spells and greater interannual variability are expected to intensify the frequency and severity of drought stress during key developmental stages, ultimately threatening both yield quantity and grain quality (Wakchaure et al., 2016; Alghory and Yazar, 2019). These risks underline the urgency of assessing climate impacts and developing targeted adaptation strategies for wheat production in Thessaly.

This paper focuses on the region of Thessaly in central Greece, which is a key agricultural zone and a major contributor to the country's wheat production. Given its climatic and agronomic significance, Thessaly serves as an ideal case study for evaluating how future climate conditions may impact winter wheat performance. In particular, the analysis highlights the role of crop water stress as a critical factor influencing yield reductions under future emission scenarios.

2. THEORY

2.1. Impact of climate change to winter wheat water stress

Water stress, driven by the imbalance between crop water demand and available moisture, is expected to become more pronounced under warmer and drier future conditions. Understanding how water stress will evolve under different climate scenarios is essential for designing adaptive strategies that can sustain wheat production and food security in the region. To this end, the Crop Water Stress Index (CWSI) was used as a diagnostic tool for quantifying

plant water deficit and identifying potential risk periods. The temperature difference between the canopy and the surrounding air provides useful insight into crop responses to environmental changes (García-Tejero et al., 2017). The method introduced by Idso et al. (1977; 1981) remains widely used due to its simplicity. Building upon this approach, WSI can also be derived from energy balance equations that integrate environmental parameters such as vapor pressure deficit, net radiation, and air temperature (Jackson et al., 1981).

2.2. Weather research and forecasting model WRF

The Weather Research and Forecasting (WRF) model is a state-of-the-art, open-source, community-supported atmospheric model developed by the National Center for Atmospheric Research (NCAR) and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). It is designed for both atmospheric research and operational forecasting and is capable of simulating weather and climate across a wide range of scales from tens of meters to thousands of kilometers (Hong et al. 2021). SSP2–4.5 represents a moderate, 'middle-of-the-road' socioeconomic development pathway, leading to a relatively mild global warming trend (Thomson et al. 2011). Researchers use WRF in conjunction with these SSP scenarios to project the impacts of different climate futures, such as changes in temperature extremes and drought frequency, at high resolutions for specific regions.

The purpose of this study is to employ high-resolution climate simulations from the WRF model under the SSP2-4.5 scenario to estimate the CWSI for winter wheat in Thessaly. The analysis focuses on identifying how projected climatic changes will influence water stress across key growth stages, providing insights into the timing and intensity of stress events and supporting adaptation planning for one of Greece's most important wheat-producing regions.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. WRF model set up

The WRF model was applied using a two-domain nesting approach: a coarse 50 km grid covering Europe, North Africa and the Middle East, and a finer 10 km grid focused on Greece to capture local climate features and complex topography. Simulations covered a reference period (2005–2014) and a near-future period (2046–2055) under SSP2–4.5 emissions scenario (intermediate). Model physics schemes were selected based on prior sensitivity tests and land use was represented using the 1 km GLCNMO v1 dataset. Boundary conditions came from a bias-corrected CMIP6–ERA5 hybrid dataset (Xu et al., 2021), which improves regional climate simulations by combining high-quality reanalysis data with ensemble climate model trends, reducing large-scale forcing biases and better capturing variability and extremes. The analysis was based on high-resolution regional climate simulations generated by the WRF model, providing climate data for Thessaly at a 10 km and 1 h spatial and temporal resolution, respectively.

3.2. Crop water stress index

The CWSI is a widely used indicator for assessing plant water stress and is defined according to Jackson et al. (1988) by the following expression: $CWSI = ((Tc - T) - (Tc - T)_{LL}) / ((Tc - T)_{UL} - (Tc - T)_{LL})$. In this formulation, (Tc – T) represents the observed temperature difference between the canopy (Tc) and the surrounding air (T). The term $(Tc - T)_{LL}$ corresponds to the lower limit of this difference, which is associated with non-stressed, well-watered conditions.

The term $(Tc - T)_{UL}$ corresponds to the upper limit of this difference, which is associated with non-transpiring, stressed conditions. The value of (Tc – T) is further calculated based on the energy balance approach proposed by Jackson et al. (1981): $(Tc - T) = [rA \times (Rn - \lambda E)] / (\rho \times Cp)$, where Rn denotes the net radiation (W/m^2), defined as the total incoming and outgoing radiation at the crop surface; λE is the latent heat flux (W/m^2), corresponding to the energy consumed during evapotranspiration; ρ is the air density (typically 1.204 kg/m^3); Cp is the specific heat capacity of air at constant pressure (1006 J/kg·K); and rA is the aerodynamic resistance (s/m), which quantifies the resistance to heat transfer from the canopy to the atmosphere. The upper limit $(Tc - T)_{UL}$ and lower limit $(Tc - T)_{LL}$ are determined based on methodology described in Zhang et al. (2024) and Katsoulas et al. (2001).

The CWSI was assessed across three key growth stages based on the FAO classification (FAO, 2002). Stage GS1 (10–35 DAS) covers early vegetative development, including emergence and initial stem elongation. GS2 (35–120 DAS) encompasses the main vegetative and reproductive phases, from stem elongation to anthesis. GS3 (130–180 DAS) corresponds to grain filling and ends at physiological maturity, indicated by flag leaf and spike yellowing.

3.3.Calculations and statistical analysis

To assess spatial changes in T, RH and CWSI, the difference between the future (2046– 2055) and reference (2005–2014) period was calculated per grid cell and growth stage. These differences (ΔT, ΔRH, ΔCWSI) were grouped into four classes, and the frequency of occurrence (%) within each class was computed per region. For CWSI, emphasis was placed on values exceeding 0.5, which are generally associated with the onset of moderate to severe water stress (Kumari et al., 2024). To assess the spatial extent of stress increase under the SSP2–4.5 emissions scenario, the increase in the proportion of grid cells with CWSI > 0.5 between the reference and future period was categorized into four classes. This classification allowed for a clearer evaluation of the distribution and intensity of water stress across the study area. A simple Student's t test was employed to examine the statistical significance of future changes in CWSI at a confidence level of 95% ($p \leq 0.05$) using SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, IBM, USA).

4. Results

Table 1 presents the frequency of occurrence (%) of ΔT and ΔRH classes across three key winter wheat growth stages (GS1-3) under SSP2-4.5 emissions scenario. During GS1, the greater part of Thessaly exhibits elevated temperatures, ΔT being higher than 1.6°C in the 63.5% of the region's area. This temperature increase is accompanied by notable reductions in relative humidity, ΔRH being reduced up to 6% in the with 87.6% of the region' area.

During GS2, which corresponds to the vegetative growth phase, thermal stress remains significant under SSP2–4.5 with 66.4% of Thessaly showing ΔT increases above 1.6°C. Relative humidity conditions further provide water stress, over 54% of the region exhibits ΔRH reductions between 0% and (–3%), while 45.3% shows even stronger deficits between (–3%) and (–6%). This dual stress environment—elevated canopy temperatures and widespread moisture loss—can significantly hinder leaf expansion, limit photosynthetic activity, and suppress vegetative biomass accumulation.

During GS3 stage, the critical reproductive and grain filling period—thermal stress becomes dominant once again in SSP2–4.5 where 94.2% of spatial values show ΔT > 1.6°C. Relative humidity differences are also widespread, with 98.5% of the region displaying ΔRH deficits

between 0% and (–6%). These conditions suggest a high likelihood of heat and moisture stress during grain development, with potentially severe implications for final yield and grain quality. The resulted warmer and drier climate induce significant impacts on winter wheat, affecting each developmental stage differently. During early growth (GS1), elevated temperatures can hinder seed germination and seedling establishment, as increased evaporative demand reduces available soil moisture and exposes young plants to early stress.

In the vegetative or tillering stage (GS2), heat stress limits leaf expansion and photosynthetic activity, reducing biomass accumulation and increasing the crop's water requirements, as reflected by higher CWSI values. The reproductive and grain-filling stage (GS3) is particularly sensitive, with high temperatures potentially reducing the number of grains per spike and impairing endosperm development, ultimately compromising yield and grain quality. Georgopoulou et al. (2024) noted that cereals in southern Mediterranean environments can cope with climate stress by adjusting sowing dates, optimizing water use and using resilient cultivars.

Table 1. Frequency (%) of occurrence of temperature difference (ΔT, °C) and relative humidity difference (ΔRH, %) classes between future and reference period during three winter wheat growth stages (GS1, GS2, GS3) under SSP2-4.5 emissions scenario.

Parameter	Class	GS1	GS2	GS3
ΔT (ºC)	**< 1.2**	5.10	0.00	0.73
	1.2 – 1.4	10.95	10.22	0.73
	1.4 – 1.6	20.44	23.35	4.37
	> 1.6	63.51	66.43	94.17
ΔRH (%)	**0 – (+3)**	3.65	0.00	0.00
	0 – (-3)	56.95	54.75	58.39
	(-3) – (-6)	30.65	45.25	40.16
	< (-6)	8.75	0.00	1.45

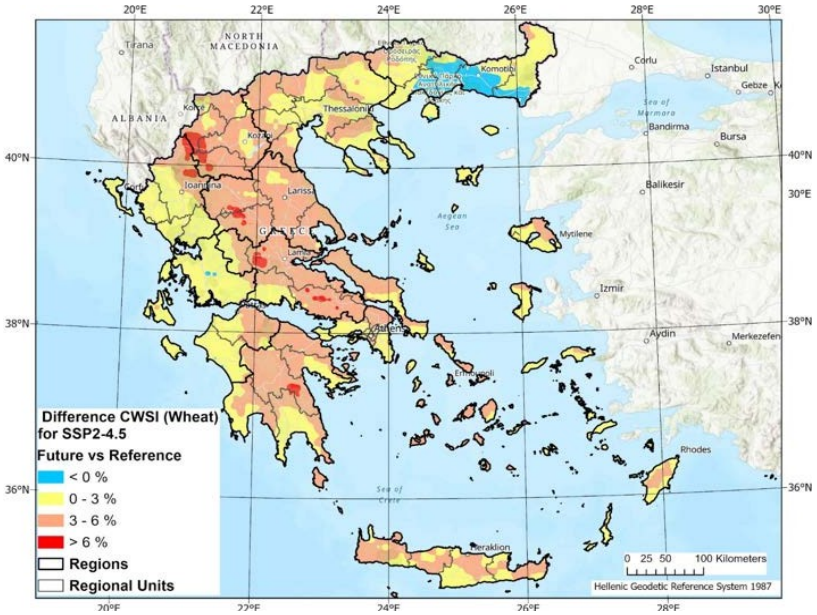


Figure 2. Spatial distribution of the projected CWSI difference (future period vs reference period) for winter wheat under SSP2–4.5 emissions scenario in Thessaly and across Greece.

Figure 2, presents the spatial distribution of the projected CWSI difference (future period vs reference period) for winter wheat under SSP2–4.5 emissions scenario in Thessaly and across Greece. In Thessaly, Figure 2 reveals an increase in crop water stress across almost all the region. Notably, the Thessalian plain, the core agricultural zone, shows a concentration of increased values, indicating that areas with high cultivation density are among the most exposed.

The frequency of occurrence of CWSI increases above 0.5 grouped into four classes for each crop growth stage (GS1–GS3) across Thessaly is presented in Figure 3.

During GS1, more than 30% of the region's area showed no significant ΔCWSI values higher than 0.5. The remaining percentage was distributed among the classes 0–3%, 3–6%, and >6%. During GS2, which corresponds to vegetative growth, the largest share—approximately 56% of the areas—was observed in the 3–6% class. About 10% of the areas showed differences greater than 6%, while the remaining statistically significant 34% fell within the 0–3% class.

This sharp rise in mid-season water stress is critical, as it may restrict leaf development and photosynthetic capacity, ultimately limiting biomass accumulation.

A similar pattern to GS2 was observed during GS3, which represents the reproductive and grain-filling stage. About 43% of the region varied in the 3–6% class, 15% exceeded 6%, while the remaining percentage was in the 0–3% class. These stress levels may interfere with grain development and final yield formation.

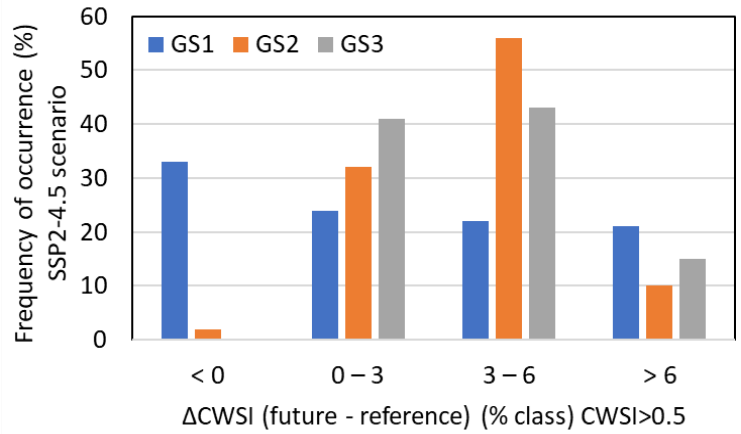


Figure 3. Frequency of occurrence (%) in values showing an increase in crop water stress (ΔCWSI > 0.5), grouped into four classes (<0%, 0–3%, 3–6%, >6%) for each crop growth stage (GS1–GS3), across Thessaly, under the SSP2–4.5 climate scenario.

Overall, winter wheat cultivation in Thessaly is expected to experience increasing thermal and water stress when considering SSP2–4.5 emissions scenario. This fact highlights the need that region-specific adaptation strategies are required. Early-season water deficits and high temperatures suggest the need for optimized irrigation systems, such as drip or precision irrigation, particularly during GS1 and GS2. The use of heat- and drought-tolerant wheat varieties is recommended to withstand the intense stress observed during the reproductive and grain-filling stage. Moderate but significant water stress during vegetative and grain-filling stages calls for targeted irrigation, coupled with the selection of drought-resistant varieties. Canopy management strategies, such as optimized plant density and fertilization, can help maintain leaf area efficiency while minimizing water loss. In places where moderate water stress is projected, primarily during GS2, localized irrigation on the most stressed plots and soil management practices to enhance water retention, such as the incorporation of organic

amendments, can help mitigate mid-season stress. Regular monitoring of canopy temperature and relative humidity allows dynamic management to ensure that interventions are applied where and when needed. Early-season soil moisture management is critical to support seedling emergence and canopy establishment. Targeted irrigation and, in extreme heat episodes, measures such as shading or intercropping can help reduce canopy temperatures and protect yields.

5. Conclusions

This study highlights the projected response of winter wheat in Thessaly to future climatic conditions. The tillering stage (GS2) is identified as the most vulnerable phase, followed by grain filling (GS3), emphasizing the need for targeted water management during these critical periods. Analysis indicates that a large part of Thessaly will experience significant water stress, particularly during GS2, while early growth (GS1) is comparatively less affected. Adaptation strategies in the region include adjusting sowing dates to avoid peak stress periods, applying targeted irrigation where water deficits are highest, and selecting heat- and drought-tolerant wheat varieties to sustain productivity under warmer and drier future conditions.

Acknowledgment

This study is funded by the project “Crop and livestock stress under climate change scenarios (AGRO FUTURE CLIMATE STRESS)”, which is carried out within the framework of the National Recovery and Resilience Plan Greece 2.0, funded by the European Union – NextGenerationEU (Implementation body: HFRI).

6. References

Alghory, A., & Yazar, A. (2019). Impact of water deficit on wheat production: A review. Agricultural Water Management, 213, 152-160.

ELSTAT. 2023. Cereals for grain and olive trees. Areas and production, by Region and Regional Unity. Annual Agricultural Statistical Survey. Hellenic Statistical Authority. https://www.statistics.gr/en/statistics/-/publication/SPG06/-

Eurostat. (2023). Wheat production statistics for Greece (2013–2022). Retrieved from

García-Tejero, I. F., Hernández, A., Padilla-Díaz, C. M., Diaz-Espejo, A., & Fernández, J. E. (2017). Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. Agricultural Water Management, 188, 50–60.

Georgopoulou, E., Gakis, N., Kapetanakis, D., Voloudakis, D., Markaki, M., Sarafidis, Y., Lalas, D.P., Laliotis, G.P., Akamati, K., Bizelis, I., et al., 2024. Climate change risks for the Mediterranean agri-food sector: The case of Greece. Agriculture 14, 770.

Hong, M., Sang-Hyun, L., Seung-Jae, L., Jin-Yong, C., 2021. Application of high-resolution meteorological data from NCAM-WRF to characterize agricultural drought in small scale farmlands based on soil moisture deficit. Agric. Water Manag. 243, 106494. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106494.

Idso, S. B., Jackson, R. D., & Reginato, R. J. (1977). A method for determination of water stress in plants by infrared thermometry. Agricultural Meteorology, 17(1), 51–58.

Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agricultural Meteorology, 24(1), 45–55.

Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Research, 17(4), 1133–1138.

Katsoulas. N.. Kittas. C. & Baille. A.. 2001. *Evaluation of greenhouse microclimate and crop transpiration models*. *Agricultural and Forest Meteorology*. 107(1). 1–17.

Kumari, A., Rana, K., Mishra, R. C., et al. (2024). Optimizing wheat supplementary irrigation: Integrating soil stress and crop water stress index for smart scheduling. Agricultural Water Management, 305, Article 109104.

Wakchaure, G. C., Patel, B., & Singh, A. (2016). Effect of drought stress on growth and physiological parameters of wheat. International Journal of Plant Sciences, 11(2), 56-63.

Xu, Z., Han, Y., Tam, CY. et al. Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100). (2021). Sci Data 8, 293

Zhang. Q.. Yang. X.. Liu. C.. Yang. N.. Yu. G.. Zhang. Z.. Chen. Y.. Yao. Y.. & Hu. X.. 2024. *Monitoring soil moisture in winter wheat with crop water stress index based on canopy-air temperature time lag effect*. *International Journal of Biometeorology*. 68(4). 647–659.

54. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΥΘΜΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΜΙΑΣ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΕΜΕΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Αναστασία Δενιζοπούλου, Αναστασία Μαρτζοπούλου, Βασίλειος Ντότας, Βασίλειος Φράγκος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης, Τμήμα Γεωπονίας, e-mail: adeniz@agro.auth.gr

Περίληψη

Μία από τις πιο πολυσυζητημένες πτυχές των σύγχρονων πρακτικών κτηνοτροφίας είναι η εκπομπή αερίων που σχετίζονται με το περιβάλλον και την κλιματική αλλαγή, επειδή τα κτηνοτροφικά κτίρια αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών αερίων, ιδιαίτερα όπως της αμμωνίας, του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου. Η αμμωνία είναι ένας ατμοσφαιρικός ρύπος υπεύθυνος για τον ευτροφισμό και την οξίνιση του εδάφους, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο είναι αέρια του θερμοκηπίου, τα οποία συμβάλλουν στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας. Η ποσοτικοποίηση των αερίων εκπομπών από φυσικά αεριζόμενα κτηνοτροφικά κτίρια είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο έργο και απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εκτίμηση του ρυθμού αερισμού και στη συνέχεια η ποσοτικοποίηση των αερίων εκπομπών. Ο ρυθμός με τον οποίο ο αέρας εισέρχεται και εξέρχεται από μία κτηνοτροφική κατασκευή θεωρείται μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους του ελέγχου του κλίματος, στο εσωτερικό των κτηνοτροφικών κατασκευών. Τα συστήματα φυσικού αερισμού όταν χρησιμοποιούνται σε κτηνοτροφικά κτίρια έχουν ως κύρια δυσκολία την έλλειψη ακριβών, συνεχών και άμεσων τεχνικών μέτρησης του ρυθμού αερισμού, κρίσιμου για τον έλεγχο των εσωτερικών παραμέτρων της ποιότητας του αέρα. Αξιόπιστα μέσα για την εκτίμηση του ρυθμού αερισμού μιας κτηνοτροφικής αποτελούν οι έμμεσες τεχνικές μέτρησης όπως μεταξύ άλλων το ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα, τα οποία παρέχουν ένα χρήσιμο εργαλείο για τη ροή του αέρα μέσω των κελυφών των κτηνοτροφικών κατασκευών. Η μέση τιμή του ρυθμού αερισμού σε φυσικά αεριζόμενο πτηνοτροφείο βιολογικής εκτροφής που διενεργήθηκε το πείραμα ήταν 5,48 m^3/h/πτηνό λίγο πιο πάνω από τους ρυθμούς αερισμού του εύρους άνεσης 0,1 - 4,8 m^3/h/πτηνό για πτηνοτροφεία ωοτόκων ορνίθων και με ένα εύρος τιμών του ρυθμού αερισμού να κυμαίνεται μεταξύ 1,54 -18,60 m^3/h/πτηνό. Η αύξηση του ρυθμού αερισμού έχει ως αποτέλεσμα την αποσυμφόρηση του εσωτερικού περιβάλλοντος της πτηνοτροφικής κατασκευής από ρύπους όπως η αμμωνία και το διοξείδιο του άνθρακα και προσπαθεί να διασφαλίσει βέλτιστες συνθήκες σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας.

Λέξεις κλειδιά: ρυθμός αερισμού, φυσικός αερισμός, αέριες εκπομπές ρύπων, βέλτιστες συνθήκες, κτηνοτροφικές κατασκευές

DETERMINATION OF THE VENTILATION RATE OF A LIVESTOCK BUILDING USING INDIRECT MEASUREMENT TECHNIQUE

A. Denizopoulou, A. Martzopoulou, V. Dotas, V. Fragos

1 Aristotle University of Thessaloniki, Department of Agriculture, Thessaloniki, e-mail: adeniz@agro.auth.gr

ABSTRACT

One of the most debated aspects of modern livestock farming practices is the emission of gases related to the environment and climate change, because livestock buildings are a significant source of gas emissions, particularly ammonia, carbon dioxide, and methane.

Ammonia is an atmospheric pollutant responsible for eutrophication and soil acidification, while carbon dioxide and methane are greenhouse gases, which contribute to global warming. Quantifying gas emissions from naturally ventilated livestock buildings is a particularly complex task, and a prerequisite is to estimate the ventilation rate and then quantify the gas emissions. The rate at which air enters and exits a livestock building is considered one of the most important parameters for climate control inside livestock buildings. The main difficulty with natural ventilation systems when used in livestock buildings is the lack of accurate, continuous, and direct techniques for measuring the ventilation rate, which is critical for controlling the internal parameters of air quality. Reliable means of estimating the ventilation rate of a livestock building are indirect measurement techniques such as carbon dioxide balance, which provide a useful tool for air flow through the shells of livestock buildings. The average ventilation rate in a naturally ventilated organic poultry house where the experiment was conducted was 5.48 m^3/h/bird, slightly above the ventilation rates in the comfort range of 0.1 - 4.8 m^3/h/bird for laying hen houses, with a range of ventilation rates between 1.54 -18.60 m^3/h/bird. The increase in ventilation rate results in the decongestion of the internal environment of the poultry house of pollutants such as ammonia and carbon dioxide, while ensuring optimal relative humidity and temperature conditions.

Keywords: ventilation rate, natural ventilation, gaseous emissions, optimal conditions, livestock buildings

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος κάθε παραγωγού ζωικού κεφαλαίου είναι να παρέχει ένα βέλτιστο περιβάλλον εντός του κτηνοτροφικού κτιρίου με σκοπό την μεγιστοποίηση της ευημερίας και της παραγωγικότητας των ζώων. Ο καλός και επαρκής αερισμός εντός της κτηνοτροφικής κατασκευής είναι βασικό στοιχείο προς την επίτευξη αυτού του στόχου. Οι περισσότεροι παραγωγοί κτηνοτροφικών προϊόντων γνωρίζουν τη σημασία και τα οφέλη ενός καλού συστήματος αερισμού για την απομάκρυνση της περίσσειας υγρασίας και θερμότητας και για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα του εσωτερικού περιβάλλοντος της κτηνοτροφικής κατασκευής με ελάχιστη ενεργειακή δαπάνη (Jones et al., 2015). Ο ποσοτικός προσδιορισμός των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων έλαβε μεγαλύτερη έμφαση τον 21ο αιώνα λόγω ανησυχιών που σχετίζονται με μεγάλες κτηνοτροφικές επιχειρήσεις σχετικά με τις προκαλούμενες οχλήσεις, τις περιβαλλοντικές και οικολογικές επιπτώσεις της αμμωνίας καθώς επίσης και τον πιθανό αντίκτυπο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η άμεση και συνεχής μέτρηση του αερισμού των κτηνοτροφικών κατασκευών εξακολουθεί να αποτελεί τεχνική πρόκληση, ειδικά εάν πρόκειται για φυσικά αεριζόμενες κτηνοτροφικές κατασκευές.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητα των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού καθώς και ο προσδιορισμός του ρυθμού αερισμού με την έμμεση τεχνική μέτρησης του ισοζυγίου του διοξειδίου του άνθρακα

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1.Ισοζύγιο Διοξειδίου του άνθρακα

Ο ρυθμός αερισμού υπολογίστηκε από το ισοζύγιο μάζας διοξειδίου του άνθρακα για την πτηνοτροφική κατασκευή και βασίστηκε σε εκτιμήσεις της παραγωγής CO2 από τα πουλερικά σύμφωνα με το ζωντανό σωματικό βάρος (van Ouwerkerk και Pedersen, 1994).

Ο ρυθμός αερισμού VR (Ventilation Rate) εντός του πτηνοτροφείου υπολογίστηκε

χρησιμοποιώντας τη έμμεση μέθοδο υπολογισμού του ισοζυγίου του διοξειδίου άνθρακα της ακόλουθης μορφής:

$$VR = \frac{V_{CO_2} \times 10^6}{Ce,_{CO_2} - Ci,_{CO_2}} \times \rho_{CO_2} \quad (1)$$

Όπου:

- VCO_2: ρυθμός παραγωγής CO_2 εντός του πτηνοτροφείου (m^3 h^{-1} $house^{-1}$),
- Ce,CO_2 και Ci,CO_2: οι εσωτερικές και εξωτερικές της κατασκευής συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα CO_2 στους 20 ° C (mg m^{-3}) και
- ρCO_2 : η πυκνότητα του διοξειδίου του άνθρακα CO_2 (1,977 kg m^{-3} στους 20 ° C).

Η συγκέντρωση του CO_2 σε εξωτερικούς χώρους ορίστηκε στα 380 ppm (686mg/m3) στους υπολογισμούς (Nimmermark, 2009).

Οι Van Ouwerkerk και Pedersen (1994), - όπως αναφέρεται στο CIGR 2002 - δήλωσαν ότι το αναπνευστικό πηλίκο (respiratory quotient - RQ) των ορνίθων αυγοπαραγωγής είναι 0,86 έως 0,92 (αντίστοιχα με τροφή υψηλής έως χαμηλής ποιότητας). Χρησιμοποιώντας μια έμμεση σχέση θερμιδομετρίας μεταξύ της συνολικής παραγωγής θερμότητας, της παραγωγής CO_2 και του αναπνευστικού πηλίκου καθώς επίσης και της προσαρμογής για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της θερμοκρασίας και της παραγωγής CO_2 από την κοπριά, η παραγωγή CO_2 μιας ωοτόκου όρνιθας θα μπορούσε να εκφραστεί ως εξής (Van Ouwerkerk και Pedersen, 1994):

$$V_{CO2} = \frac{0.0036 \times f_c \times THP \times N \times 273}{\left[\frac{16.18}{RQ} + 5.02\right] \times (T_i + 273)} \times K_{m,co2} \quad (2)$$

Όπου:

- THP : συνολική παραγωγή θερμότητας (Total Heat Production) (W hen^{-1}), f_c: συντελεστής διόρθωσης για την παραγωγή ημερήσιου CO_2,
- N: αριθμός ορνίθων στο πτηνοτροφείο,
- RQ: αναπνευστικό πηλίκο (Η τιμή του RQ επιλέχτηκε ως 0.86 στην τρέχουσα μελέτη για να αντικατοπτρίζει την υψηλή ποιότητα ζωοτροφής των κοτόπουλων (Van Ouwerkerk and Pedersen, 1994),
- Ti: εσωτερική θερμοκρασία αέρα (°C), και
- $K_{m,CO2}$: πολλαπλασιαστικός συντελεστής που αντιπροσωπεύει την αύξηση της παραγωγής
- CO_2 τόσο από την κοπριά όσο και από άλλες δραστηριότητες.

ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Στο σύστημα βαρύτητας (φυσικός αερισμός) μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράθυρα, ειδικά ανοίγματα ή σωλήνες για την κυκλοφορία του αέρα. Ο εισερχόμενος ψυχρός αέρας εκτοπίζει τον θερμό, τον φορτωμένο με υγρασία, αέρα, που ανεβαίνει μέσω των αεραγωγών ή διαμέσου των ανοιχτών παραθύρων. Οι αεραγωγοί πρέπει, επίσης, να εκτείνονται πολύ πάνω από την οροφή, για να δημιουργείται το απαραίτητο ρεύμα που θα απομακρύνει τον ζεστό υγρό αέρα. Αυτό το σύστημα αερισμού λειτουργεί ικανοποιητικά σε ορνιθώνες που διαθέτουν μόνωση και κατάλληλα προσαρμοσμένα ανοίγματα και παράθυρα.

Η μέτρηση των συγκεντρώσεων της αμμωνίας NH3 και του διοξειδίου του άνθρακα CO_2 έλαβαν χώρα σε ένα πτηνοτροφείο ορνίθων βιολογικής ωοπαραγωγής με φυσικό αερισμό και σύστημα εκτροφής σε δάπεδο με αχυροστρωμνή (ελεύθερος σταβλισμός σε στρωμνή),με την βοήθεια ειδικών αισθητήρων και την χρήση τεχνολογία ανοικτού κώδικα για τον υπολογισμό

του ρυθμού αερισμού με τη μέθοδο του ισοζυγίου του διοξειδίου του άνθρακα Επιχειρείται με αυτό τον τρόπο η μελέτη της αποτελεσματικότητα των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού καθώς και του ρυθμού αερισμού στη μείωση συσσώρευσης αέριων ρύπων, παραγόμενων από την πτηνοτροφική δραστηριότητα (Denizopoulou et al., 2019).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση του ρυθμού αερισμού με αυτές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες ωριαίες τιμές. Η μέση τιμή του ρυθμού αερισμού ήταν λίγο πιο πάνω από τους ρυθμούς αερισμού του εύρους άνεσης 0,1 - 4,8 m^3/h/πτηνό σε πτηνοτροφεία ωοτόκων ορνίθων. Ο υπολογισμός των ποσοστών αερισμού έδειξε ότι οι μέσοι ωριαίοι ρυθμοί αερισμού είναι συνήθως σε συμφωνία με τις συνιστώμενες ελάχιστες τιμές του ρυθμού αερισμού το χειμώνα, δηλαδή 0,18 m^3/ h/ kg (0,3 m^3/h/πτηνό) και 1,8 m^3 /h /kg (3,06 m^3/h/πτηνό) το καλοκαίρι (Polat, 2015). Ο αερισμός εξασφαλίζει ότι η κυκλοφορία του αέρα, το επίπεδο σκόνης, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και οι συγκεντρώσεις αέριων ρύπων διατηρούνται εντός ορίων, τα οποία δεν είναι επιβλαβή για τα πτηνά. Τα συστήματα αερισμού στα πτηνοτροφεία σχεδιάζονται έτσι ώστε η συγκέντρωση της αμμωνίας NH_3 να μην υπερβαίνει τα 20 ppm και η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα CO_2 να μην υπερβαίνει τα 3000 ppm και ώστε η μέση σχετική υγρασία που καταγράφεται εντός του πτηνοτροφείου κατά τη διάρκεια οποιωνδήποτε 48 ωρών, να μην υπερβαίνει το 70% όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι κάτω από 10 °C. Ο ρυθμός αερισμού πρέπει να παραμένει σε τέτοιο επίπεδο ώστε να μην ψύχει τα πουλιά, διατηρώντας παράλληλα ανά πάσα στιγμή επαρκείς αλλαγές αέρα. Ο μέγιστος ρυθμός αερισμού για ωοτόκα πτηνά 2 kg ζώντος βάρους είναι 9.000 m^3/h/1000 πτηνά (ήτοι 9 m^3/h/πτηνό) (Report S117, 2020).

Πίνακας 4.1: Περιγραφικά στατιστικά των ολικών μέσων ωριαίων τιμών των υπό εξέταση παραμέτρων

Παράμετρος	**Mean**	**Standard deviation**	**Minimum**	**Maximum**
C_{NH3}, ppm	19,09	8,14	5,69	41,59
C_{CO2}, ppm	814,41	146,15	480,83	1391,42
Tin, ºC	15,63	3,27	8,70	23.40
RHin %	47,14	5,53	39,60	62,30
VR, m^3/h/hen	5,48	2,91	1,54	18,6

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέση τιμή του ρυθμού αερισμού υπολογίστηκε με την μέθοδο του ισοζυγίου του διοξειδίου του άνθρακα CO_2 και έδωσε μέση τιμή 5,48± 2,91 m^3/h/πτηνό με ένα εύρος τιμών του ρυθμού αερισμού να κυμαίνεται μεταξύ 1,54 -18,60 m^3/h/πτηνό.

Παρατηρήθηκε ότι η υπολογισμένη μέση τιμή του ρυθμού αερισμού με βάση την έμμεση μέθοδο υπολογισμού του ισοζυγίου CO_2 σε ένα πτηνοτροφείο βιολογικής εκτροφής ωοτόκων ορνίθων είναι μέσα στα αποδεκτά όρια σύμφωνα με την βιβλιογραφική επισκόπηση γεγονός που καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο αξιόπιστη.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Denizopoulou, A., Karnoutsos, P., Martzopoulou, A., Giantsis, I., Andreopoulou, Z., Kotsopoulos, T., Fragos, V. & Nikita-Martzopoulou, C. (2019). Monitoring pollution level and microclimate conditions in a naturally ventilated livestock building using open-source device. *Journal of environmental protection and ecology*, 20(1), 1-11.

Jones, D. D., Friday, W. H., & DeForest, S. S. (2015). Natural Ventilation for Livestock Housing. *Historical Documents of the Purdue Cooperative Extension Service. Paper 1082.*

Nimmermark, S., Lund, V., Gustafsson, G., & Eduard, W. (2009). Ammonia, dust and bacteria in welfare-oriented systems for laying hens**.** *Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 16*(1), 103-113.

Polat, H. E. (2015). Effects of poultry building design on indoor air quality in humid climates. *JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences, 25*(5).

Van Ouverkerk, E. N. J., & Pedersen, S. (1994). *Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings. In Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock building. In: Proceedings of the XII World Congress on Agricultural Engineering*, Milano, Italy, pp. 516- 529.

Technical Report S117 - *Minimum Specification for the Housing of Organic Animal. Department of Agriculture, Food and the Marine, May 2020*. Available at https://www.agriculture.gov.ie/media/migration/farmingschemesandpayments/tamsx2ffarmbuildings/farmbuildingspecifications/pdfversions/1S117May2020290520.pdf

55. ADVANCING DIGITAL SUSTAINABILITY IN LIVESTOCK FARMING: GREEK PARTNERSHIP TO DIGI4LIVE PROJECT

V. Anestis[1], S. Vouraki[2], A. Arsenos[3], S. Georgiou[1], G. Arsenos[4], T. Bartzanas[1] & J. Niemi[5]

[1] *Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece*
[2] *University of Ioannina, Department of Agriculture, Kostakioi, 47100 Arta, Greece*
[3] *National and Kapodistrian University of Athens, Department of Digital Industry Technologies, Euripus Campus, 34400 Euboea, Greece*
[4] *Aristotle University, School of Veterinary Medicine, University Campus, 54124 Thessaloniki, Greece 5 Natural Resources Institute, Latokartanonkaari, FI-00790 Helsinki, Finland *vanestis@aua.gr*

ABSTRACT

Digi4Live is an EU-funded project aiming to accelerate the digital transformation of the livestock sector through improved data collection, integration, and exploitation. Engaging over 1,000 stakeholders, including farmers, researchers, technology providers, and policymakers, it promotes co-creation of digital solutions tailored to diverse livestock systems across Europe. The Agricultural University of Athens (AUA) plays a central role in multiple work packages. AUA led the mapping of 378 digital tools and datasets, drawing on literature reviews, interviews in nine countries, and a stakeholder webinar to identify barriers to data interoperability, standardization, and adoption. AUA also leads the development of a unified methodology, supported by AI, to assess stakeholder needs and grassroots innovations by integrating tool mapping, policy insights, and user feedback. In Case Study E, AUA focuses on environmental assessment of pig and poultry systems using Life Cycle Assessment (LCA) methods aligned with the EU Product Environmental Footprint (PEF). The team is developing user-friendly templates and a prototype LCA tool to improve data consistency, reduce complexity of conducting LCAs and facilitate decision-making across the value chain. AUA also contributes to assessing the environmental impact of digital technologies examined in the project in livestock systems.

Keywords: Digi4Live, digitisation, livestock, environmental performance, life cycle assessment

1. INTRODUCTION

The digital transformation of livestock sector is a critical priority of the European Green Deal and the Farm to Fork strategy, both of which emphasize the transition to more sustainable, resilient, and resource-efficient food systems. Livestock farming, while essential for global food security and rural livelihoods, is also associated with significant environmental impacts, including greenhouse gas emissions, land use, and water consumption. Digital technologies – such as sensors, artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT) platforms, and data analytics – are increasingly recognized as essential tools for addressing these sustainability challenges while enhancing productivity and animal welfare (Garske et al., 2021).

Despite the potential of these technologies, several barriers hinder widespread adoption of digital solutions across the livestock value chain. These include the fragmentation of data sources, lack of interoperability among digital tools, and varying levels of digital maturity among farms and regions (Bellon-Maurel et al., 2023; Farina et al., 2025). Data silos and proprietary systems limit the ability to integrate information across breeding, feeding, health

monitoring, and logistics, thus constraining innovation and evidence-based decision-making. Moreover, farmers often face challenges related to digital literacy, economic feasibility, and trust in data governance models (Lepore et al., 2025).

To address these challenges, **Digi4Live** – a Horizon Europe Coordination and Support Action (CSA) – brings together a transdisciplinary consortium of stakeholders from research, industry, and policy. The project aims to co-create, validate, and disseminate digital solutions tailored to the needs of livestock stakeholders across Europe. A key ambition of Digi4Live is to foster a common data governance framework that enhances interoperability, transparency, and equitable data sharing throughout the livestock ecosystem. By aligning with EU policy objectives and engaging stakeholders through Living Labs, Digi4Live supports a participatory and inclusive digital transition. Digi4Live also contributes to establishing a harmonised European digital infrastructure for livestock, helping to bridge the digital gaps and enable scalable, cross-border innovation.

2. PROJECT OBJECTIVES AND STRUCTURE

Digi4Live brings together a strong network of 16 partners from 11 European countries, combining expertise of universities, research institutes, industry actors, public authorities, and technology providers. The project is organized into 11 collaborative Work Packages, each focusing on a key aspect of the digital transition in livestock; ranging from ecosystem analysis and stakeholder engagement to AI tool development, policy integration, and environmental assessment. At the heart of the project is a commitment to inclusivity and co-creation. Digi4Live follows a multi-actor approach, engaging more than 1,000 stakeholders from across the livestock sector. These include farmers, researchers, veterinarians, digital solution developers, policy-makers, and representatives from civil society. Their insights and experiences help shape the direction of the project, ensuring that the tools and frameworks developed are relevant, usable, and impactful.

A unique feature of Digi4Live is its network of six thematic Case Study (CS) Hubs (A–F). Each hub addresses a specific area of digital innovation in the livestock sector:

- **Case-study A:** Animal health and welfare,
- **Case Study B**: Resilience and transparency,
- **Case Study C**: AI in sensor-based animal tracking,
- **Case Study D**: Integration of technologies including animal breeding,
- **Case Study E**: Environmental footprint assessment, using LCA and
- **Case Study F**: Policy monitoring, impact and administration.

These case studies act as testbeds where solutions are developed in collaboration with stakeholders and refined through real-world application. This structure not only helps the project stay grounded in practice but also ensures that innovations can be scaled across different European regions and livestock systems.

3. CONTRIBUTION OF AUA TO DIGI4LIVE

The Agricultural University of Athens (AUA) plays a central and dynamic role in Digi4Live, contributing its expertise across several core areas of the project. From mapping the digital ecosystem to leading advanced environmental assessments, AUA’s involvement helps ensure that the project outcomes are grounded in scientific rigor, policy relevance, and real-world applicability.

3.1.Mapping the digital landscape of livestock innovation

One of AUA's key contributions is the development of a structured inventory of 378 digital tools, datasets, applications, and projects relevant to the livestock sector. This mapping effort was more than just a cataloguing exercise. It aimed to offer a comprehensive picture of the digital maturity of the livestock sector across Europe. The work involved extensive desk research, interviews with stakeholders in nine countries, and a dedicated webinar that brought together diverse voices from the field.

Through this process, AUA helped identify not only what tools that exist, but also where gaps lie – especially around issues such as interoperability, data ownership, and uneven uptake. These insights now support other parts of the project, particularly in designing solutions that are responsive to on-the-ground challenges.

3.2.Developing an AI-Enabled approach to understand stakeholder needs

AUA has been instrumental in creating a methodology to better understand the needs of stakeholders, the potential of grassroots innovations, and the policy landscape surrounding digital agriculture. What makes this approach distinctive is its use of AI tools, particularly Large Language Models (LLMs), to analyze a wide range of qualitative data – such as interviews, workshop outcomes, and open-ended survey responses.

By combining data from the digital mapping exercise with stakeholder insights and regulatory reviews, AUA developed an integrated framework that identifies common needs, barriers, and opportunities across countries and farming systems. This methodology helps translate complex, diverse data into actionable intelligence, supporting the co-design of digital solutions that are relevant, scalable, and aligned with EU priorities.

3.3.Leading environmental assessments in livestock farming

AUA leads CS-E, which focuses on evaluating the environmental footprint of intensive pig and poultry production systems – two of the most impactful livestock sectors in terms of emissions and resource use. AUA is developing a user-friendly Life Cycle Assessment (LCA) tool that simplifies the process of collecting, organizing, and analyzing environmental data directly from farms.

Importantly, this tool is being designed in line with the EU Product Environmental Footprint (PEF) framework, ensuring that it supports both farm-level decision-making and compliance with broader sustainability standards. Alongside the tool, AUA is also creating web-based data templates to help streamline primary data collection.

Through workshops, testing phases, and farmer feedback, AUA ensures that the tool is not only scientifically robust but also practical and usable by non-experts. By making environmental data more accessible and actionable, AUA helps livestock producers and advisors identify improvement strategies and track progress toward sustainability goals.

4. EXPECTED IMPACT

The contributions of AUA are expected to generate lasting value both within the Digi4Live project and across the wider European livestock sector. By leading the development of an accessible, scientifically robust environmental assessment toolkit, AUA enables the

benchmarking of digital innovations based on their actual environmental performance. This is critical in a context where new technologies are often adopted without clear evidence of their ecological impact. Through its LCA work, aligned with the EU's PEF methodology, AUA supports the transition to more transparent and sustainable livestock production practices.

For farmers and advisors, the practical tools developed by AUA will reduce the complexity of conducting environmental assessments, lower data entry burdens, and improve access to actionable sustainability indicators. This can empower end-users to make better-informed decisions and adopt digital technologies that support environmental goals. For policy-makers and regulatory bodies, AUA's work contributes to a clearer picture of how digital transformation aligns with EU sustainability targets, such as those outlined in the Green Deal and the Farm to Fork Strategy.

Beyond tool development, AUA plays a strategic coordination role across case studies and thematic panels. Its input ensures that environmental concerns are consistently integrated into the co-design and validation processes of digital solutions. By doing so, AUA contributes to the harmonisation of data frameworks, promotes interoperability across national contexts, and supports the creation of shared standards that can scale across Europe. Ultimately, AUA's work strengthens the evidence base for sustainable innovation and anchors environmental integrity at the heart of the digital livestock transition.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the Digi4Live project (101134866) that is funded by the European Union.

6. REFERENCES

Bellon-Maurel, V., Piot-Lepetit, I., Lachia, N., Llorens, J., Clérice, C., & Rousset, S., 2023. *Digital agriculture in Europe and in France: which organisations can boost adoption levels?* Crop and Pasture Science, 74(4), 353–364. https://doi.org/10.1071/CP22065.

Farina, G., Kocian, A., Brunori, G., Chessa, S., & Lai, M.B., 2025. *Interoperable traceability in agrifood supply chains: Enhancing transport systems through IoT sensor data, blockchain, and dataspace*. Sensors, 25(11), 3419. https://doi.org/10.3390/s25113419.

Garske, B., Bau, A., & Ekardt, F., 2021. Digitalization and AI in European agriculture: *A strategy for achieving climate and biodiversity targets?* Sustainability, 13(9), 4652. https://doi.org/10.3390/su13094652.

Lepore, F., Ortolani, L., Iliopoulos, C., Vergamini, D., & Brunori, G, 2025. *Assessing costs and benefits of agricultural digitalisation: the case of data collection support tools in agricultural-pastoral farms*. Italian Review of Agricultural Economics (REA). https://doi.org/10.36253/rea-15851.

56. REAL-TIME MEASUREMENT OF GREENHOUSE AND AMMONIA GAS EMISSIONS FROM POULTRY HOUSES

A. Maragou, V. Anestis & T. Bartzanas

Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Iera Odos 75, 11855, Athens, Greece, armaragou@aua.gr

Abstract

Livestock production plays a major role in climate change, contributing about 7Gt CO_2-eq per year - roughly 14.5% of human induced GHG emissions. Poultry alone, including meat and egg production, accounts for around 8% of this total. This study explores how real-time monitoring technologies can help measure greenhouse gas (GHG) and ammonia (NH_3) emissions from poultry houses, focusing on both layer and broiler facilities. Among the tools used to track these emissions, semiconductor metal oxide (SMO) gas sensors have become popular for their ability to detect gases through redox chemical reactions on their surfaces. Electrochemical gas sensors are also widely used, relying on the changes in electrical signals due to chemical reactions when they come into contact with certain gases. These sensor technologies are already being tested in many poultry farms and are promising for offering continuous, accurate, affordable and portable solutions for measuring GHG and NH_3 emissions. This study highlights the importance of developing clear, standardized real-time sensor technologies to measure GHG and NH_3 emissions, which is essential for mitigating the environmental impact of poultry production systems.

Keywords: GHG and NH_3 emissions in poultry systems, real-time measurement sensors, semiconductor metal oxide (SMO) gas sensors, Electrochemical gas sensors

1. INTRODUCTION

The global population is projected to reach 9.7 billion by 2050 (UN, United Nations 2022), which is expected to lead to a further increase in livestock products (meat, milk and eggs) for human nutrition. According to FAO, these needs are estimated to be doubled by 2050, and specifically meat and milk demands are expected to increase over 70% and 50%, respectively (UN, Department of Economic and Social Affairs,2019., Alexandratos and Bruinsma, 2012). Livestock is considered a significant contributor to climate change with emissions estimated at 7.1 Gt CO_2-eq per year, representing 14.5% of human induced GHG emissions (Gerber et al., 2013). Beef and cattle milk production account for the majority of emissions, respectively contributing 41% and 20% of the sector's emissions. While pig meat and poultry meat and eggs contribute respectively 9% and 8% to the sector's emissions. The strong projected growth of this production will result in higher emission shares and volumes over time. Feed production and processing, and enteric fermentation from ruminants are the two main sources of emissions, representing 45% and 39% or 2.8 Gt CO_2-eq of sector's emissions, respectively. While manure storage and handling represent 10% (Gerber et al., 2013).

It has become crucial to understand NH_3's and GHG's origin and control their concentrations in animal facilities by sampling and measurement techniques, including suitable GAS sensors for NH_3 and GHG measuring, instruments and procedures.

Obtaining precise gas pollutants' emission from animal building or facilities, the measurement of the concentration difference between the outgoing and incoming air is indispensable along with the air exchange rate and suitable measurement techniques must be adopted (Pecen and Zabloudilova., 2005). Methods of measuring NH_3 and GHG concentrations include electrochemical systems, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, non-dispersive infrared (NDIR) absorption, deep ultraviolet (DUV), differential optical absorption spectroscopy (DOAS), photoacoustic spectroscopy (PAS), gas tubes, gas chromatography (GC), and metal oxide semiconductors (MOS), (Ma et al., 2024, Lee et al., 2023, Li et al., 2023). Detection of ammonia and GHG with instruments under field conditions has been cumbersome (Wheeler et al., 2000). On the other hand, the electrochemical method has been frequently used in industrial applications and research field measurements, as it allows real-time and specific gas quantitative monitoring (Lee et al., 2023). Also, Semiconductor metal oxide (SMO) gas sensors are the most investigated group of gas sensors that are being increasingly used for gas sensing due to their size dependent properties (Dey et al., 2018).

The objective of this research is to review novel, portable, accurate and low-cost measurement techniques to evaluate GHG and NH_3 emissions focusing on the real time monitoring of emissions from Layers and Broilers breeding facilities to further enlighten future trends in monitoring technologies.

2. MATERIALS AND METHODS

Search in Google Scholar, Web of Science™ and Scopus databases was conducted focusing on emission measurement studies in poultry farms. The selected studies were oriented mostly towards real-time measurement technologies like semiconductor metal oxide (SMO) gas sensors and electrochemical gas sensors used in poultry facilities (Gates et al., 2005, Pecen et al., 2005).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1.Poultry Production and Productivity

The past two decades have seen a steady upward trend in world agricultural production to meet expanding demand, with primary crops production growing by 54% between 2000 and 2021, meat production growing by 53% and milk production by 58% (FAO., 2022). Besides that, there is a trend in shift from red to white meat, especially towards poultry. Thus, to meet the demand, poultry farming grows constantly. The average annual growth rate for poultry meat over the last 50 years was 5% while it was 1.5% for beef, 3.1% for pork and 1.7% for small ruminants (Alexandratos and Bruinsma, 2012), and its share in world meat production increased from 15% three decades ago to 30% currently (FAO, 2006a.; Gerber et al., 2020).

Technological changes in production practices have been one of the main drivers of the sector's growth. The transition from free-ranging flocks to confined poultry operations dynamically increased the number of birds per farmer and led to a significant increase in productivity (Mottet and Tempio., 2017). The intensification of poultry sector has led to more efficient operations through the shift to larger, specialized and more integrated facilities and through improvements in the use of animal genetics, optimized nutrition and new production technologies, deeming poultry as one of the fastest growing agricultural sub-sectors.

3.2.GHG emissions in poultry

3.2.1. Carbon dioxide (CO_2) emissions

Poultry contributes to climate change by emitting GHG either directly (from animal breeding and manure management) or indirectly (from feed-production activities or conversion of forest into croplands). The sources of GHGs emissions derive from feed production, LUC (Land Use Change) and the energy use during the operations in and out of the farms (international trade, slaughterhouse, feed production, hatchery). Energy combustion is an important source of GHG in poultry production, both for eggs and meat production required for the ventilation, feeding, lighting, egg collection, sorting, heating, and operation of the mechanical equipment (Zisis et al., 2023). On laying hen farms, about 29% of GHG emissions were the result of electricity use while the pullet and broiler farms had only 3% emissions from electricity use (Xin et al., 2011, Broucek et al., 2015).

3.2.2. Nitrous oxide (N_2O) emissions

The non-ruminant sector is a minor N_2O emissions contributor compared with ruminant N_2O emissions. However, it is reported that poultry industry is the largest direct N_2O producer of the non-ruminant livestock industries, contributing 2.3 Gg/year or 92.8% of the total non-ruminant N_2O emissions calculated with IPCC methodology in South Africa (Toit et al., 2013). Nitrous oxide is primarily produced through nitrification and denitrification processes in nitrogen containing substances such as agricultural soils and via digestion of organic matter in manure storage, where both aerobic and anaerobic conditions can exist (Jan Broucek, 2018). Nitrifiers and denitrifiers microorganisms are the principal producers of the gas (Oenema et al., 2005). Nitrification occurs under aerobic conditions where ammonia oxidizes to hydroxylamine (NH2OH) catalyzed by ammonia monooxygenase (AMO). Thereafter, NH_2OH is oxidized to nitrite (NO_2^-) catalyzed by hydroxylamine oxidoreductase (HAO), then nitrite is converted to nitrate (NO_3^-), with N_2O as a by-product. Also, nitrifiers reduce nitrite (NO_2^-) via N_2O to dinitrogen (N_2). In addition, during nitrification ammonia-oxidizing bacteria, can lead to the production of N_2O (Jan Broucek 2018, Oenema et al., 2005). Denitrification is a series of microbe-mediated reactions of the natural microbial process and is an essential part of the nitrogen cycle. This anaerobic process is the stepwise reduction of nitrate (NO_3^-) to nitrogen
(N) via nitrite (NO_2^-), nitric oxide (NO), and N_2O (Jan Broucek 2018). The rate of formation and emission of N_2O varies and is affected by manure porosity, pH, temperature, moisture, amount of solids, N, carbon C and protein content of the manure substrate (Jan Broucek 2018).

3.2.3 Methane (CH_4) emissions

Non-ruminant animals produce some CH_4, although not as much as ruminants due to the limitation of enteric fermentation occurrence in the post-gastric compartment such as caecum and large intestines (Wang and Huang, 2005). Due to the digestive physiology, poultry are monogastric and produce only slightly amounts of CH_4. However, CH_4 can be generated in animal housing, in manure storage facilities and during manure application, by fermentation of organic matter (Broucek and Cermak, 2015). In addition, the type of litter, moisture and temperature affect the emissions and concentrations of gases, for example in a biological production system, excreta in piles are composted, which increases aeration and reduces anaerobic CH_4 production (Zisis et al., 2023).

3.3. GHG and NH_3 emissions measurement methods

3.3.1 Function mechanism of gas sensing technology

It has become crucial to understand NH_3's and GHG's origin and control their concentrations in animal facilities by sampling and measurement techniques, including suitable sensors for NH_3 and GHG measuring, instruments and procedures. Obtaining precise gas pollutants' emission from animal building or facilities, the measurement of the concentration difference between the outgoing and incoming air is indispensable along with the air exchange rate and suitable measurement techniques must be adopted (Pecen and Zabloudilova., 2005).

Methods of measuring NH_3 and GHG concentrations include electrochemical systems, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, non-dispersive infrared (NDIR) absorption, deep ultraviolet (DUV), differential optical absorption spectroscopy (DOAS), photoacoustic spectroscopy (PAS), gas tubes, gas chromatography (GC), and metal oxide semiconductors (MOS), (Ma et al., 2024, Lee et al., 2023, Li et al., 2023). Detection of ammonia and GHG with instruments under field conditions has been cumbersome (Wheeler et al., 2000). On the other hand, the electrochemical method has been frequently used in industrial applications and research field measurements, as it allows real-time and specific gas quantitative monitoring (Lee et al., 2023). The measurement accuracies of FTIR, NDIR, DOAS, and GC are high, although these methods are limited to the laboratory and complicated for field measurements (Gautam et al., 2021).

Over the past decades, many types of gas sensors have been developed based on different sensing materials and methods. Accordingly, gas sensors are classified as catalytic combustion, electrochemical, thermal conductive, infrared absorption, paramagnetic, solid electrolyte and metal oxide semiconductor sensors (Li et al., 2023, Gautam et al., 2021, Dey et al., 2018).

Liu et al. has classified the gas sensors based on their sensing methods and divided them to two groups:

(a) methods based on electrical variation with different materials, like Metal Oxide Semiconductor, Polymer, Carbon Nanotubes and Moisture Absorbing Material.

(b) different methods based on other kinds of variation, like Optic Methods, Acoustic Methods, Gas Chromatograph and Calorimetric Methods.

Materials like semiconductor metal oxides (SMO), carbon nanotubes and polymers are able to sense gas based on variation in electrical properties. The other variations are optic, acoustic, gas chromatographic and calorimetric (Dey et al., 2018, Gautam et al., 2021).

Semiconductor metal oxide (SMO) gas sensors are the most investigated group of gas sensors that are being increasingly used for gas sensing due to their size dependent properties (Dey et al., 2018). Sensing technology based on metal oxide semiconductors are mainly applied to detect target gases through redox reactions between the target gases and the oxide surface. This process includes two steps:

1. redox reactions, during which O^- distributed on the surface of the materials would react with molecules of target gases, leading to an electronic variation of the oxide surface, and then
2. this variation is transduced into an electrical resistance variation of the sensors.

The resistance variation could be detected by measuring the change of capacitance, work function, mass, optical characteristics or reaction energy (Liu et al., 2012).

In a similar way, it is described the function of metal oxide semiconductor sensor (MOS) that applies the principle of electron attraction when a heated surface of the sensor absorbs oxygen. The absorption causes oxygen to become an anion with increased resistance and, consequently, reduces the current through the sensor. By contrast, the target gas (reducing gas), such as NH_3, reacts with oxygen. This lowers the sensor resistance so that the resistance falls and the current through the sensor increases. The resistance in a MOS sensor is proportional to the target gas concentration, which is thus calculated. The MOS sensor is advantageous in terms of automatic measurement, simplicity, short response, low production costs, small size, and long lifespan. However, the drawback of these sensors is their sensitivity to external environmental factors, such as temperature and humidity (Lee et al., 2023, Pecen and Zabloudilova., 2005).

Similarly, Dey et al. describes the gas sensing mechanism of SMO sensors that involves two major functions: receptor and transducer.

- The receptor function involves recognition of a target gas in gas - solid interface, which includes electronic change in the surface of the metal oxides.
- While transducer function involves transduction of the surface phenomenon into an electrical resistance change in the sensors (Dey et al., 2018).

The gas detection in SMO gas sensors is related to ionosorbed surface oxygen and target analyte gas. There is a shift in the state of equilibrium of the surface oxygen reaction due to the presence of target analyte gas. The resulting change in chemisorbed oxygen changes the conductivity of SMO materials. This is called transducer function (Dey et al., 2018, Gautam et al., 2021).

Numerous industrial sensors incorporate electrochemical principles for sensing the concentration levels of NH_3 and GHGs. Electrochemical sensors use electrochemical measuring transducers to measure the partial pressure of the gas under atmospheric conditions. The surrounding air being monitored diffuses through the liquid electrolyte in the sensor via the membrane, where the current inflow is used to determine the gas concentration (Lee et al., 2023). Furthermore, electrochemical gas sensors typically use the changes in electrode signal (such as current, conductance or potential changes) resulting from chemical reactions involving the gas being measured inside to deduce the gas concentration (Li et al., 2023). Additionally, Gautam et al., elaborate the function of electrochemical sensors that permit the diffusion of gases through a membrane to the working electrode where oxidation or reduction of the gases takes place (Gautam et al., 2021).

3.3.2. Applied sensor-based measurement methods on poultry farms

In a research it is compared handheld instrumentation capable of continuous and reliable ammonia sampling and measuring under three different (sites and) situations, where pull tube and passive tube, were evaluated in comparison to an electrochemical sensor (Drager Polytron 2) that continuously monitored ammonia level. The electrochemical sensor has a minimum detection range of 0-300 ppm NH_3 concentration and a precision of ± 3% of full scale, which was ± 9 ppm during this study. In this analysis they showed the best correlation between electrochemical and passive tubes (0.56), with pull and passive being only 0.16 and electrochemical and pull tubes having a negative correlation, concluding that electrochemical sensor (Drager Polytron 2) was successful in determining continuous and reliable ammonia

level at a reasonable cost for research purposes (Wheeler et al., 2000).

In another laboratory research NH_3 concentration was measured with two different types of sensors (PHOTO ACOUSTICS analyzer INNOVA and SOLID STATE sensor SP-53) observing a small difference between the output data of these sensors. The solid state gas sensor relies on semiconductor technology and has several advantages like simplicity, quick response, low price, low production costs and long life. On the other hand, there are some drawbacks like their strong dependence on surrounding conditions, especially temperature and humidity. The assessment showed that the accuracy of the INNOVA is better than the SP-53 gas sensors and INNOVA sensitivity is approximately ten times higher than the SP-53, despite that in all the examined cases the decrease of ammonia emissions was found out with SP-53 gas sensor (Pecen et al., 2005).

An innovative, low-cost, rugged, and reliable portable measurement system for determining CO_2 and NH_3 Emission Rate (ER) from mechanically ventilated poultry facilities has been used for 2.5 years in more than 24 broiler and layer houses. Emission calculation consists of determining the level of pollutant being discharged from the poultry house multiplied by the Ventilation Rate (VR) of air discharged from the house. The VR of a building is a critical measurement for determining Emission Rate of a building. The technique adopted in this project was to continuously measure and record the building static pressure differential and the operating status (on-off) of each of the fans. In this system evaluation, a chemiluminescence NH_3 analyzer was used for comparison, showing very reasonable agreement between the 2 measurement systems (Gates et al., 2005).

A study was conducted to measure ammonia emissions from broiler houses over a 1-year cycle. Ammonia levels of air exhausted from the buildings were determined by portable electrochemical sensors. Were detected wide variations in ammonia emissions among houses, ages of birds, and flocks showing consistency with the results of a similar measurement system of another project. The study underlines that in the future poultry producers may need to address ammonia emissions when adopting best management practices for their operations (Pescatore et al., 2005).

4. CONCLUSION

It is essential to understand NH_3's and GHG's origin and control their concentrations in animal facilities by sampling and measurement techniques, including suitable GAS sensors for NH_3 and GHG measuring, instruments and procedures. The electrochemical method has been frequently used in industrial applications and research field measurements, as it allows real-time and specific gas quantitative monitoring. Also, Semiconductor metal oxide (SMO) gas sensors are the most investigated group of gas sensors that are being increasingly used for gas sensing due to their size dependent properties. In many studies for broilers and layers farms, real-time gas sensors have been used successfully giving accurate values of GHG and NH_3 emissions with portable and affordable technologies. In this way, the importance of precise measurement technologies in mitigating the climate impact of poultry farms is highlighted.

5. REFERENCES

Alexandratos, N., and Bruinsma. J., 2012. *World Agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision.* AgEcon Search http://ageconsearch.umn.edu aesearch@umn.edu

Barsan, N., Koziej. D. and Weimar, U., 2007. *Metal oxide-based gas sensor research: How to?*

Sensors and Actuators B 121 (2007) 18–35

Bist, R., B. and Chai, L., 2022. *Advanced Strategies for Mitigating Particulate Matter Generations in Poultry Houses.* Appl. Sci. 2022, 12, 11323. https://doi.org/10.3390/app122211323.

Dey, A., 2018. *Semiconductor metal oxide gas sensors: A Review*. Materials Science & Engineering B 229 (2018) 206-217. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.036

Gates, R. S., Xin, H., Casey, K. D., Liang, Y., and Wheeler, E. F., 2005. *Method for Measuring Ammonia Emissions from Poultry Houses.* J. Appl. Poult. Res. 14:622–634.

Gautam, Y. K., Sharma, K., Tyagi, S., Ambedkar, A. K., Chaudhary, M., and Singh, B. P., 2025. *Nanostructured metal oxide semiconductor-based sensors for greenhouse gas detection: progress and challenges.* R. Soc. Open Sci. 8: 201324. https://royalsocietypublishing.org/

Gerber, P., Opio. C., and Steinfeld. H., 2020. *Poultry production and the environment – A Review*. Poultry in the 21st Century.

Lee, S. Y., Lee, I. B., and Kim. J. G., 2023. *Sensors and Instrumentation in Management and Online Control*. Technology for Environmentally Friendly Livestock Production. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19730-7_10

Li, T., Wang, C., Ji, W., Wang, Z., Shen, W., Feng, Y., Zhou, M., 2023. *Cutting-edge ammonia emissions monitoring technology for sustainable livestock and poultry breeding: A comprehensive review of the state of the art*. Journal of Cleaner Production 428 (2023) 139387. http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Ma, W., Ji, X., Ding, L., Yang, S. X., Guo, K., and Li, Q., 2024. *Automatic Monitoring Methods for Greenhouse and Hazardous Gases Emitted from Ruminant Production Systems: A Review*. Sensors 2024, 24, 4423. https://www.mdpi.com/journal/sensors

PECEN, J., and ZABLOUDILOVÁ. P., 2005. *The comparison of two types sensors for ammonia emission continual measurement*. RES. AGR. ENG., 51, 2005 (4): 112–118Pescatore, A. J., Casey, K. D., and Gates R. S., 2005. *Ammonia Emissions from Broiler Houses*. J. Appl. Poult. Res. 14:635–637

Wheeler, E. F., Weiss, R. W. J., and Weidenboerner, E., 2020. *Evaluation Of Instrumentation for Measuring Aerial Ammonia in Poultry Houses.* JAPR: Research Report, Poultry Science Association, Inc.

Zisis, F., Giamouri, E., Mitsiopoulou. C., Kamilaris, C., Mavrommatis, A., Christos Christodoulou. C., Pappas, A. C., and Tsiplakou E., 2023. *An Overview of Poultry Greenhouse Gas Emissions in the Mediterranean Area.* Sustainability 2023, 15, 1941. https://doi.org/10.3390/su15031941

57. ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΑΛΥΣΙΔΑ ΑΞΙΑΣ ΤΟΥ ΜΑΛΛΙΟΥ ΤΩΝ ΠΡΟΒΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Α. Αργυριάδου, Π. Μάστορας, Γ. Μπατίκας, Α. Ζέμου, Ε. Μπονόβα, Β. Φωτιάδου & Γ. Αρσένος

Εργαστήριο Ζωικής Παραγωγής & Προστασίας Περιβάλλοντος, Τμήμα Κτηνιατρικής, Σχολή Επιστημών Υγείας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Κ. 54124, Θεσσαλονίκη, arsenosg@vet.auth.gr

ABSTRACT

Sheep wool is a natural, recyclable fiber with unique characteristics. In the past, wool had considerable socio-economic importance for rural areas. Wool processing to produce fabric, tapestry and other artisanal wool products is part of the Greek tradition. However, the introduction of synthetic fibers resulted in the decline of sheep wool value chain. In Greece, about 7,000 tons of sheep wool is produced annually but is discarded as waste since there is lack of information regarding potential uses. The later has been a core topic of the research project entitled "Study of the Greek value chains and materials in artisanal production", that used a multidisciplinary approach to identify appropriate uses for Greek sheep wool. First, the quality of wool produced by different sheep breeds in Greece was assessed. Wool quality grading was based on fiber diameter and length, according to international standards. Furthermore, relevant economic data were collected to assess sustainability of artisanal wool production. During the initial phase of the project, sheep wool samples were collected from 14 adult sheep (5 male, 9 female) of Greek local sheep breeds, that were reared in 7 flocks. Samples were subjected to fiber quality assessment with an Optical Fiber Diameter Analyser (OFDA). Assessed quality parameters included fiber diameter (mean, standard deviation – SD, coefficient of variation – CVD), comfort factor, percentage of fibers finer than 15μm and staple length. Distribution histograms of fiber diameter were also considered. Results have shown that sheep wool samples were characterized by large mean fiber diameter (37.7±4.02 μm), respective mean SD (11.4±2.63 μm) and CV (30.0±5.09%), broad distribution of fiber diameter within sample, as well as low mean comfort factor (32.1±12.10%) and percentage of fibers finer than 15μm (0.7±0.46%). All above findings are indicative of very coarse wool. Furthermore, relatively long staples (77.3±18.55 mm) were observed, which is a desirable wool trait, as it facilitates spinning and production of longer, stronger and more uniform threads. Although research is ongoing, preliminary results suggest that Greek sheep wool is suitable for tapestry and other durable fabric production. The work is funded by “Greece 2.0” – Cultural Actions under the National Recovery and Resilience Plan of the Ministry of Culture.

Keywords: wool, sheep, wool production, wool quality, sheep wool value chain, artisanal wool products

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μαλλί των προβάτων είναι ένα φυσικό, ανανεώσιμο και ανακυκλώσιμο υλικό με φυσικό κύκλο αποσύνθεσης στο περιβάλλον και ξεχωριστές ιδιότητες (θερμομόνωση, απορρόφηση υγρασίας, επιβράδυνση καύσης κ.α.), που βρίσκουν χρησιμότητα τόσο στην παραγωγή υφασμάτων όσο και σε πολλές άλλες σύγχρονες εφαρμογές (Allafi και συν., 2020). Στην Ελλάδα, η επεξεργασία του για την παραγωγή υφασμάτων, ταπήτων και ειδών οικοτεχνίας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της πολιτιστικής κληρονομιάς μας, από την αρχαιότητα ως τις μέρες μας (Nosch, 2014). Επιπρόσθετα, η παραγωγή μαλλιού είχε

παραδοσιακά μεγάλη κοινωνικο-οικονομική σημασία για τις αγροτικές περιοχές της χώρας, καθώς αποτελούσε σημαντικό έσοδο για τους προβατοτρόφους. Παρά την ιδιαίτερη και πολύπλευρη σημασία του, η χρήση του μαλλιού των προβάτων στην υφαντουργία περιορίστηκε δραστικά μετά την ανακάλυψη και ευρεία χρήση των συνθετικών ινών (Jhanji Dhir, 2022). Παράλληλα, η ενίσχυση του διεθνούς εμπορίου επέτρεψε την κάλυψη των πλέον περιορισμένων αναγκών σε φυσικό μαλλί για την παραγωγή υφασμάτων, από εισαγόμενο μαλλί ανώτερης ποιότητας, προερχόμενο από εξειδικευμένες εριοπαραγωγές φυλές προβάτων. Τα παραπάνω είχαν ως άμεσο αντίκτυπο τη σταδιακή αποδυνάμωση της αλυσίδας αξίας του μαλλιού των προβάτων στην Ελλάδα, οδηγώντας τελικά στην οριστική απαξίωση του. Σήμερα, στη χώρα μας το μαλλί αποτελεί για τους προβατοτρόφους ένα υποπροϊόν που επιβαρύνει την παραγωγή με επιπλέον κόστος, χωρίς κανένα ουσιαστικό κέρδος. Οι περίπου 7.000 τόνοι μαλλιού που παράγονται από εγχώρια πρόβατα σε ετήσια βάση, απορρίπτονται ως απόβλητο, χωρίς να λαμβάνεται μέριμνα για την περαιτέρω επεξεργασία και αξιοποίησή τους. Παράλληλα, η έλλειψη ποιοτικής αξιολόγησης του παραγόμενου μαλλιού και σχετικών ερευνητικών δεδομένων περιορίζουν ακόμη περισσότερο τις δυνατότητες αξιοποίησης του.

Στο παραπάνω πλαίσιο, το ερευνητικό έργο "Μελέτη των αλυσίδων αξίας και των υλικών στην Οικοτεχνία-Χειροτεχνία" δίνει μία νέα προοπτική στην αξιοποίηση του μαλλιού συνδυάζοντας καινοτόμες προσεγγίσεις με παραδοσιακές τεχνικές, με απώτερο σκοπό την εξασφάλιση ενός βιώσιμου μέλλοντος για όλους τους εμπλεκόμενους στην αλυσίδα αξίας του μαλλιού των προβάτων. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόστηκε μια σύγχρονη διεπιστημονική προσέγγιση, μέσω της οποίας επιχειρήθηκε η εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των τύπων μαλλιού που παράγονται στην Ελλάδα από διαφορετικές φυλές προβάτων και η ποιοτική τους ταξινόμηση, σύμφωνα με σύγχρονα διεθνή συστήματα. Ακολούθως, τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης του παραγόμενου μαλλιού και την ανάδειξη των κατάλληλων πιλοτικών εφαρμογών χειροτεχνίας. Η ολιστική προσέγγιση του έργου ολοκληρώθηκε με τη συλλογή τεχνικών και οικονομικών στοιχείων σχετικά με τη βιωσιμότητα της επιχειρηματικής αξιοποίησης του μαλλιού στο πλαίσιο των προτεινόμενων πιλοτικών εφαρμογών.

Η πρώτη φάση υλοποίησης εστίασε στην επιλογή των κατάλληλων μεθόδων για την εκτίμηση της ποιότητας και την ανάδειξη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του παραγόμενου μαλλιού, που είναι ουσιώδους σημασίας για την επίτευξη των σκοπών του έργου. Στόχοι της παρούσας εργασίας ήταν (α) η ανάδειξη της κατάλληλης μεθοδολογίας για την ποιοτική ταξινόμηση και (β) η παρουσίαση των προκαταρκτικών αποτελεσμάτων από την εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του μαλλιού που παράγεται από φυλές προβάτων στην Ελλάδα.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1.Επιλογή ζωικού υλικού

Τα δείγματα ινών μαλλιού προς εκτίμηση παραμέτρων ποιότητας πρέπει να λαμβάνονται από πρόβατα επιλεγμένα με γνώμονα την ορθότερη αποτύπωση της ποιότητας του μαλλιού στον εκάστοτε υπό μελέτη πληθυσμό. Συνεπώς, εκτός από τη φυλή των ζώων (γενότυπος) που επηρεάζει την εριοπαραγωγή ποσοτικά και ποιοτικά συστήνεται να λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες που προκαλούν διακύμανση. Η ηλικία και το φύλο είναι παράγοντες που επιδρούν στην ποιότητα του παραγόμενου μαλλιού (Ζυγογιάννης Δ., 2006). Συνεπώς, συστήνεται η δειγματοληψία να γίνεται από πρόβατα ηλικίας περίπου

ενός έτους ή μεγαλύτερα που να έχουν κουρευτεί τουλάχιστον μία φορά (International Committee for Animal Recording – ICAR, 2024). Παράλληλα, πρέπει να αντιπροσωπεύονται εξίσου και τα δύο φύλα. Επιπλέον, σημαντική επίδραση στην ποιότητα του παραγόμενου μαλλιού έχουν οι διαχειριστικές πρακτικές (διατροφή, σταβλισμός, πρακτικές κουράς κ.α.) που εφαρμόζονται εντός των εκτροφών (McGregor και συν., 2016). Συνεπώς, αν στοχεύουμε στην αποτύπωση της ποιότητας του μαλλιού που παράγεται από συγκεκριμένες φυλές, πρέπει να επιλέξουμε ζώα από εκτροφές που εφαρμόζουν επαρκείς διαχειριστικές πρακτικές ώστε η ποιότητα του παραγόμενου μαλλιού να είναι αντιπροσωπευτική του γενετικού δυναμικού της φυλής. Τέλος, προκειμένου τα δείγματα που λαμβάνουμε να είναι κατά το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερα του πληθυσμού, είναι χρήσιμο να προέρχονται από περισσότερες από μία εκτροφές.

2.2.Εκτίμηση ποιότητας ινών μαλλιού προβάτων

Για τον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών του μαλλιού των προβάτων μπορούν να εκτιμηθούν πολλές διαφορετικές παράμετροι, βάσει τόσο υποκειμενικών μεθόδων (οπτική εκτίμηση μαλλιού) όσο και αναλυτικών τεχνολογιών ακριβείας, όπως φασματοφωτομετρία, ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, τεχνολογία laser, ανάλυση εικόνας κ.α. (Botha και Hunter, 2010; ICAR, 2024). Στην παρούσα εργασία, η εκτίμηση της ποιότητας των ινών του μαλλιού έγινε μέσω ανάλυσης εικόνας και ειδικότερα με χρήση αναλυτή OFDA (Optical Fiber Diameter Analyser). Με την ανάλυση αυτή εκτιμήθηκε μία σειρά από παραμέτρους που περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω (ICAR, 2024; Montana State University, χ.χ.).

- **Μέση διάμετρος ινών (σε μm, Fiber diameter/Micron)**: Η διάμετρος των ινών είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που καθορίζει την εμπορική τους επεξεργασία και την τελική αξία του μαλλιού. Έχει υψηλή κληρονομησιμότητα, αλλά επηρεάζεται και από την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών με την τροφή. Ως εκ τούτου, μπορεί να εμφανίζει μεγάλη διακύμανση (μέχρι 12 μm) στο ίδιο δείγμα ακόμη και εντός της ίδιας περιόδου αύξησης.
- **Τυπική απόκλιση διαμέτρου ινών (σε μm, Standard deviation of fiber diameter – SD)**: Εκφράζει τον βαθμό διακύμανσης της διαμέτρου των ινών που παρατηρείται σε ένα δείγμα. Η παράμετρος αυτή προτιμάται για την εκτίμηση της διακύμανσης της διαμέτρου των ινών σε μεμονωμένα πρόβατα. Η χαμηλή τυπική απόκλιση της διαμέτρου των ινών ενός προβάτου, σχετίζεται με απαλότερη υφή, υψηλότερη εφελκυστική αντοχή και πιο ομοιόμορφο μαλλί που τείνει να χαρακτηρίζεται συχνότερα ως υψηλότερης ποιότητας.
- **Συντελεστής μεταβλητότητας διαμέτρου ινών (Coefficient of variation of fiber diameter – CVD)**: Εκφράζει την τυπική απόκλιση της διαμέτρου των ινών ως ποσοστό του μέσου όρου της. Τιμές υψηλότερες του 20% θεωρούνται ενδεικτικές ανομοιομορφίας των ινών στο δείγμα. Ο συντελεστής μεταβλητότητας προτιμάται για τη σύγκριση μεταξύ δειγμάτων μαλλιού διαφορετικής διαμέτρου ινών.
- **Τραχύ άκρο (Coarse Edge Micron – CEM)**: Η διαφορά (σε μm) μεταξύ της μέσης διαμέτρου και του λεπτότερου άκρου, στο τραχύτερο 5% των ινών. Χρησιμοποιείται συχνά για να εκτιμήσει τη συχνότητα των αγανότριχων σε ένα δείγμα.
- **Συντελεστής άνεσης (Comfort factor)**: Ποσοστό ινών που είναι ίσες ή μικρότερες από 30 μm. Ίνες με διάμετρο μεγαλύτερη από 30 μm προκαλούν την αίσθηση «τσιμπήματος» όταν έρθουν σε επαφή με το δέρμα. Η μικρότερη μέση διάμετρος και τυπική απόκλιση της διαμέτρου των ινών, συνεπάγονται μικρότερο αριθμό ινών

με διάμετρο μικρότερη των 30 μm και συνεπώς, υψηλότερης ποιότητας μαλλί.

- **Ποσοστό ινών διαμέτρου <15 μm**: Ποσοστό των ινών με διάμετρο μικρότερη των 15 μm.
- **Λεπτότητα νήματος (σε μm, Spin fineness)**: Υπολογίζεται βάσει της διαμέτρου των ινών και του συντελεστή μεταβλητότητας της διαμέτρου. Δίνει μία εκτίμηση της μέσης διαμέτρου των ινών, όπως αναμένεται να διαμορφωθεί κατά τη διαδικασία της κλώσης/νηματοποίησης.
- **Ουλότητα ινών (σε deg/mm, Fiber curvature)**: Γενικά, υψηλή ουλότητα σχετίζεται με υψηλή συχνότητα πτυχώσεων και λεπτότητα των ινών (μικρή διάμετρος).
- **Τυπική απόκλιση ουλότητας ινών (σε deg/mm, Fiber curvature SD)**: Εκφράζει τον βαθμό διακύμανσης της ουλότητας των ινών που παρατηρείται σε ένα δείγμα.
- **Αριθμός ινών (Num. fibers)**: Αριθμός ινών δείγματος.
- **Μήκος πλοκάμου/μαλλιού (σε mm, Staple length)**: Το μήκος του μαλλιού είναι πολύ σημαντικό για την ποιοτική κατηγοριοποίηση των ινών, καθώς επηρεάζει την περαιτέρω επεξεργασία για νηματοποίηση.
- **Απόσταση του λεπτότερου σημείου από την κορυφή του δείγματος (σε mm, Finest point from tip)**: Εκφράζει την απόσταση μεταξύ του λεπτότερου σημείου κάθε δείγματος και της κορυφής του. Αποτελεί ένδειξη του σημείου θραύσης ("point of break").
- **Μέση διάμετρος των άκρων των ινών (σε μm, Mean diameter ends)**: Η μέση διάμετρος των άκρων των ινών, δηλαδή της βάσης και της κορυφής τους.
- **Ελάχιστη διάμετρος ινών (σε μm, Minimum diameter)**: Το λεπτότερο σημείο στο δείγμα.
- **Μέγιστη διάμετρος ινών (σε μm, Maximum diameter)**: Το ευρύτερο σημείο στο δείγμα.

Παράλληλα, αξιολογούνται και τα ακόλουθα δύο γραφήματα που προκύπτουν κατά την ανάλυση των ινών:

- **Προφίλ διαμέτρου ινών (Micron profile)**: Γραμμικό διάγραμμα της διαμέτρου των ινών κατά μήκος του δείγματος που αντικατοπτρίζει την περιβαλλοντική επιρροή στην ανάπτυξη των ινών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της πρόσληψης θρεπτικών συστατικών κατά την περίοδο αύξησης του μαλλιού. Το διάγραμμα μελετάται από τα αριστερά (κορυφή της ίνας που αντιστοιχεί στην αρχή της περιόδου αύξησης) προς τα δεξιά (βάση του δείγματος που αντιστοιχεί στην πιο πρόσφατη περίοδο αύξησης).
- **Ιστόγραμμα κατανομής διαμέτρου ινών (Distribution histogram of fiber diameter)**: Ιστόγραμμα που απεικονίζει την κατανομή της μέσης διαμέτρου των μεμονωμένων ινών του δείγματος. Ο οριζόντιος άξονας του γραφήματος εκφράζει τη μέση διάμετρο των ινών και ο κάθετος άξονας το ποσοστό των ινών που εμφανίζουν την εκάστοτε τιμή μέσης διαμέτρου. Όσο πιο περιορισμένη η κατανομή των ινών στο γράφημα, τόσο μικρότερη η τυπική απόκλιση της διαμέτρου και η διακύμανση μεταξύ των ινών, χαρακτηριστικό που είναι επιθυμητό.

2.3.Ποιοτική κατηγοριοποίηση ινών μαλλιού προβάτων

Διαχρονικά, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά διαφορετικά συστήματα ποιοτικής ταξινόμησης του μαλλιού, όπως το αριθμητικό σύστημα ταξινόμησης (numerical count system) και το σύστημα micron που βασίζεται στην εκτίμηση της μέσης διαμέτρου των ινών του μαλλιού (Ensminger M.E., 1964; LeValley S.B., χ.χ.). Ένα εναλλακτικό σύστημα που λαμβάνει

υπόψη τόσο τη διάμετρο των ινών του όσο και το μήκος του, είναι το Σουηδικό σύστημα ταξινόμησης (Swedish Wool Standard – Behrmann J. και Lindfred L., χ.χ). Το σύστημα αυτό έχει διαμορφωθεί τα τελευταία χρόνια με γνώμονα την καλύτερη αξιοποίηση μαλλιού που προέρχεται από μη εξειδικευμένες φυλές προβάτων (γαλακτοπαραγωγικής και κρεοπαραγωγικής κατεύθυνσης) και διαφορετικά συστήματα εκτροφής και εμφανίζει μία ευρύτερη ποικιλία ποιοτικών χαρακτηριστικών. Στο σύστημα αυτό, το μαλλί διακρίνεται σε έξι (6) κύριες κατηγορίες ποιότητας βάσει της διαμέτρου των ινών και κάθε κύρια κατηγορία σε πέντε (5) υποκατηγορίες βάσει του μήκους του, της υφής του και της παρουσίας φυτικών ινών. Επιπρόσθετα, διακρίνονται τρεις επιπλέον κατηγορίες, στις δύο εκ των οποίων κατατάσσεται το μαλλί συγκεκριμένων φυλών που έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (φυλές που δεν εκτρέφονται στην Ελλάδα) και στην τρίτη τα τμήματα του μαλλιού που κατεξοχήν θεωρούνται κατώτερης ποιότητας και απορρίπτονται (μαλλί από την κοιλιακή χώρα/τους μηρούς/την ουρά, πολύ λερωμένο, με υψηλή περιεκτικότητα σε φυτικές ίνες). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται μία απλοποιημένη εκδοχή του Σουηδικού συστήματος ταξινόμησης που θα μπορούσε να εφαρμοστεί για την ταξινόμηση του μαλλιού που παράγεται από φυλές προβάτων στην Ελλάδα.

Πίνακας 1. Σύστημα ποιοτικής ταξινόμησης του μαλλιού βάσει της μέσης διαμέτρου των ινών και του μήκους (τροποποιημένη εκδοχή του Σουηδικού συστήματος – Swedish Wool Standard).

Κύρια κατηγορία ποιότητας	**Μέση διάμετρος ινών (μm)**	**Υποκατηγορία**	**Μήκος (mm)**	**Λοιπά χαρακτηριστικά**	
				Περιεκτικότητα σε ίνες	**Υφή**
Α: Υψηλής λεπτότητας (Fine)	≤ 21	A1	>100	Χαμηλή	Πολύ μαλακή
		A2	50–100	Χαμηλή	
		A3	50–100	Μέτρια	
		A4	30–50	Χαμηλή	
Β: Υψηλής προς μέτριας λεπτότητας (Fine to medium)	18–23	B1	>100	Χαμηλή	Μαλακή
		B2	50–100	Χαμηλή	
		B3	50–100	Μέτρια	
		B4	30–50	Χαμηλή	
C: Μέτριας λεπτότητας προς τραχύ (Medium to coarse)	22–27	C1	>100	Χαμηλή	Μαλακή προς σχετικά μαλακή
		C2	50–100	Χαμηλή	
		C3	50–100	Μέτρια	
		C4	30–50	Χαμηλή	
D: Τραχύ (Coarse)	28–34	D1	>100	Χαμηλή	Σχετικά μαλακή
		D2	50–100	Χαμηλή	
		D3	50–100	Μέτρια	
		D4	30–50	Χαμηλή	
Ε: Πολύ τραχύ (Very coarse)	≥ 35	E1	>100	Χαμηλή	Τραχιά
		E2	50–100	Χαμηλή	
		E3	50–100	Μέτρια	
		E4	30–50	Χαμηλή	
Κατώτατης ποιότητας	–	–	–	Μαλλί από την κοιλιακή χώρα/τους μηρούς/την ουρά, πολύ λερωμένο, με υψηλή περιεκτικότητα σε φυτικές ίνες	

Οι δυνατότητες χρήσης του μαλλιού διαφοροποιούνται ανά κατηγορία ποιότητας. Μαλλί μέσης διαμέτρου ινών μεγαλύτερης από 30 μm σχετίζεται με το δυσάρεστο αίσθημα «τσιμπήματος» όταν έρχεται σε επαφή με το σώμα. Αντιθέτως, όσο μικρότερη η μέση διάμετρος των ινών, τόσο πιο μαλακό το μαλλί και πιο άνετη η αίσθηση στο σώμα. Συνεπώς, μαλλί υψηλής και μέσης λεπτότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή διαφόρων ειδών ρουχισμού. Αντιθέτως, μαλλί πιο τραχιάς υφής («τραχύ» και «πολύ τραχύ») είναι καταλληλότερο για χρήση κυρίως στην ταπητουργία και γενικότερα στην παραγωγή υφασμάτων που προορίζονται για πιο βαριά χρήση (τσάντες, κουβέρτες κτλ), καθώς η μεγάλη διάμετρος των ινών προσδίδει την απαιτούμενη ανθεκτικότητα στα τελικά προϊόντα. Παράλληλα, το μήκος του μαλλιού αποτελεί επίσης καθοριστικό παράγοντα για την τελική ποιοτική κατάταξη. Το μεγαλύτερο μήκος μαλλιού είναι επιθυμητό χαρακτηριστικό για τη βιομηχανία, καθώς διευκολύνει την επεξεργασία για νηματοποίηση και δίνει μακρύτερα, δυνατότερα και περισσότερο ομοιόμορφα νήματα. Αντιθέτως, το μικρότερο μήκος μαλλιού οδηγεί σε χνούδιασμα και ευκολότερη απώλεια ινών (Holman B.W.B και Malau-Aduli A.E.O., 2012). Ωστόσο, το υπερβολικά μεγάλο μήκος (>12-13 cm) είναι επίσης ανεπιθύμητο καθώς περιπλέκει την περαιτέρω επεξεργασία του μαλλιού (ICAR, 2024).

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1.Ζωικό υλικό

Συλλέχθηκαν δείγματα μαλλιού από έξι (6) εγχώριες φυλές/πληθυσμούς προβάτων (Ορεινό Ηπείρου, Καλαρρύτικο/Μπούτσκο, Καραμάνικο/Κατσικά, Λέσβου, Λήμνου, Ευρυτανίας). Η δειγματοληψία έγινε από 14 ενήλικα πρόβατα (5 αρσενικά, 9 θηλυκά) που εκτρέφονταν σε επτά (7) εκτροφές. Για κάθε ζώο καταγράφηκαν πληροφορίες σχετικά με την ημερομηνία τελευταίας κουράς, τη φυλή, το φύλο, την ηλικία και τον χρωματισμό του μαλλιού.

3.2.Λήψη δείγματος ινών μαλλιού προβάτου

Τα πρόβατα ακινητοποιήθηκαν σε όρθια στάση και με τρόπο που να ελαχιστοποιεί την καταπόνηση τους και την πιθανότητα πρόκλησης τραυματισμών κατά τη δειγματοληψία. Τα δείγματα λήφθηκαν από στεγνό μαλλί με ειδικό ψαλίδι κουράς από την πλευρά του κορμού του ζώου, στο ύψος της τρίτης πλευράς από το τέλος και στο μέσο επίπεδο (ICAR, 2024). Το μαλλί κόπηκε όσο το δυνατόν πιο κοντά στο δέρμα και εξασφαλίστηκε ικανή ποσότητα μαλλιού ανά δείγμα. Ειδικότερα, η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα για τη διενέργεια των δοκιμών εκτίμησης της ποιότητας ινών μαλλιού είναι 3-4 πλόκαμοι μαλλιού από κάθε πρόβατο.

3.3.Συσκευασία και αποστολή των δειγμάτων προς ανάλυση

Μετά τη συλλογή, τα δείγματα συσκευάστηκαν σε χάρτινες σακούλες που δεν επέτρεπαν την παγίδευση υγρασίας στο εσωτερικό τους, η οποία θα μπορούσε να αλλοιώσει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων. Οι σακούλες έφεραν τον κωδικό αριθμό δείγματος σε αυτοκόλλητη ετικέτα στην εξωτερική επιφάνεια και σε δεύτερη ετικέτα στο εσωτερικό τους. Μετά την τοποθέτηση των δειγμάτων, οι σακούλες σφραγίστηκαν για να αποφευχθούν ανεπιθύμητες απώλειες υλικού. Ακολούθως, τα δείγματα αποστάλθηκαν σε εξωτερικό εργαστήριο προκειμένου να γίνει εκτίμηση των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών.

3.4.Ποιοτική αξιολόγηση ινών μαλλιού προβάτων

Η ποιοτική αξιολόγηση των δειγμάτων ινών μαλλιού προβάτων έγινε με βάσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης OFDA, με την οποία εκτιμήθηκαν οι παράμετροι ποιότητας που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.2. Ακολούθως, η ταξινόμηση των δειγμάτων σε κατηγορίες ποιότητας και η ανάδειξη κατάλληλων χρήσεων σε κάθε περίπτωση έγινε με βάση την απλοποιημένη εκδοχή του Σουηδικού συστήματος ταξινόμησης που περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 2.3 (Πίνακας 1).

4. Αποτελέσματα

Οι περιγραφικές στατιστικές παράμετροι των αποτελεσμάτων των αναλύσεων OFDA παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων, το μαλλί των ελληνικών προβάτων χαρακτηρίζεται ποιοτικά ως πολύ τραχύ, καθώς ο μέσος όρος της διαμέτρου των ινών ήταν 37,7 μm (βλ. Πίνακας 1). Επιπρόσθετα, η πλειονότητα των δειγμάτων (11/14) είχε μέση διάμετρο ινών μεγαλύτερη από 35 μm (μέγιστη: 46,3 μm), ενώ και τα υπόλοιπα δείγματα (3/14) είχαν μέση διάμετρο ινών μεγαλύτερη από 30 μm.

Πίνακας 2. Περιγραφικές στατιστικές παράμετροι των παραμέτρων εκτίμησης ποιότητας ινών μαλλιού προβάτων.

	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
Μέση διάμετρος ινών (μm)	37,7	4,02	30,4	46,3
Τυπική απόκλιση διαμέτρου ινών (μm)	11,4	2,63	7,2	17,2
Συντελεστής μεταβλητότητας διαμέτρου ινών (%)	30,0	5,09	20,5	37,2
Τραχύ άκρο (μm)	21,3	4,09	11,5	26,9
Συντελεστής άνεσης (%)	32,1	12,10	14,3	54,9
Ποσοστό ινών διαμέτρου <15 μm (%)	0,7	0,46	0	1,6
Λεπτότητα νήματος (μm)	40,2	5,39	32	53,1
Ουλότητα ινών (deg/mm)	41,0	9,26	26	58,7
Τυπική απόκλιση ουλότητας ινών (deg/mm)	38,1	6,33	27,4	47,5
Αριθμός ινών	843,6	392,26	207	1710
Μήκος πλοκάμου/μαλλιού (mm)	77,3	18,55	45	100
Απόσταση του λεπτότερου σημείου από την κορυφή του δείγματος (mm)	43,6	36,45	0	95
Μέση διάμετρος των άκρων των ινών (μm)	38,4	4,48	29,7	46,5
Ελάχιστη διάμετρος ινών (μm)	32,9	2,68	28	36,6
Μέγιστη διάμετρος ινών (μm)	43,4	6,73	35	61
Τυπική απόκλιση διαμέτρου κατά μήκος της κάθε ίνας (μm)	3,4	2,61	1	11,1
Τυπική απόκλιση διαμέτρου μεταξύ των ινών (μm)	10,7	2,18	6,9	13,6

Παράλληλα, παρατηρήθηκαν σχετικά υψηλές τιμές τυπικής απόκλισης της διαμέτρου των ινών (μέσος όρος: 11,4 μm, εύρος: 7,2–17,2 μm) και του αντίστοιχου συντελεστή μεταβλητότητας (μέσος όρος: 30,0%, εύρος: 20,5–37,2%), που υποδηλώνουν λιγότερο ομοιόμορφη και πιο τραχιά υφή. Σε συμφωνία με τα παραπάνω, από τη μελέτη των

ιστογραμμάτων της κατανομής της μέσης διαμέτρου των μεμονωμένων ινών του δείγματος, διαπιστώθηκε ότι τα περισσότερα δείγματα εμφανίζουν μεγάλο εύρος κατανομής (μεταξύ~10–70 μm), εύρημα που υποδηλώνει μεγάλη διακύμανση μεταξύ των ινών του κάθε δείγματος. Επιπρόσθετα, ο μέσος όρος του συντελεστή άνεσης ήταν σχετικά χαμηλός, 32,1%. Αντίστοιχα, το ποσοστό των ινών διαμέτρου <15 μm ήταν εξαιρετικά χαμηλό (μέσος όρος: 0,7%, εύρος: 0–1,6%). Τα χαμηλά ποσοστά των δύο παραπάνω παραμέτρων είναι ενδεικτικά της περιορισμένης παρουσίας ινών λεπτής διαμέτρου στα δείγματα, που ενισχύει την τραχιά υφή τους.

Τέλος, το μέσο μήκος των δειγμάτων ήταν 77,3 mm, με την πλειονότητα των δειγμάτων να εμφανίζει μήκος μεταξύ 65 και 100 mm. Βάσει του μήκους τους, τα δείγματα κατατάχθηκαν στη δεύτερη υψηλότερη υποκατηγορία μήκους (50–100 mm) του προτεινόμενου συστήματος ταξινόμησης (βλ. Πίνακας 1). Το χαρακτηριστικό αυτό κρίνεται ικανοποιητικό, καθώς διευκολύνει την περαιτέρω επεξεργασία για νηματοποίηση και σχετίζεται με μακρύτερα, δυνατότερα και περισσότερο ομοιόμορφα νήματα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα παρόντα αποτελέσματα αποτελούν μία πρώτη εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του μαλλιού που παράγεται στην Ελλάδα. Τα δείγματα λήφθηκαν από φυλές, η εριοπαραγωγή των οποίων είναι χαρακτηριστική του εγχώριου ζωικού κεφαλαίου. Βάσει των ποιοτικών χαρακτηριστικών του, το μαλλί που εξετάστηκε θεωρείται περισσότερο κατάλληλο για χρήση στην ταπητουργία και στην παραγωγή ανθεκτικών υφασμάτων που προορίζονται για πιο βαριά χρήση (τσάντες, κουβέρτες κτλ). Συνεπώς, είναι δυνατό το εγχώρια παραγόμενο μαλλί να βρει χρήση ως πρώτη ύλη για την παραγωγή πολλών διαφορετικών ειδών στο πλαίσιο δράσεων Οικοτεχνίας-Χειροτεχνίας. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της ποιότητας του μαλλιού και την ταξινόμησή του διευκολύνει την επιλογή των καταλληλότερων μεθόδων επεξεργασίας για την αποδοτικότερη αξιοποίησή του, περιορίζοντας έτσι τα σχετικά κόστη και βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητα των παραγόμενων προϊόντων. Η καθιέρωση της ποιοτικής αξιολόγησης δειγμάτων μαλλιού ως συστηματικής πρακτικής στο πλαίσιο της συλλογής του παραγόμενου μαλλιού από τις εγχώριες προβατοτροφικές εκμεταλλεύσεις, είναι καίριας σημασίας προς την επίτευξη των παραπάνω στόχων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Allafi, F., Hossain, M.S., Lalung, J., Shaah, M., Salehabadi, A., Ahmad, M.I. and Shadi, A., 2020. *Advancements in Applications of Natural Wool Fiber: Review*. Journal of Natural Fibers, 19(2), 497–512. https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1745128

Behrmann, J. and Lindfred, L., χ.χ. The Swedish Wool Standard. Ανακτήθηκε από: https://www.axfoundation.se/en/swedish-wool-standard

Botha, A.F. and Hunter, L., 2010. *The measurement of wool fibre properties and their effect on worsted processing performance and product quality. Part 1: The objective measurement of wool fibre properties.* Textile Progress, 42(4), 227–339. https://doi.org/10.1080/00405167.2010.486932

Ensminger, M.E., 1964. Sheep and Wool Science. The Interstate Printers & Publishers Inc. Danville, Illinois.

Ζυγογιάννης Δ., 2006. Προβατοτροφία. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία. Θεσσαλονίκη.

Holman, B.W.B. and Malau-Aduli, A.E.O., 2012. *A review of sheep wool quality traits.* Annual review & Research in Biology, 2(1), 1–14. https://journalarrb.com/index.php/ARRB/article/view/1260

International Committee for Animal Recording, 2024. ICAR recording guidelines. Section 23 – Guidelines for Wool Recording in Sheep. Ανακτήθηκε από: https://www.icar.org/Guidelines/23-Wool-Sheep-Recording.pdf

Jhanji Dhir, Y., 2022. Natural fibers: the sustainable alternatives for textile and non-textile applications. In *Natural Fiber*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.106393

LeValley, S.B., χ.χ. *Grades and Lengths of Grease Wool – Fact Sheet No. 1.401*. Ανακτήθηκε από :cHromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/ https://jeffco.extension.colostate.edu/do cs/pubs/livestk/01401.pdf

McGregor, B.A., De Graaf, S.P. and Hatcher, S., 2016. *On-farm factors affecting physical quality of Merino wool. 1. Nutrition, reproduction, health and management.* Small ruminant research, 137, 138–150. https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2016.03.019

Montana State University, χ.χ. *OFDA 2000 Explanation of Analysis and Glossary of Terms.*Ανακτήθηκε από: https://www.montana.edu/woollab/ofda.html

Nosch, M.L., 2014. *The Aegean wool economies of the Bronze Age*. In: Textile Society of America 2014 Biennial Symposium Proceedings: New Directions: Examining the Past, Creating the Future, Los Angeles, California, September 10–14, 2014

58. ASSESSMENT OF SHEEP THERMAL STRESS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

D. K. Papanastasiou[1], A. I. Gelasakis[2], G. Papadopoulos[3], D. Melas[3], K. Douvis[4], I. Faraslis[1], S. Keppas[3], I. Stergiou[3], A. Poupkou[4], A. Progiou[4], J. Kapsomenakis[4] & N. Katsoulas[5]

[1] *University of Thessaly, Department of Environmental Sciences, Larissa*
[2] *Agricultural University of Athens, Department of Animal Science, Athens*
[3] *Aristotle University of Thessaloniki, School of Physics, Thessaloniki*
[4] *Academy of Athens, Research Centre for Atmospheric Physics and Climatology, Athens*
[5] *University of Thessaly, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, Volos dkpapan@uth.gr*

ABSTRACT

The Weather Research and Forecasting (WRF) model was used as a high-resolution climate model in this study in order to simulate climate conditions for two decades in Greece (2046 –2055: near future; 2005 – 2014: reference decade). The WRF model was applied for two emission scenarios (SSP2-4.5, intermediate; SSP5-8.5, worst-case). Temperature and relative humidity model's projections were exploited to calculate the Temperature Humidity Index (THI) in order to assess the impact of future climate conditions on heat-stress of sheep. Results showed that mean THI levels are expected to rise up to 10% in most of the country, indicating a deterioration of heat-stress conditions in the near-future. Increase will be slightly higher when considering the worst-case emissions scenario. Given the outstanding economic, social, and environmental value of sheep farming in Greece, adaptation to and mitigation of climate change impacts are urgent challenges for the future of the sector.

Keywords: Climate Change, Emission Scenario, WRF model, Sheep, Heat-stress, Temperature Humidity Index

EXTENDED ABSTRACT

It is well-documented that sheep physiology, welfare, health and productivity are significantly affected under heat-stress conditions (e.g., Sejian et al., 2012). Sheep farming is crucial for ensuring food availability and national food security, while also significantly contributing to key areas of the Greek agricultural economy and rural incomes. The aim of this study was to produce future climate projections and utilize them to quantitatively assess changes in heat-stress conditions for sheep across Greece in order to identify regions that may become more or less favourable for sheep farming, as well as, to propose adaptation measures and good practices to sheep farmers to reduce impacts derived from climate change-induced thermal stress conditions to animals.

The Weather Research and Forecasting (WRF) model (Skamarock et al., 2008) was used as a high-resolution regional climate model in order to simulate climate conditions in Greece at 10 Km and 1 hour spatial and temporal resolution, respectively. The model has been applied and validated in several studies (e.g., Marta-Almeida et al., 2016), while past studies have utilized it to investigate the impacts of meteorological and climatological conditions on the agricultural systems (e.g., Im et al., 2021). WRF model was applied for two emission scenarios, namely the SSP2-4.5 (intermediate) and the SSP5-8.5 (worst-case) (IPCC, 2021). Appropriate physics schemes were selected for the simulations. Projections refer to the near future decade (2046–2055), while decade (2005–

2014) was used as the reference decade for comparison purposes. Three popular statistical indices were employed to evaluate model's performance, namely the Mean Bias (MB), the Mean Absolute Error (MAE) and the Pearson's coefficient (R). The Temperature Humidity Index (THI) [THI=T-(0.31-0.0031·RH)·(T-14.4)] [T: dry-bulb temperature (°C); RH: relative humidity (%)] (Marai et al., 2007) was applied to assess the impact of future climate conditions on sheep thermal stress in Greece. Four heat-stress categories have been defined for THI: absence of heat-stress (THI < 22.2), moderate heat-stress (22.2 ≤ THI < 23.3), severe heat-stress (23.3 ≤ THI < 25.6) and extremely severe heat- stress (THI ≥ 25.6). THI is a widely recognized and extensively applied metric in livestock climatology (e.g., Panagakis, 2016). MB, MAE and R values revealed that the model simulated T and RH satisfactorily during the reference period (mean MB, MAE and R values were -0.5 °C, 1.7 °C and 0.96, respectively, for T; -2.1%, 8.0% and 0.59, respectively, for RH). Larger discrepancies were found for RH compared to T, as the first is a more complex parameter, strongly influenced by the latter, moisture transport and precipitation.

Projected difference (future vs reference period) of mean THI for each model grid cell under the two examined emissions scenarios are presented in Figure 1. For the intermediate emission scenario (SSP2-4.5), mean THI (sheep) is projected to increase by 5% – 10%, 10% – 15%, 15% – 20% and 20% – 25% in the 74.0%, 21.7%, 4.0% and 0.3% of the Greek territory, respectively. Mean THI levels became slightly worse when the worst-case emission scenario (SSP5-8.5) was applied. Higher increases are projected for mountainous areas for both emission scenarios.

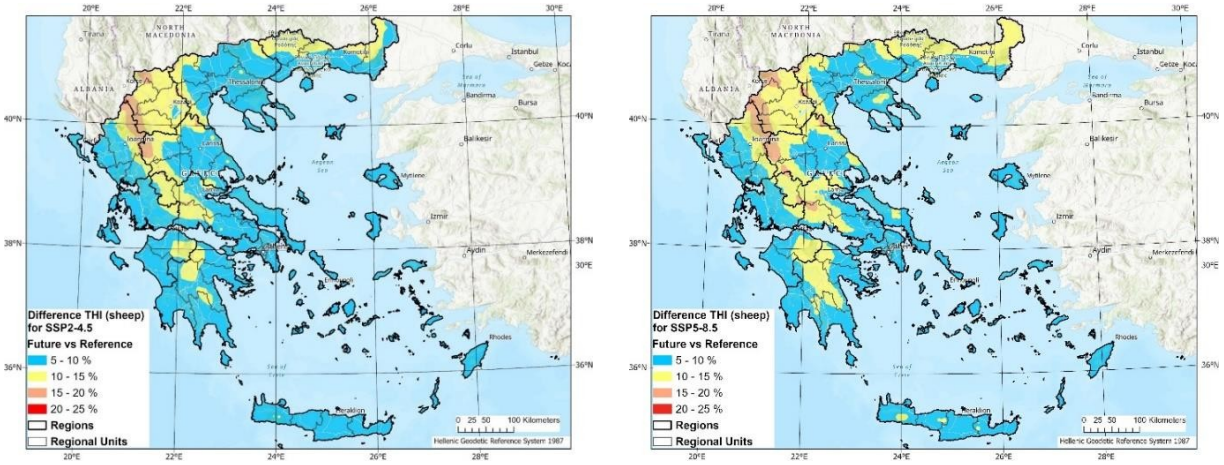


Figure 1. Projected difference (future vs reference period) of mean THI for each model grid cell under the SSP2–4.5 (left map) and SSP5–8.5 (right map) emission scenarios across Greece.

Based on the hourly THI values that were projected to occur under each emission scenario, it was found that hourly THI levels will be aggravated in the near future. The number of non- heat-stress hours will be reduced by up to 10.5%. The number of moderate heat-stress hours will be increased by up to 40% in most of the Greek territory. The number of severe heat- stress hours will double almost in the whole country, while the number of extremely severe heat-stress hours will also double in most of the Greek territory. The deterioration of heat- stress conditions will be slightly more pronounced under the worst-case emission scenario.

Adaptation measures and good practices are recommended to sheep farmers to mitigate the rise in animal heat-stress that is expected to occur in the future due to climate change.

These measures could be categorized into four domains, namely, genetic selection and breeding, management of livestock housing conditions, nutritional interventions, and precision farming technological innovations. Better understanding and efficient management of climate change challenge are crucial for ensuring the sustainable and resilient sheep farming in Greece.

ACKNOWLEDGEMENT

This study is funded by the project “Crop and livestock stress under climate change scenarios (AGRO FUTURE CLIMATE STRESS)”, which is carried out within the framework of the National Recovery and Resilience Plan Greece 2.0, funded by the European Union – NextGenerationEU (Implementation body: HFRI)

REFERENCES

Im, E.-S., Ha, S., Qiu, L., Hur, J., Jo, S., Shim, K.-M., 2021. *An evaluation of temperature-based agricultural indices over Korea from the high-resolution WRF simulation*. Frontiers in Earth Science, 9, 656787.

IPCC, Climate Change 2021: *The Physical Science Basis*. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (eds.), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, in press.

Marai, I.F.M., El-Darawany, A.A., Fadiel, A., Abdel-Hafez, M.A.M., 2007. *Physiological traits as affected by heat stress in sheep-A review*. Small Ruminant Research, 71(1-3), 1–12.

Marta-Almeida, M., Teixeira, J.C., Carvalho, M.J., Melo-Gonçalves, P., Rocha, A.M., 2016. *High resolution WRF climatic simulations for the Iberian Peninsula: Model validation*. Physics and Chemistry of the Earth, 94, 94–105.

Panagakis, P., 2016. *Potential seasonal HS of sheep: assessment of four husbandry areas in Greece*. Applied Engineering in Agriculture, 32(1), 125–129.

Sejian, V., Naqvi, S.M.K., Ezeji, T., Lakritz, J., Lal, R., 2012. *Environmental stress and amelioration in livestock production*. Springer, Berlin Heidelberg.

Skamarock, W.C., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D., Wang, W., Powers, J.G., 2008. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR/TN–475+STR. 3-27.

59. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΗΣ ΧΩΛΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΡΟΒΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ IMU ΚΑΙ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ

Κ. Δολαπτσής, Γ. Τζιότζιος, Δ. Μπόχτης & Δ. Κατέρης

Ινστιτούτο Βιο-Οικονομίας και Αγρο-Τεχνολογίας (iBO), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Δημάρχου Γεωργιάδου 118, 38333, Βόλος, d.kateris@certh.gr

Περίληψη

Η χωλότητα αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παθολογικές καταστάσεις στις εκτροφές προβάτων, με σοβαρές επιπτώσεις στην ευζωία, την παραγωγικότητα και τη βιωσιμότητα των εκμεταλλεύσεων. Η διάγνωση βασίζεται παραδοσιακά στην οπτική εκτίμηση, η οποία είναι χρονοβόρα, υποκειμενική και συχνά αναποτελεσματική. Η παρούσα εργασία διερευνά μια αυτοματοποιημένη μέθοδο ανίχνευσης της χωλότητας με χρήση αδρανειακών μονάδων μέτρησης (IMUs) τοποθετημένων σε κολάρα στο λαιμό των ζώων, σε συνδυασμό με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης. Η διαδικασία περιλαμβάνει προεπεξεργασία σημάτων, εξαγωγή και επιλογή χαρακτηριστικών, καθώς και εκπαίδευση μοντέλων με χρήση των ταξινομητών Random Forest, k-NN και SVM. Τα αποτελέσματα της διασταυρούμενης επικύρωσης έδειξαν υψηλή ακρίβεια στην κατηγοριοποίηση της χωλότητας, μειώνοντας την υποκειμενικότητα της οπτικής παρατήρησης.

Λέξεις κλειδιά: αιγοπρόβατα, χωλότητα, αισθητήρες αδράνειας, μηχανική μάθηση, αυτοματοποιημένη διάγνωση

DETECTION OF LAMENESS IN SHEEP USING IMU SENSORS AND ADVANCED MACHINE LEARNING ALGORITHMS

K. Dolaptsis, G. Tziotzios, D. Bochtis & D. Kateris*

Institute for Bio-Economy and Agri-Technology (iBO), Centre of Research and Technology-Hellas (CERTH), Dimarchou Georgiadou 118, 38333, Volos,

**d.kateris@certh.gr*

ABSTRACT

Lameness is one of the most significant pathological conditions in sheep farming, with serious implications for animal welfare, productivity, and farm sustainability. Traditionally, diagnosis relies on visual assessment, which is time-consuming, subjective, and often ineffective. The present study investigates an automated method for lameness detection using inertial measurement units (IMUs) mounted on animal neck collars, combined with machine learning algorithms. The process included signal preprocessing, feature extraction and selection, as well as model training using Random Forest k-NN and SVM classifiers. Cross-validation results demonstrated high accuracy in lameness categorization, reducing the subjectivity of visual observation.

Keywords: sheep and goats, lameness, inertial sensors, machine learning, automated diagnosis

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προβατοτροφία συμβάλλει καθοριστικά στην παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια, παρέχοντας κρέας, γάλα και μαλλί (Fogarty et al., 2018). Η υγεία και η ευζωία των ζώων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την παραγωγικότητα και τη βιωσιμότητα των εκτροφών, ενώ η έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών βελτιώνει την αποδοτικότητα και μειώνει τις απώλειες. Η χωλότητα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παθήσεις παγκοσμίως σε ποσοστό 0,4%–23,3% (Gelasakis et al., 2013) με σημαντικό οικονομικό κόστος για τον τομέα της κτηνοτροφίας. Περίπου 80% των περιπτώσεων σχετίζεται με μολυσματικές ασθένειες, κυρίως ποδοδερματίτιδα (Green & Kaler, 2008), καθιστώντας την έγκαιρη διάγνωση απαραίτητη (Kaler et al., 2010).

Οι παραδοσιακές οπτικές μέθοδοι εντοπισμού είναι χρονοβόρες και υποκειμενικές, καθώς τα πρόβατα συχνά αποκρύπτουν τα συμπτώματα, ενώ η εκτίμηση του βαδίσματος καλύπτει μόλις το 2% της καθημερινής δραστηριότητας (Bueno & Ruckebusch, 1979). Στις αίγες, η χωλότητα συσχετίζεται συχνά με υπερανάπτυξη οπλών, ιδιαίτερα σε εντατικά συστήματα με μαλακά υποστρώματα (Winter, 2011).

Τα τελευταία χρόνια η πρόοδος στους αισθητήρες έχει προσφέρει νέες λύσεις για αντικειμενική ανίχνευση. Επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κινητικότητας των ζώων, ενώ έχουν δοκιμαστεί και κάμερες 2D/3D (Aydin, 2017), θερμογραφία (Stokes et al., 2012), πιεζοευαίσθητα δάπεδα (Byrne et al., 2019) και ραντάρ (Busin et al., 2019). Παρά τις προόδους, η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στα βοοειδή, με περιορισμένες μελέτες σε μικρά μηρυκαστικά. Σε πρόβατα, οι αισθητήρες έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί για την αναγνώριση συμπεριφοράς και χωλότητας (Kaler et al., 2020), με ακρίβεια έως 75,5% σε προηγούμενες μελέτες (Al-Rubaye et al., 2018).

Οι μέθοδοι με αισθητήρες προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως συνεχή συλλογή δεδομένων και ανεξαρτησία από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Finney et al., 2018), σε αντίθεση με τις κάμερες ή τα πιεζοευαίσθητα συστήματα που απαιτούν ειδικές συνθήκες και είναι πιο δαπανηρά (Qiao et al., 2021). Παρά τις ενθαρρυντικές εξελίξεις, δεν υπάρχουν ακόμη πλήρως εμπορικές λύσεις για την ανίχνευση της χωλότητας σε μικρά μηρυκαστικά. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτίωση της ακρίβειας και της εφικτότητας σε πραγματικές συνθήκες, με στόχο την ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο για την ευζωία προβάτων και αιγών.

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός αυτοματοποιημένου συστήματος ανίχνευσης χωλότητας σε πρόβατα, με χρήση φορητών αδρανειακών αισθητήρων (IMUs) και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, ικανού να ταξινομεί τη χωλότητα σε διαφορετικά επίπεδα σοβαρότητας. Η έρευνα επιδίωξε να προσφέρει μια αξιόπιστη, αντικειμενική και μη παρεμβατική μέθοδο διάγνωσης, που θα μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες εκτροφής, συμβάλλοντας τόσο στη βελτίωση της ευζωίας των ζώων όσο και στη μείωση των οικονομικών απωλειών για τους παραγωγούς.

2. ΥΛΙΚΑ και ΜΕΘΟΔΟΙ

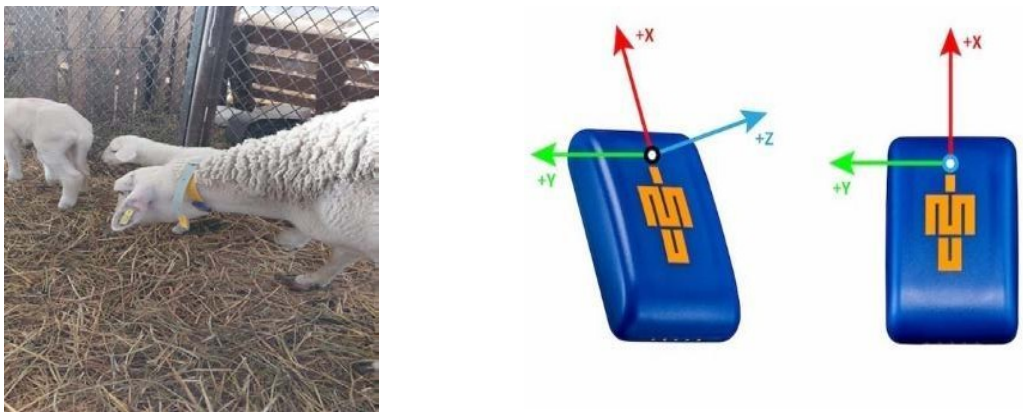
Η αρχιτεκτονική του αυτοματοποιημένου συστήματος ανίχνευσης χωλότητας σε πρόβατα αποτελεί το θεμελιώδες σχέδιο που συνδυάζει υλικό (hardware) και λογισμικό (software) σε ένα ενιαίο σχήμα, επιτρέποντας τη μετατροπή ακατέργαστων σημάτων

από αισθητήρες σε χρήσιμες διαγνωστικές πληροφορίες. Το σύστημα συγκροτείται από πέντε κύριες υπομονάδες:

1. Μονάδα Συλλογής Δεδομένων, που καταγράφει την κίνηση μέσω φορητών αισθητήρων·
2. Αγωγό Προεπεξεργασίας, που καθαρίζει και κανονικοποιεί τα δεδομένα·
3. Μονάδα Εξαγωγής Χαρακτηριστικών, που υπολογίζει ποσοτικά μέτρα από τα σήματα·
4. Πυρήνα Μηχανικής Μάθησης, όπου εφαρμόζονται αλγόριθμοι πρόβλεψης για την ταξινόμηση της χωλότητας· και
5. Διεπαφή Εξόδου, που παρουσιάζει τα αποτελέσματα στους τελικούς χρήστες. Η αρχιτεκτονική αυτή ανταποκρίνεται τόσο σε λειτουργικές απαιτήσεις (υψηλή ακρίβεια ταξινόμησης) όσο και σε μη λειτουργικούς περιορισμούς (υπολογιστική αποδοτικότητα, επεκτασιμότητα, ελάχιστη όχληση των ζώων).

Η έρευνα διεξήχθη τα έτη 2024-2025 σε δυο κτηνοτροφικές μονάδες αιγοπροβάτων: α) στην Πετρούσα Δράμας και β) στη Νέα Απολλωνία Θεσσαλονίκης. Συνολικά συμμετείχαν 27 πρόβατα (14 από την Πετρούσα και 13 από τη Νέα Απολλωνία), εκ των οποίων 7 αρνιά ηλικίας 5–27 ημερών και 20 προβατίνες ηλικίας 2–6 ετών. Η επιλογή έγινε βάσει υγειονομικής κατάστασης, με τα ζώα να ταξινομούνται σε υγιή, με ήπια μορφή χωλότητας και με σοβαρή μορφή χωλότητας, κατόπιν κλινικής αξιολόγησης. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν για μία ώρα σε κάθε ζώο ανά φάση συλλογής, με στόχο την παρακολούθηση κινητικότητας σε συνθήκες φυσικής βόσκησης. Για λόγους ταυτοποίησης, τα ζώα σημαδεύτηκαν με χρωματιστό σπρέι και αριθμήθηκαν αναλόγως.

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε με καταγραφικές μονάδες της εταιρίας Blue Trident IMUs (12 g), οι οποίοι ενσωμάτωναν τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο και μαγνητόμετρο. Οι κύριες μονάδες τοποθετήθηκαν σε κολάρα – πρακτική που αποδείχθηκε εύχρηστη και ελάχιστα παρεμβατική – για λεπτομερέστερη καταγραφή της χωλότητας. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 125 Hz, με διάρκεια καταγραφής 30 λεπτών ανά ζώο. Το τελικό σύνολο δεδομένων ξεπέρασε τις 50.000 καταγραφές διάρκειας 3 δευτερολέπτων, εκ των οποίων 41% αφορούσε βάδιση, 48% ορθοστασία και 11% κατάκλιση. Κάθε δείγμα συνοδευόταν από χρονική σήμανση και ετικέτα κατηγορίας (υγιές ζώο, ήπια χωλότητα και σοβαρή μορφή χωλότητας).



(α) (β)

Σχήμα 1. Το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα στα ζώα και β) οι αισθητήρες Vicon Blue Trident IMU που χρησιμοποιήθηκαν.

Η προεπεξεργασία περιλάμβανε υποδειγματοληψία (undersampling) για αντιμετώπιση ανισορροπίας τάξεων, αντικατάσταση ελλιπών τιμών, καθώς και διόρθωση ακραίων τιμών. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε εξαγωγή χαρακτηριστικών ώστε τα ακατέργαστα σήματα να μετατραπούν σε αναγνωρίσιμα πρότυπα κίνησης. Συνολικά εξήχθησαν 17 χαρακτηριστικά ανά άξονα, κατανεμημένα σε χρονικό (μέσος όρος, τυπική απόκλιση, μηδενικές διελεύσεις κ.ά.), συχνοτικό (φασματική εντροπία, πυκνότητα φασματικής ισχύος, κυρίαρχη συχνότητα) και στατιστικό πεδίο (ασυμμετρία, κύρτωση) (Kateris et al., 2014). Η επιλογή παραθύρου 3 δευτερολέπτων με 50% επικάλυψη κρίθηκε βέλτιστη για την αποτύπωση σύντομων κινητικών μοτίβων. Για μείωση της διαστασιμότητας και περιορισμό του κινδύνου υπερπροσαρμογής εφαρμόστηκε η μέθοδος ReliefF, με στόχο την ανάδειξη των πλέον διακριτικών χαρακτηριστικών.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας

Feature Name	*Formula*	*Feature Name*	*Formula*
Mean	$Mean = \frac{\sum_{n=1}^{N} x(n)}{N}$	**Standard Deviation**	$STD = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n) - mean)^2}{N-1}}$
Root Mean Square	$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n))^2}{N}}$	**T3**	$T3 = \left(\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}\sqrt{\lvert x(n)\rvert}}{N}}\right)^2$
Peak Value	$Peak\ Value = max\lvert x(n)\rvert$	**Skewness**	$Skewness = \frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n) - Meam)^3}{(N-1)STD^3}$
Clearance factor	$Clearance\ Factor = \frac{Peak\ Value}{T3}$	**Kurtosis**	$Kurtosis = \frac{\sum_{n=1}^{N}(x(n) - Meam)^4}{(N-1)STD^4}$
Min	The lowest value in the window	**Crest factor**	$Crest\ Factor = \frac{Peak\ Value}{RMS}$
Max	The highest value in the window	**Zero Crossing**	The N number of times the values change from positive to negative sign and vice versa
Dominant Frequency	Frequency where signal has the highest valuer	**Signal Area**	$SA = \sum Mag \cdot 1\ f\ s$
Spectral Area	$SpA = 2\sum Nn = 1S(fn) \cdot \Delta f$	**Harmonic ratio**	$HR = \frac{\sum_{i=1}^{n} f_{2i}}{\sum_{i=1}^{n} f_{2i+1}}$
Spectral Entropy	$SE = -\sum PSDnorm(f) \cdot log\ (PSDnorm(f))$ *PSD*=power spectral density		

Για την ταξινόμηση της χωλότητας δοκιμάστηκαν τρεις αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης: Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) και k-Nearest Neighbors (KNN). Ο RF, αξιοποιώντας συνδυαστική μάθηση (ensemble learning), επέδειξε υψηλή ακρίβεια και μικρό κίνδυνο υπερπροσαρμογής. Ο SVM, αν και ισχυρός σε μη γραμμικά προβλήματα, απαιτούσε προσεκτική ρύθμιση παραμέτρων, ενώ ο KNN πρόσφερε απλότητα αλλά ήταν πιο ευάλωτος σε θόρυβο και υψηλό όγκο δεδομένων. Η εκπαίδευση και αξιολόγηση έγινε με πενταπλή διασταυρούμενη επικύρωση (5-fold cross-validation) σε επίπεδο ζώου, ώστε να αποτραπεί διαρροή δεδομένων.

Η αξιολόγηση της απόδοσης βασίστηκε σε κλασικές μετρικές: Ακρίβεια (Accuracy), Ακρίβεια Θετικής Πρόβλεψης (Precision), Ανάκληση (Recall), Ειδικότητα (Specificity) και F-Score. Με αυτόν τον τρόπο εκτιμήθηκε ολοκληρωμένα η ισορροπία του συστήματος μεταξύ σωστής διάγνωσης υγιών και χωλών ζώων.Οι δείκτες αυτοί παρέχουν ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης, επιτρέποντας την αξιολόγηση τόσο της σωστής αναγνώρισης των περιστατικών χωλότητας όσο και της αποφυγής ψευδώς θετικών προβλέψεων.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το αυτοματοποιημένο σύστημα ανίχνευσης χωλότητας αξιολογήθηκε με βάση ένα σύνολο δεδομένων 27.758 δειγμάτων, τα οποία συλλέχθηκαν από 27 πρόβατα σε δυο εμπορικές φάρμες στην Ελλάδα την διετία 2024-2025, μετά από διαδικασία εξισορρόπησης των τάξεων και απομάκρυνσης ελλιπών ή ακραίων τιμών. Τα δείγματα αυτά κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις κλάσεις χωλότητας — υγιή ζώα, ζώα με χωλότητα σε πρώιμο στάδιο και ζώα με χωλότητα σε προχωρημένο στάδιο — βάσει κλινικής αξιολόγησης από ειδικούς. Στο επεξεργασμένο σύνολο δεδομένων, η κατηγορία των υγιών περιλάμβανε 9.353 δείγματα, η κατηγορία με ήπια χωλότητα 9.252 δείγματα και η κατηγορία με σοβαρή χωλότητα 9.153 δείγματα. Για την εκπαίδευση και αξιολόγηση των μοντέλων εφαρμόστηκε πενταπλή διασταυρούμενη επικύρωση. Σε κάθε επανάληψη, περίπου 5.551–5.552 δείγματα χρησιμοποιήθηκαν για έλεγχο (27.758 ÷ 5), ενώ τα υπόλοιπα ~22.206–22.207 δείγματα αξιοποιήθηκαν για εκπαίδευση. Τρεις αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης — Random Forest (RF), k-Nearest Neighbors (KNN) και Support Vector Machine (SVM) — αξιολογήθηκαν, με τις επιδόσεις τους να παρουσιάζονται με βάση δείκτες συνολικής ακρίβειας, precision, recall, F- score, specificity και πίνακες σύγχυσης.

Πίνακας 2. Πίνακας Σύγχυσης και Μετρήσεις Αξιολόγησης του Αλγόριθμου Random Forest

Actual / Predicted	*Healthy*	*Mild Lameness*	*Severe Lameness*	*Recall*	*F-score*
Healthy	8,137	935	467	0.87	0.87
Mild Lameness	655	7,771	1,303	0.84	0.79
Severe Lameness	561	546	7,383	0.81	0.84
Precision	0.88	0.74	0.88		
Specificity	0.91	0.86	0.92		
Overall Accuracy					0.84

Ο αλγόριθμος **Random Forest** παρουσίασε την υψηλότερη επίδοση, με συνολική ακρίβεια 0,84. Ο πίνακας σύγχυσης (Πίνακας 2) παρουσιάζει αναλυτικά τα αποτελέσματα ταξινόμησης για τις τρεις κατηγορίες. Για την κατηγορία των υγιών (9.353 δείγματα), το RF κατέγραψε recall 0,87 και precision 0,88, αναγνωρίζοντας σωστά 8.137 δείγματα (αληθώς θετικά, TP), με 1.149 ψευδώς θετικά (FP). Στην κατηγορία με ήπια χωλότητα (9.252 δείγματα) το μοντέλο εμφάνισε recall 0,84 και precision 0,74, με 7.771 TP και 2.729 FP, γεγονός που υποδηλώνει κάποια επικάλυψη με τις υπόλοιπες κατηγορίες. Για την κατηγορία με σοβαρή χωλότητα (9.153 δείγματα), το RF πέτυχε recall 0,81 και precision 0,87, ταξινομώντας σωστά 7.383 TP με 1.107 FP. Οι τιμές F-score ήταν 0,87, 0,79 και 0,84 για τις κατηγορίες υγιή, ήπια και σοβαρή χωλότητα αντίστοιχα, ενώ η specificity έφτασε το 0,91, 0,86 και 0,91 για τις τρεις κατηγορίες, αντίστοιχα, αποδεικνύοντας την υψηλή διακριτική ικανότητα του αλγορίθμου.

Ο αλγόριθμος **k-Nearest Neighbors (KNN)** είχε ελαφρώς χαμηλότερη επίδοση σε σχέση με το Random Forest, με συνολική ακρίβεια 0,81. Ο πίνακας σύγχυσης (Πίνακας 3) δείχνει αυξημένες εσφαλμένες ταξινομήσεις. Για την κατηγορία των υγιών ζώων (9.353 δείγματα), το KNN πέτυχε recall 0,84 και precision 0,85, με 7.856 σωστά ταξινομημένα δείγματα (TP) και 1.332 ψευδώς θετικά (FP). Στην κατηγορία με ήπια χωλότητα (9.252 δείγματα), το recall έφτασε το 0,81 και το precision το 0,71, με 7.493 TP και 3.056 FP. Στην κατηγορία με σοβαρή χωλότητα (9.153 δείγματα), το μοντέλο πέτυχε recall 0,76 και precision 0,85, με 6.994 TP και 1.200 FP. Οι τιμές F-score ήταν 0,84, 0,76 και 0,80 για τις κατηγορίες υγιών, ήπιας και σοβαρής χωλότητας αντίστοιχα, ενώ οι τιμές specificity ανήλθαν σε 0,89, 0,84 και 0,90.

Πίνακας 3. Πίνακας Σύγχυσης και Μετρήσεις Αξιολόγησης του Μοντέλου KNN

Actual / Predicted	***Healthy***	***Mild Lameness***	***Severe Lameness***	***Recall***	***F-score***
Healthy	7,856	1,028	652	0.84	0.84
Mild Lameness	748	7,493	1,507	0.81	0.76
Severe Lameness	749	731	6,994	0.76	0.80
Precision	0.85	0.71	0.85		
Specificity	0.89	0.84	0.94		
Overall Accuracy					0.81

Πίνακας 4. Πίνακας Σύγχυσης και Μετρήσεις Αξιολόγησης του Μοντέλου SVM

Actual / Predicted	***Healthy***	***Mild Lameness***	***Severe Lameness***	***Recall***	***F-score***
Healthy	7,108	1,376	1032	0.76	0.77
Mild Lameness	1,086	6,569	2,001	0.71	0.67
Severe Lameness	1,159	1,307	6,120	0.67	0.72
Precision	0.78	0.63	0.78		
Specificity	0.83	0.79	0.91		
Overall Accuracy					0.72

Ο αλγόριθμος **Support Vector Machine (SVM)** παρουσίασε τη χαμηλότερη επίδοση, με συνολική ακρίβεια 0,72. Ο πίνακας σύγχυσης (Πίνακας 4) αναδεικνύει σημαντικές λανθασμένες ταξινομήσεις σε όλες τις κατηγορίες. Για τα υγιή ζώα (9.353 δείγματα), το SVM πέτυχε recall 0,76 και precision 0,78, με 7.108 σωστά ταξινομημένα δείγματα (TP) και 2.008 ψευδώς θετικά (FP). Στην κατηγορία με ήπια χωλότητα (9.252 δείγματα), το recall έφτασε το 0,71 και το precision το 0,63, με 6.569 TP και 3.856 FP. Στην κατηγορία με σοβαρή χωλότητα (9.153 δείγματα), το recall ήταν 0,67 και το precision 0,78, με 6.120 TP και 1.761 FP. Οι τιμές F-score ήταν 0,77, 0,67 και 0,72 για τις κατηγορίες υγιών, ήπιας και σοβαρής χωλότητας αντίστοιχα, ενώ οι τιμές specificity έφτασαν σε 0,83, 0,79 και 0,87. Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι το SVM είχε τη χαμηλότερη διακριτική ικανότητα ανάμεσα στα μοντέλα που δοκιμάστηκαν.

7. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το σύστημα ανίχνευσης χωλότητας που αναπτύχθηκε με χρήση αδρανειακών μονάδων μέτρησης (IMUs) και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης βελτιώνει την ευζωία των προβάτων και τη διαχείριση εκτροφών. Το μοντέλο **Random Forest (RF)** πέτυχε την υψηλότερη ακρίβεια (84%), ξεπερνώντας το **KNN** (81%) και το **SVM** (72%). Η υπεροχή του RF αποδίδεται στην ανθεκτικότητά του σε δεδομένα υψηλής διάστασης και στην ικανότητά του να περιορίζει την υπερπροσαρμογή. Τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά από επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια αποδείχθηκαν ιδιαίτερα διακριτικά, επιβεβαιώνοντας προηγούμενες μελέτες.

Σε σύγκριση με άλλες έρευνες (π.χ. Al-Rubaye et al., 2018), η ακρίβεια του RF ήταν βελτιωμένη χάρη στη χρήση φασματικών χαρακτηριστικών, στατιστικών υψηλότερης τάξης και παραθύρων τριών δευτερολέπτων με επικάλυψη. Το KNN επηρεάστηκε από θόρυβο και επιλογή παραμέτρων, ενώ το SVM δυσκολεύτηκε με μη γραμμικά δεδομένα, σε αντίθεση με αποτελέσματα που είχαν αναφερθεί σε βοοειδή.

Η τοποθέτηση IMUs σε κολάρα αποδείχθηκε πρακτική και λιγότερο παρεμβατική σε σχέση με εναλλακτικές, ενώ η προαιρετική χρήση αισθητήρων στα άκρα πρόσφερε πρόσθετη ανάλυση σε περιπτώσεις σοβαρής χωλότητας. Παρά τα θετικά αποτελέσματα, περιορισμοί όπως το σχετικά μικρό δείγμα (27 πρόβατα, δυο φάρμες) και η χρήση υποδειγματοληψίας μπορεί να επηρεάζουν τη γενικευσιμότητα.

Συνολικά, το προτεινόμενο σύστημα συνδυάζει υψηλή ακρίβεια, πρακτικότητα και δυνατότητες πραγματικού χρόνου, αποτελώντας υποσχόμενο πρωτότυπο για εφαρμογή σε εμπορικές εκτροφές. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για μείωση του υπολογιστικού κόστους, ενίσχυση της ανθεκτικότητας των αισθητήρων και κλιμάκωση μέσω τεχνολογιών edge computing.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία απέδειξε ότι ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ανίχνευσης χωλότητας με χρήση αδρανειακών αισθητήρων (IMUs) σε συνδυασμό με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη και πρακτική λύση για τις εκτροφές προβάτων. Ο αλγόριθμος Random Forest παρουσίασε την υψηλότερη ακρίβεια (84%), ξεπερνώντας το KNN (81%) και το SVM (72%), γεγονός που επιβεβαιώνει την καταλληλότητά του για την ταξινόμηση δεδομένων υψηλής διάστασης και την ελαχιστοποίηση της υπερπροσαρμογής. Επιπλέον, η τοποθέτηση των αισθητήρων σε κολάρα αποδείχθηκε λειτουργική και ελάχιστα παρεμβατική, διευκολύνοντας την εφαρμογή σε εμπορικές συνθήκες. Συνολικά, το προτεινόμενο σύστημα προσφέρει μια αντικειμενική και αποδοτική εναλλακτική στην υποκειμενική οπτική παρατήρηση, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της ευζωίας των ζώων και της παραγωγικότητας των εκτροφών.

Ευχαριστίες

Αυτή η έρευνα χρηματοδοτήθηκε από τη Δράση «Πρόγραμμα Αγροτικής Ανάπτυξης της Ελλάδας 2014–2020», στο πλαίσιο του Μέτρου 16 «Συνεργασία», Υπομέτρων 16.1–16.2, η οποία συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Αγροτικής Ανάπτυξης και εθνικούς πόρους, μέσω του έργου «LAMERSYS – Αυτόματο σύστημα αναγνώρισης χωλότητας σε μονάδες εκτροφής αιγοπροβάτων» (Κωδικός έργου: Μ16ΣΥΝ2-00033).

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Al-Rubaye, Z., Al-Sherbaz, A., McCormick, W., & Turner, S. (2018). Sensor Data Classification for the Indication of Lameness in Sheep. In I. Romdhani, L. Shu, H. Takahiro, Z. Zhou, T. Gordon, & D. Zeng (Eds.), Collaborative Computing: Networking, Appli-cations and Worksharing (pp. 309–320). Springer International Publishing.

Aydin, A. (2017). Development of an early detection system for lameness of broilers using computer vision. Computers and Electronics in Agriculture, 136, 140–146. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.019 Bueno, L., & Ruckebusch, Y. (1979). Ingestive behaviour in sheep under field conditions.
Applied Animal Ethology, 5(2), 179–187.

Busin, V., Viora, L., King, G., Tomlinson, M., LeKernec, J., Jonsson, N., & Fioranelli, F. (2019). Evaluation of lameness detection using radar sensing in ruminants. Veterinary Record, 185(18), 572. https://doi.org/10.1136/vr.105407

Byrne, D. T., Esmonde, H., Berry, D. P., McGovern, F., Creighton, P., & McHugh, N. (2019). Sheep lameness detection from individual hoof load. Computers and Electronics in Agriculture, 158, 241–248.

Finney, G., Gordon, A., Scoley, G., & Morrison, S. J. (2018). Validating the IceRobotics IceQube tri-axial accelerometer for measuring daily lying duration in dairy calves. Livestock Science, 214, 83–87.

Fogarty, E. S., Swain, D. L., Cronin, G., & Trotter, M. (2018). Autonomous on-animal sensors in sheep research: A systematic review. Computers and Electronics in Agriculture, 150, 245– 256.

Gelasakis, A. I., Oikonomou, G., Bicalho, R. C., Valergakis, G. E., Fthenakis, G. S., & Arsenos, G. (2013). Clinical characteristics of lameness and potential risk factors in intensive and semi- intensive dairy sheep flocks in Greece. Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society, 64(2), 123–130.

Green, L. E., & Kaler, J. (2008). Recognition of lameness and decisions to catch for inspection among sheep farmers and spe-cialists in GB.

Kaler, J., Daniels, S. L. S., Wright, J. L., & Green, L. E. (2010). Randomized clinical trial of long- acting oxytetracycline, foot trimming, and flunixine meglumine on time to recovery in sheep with footrot. Journal of Veterinary Internal Medicine, 24(2), 420–425.

Kaler, J., Mitsch, J., Vázquez-Diosdado, J. A., Bollard, N., Dottorini, T., & Ellis, K. A. (2020). Automated detection of lameness in sheep using machine learning approaches: Novel insights into behavioural differences among lame and non-lame sheep. Royal Society Open Science, 7(1). https://doi.org/10.1098/rsos.190824

Kateris, D., Moshou, D., Pantazi, X.E., Gravalos, I., Sawalhi, N., Loutridis, S., “A machine learning approach for the condition monitoring of rotating machinery,” J Mech Sci Technol, vol. 28, pp. 61–71, 2014

Qiao, Y., Kong, H., Clark, C., Lomax, S., Su, D., Eiffert, S., & Sukkarieh, S. (2021). Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: A review. Animals, 11(11), 3033.

Stokes, J. E., Leach, K. A., Main, D. C. J., & Whay, H. R. (2012). An investigation into the use of infrared thermography (IRT) as a rapid diagnostic tool for foot lesions in dairy cattle. The Veterinary Journal, 193(3), 674–678.

Winter, A. C. (2011). Treatment and control of hoof disorders in sheep and goats. Veterinary Clinics: Food Animal Practice, 27(1), 187–192

60. C-FARMING: CARBON FARMING ALLIANCE

Dimitrios Michas, Bas Paris, Ioannis Thermos & Athanasios Balafoutis

Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, 6ο χλμ Χαριλάου – Θέρμης, 57001, Θέρμη, email:d.michas@certh.gr

Extended abstract

The C-Farming project aims to accelerate the uptake of Carbon Farming as a sustainable and climate-smart agricultural business model by strengthening the green, digital, entrepreneurial, transversal, and resilience skills of current and future farmers, agri-professionals, students, and educators. Through a holistic and meta-innovative approach, the project empowers these actors to act as catalysts of sustainable agricultural transformation across Europe and beyond.

C-Farming brings together 18 partners from 7 European countries, including 6 higher and vocational education and training (HE/VET) institutions, 2 research organizations, and 10 labour market actors. This cross-sectoral alliance bridges education, research, and the agri-business ecosystem, fostering innovation in teaching, training, and production processes, and supporting Europe's transition towards low-carbon, circular, and resilient farming systems.

C-Farming develops two complementary learning pathways:

1. Training Programme (VOOC), for farming practitioners, agri-entrepreneurs, and students, enhancing competences in green innovation, digitalization, and sustainable entrepreneurship.
2. Train-the-Trainers Programme (MOOC), for VET/HE educators and agricultural advisors, introducing innovative pedagogies, technology-driven learning, and sustainability-focused teaching methods.

Both programmes align with ECVET, EQF, EQAVET, and the EU Micro-credential framework, and are freely accessible through the C-Farming Digital Learning Ecosystem, an immersive platform featuring an e-learning hub, Virtual Farm, and virtual library. Through 6 capacity- building activities, 6 blended and 1 asynchronous pilot training, and 7 work-based learning sessions, the project will upskill and reskill over 420 beneficiaries, closing identified skills gaps in the agricultural sector.

To ensure long-term impact, 6 Carbon Farming Learning & Business Incubators will be established across partner countries, functioning as one-stop shops for sustainable agri- entrepreneurship, innovation, and CSR/ESG-driven business models. C-Farming applies a multidisciplinary, participatory, and co-creative methodology, combining the expertise of HEIs, VET providers, research institutions, and agri-businesses. The approach is structured around the following principles:

- Comprehensive needs analysis validated by farmers and key stakeholders.
- Co-design & co-creation of results to ensure ownership and practical relevance.
- Tailored interventions as incubators, capacity-building, and digital upskilling tools.
- Train-the-trainer model ensuring multiplier effects and long-term sustainability.
- Digital innovation via e-learning, virtual reality, and AI-supported learning tools.
- Strong management and quality assurance for effective implementation and evaluation.

The project will promote innovation, enhance employability, and drive digital transformation within sustainable agriculture, supporting the creation of a more resilient and competitive green economy. By strengthening policy dialogue on sustainable farming and green entrepreneurship, C-Farming fosters stronger connections between education, research, and industry. Its long-term sustainability is ensured through the establishment of Carbon Farming Learning & Business Incubators, advanced digital learning tools, and an international certification framework aligned with EQF, EQAVET, ECVET, and Europass Digital Credentials. Ultimately, C-Farming contributes to Europe's green and digital transition, empowering the agricultural community to advance toward a climate-resilient, innovation-driven, and net-positive future.

61. PRIMARY - NEW BUSINESS FOR FARMERS AND COOPERATIVES IN RURAL AREAS BY LOCAL UPCYCLING SOLUTIONS USING UNDERUTILIZED AGRICULTURAL FEEDSTOCKS

Bas Paris, Dimitris Michas, Giorgos Karampelas, Athanasios Balafoutis

CERTH, Institute for Bio-Economy and Agri-Technology (iBO), 80 Athinon Avenue and 2-4 Mirionou,10441, Athens, e-mail: d.michas@certh.gr

Extended abstract

The PRIMARY project aims to develop and pilot innovative local solutions for producing food, feed, bio-based materials, bioenergy, and fertilizers by valorizing underutilized agricultural biomass. Much of Europe's agricultural by-products such as grass, greenhouse waste, cotton residues, and olive tree prunings are currently burned, composted, or discarded despite being abundant and valuable. PRIMARY seeks to unlock this potential by establishing sustainable, regionally grounded value chains in rural areas where pilot and demonstration infrastructures are limited. PRIMARY brings together 12 partners from Finland, Greece, and Estonia, representing research institutions, industry leaders, agricultural organizations, and renewable energy communities. The project aims to boost local businesses, create opportunities for rural employment, and accelerate Europe's transition toward a resilient circular bioeconomy. Over a four-year period, the project will work closely with farmers, cooperatives, and SMEs to demonstrate scalable bio-based production processes in two diverse regions of Europe, North-East Europe (Finland) and South-East Europe (Greece).

The project applies a cascading biomass use methodology across six integrated process concepts: (1) fractionation of grass into protein- and fibre-rich components for food, feed, and material applications; (2) and (3) submerged and solid-state fermentation to convert agricultural residues into protein-rich ingredients; (4) fibre-forming technology for sustainable packaging and construction materials; (5) pelletizing of olive tree and cotton by-products to produce biofuels and support gasification; and (6) pyrolysis of cotton and olive residues to generate biochar for fertilizer, soil improvement, and material use. Each technology is selected to maximize biomass value while responding to regional environmental, economic, and social priorities.

Additionally, pilot activities are already demonstrating the project's practical relevance. In Finland, partners are developing grass biorefining, fermentation-based protein production, and foam-forming technologies for fibre-rich feedstocks. In Greece, cotton and olive by-products are being transformed into solid biofuels, renewable electricity, biochar, compost, and other innovative materials, showcasing how circular bioeconomy solutions can originate at the farm level. These initiatives illustrate the potential to replace wasteful practices, diversify farm income, and strengthen rural economies.

To broaden its impact, PRIMARY will launch an open innovation call, enabling stakeholders across Europe to test, adapt, and replicate the project's technologies and business models. Through a stakeholder platform, knowledge-sharing activities, and collaboration with policymakers, the project aims to enhance self-sufficiency protein, reduce greenhouse gas emissions and land-use pressures, improve soil health, and promote

resource-efficient production systems. The economic potential is significant where new bio-based value chains could generate billions of euros and tens of thousands of jobs across the EU. Ultimately, PRIMARY supports the transition to sustainable agricultural systems by demonstrating viable, scalable, and regionally tailored bio-based solutions. The project provides practical guidance for farmers, rural enterprises, and decision-makers, contributing to a more resilient, competitive, and environmentally responsible European bioeconomy.

ΕΝΟΤΗΤΑ 7η

Ενέργεια και βιοενέργεια στη γεωργία

62. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΜΕ ΦΒ

Αικατερίνη Μπαξεβάνου[1], Δημήτριος Φείδαρος[2], Χρυσούλα Παπαιωάννου[1] & Νικόλαος Κατσούλας[2]

[1] *Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας - Αγροτεχνολογίας, Γαιόπολις, 41500 Λάρισα,: chpapa@uth.gr*
[2] *Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, e-mail: nkatsoul@uth.gr*

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση ΦΒ εγκατεστημένων σε θερμοκήπιο στις ενεργειακές καταναλώσεις σε συνάρτηση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτά. Εξετάζονται δύο θάλαμοι θερμοκηπίου υψηλής τεχνολογίας με αυτόματο έλεγχο μικροκλίματος, εκ των οποίων ο ένας έχει εγκατεστημένα εντός του ΦΒ μονοκρυσταλλικές μονάδες διπλής όψης με σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς σε καλλιέργεια αγγουριού. Σύμφωνα με τις μετρήσεις, για την περίοδο μιας εαρινής καλλιέργειας αγγουριού, η τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο θάλαμο με τα ΦΒ στοιχεία ήταν κατά 10% μεγαλύτερη από αυτή του θαλάμου μάρτυρα, ενώ η παραγωγή αγγουριών μειώνεται κατά 5%. Ωστόσο λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒ, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στον θάλαμο με τα ΦΒ είναι μειωμένη κατά 50% σε σχέση με το θάλαμο μάρτυρα, ενώ το περιβαλλοντικό αποτύπωμα υπό όρους εκπομπής CO2 είναι μειωμένο κατά 55%. Τέλος, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στον θάλαμο με τα ΦΒ, υπερκαλύπτει για αυτό το χρονικό διάστημα τις ανάγκες του θαλάμου σε ηλεκτρική ενέργεια οι οποίες είναι μόλις το 33% της ενέργειας που απαιτεί η παραγωγή.

Λέξεις κλειδιά: Αγροβολταικά, μέτρηση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, θερμοκήπια

ENERGY CONSUMPTION IN GREENHOUSES WITH PV

Catherine Baxevanou[1], Dimitrios Fidaros[2], Chryssoula Papaioannou[1], Nikolaos Katsoulas[2]

[1]*Department of Agrotechnology, University of Thessaly, Gaiopolis, Larisa, Greece,:chpapa@uth.gr*
[2]*Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly,Fytokou Street, 38446 Volos, Greece, e-mail: nkatsoul@uth.gr*

Abstract

In the present work the impact of PV installed in a greenhouse on the energy consumption in relation to the power production is examined. Two high-tech greenhouse chambers with automatic microclimate control are examined, one of which has bi-facial monocrystalline PV modules installed inside equipped with a solar tracking system in cucumber cultivation. According to the electrical energy consumption measurements, for the period of a spring cucumber crop, the final electricity consumption in the chamber with the PV cells was 10% higher than that of the control chamber, while cucumber production was reduced by 5%. However, taking into account the production of electricity from PV, the primary energy consumption in the PV chamber is reduced by 50% compared to the control chamber, while the environmental footprint in terms of CO2 emissions is reduced by 55%. Finally, the power production in the chamber with PVs exceeds the chamber's electricity needs for this period, which are only 33% of production.

Key words: Agivoltaics, measurement electrical energy consumption, greenhouses

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θερμοκήπια είναι αειφορική μορφή γεωργίας αφού λειτουργώντας ως ηλιακές συσκευές αυξάνουν τη στρεμματική απόδοση μειώνοντας, παράλληλα, τις καταναλώσεις σε νερό και λιπάσματα. Ωστόσο τα σύγχρονα θερμοκήπια είναι κάτι παραπάνω από 'ηλιακές συσκευές' αφού είναι εξοπλισμένα με συστήματα ρύθμισης του μικροκλίματος αλλά και αυτοματισμού της παραγωγής, κυρίως στις περιπτώσεις στις οποίες η καλλιέργεια δε γίνεται στο έδαφος, π.χ. υδροπονία, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο ακόμα μεγαλύτερη στρεμματική απόδοση αλλά και τυποποιημένη υψηλή ποιότητα παραγωγής (Nikolaou *et al.* 2021). Συνεπώς τα θερμοκήπια, πλέον ως μονάδες παραγωγής αγροτικών προϊόντων σε ελεγχόμενο περιβάλλον, γίνονται και καταναλωτές ενέργειας (Paris *et al.* 2022). Λόγω του τεχνολογικού εκσυχρονισμού των θερμοκηπίων το κόστος της ενέργειας στο συνολικό κόστος της παραγωγής αυξήθηκε από 5.9% το 2003 σε 10.0% το 2011 (Sanford, 2011).

Η αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες και το είδος της καλλιέργειας και συνήθως δίνεται ανηγμένη στην επιφάνεια του θερμοκηπίου, κάτι που δημιουργεί συχνά λανθασμένες εντυπώσεις καθώς θερμοκήπια χαμηλής τεχνολογίας, και άρα χαμηλής απόδοσης, εμφανίζονται ως ενεργειακά αποτελεσματικά. Για τον λόγο αυτό είναι προτιμότερο η κατανάλωση ενέργειας να ανάγεται στην αγροτική παραγωγή του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά μπορεί να αναφερθεί ότι η κατανάλωση ενέργειας για παραγωγή αγγουριού στην Ολλανδία κυμαίνεται στις 11500 GJ/ha, ενώ στη Γερμανία στις 13000 GJ/ha. (Paris *et al.* 2022). Στην Ελλάδα βάσει ενεργειακών επιθεωρήσεων που διεξήχθησαν στο πλαίσιο του έργου REGACE σε εμπορικό θερμοκήπιο υψηλής τεχνολογίας με λέβητα βιομάζας, η κατανάλωση ενέργειας για καλλιέργεια αγγουριού ανέρχεται σε 488.9 kWh/m^2 ή

10.85 kWh/kg (Baxevanou *et al.* 2024). Οι Paris *et al.* δίνουν αρκετά γενικευμένα όρια κατανομής της κατανάλωσης ενέργειας, σύμφωνα με τα οποία η θέρμανση και η ψύξη αντιστοιχούν στο 0 – 99% της συνολικής κατανάλωσης, η άρδευση αντιστοιχεί στο 1-19%, η λίπανση 1- 27%, η εφαρμογή φυτοφαρμάκων 0 – 6% και ο φωτισμός περιορίζεται στο 1% (Paris *et al.* 2022). Ενώ μια εξίσου γενικευμένη προσέγγιση (Djevic and Dimitrijevic 2009) αναφέρει ότι το 70-80% της ενέργειας χρησιμοποιείται για θέρμανση, το 10-15% για άλλες ηλεκτρικές καταναλώσεις και η υπόλοιπη ενέργεια χρησιμοποιείται για μεταφορές. Σε κάθε περίπτωση η κατανομή εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες και το επίπεδο τεχνολογίας του θερμοκηπίου (χρήση λέβητα ή αντλίας θερμότητας). Με βάση τις ενεργειακές επιθεωρήσεις που παρουσιάζονται στο (Baxevanou *et al.* 2024) η γενική κατανομή κατανάλωσης ενέργειας σε Ελληνικά θερμοκήπια είναι για θέρμανση 78 – 93%, ψύξη 0 – 11%, αερισμό 0.5%, άρδευση 2 – 8%, λίπανση 1 – 3% και φωτισμό 0 – 1%. Τελικά ο προσδιορισμός της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και του χρονικού profile αυτής της κατανάλωσης, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τον όποιο σχεδιασμό. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι γνωστά συνήθως στοιχεία για τη συνολική κατανάλωση ή κάποια μοντέλα προσδιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας (Kittas *et al.* 2014, Trypanagnostopoulos *et al.* 2017).

Ένας τρόπος να διατηρήσουν τα θερμοκήπια χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αλλά και να αυξήσουν την απόδοση της καταλαμβανόμενης έκτασης, είναι η ταυτόχρονη χρήση της επιφάνειάς τους για παραγωγή ενέργειας επιπλέον της καλλιέργειας. Η προτεινόμενη τεχνολογία είναι η χρήση φωτοβολταικών (ΦΒ) στοιχείων πάνω από την καλλιέργεια, τα οποία ονομάζομαι αγροβολταϊκά (Palone 2017). Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτουν ερωτήματα σχετικά με το βέλτιστο σχεδιασμό, που αφορούν το είδος των ΦΒ στοιχείων, το ποσοστό κάλυψης της καλλιέργειας, τη θέση τοποθέτησης τους, την κλίση τους, το αν θα

είναι η κλίση σταθερή η μεταβαλλόμενη. Η απάντηση σε αυτά τα ερωτήματα εξαρτάται από πλήθος παράγοντες, σε κάθε περίπτωση όμως στόχος είναι η ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της αγροτικής παραγωγής και της παραγόμενης ενέργειας. Εφόσον το ίδιο το θερμοκήπιο είναι και καταναλωτής ενέργειας, θα πρέπει η χρήση αγροβολταϊκών να μη μειώνει την αγροτική παραγωγή και να μην αυξάνει τη ζήτηση ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο, περισσότερο από το ενεργειακό κέρδος που προσφέρει.

Σε ότι αφορά το είδος των ΦΒ έχουν εξεταστεί διάφορες τεχνολογίες όπως είναι τα ημι-διάφανα εύκαμπτα ΦΒ στοιχεία, άλλα ημιδιάφανα ΦΒ καθώς άκαμπτα ΦΒ στοιχεία διπλής όψης (Yano *et al.* 2014, Baxevanou *et al.* 2020). Σε ότι αφορά τα ημι-διάφανα εύκαμπτα ΦΒ στοιχεία έχουν μεν το πλεονέκτημα της εύκολης τοποθέτησης πάνω στο κάλυμμα του θερμοκηπίου και του χαμηλού βάρους, όμως χαρακτηρίζονται από μικρό βαθμό απόδοσης και μικρό χρόνο ζωής (Baxevanou *et al.* 2023). Η χρήση άκαμπτων ημιδιάφανων ΦΒ στοιχείων περιορίζει τις επιλογές ως προς το σχήμα της οροφής του θερμοκηπίου. Μια άλλη επιλογή μπορεί να είναι η τοποθέτηση άκαμπτων ΦΒ στοιχείων διπλής όψης με μεγάλη περατότητα κάτω από το κάλυμμα του θερμοκηπίου. Σε αυτήν την περίπτωση αναμένεται πέρα από τη μείωση της διαθέσιμης PAR στο επίπεδο των φυτών να μεταβληθεί και το μικροκλίμα μέσα στο θερμοκήπιο όχι μόνο λόγω μεταβολής της ακτινοβολίας (η οποία ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση μπαίνει στο χώρο του θερμοκηπίου από το κάλυμμα χωρίς εμπόδιο) αλλά και λόγω της μεταβολής του πεδίου ροής μέσα στο θερμοκήπιο. Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη των ΦΒ μεταβάλλει εκτός από την καλλιέργεια και την κατανάλωση ενέργειας σε αυτά.

Σε ότι αφορά το ποσοστό κάλυψης έχουν γίνει αρκετές εργασίες οι οποίες είτε καθορίζουν το βέλτιστο ποσοστό κάλυψης ανάλογα με την καλλιέργεια και την περατότητα του ΦΒ στοιχείου, είτε καθορίζουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη μείωση του ολικού συντελεστή περατότητας του καλύμματος και πάλι συναρτήσει της καλλιέργειας. Ο Hassanien προτείνει κάλυψη της οροφής κατά 20% με ημιδιάφανα ΦΒ ηλεκτρικής απόδοσης 8.25% (Hassanien *et al.* 2018). Σύμφωνα με το (Baxevanou *et al.* 2020), κάλυψη της οροφής κατά 47% με ημιδιάφανα εύκαμπτα ΦΒ με ηλεκτρική απόδοση 3.15% θα μπορούσε να εξασφαλίσει ικανοποιητικά επίπεδα PAR από Μάιο έως Σεπτέμβριο για καλλιέργεια τομάτας. Τέλος, ο Yano μελέτησε την παραγωγή ενέργειας από ΦΒ διπλής όψης που καλύπτουν το 37% της επιφάνειας ενός θερμοκηπίου (Yano *et al.* 2014)

Στην περίπτωση των ΦΒ που αναρτώνται πάνω στην οροφή, η κλίση τους καθορίζεται μονομερώς από τη γεωμετρία της οροφής. Στην περίπτωση ΦΒ που τοποθετούνται κάτω από το κάλυμμα της οροφής υπάρχει η δυνατότητα και να επιλεχθεί μια σταθερή κλίση αλλά και να χρησιμοποιηθεί σύστημα μεταβολής της κλίσης ανάλογα με τη θέση του ήλιου και τις ανάγκες της καλλιέργειας. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα χρήσης μονοκρυσταλλικών ΦΒ διπλής όψης με σημαντικά μεγαλύτερη απόδοση από τα ημι-διάφανα οργανικά ή τα μονοκρυσταλλικά μονής όψης, η οποία αναμένεται να παραμείνει σημαντικά μεγάλη παρά τη μειωμένη, λόγω του καλύμματος, διαθέσιμη ακτινοβολία μέσα στο θερμοκήπιο καθώς και τη λειτουργία τους σε υψηλή θερμοκρασία, σε σχέση με τη λειτουργία τους σε ανοιχτό πεδίο. Τέλος το κόστος της ανάρτησής τους μπορεί να περιοριστεί με την αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής του θερμοκηπίου για τη στήριξή τους.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται δύο διπλανοί εσωτερικοί θάλαμοι ενός θερμοκηπίου με οροφή γοτθικού τύπου υψηλής τεχνολογίας, με εαρινή καλλιέργεια αγγουριού εκ των οποίων ο ένας θάλαμος είναι συμβατικός (μάρτυρας) ενώ ο άλλος φέρει κάτω από την οροφή μονοκρυσταλλικές μονάδες ΦΒ διπλής όψης, εδραζόμενες στην υποδομή του θερμοκηπίου με σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς. Συγκεκριμένα μελετάται

η επίδραση των ΦΒ στις ενεργειακές καταναλώσεις σε συνάρτηση με την τοπική παραγωγή ενέργειας. Για τον λόγο αυτό μετρήθηκαν η κατανάλωση ενέργειας, συνολικά και ανά χρήση σε κάθε θάλαμο, για την κάλυψη της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς και η παραγωγή ενέργειας από τα ΦΒ, προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της λειτουργίας των ΦΒ στην κατανάλωση ενέργειας (απόλυτη κατανάλωση και κατανάλωση ανηγμένη στην αγροτική παραγωγή), καθώς το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του θερμοκηπίου.

1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε η κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας εαρινής καλλιέργειας αγγουριού σε δύο γειτονικούς εσωτερικούς θαλάμους ενός θερμοκηπίου αποτελούμενο από 6 θαλάμους συνολικά. Συγκεκριμένα μετρήθηκε η κατανάλωση ενέργειας στον θάλαμο 3 ο οποίος είναι ο θάλαμος μάρτυρας και στον θάλαμο 4 στον οποίο είναι εγκατεστημένα ΦΒ. Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι: α) άμεση καταγραφή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με καταγραφικά, β) έμμεσος υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας μέσω καταγραφής του χρόνου λειτουργίας. Η παραγωγή των δύο θαλάμων μετρήθηκε με ζύγιση της παραγωγής αγγουριών σε όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας. Τέλος για τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές μετατροπής ενέργειας σε εκπομπές CO_2 (TCG, 2017), 0.264 kg CO_2/kWh για το πετρέλαιο και 0.989 kg CO_2/kWh για την ηλεκτρική ενέργεια.

1.1.Μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας

Πίνακας 1. Θέσεις μετρητών ενέργειας

α/α	Πίνακας	Συσκευή	Μετρητής
1	Κεντρικός πίνακας		3P
2	Υποπίνακας ανεμιστήρων		
		Ανεμιστήρας θάλαμος 3	3P
		Ανεμιστήρας θάλαμος 4	3P
		Ανεμιστήρας θάλαμος 5	3P
3	Υποπίνακας αερισμού		
		Κινητήρας ανοίγματος θάλαμος 3	3P
		Κινητήρας κουρτίνας θάλαμος 3	3P
		Κινητήρας ανοίγματος θάλαμος 4	3P
		Κινητήρας κουρτίνας θάλαμος 4	3P
		Κινητήρας ανοίγματος θάλαμος 5	3P
		Κινητήρας κουρτίνας θάλαμος 5	3P
4	Υποπίνακας υγρής παρειάς		
		Κινητήρας κουρτίνας υγρής παρειάς	1P
		Αντλία υγρής παρειάς	3P
6	Υποπίνακας θέρμανσης		3P

Για τη μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα (12) τριφασικοί μετρητές ενέργειας ράγας μέχρι 63A (SHELLY PRO 3EM-3CT63 SMART) και ένας (1) μονοφασικός μετρητής ενέργειας ράγας μέχρι 50A (SHELLY PRO EM-50 SMART). Οι μετρητές συνδέθηκαν στις ηλεκτρικές γραμμές στους υποπίνακες, οι οποίοι βρίσκονται στον θάλαμο 1 του θερμοκηπίου που λειτουργεί ως μηχανοστάσιο. Μετράνε σωρευτικά

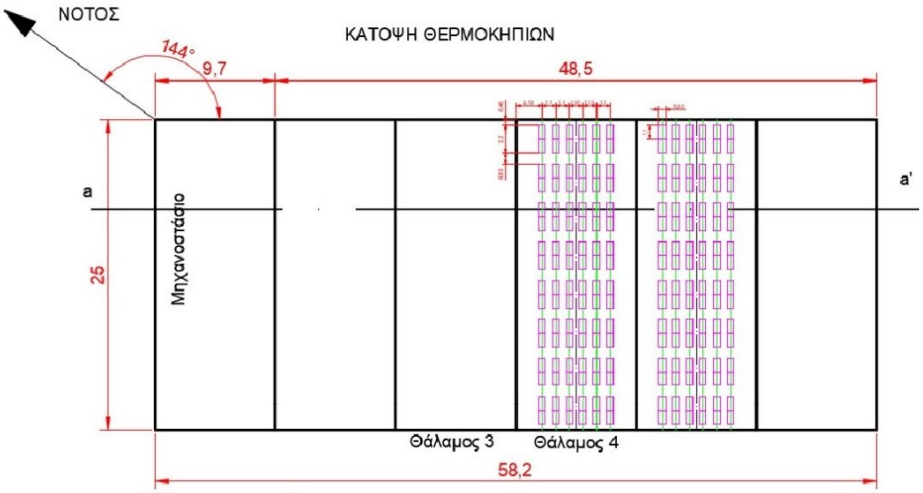
την κατανάλωση ενέργειας με ωριαία ολοκλήρωση, αλλά δίνουν και στιγμιαίες τιμές τάσης, ρεύματος, ενεργού και φαινόμενης ισχύος ανά φάση/κανάλι σε πραγματικό χρόνο. Είναι συνδεδεμένα με WiFi και στέλνουν σε υπολογιστή τις μετρήσεις. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θέσεις μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας.

1.2.Έμμεσος υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας

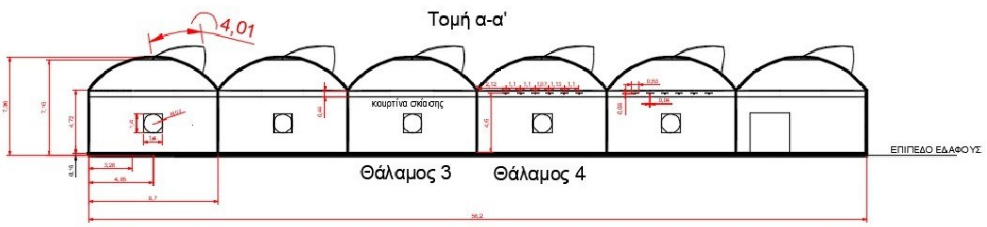
Για την κατανάλωση ενέργειας στην υδροπονία, χρησιμοποιήθηκαν οι πληροφορίες του συστήματος παρακολούθησης της λειτουργίας του θερμοκηπίου με βήμα 15 min. Από το σύστημα αυτό γνωρίζουμε πότε λειτουργούν οι αντλίες του συστήματος υδροπονίας (υδροπονική κεφαλή, αντλίες για τις γραμμές καλλιέργειας, και αντλίες των απορροών). Με βάση την εγκατεστημένη ισχύ και τον χρόνο λειτουργίας τους, υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε αυτές.

1.3 Περίπτωση μελέτης

Το θερμοκήπιο αποτελείται από 6 θαλάμους 9.6 m x 25.0 m με οροφή γοτθικού τύπου, με ύψος υδρορροής 4.72 m και ύψος κορφιά 7.36 m. Βρίσκεται στο Βελεστίνο Μαγνησίας με συντεταγμένες 39^{o} 23’ 41.14’’ N και 22^{o} 45’ 29.16’’ E σε υψόμετρο 120 m. Στα σχήματα 1 και 2 που ακολουθούν, δίνονται η κάτοψη και η όψη του θερμοκηπίου και σημειώνονται οι δύο θάλαμοι που αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Ο θάλαμος 3 αποτελεί τον θάλαμο μάρτυρα ενώ ο θάλαμος 4 είναι ο θάλαμος στον οποίο είναι εγκατεστημένα ΦΒ στοιχεία, χωρίς κάποια άλλη αλλαγή στα συστήματα και τη λειτουργία του θαλάμου.



Σχήμα 1. Κάτοψη θερμοκηπίων



Σχήμα 2. Όψη θερμοκηπίων

Σε όλους τους θαλάμους η καλλιέργεια είναι υδροπονική, για τη θέρμανση χρησιμοποιείται σύστημα σωληνώσεων νερού το οποίο θερμαίνεται σε λέβητα πετρελαίου, για την ψύξη χρησιμοποιείται σύστημα υγρής παρειάς, για τον αερισμό υπάρχουν ανοίγματα οροφής, και τέλος για τη σκίαση υπάρχει θερμοκουρτίνα. Στον πίνακα 2 που ακολουθεί δίνεται η εγκατεστημένη ισχύς σε όλο το θερμοκήπιο. Η συνολική εγκατεστημένη θερμική ισχύς είναι 291.4 kW και η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς είναι 37.38 kW. Η λειτουργία του εξοπλισμού διαχείρισης του μικροκλίματος, καθορίζεται αυτόματα ελέγχοντας το ίδιο και τη λειτουργία της υδροπονίας.

Πίνακας 2. Εγκατεστημένη ισχύς στο θερμοκήπιο

α/α	Συσκευή	Θερμική ισχύς [kW]	Ηλεκτρική ισχύς [kW]	Αριθμός
1	Λέβητας πετρελαίου	291.4	0.47	1
2	Κυκλοφορητής θερμού νερού		0.87	1
3	Αντλία υγρής παρειάς		2.20	1
4	Κινητήρας κουρτίνας υγρής παρειάς		0.37	1
5	Αξονικοί ανεμιστήρες		1.10	6
6	Κινητήρες ανοιγμάτων οροφής		0.37	6
7	Αντλία ύδρευσης		5.00	1
8	Κεντρική αντλία υδροπονίας		1.91	1
9	Αντλίες παροχής μίγματος υδροπονίας		0.83	8
10	Αντλία θερμότητας για θέρμανση		5.10	1
11	Υπολογιστές αυτοματισμοί		0.50	1
12	Αντλίες αποστράγγισης		1.10	5

Σχήμα 3. Εγκατεστημένο σύστημα ΦΒ

Στον θάλαμο 4 είναι εγκατεστημένο σύστημα 96 μονοκρυσταλικών φωτοβολταικών στοιχείων διπλής όψης HS36-M075-H158HC, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 7.2 kW. Τα ΦΒ στοιχεία είναι τοποθετημένα πάνω σε άξονες (εδραζόμενους στον σκελετό του θερμοκηπίου) οι οποίοι καθοδηγούνται από υδραυλικό μηχανισμό, ώστε να μεταβάλλεται η κλίση του ΦΒ στοιχείου σε έναν άξονα. Η μεταβολή της κλίσης εξαρτάται από τη θέση του ήλιου και τις ανάγκες της καλλιέργειας και τροποποιείται αυτόματα βάσει λογισμικού. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος και η διαχείριση της ενέργειας που προέρχεται από τα ΦΒ, γίνεται σε έναν αντιστροφέα τάσης Plenticore-plus-8.5-G2, εγκατεστημένο στο μηχανοστάσιο του θερμοκηπίου. Στο σχήμα 3 δίνεται κοντινή εικόνα του συστήματος των ΦΒ.

Το ισοζύγιο της ενέργειας αφορά τη διάρκεια καλλιέργειας αγγουριού από 25/4/25 έως 13/6/25. Η καλλιέργεια ήταν η ίδια και στους δύο θαλάμους. Σε κάθε θάλαμο υπήρχαν 6 γραμμές φυτών με πυκνότητα φύτευσης 1.84 φυτά/m^2. Τα ανοίγματα αερισμού ανοίγουν όταν η θερμοκρασία είναι πάνω από 18^{o}C την ημέρα και πάνω από 21^{o}C τη νύχτα, το σύστημα θέρμανσης εκκινούσε όταν η θερμοκρασία ήταν κάτω από 18^{o}C τη μέρα και κάτω από 14^{o}C τη νύχτα, το σύστημα ψύξης όταν η θερμοκρασία είναι πάνω από 25^{o}C, και η θερμοκρασία σχεδιασμού ήταν 23^{o}C τη μέρα και 17^{o}C τη νύχτα (set points).

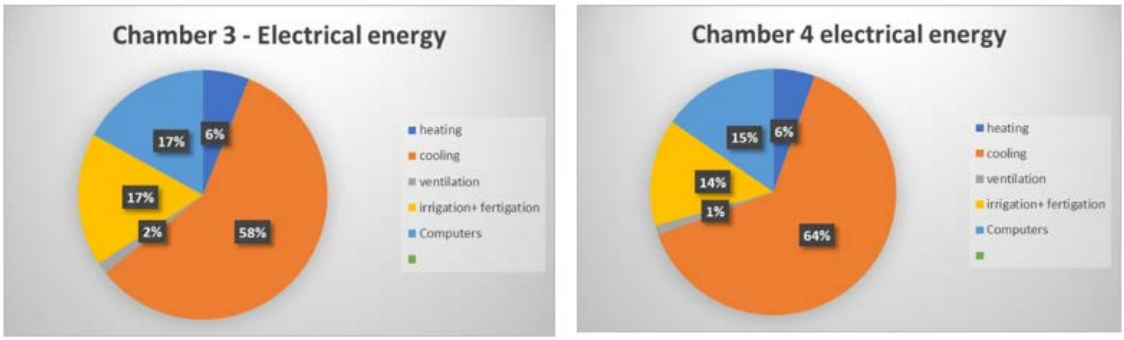
2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον πίνακα 3 δίνεται η συνολική και ανά κατηγορία κατανάλωση ενέργειας στους δύο εξεταζόμενους θαλάμους. Σε ότι αφορά την ενέργειας που καταναλώνεται για τη θέρμανση και τη διαχείριση θεωρείται ότι μοιράζεται εξίσου σε όλους τους θαλάμους.

Πίνακας 3. Κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια εαρινής καλλιέργειας αγγουριού

α/α	Κατηγορία κατανάλωσης	Θάλαμος 3		Θάλαμος 4	
		Θερμική ενέργεια [kWh]	Ηλεκτρική ενέργεια [kWh]	Θερμική ενέργεια [kWh]	Ηλεκτρική ενέργεια [kWh]
1	Θέρμανση λέβητας πετρελαίου	1588.93	7.30	1588.93	7.30
2	Θέρμανση αντλία θερμότητας		28.32		28.32
3	Ψύξη ανεμιστήες		229.50		302.26
4	Ψύξη αντλία υγρής παρειάς		110.81		110.81
5	Ψύξη κινητήρας κουρτίνας υγρής παρειαάς		2.23		2.23
6	Αερισμός κινητήρες ανοιγμάτων		3.97		4.39
7	Αερισμός κινητήρες κουρτίνων		4.82		3.66
8	Ύδρευση και λίπανση		98.99		89.05
9	Αντλίες αποστράγγισης		2.69		2.51
10	Υπολογιστές διαχείριση θερμοκηπίου		100.00		100.00
	ΣΥΝΟΛΟ	1588.93	588.63	1588.93	650.53

Οι βασικές διαφορές αντιστοιχούν στην ενέργεια που καταναλώνουν οι ανεμιστήρες για ψύξη όπου ο θάλαμος με τα ΦΒ χρειάζεται 80 kWh περισσότερες από το θάλαμο μάρτυρα και στην ενέργεια που χρειάζεται για τον αερισμό και τις αντλίες αποστράγγισης όπου οι διαφορές είναι μικρές. Η διαφορά στην ενέργεια που καταναλώνεται στους ανεμιστήρες, οφείλεται στην εμφάνιση ελαφρά υψηλότερων θερμοκρασιών στον θάλαμο 4, οι οποίες οδηγούν σε εκκινήσεις του συστήματος ψύξης. Στο Σχήμα 4 που ακολουθεί δίνονται οι κατανομές της κατανάλωση ενέργειας με τη μορφή πίτας στους 2 θαλάμους

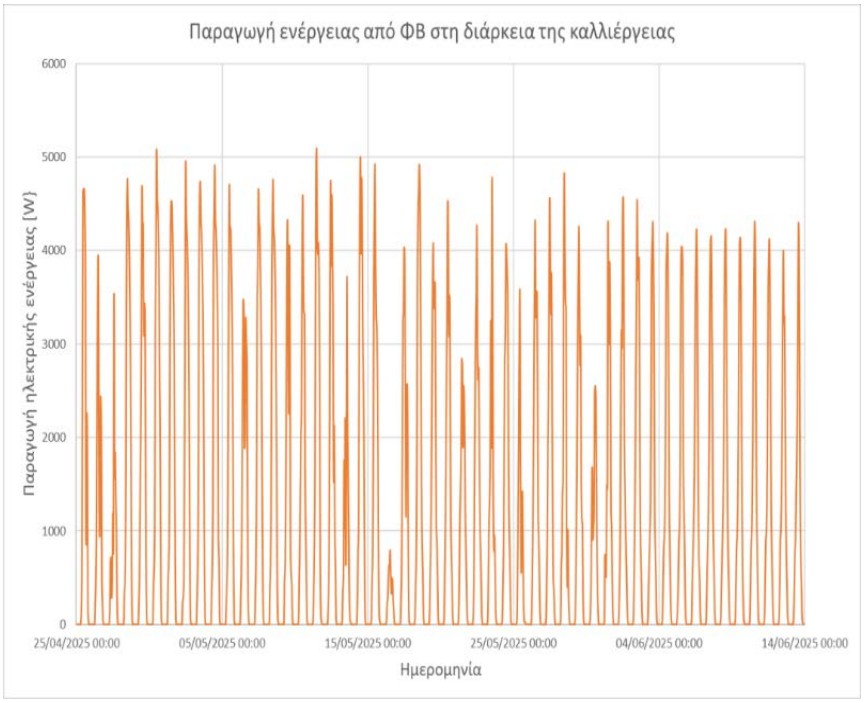


Σχήμα 4. Κατανομή κατανάλωσης ενέργειας ανά κατηγορία

Και στις δύο περιπτώσεις το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται για την ψύξη και ακολουθείται εξίσου από το ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται για τη λειτουργία του συστήματος υδροπονίας και για τη διαχείριση της λειτουργίας του θερμοκηπίου.

Πίνακας 4. Παραγωγή αγγουριών και ηλεκτρικής ενέργειας

α/α		Θάλαμος 3	Θάλαμος 4
1	Παραγωγή αγγουριών [kg/m^2]	4.40	4.16
2	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [kWh]	0	1988.33



Σχήμα 5. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ

Στον πίνακα 4 δίνεται η παραγωγή αγγουριών ανά θάλαμο καθώς και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ, στον θάλαμο 4. Όπως φαίνεται, η παραγωγή αγγουριών επηρεάζεται ελάχιστα από την παρουσία των ΦΒ, ενώ στον θάλαμο 4 υπάρχει μια σημαντική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία όχι μόνο ξεπερνάει τη διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας αλλά δείχνει να καλύπτει και όλη τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του θαλάμου σε όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας. Στο σχήμα 5 δίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒ στοιχεία του θαλάμου 4, σε όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας.

Πίνακας 5. Ενεργειακοί δείκτες χωρίς να ληφθεί υπόψη η παραγωγή των ΦΒ

α/α	Είδος ενέργειας	Θάλαμος 3		Θάλαμος 4	
		kWh/m^2	kWh/kg	kWh/m^2	kWh/kg
1	Συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας	9.073	2.063	9.331	2.242
2	Συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας	14.395	3.273	15.143	3.443
3	Κατανάλωση θερμικής ενέργειας	6.621	1.505	6.621	1.591
4	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας	2.453	0.558	2.711	0.651

Στον πίνακα 5 δίνονται δείκτες κατανάλωσης ενέργειας και για τους δύο θαλάμους ανηγμένους στο εμβαδό της επιφάνειας του θαλάμου σε όρους τελικής κατανάλωσης, για να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης με τα βιβλιογραφικά δεδομένα, και σε όρους κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας (δόκιμος τρόπος άθροισης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας) και τέλος ο δείκτης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ.

Είναι προφανές ότι αν λαμβάνονταν υπόψη η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των ΦΒ, οι δείκτες κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στον θάλαμο 4 θα ήταν μηδενικοί. Προκειμένου να αξιολογηθεί πλήρως η συνεισφορά των ΦΒ στον πίνακα 5, λαμβάνεται υπόψη η παραγωγή των ΦΒ για τον επανυπολογισμό της πρωτογενούς ενέργειας, αλλά και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της λειτουργίας του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας υπό όρους εκπομπών CO_2.

Πίνακας 6. Ενεργειακοί δείκτες λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή των ΦΒ

α/α	Ενεργειακοί δείκτες	Θάλαμος 3	Θάλαμος 4
1	Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας [kWh/kg]	3.273	1.648
2	Εκπομπή CO_2 [kg CO_2/kg παραγωγής]	0.949	0.42

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια εαρινής καλλιέργειας αγγουριού σε δύο όμοιους διπλανούς εσωτερικούς θαλάμους εκ των οποίων ο ένας φέρει σύστημα αγροβολταϊκών αναρτημένο στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι μέσα στα όρια που αναμένονται για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια στην Ελλάδα. Το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας, της τάξης του 60%, αφορά την ψύξη των θερμοκηπίων και καταναλώνεται στη λειτουργία των ανεμιστήρων του συστήματος υγρής παρειάς. Σημαντική είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και για τη

λειτουργία του συστήματος υδροπονίας, σε ποσοστό 15 – 16%, αλλά και για τη διαχείριση της καλλιέργειας με σύστημα ολοκληρωμένης διαχείρισης θερμοκηπίου, ίσο με το 15%.

Η χρήση των ΦΒ οδηγεί σε συνολική αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 10% και αφορά κυρίως τους ανεμιστήρες λόγω ανάπτυξης ελαφρά υψηλότερων θερμοκρασιών. Αυτή η αύξηση όμως υπερκαλύπτεται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒ τα οποία στη συγκεκριμένη, εαρινή, χρονική περίοδο, δείχνουν να καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες του θερμοκηπίου σε ηλεκτρική ενέργεια και μάλιστα με μια ελάχιστη μείωση της παραγωγής της τάξης του 5%.

Τελικά υπό όρους πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας τα ΦΒ προσφέρουν μια μείωση της κατανάλωσης κατά 50% ανά kg παραγόμενου προϊόντος, ενώ ενέργεια της τάξης των 1300 kWh, περισσεύει για άλλη χρήση. Τέλος σημαντικότατη είναι η βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της λειτουργίας του θερμοκηπίου με μείωση κατά 55% των εκπεμπόμενων ρύπων CO_2 ανά kg παραγόμενου προιόντος.

ACKNOWLEDGMENT

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου REGACE το οποίο έχει λάβει χρηματοδότηση από το Πρόγραμμα Έρευνας και Καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο της Συμφωνίας Επιχορήγησης αριθ. 101096056

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Baxevanou, C., Fidaros, D., Katsoulas, N., Mekeridis, E., Varlamis, C., Zachariadis, A. and Logothetidis, S., 2020. *Simulation of Radiation and Crop Activity in a Greenhouse Covered with Semitransparent Organic Photovoltaics*. Appl. Sci., 10, 2550.

Baxevanou, C., Fidaros, D., Papaioannou, C. and Katsoulas, N., *Design and Optimization of a Hybrid Solar–Wind Power Generation System for Greenhouses*. 2023. Horticulturae, 9, 181.

Baxevanou, C., Fidaros, D., Papaioannou, C. and Katsoulas, N., 2024, *Greenhouses energy audits – procedures and results*, AgEng 2024, 1 – 4 July, Athens.

Djevic, M. and Dimitrijevic, A., 2009. *Energy consumption for different greenhouse constructions*. Energy, 34, 1325–1331.

Hassanien, R.H.E., Li, M. and Yin, F., 2018. *The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production.* Renew. Energy, 121, 377–388.

Kittas, C., Katsoulas, N. and Bartzanas, T. 2014. *Energy Needs and Energy Saving in Mediterranean Greenhouses*. Acta Hortic., 1054, 25–30.

Nikolaou, G., Neocleous,D., Christou, A., Polycarpou, P., Kitta, E. and Katsoulas, N. 2021. *Energy and Water Related Parameters in Tomato and Cucumber Greenhouse Crops in Semiarid Mediterranean Regions. A Review, Part I: Increasing Energy Efficiency*. Horticulturae, 7, 521.

Pallone T., 2017. *Agrivoltaics: how plants grown under Solar panels can benefit humankind*. http://insights.globalspec.com/article/4802/ agrivoltaics-how-plants-grown-under-solar- panels-can-benefithumankind?id=-777656564.

Paris, B., Vandorou, F., Balafoutis, A.T., Vaiopoulos, K., Kyriakarakos, G., Manolakos, D. and Papadakis, G., 2022. *Energy Use in Greenhouses in the EU: A Review Recommending Energy Efficiency Measures and Renewable Energy*

Sources Adoption. Appl. Sci. 12,5150.
Sanford, S., 2011. *Reducing Greenhouse Energy Consumption*; A3907-01; University of Wisconsin—Extension Publication: Madison, WI, USA, 1–5.
T.C.G. 2017. *Technical Guidance 20701-1-2017*. Athens.
Tripanagnostopoulos, Y., Katsoulas, N. and Kittas, C., 2017. *Potential energy cost and footprint reduction in Mediterranean greenhouses by means of renewable energy use*. Acta Hortic., 1164, 461–466.
Yano, A., Onoe, M. and Nakata, J., 2014. *Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications.* Biosyst. Eng., 122, 62–73.

63. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ ΜΕ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΧΩΡΙΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Ε. Δημητρίου, Δ. Λουκάτος, Κ.Γ. Αρβανίτης & Γ. Παπαδάκης

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, vdimt@aua.gr

Περίληψη

Η αφαλάτωση με τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μια ελκυστική λύση για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών σε απομακρυσμένες ή/και νησιωτικές περιοχές. Η αφαλάτωση με Αντίστροφη Όσμωση (ΑΟ) μπορεί να συνδυαστεί με φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα, ωστόσο η μεταβλητή και διακοπτόμενη φύση της ηλιακής ενέργειας δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις στη σταθερότητα λειτουργίας των μεμβρανών. Η παρούσα εργασία αξιολογεί πειραματικά την απόδοση μιας επίπεδης μεμβράνης αφαλάτωσης θαλασσινού νερού υπό συνθήκες μεταβλητής και διακοπτόμενης λειτουργίας, οι οποίες εξομοιώνουν πραγματικό προφίλ παραγόμενης ισχύος από αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς χρήση συσσωρευτών. Το σύστημα ΑΟ λειτούργησε για τρεις ημέρες υπό τρία διαφορετικά σενάρια: (α) σταθερή λειτουργία συστήματος ΑΟ τροφοδοτούμενο από Φ/Β με χρήση συσσωρευτών, (β) μεταβλητή λειτουργία συστήματος ΑΟ τροφοδοτούμενο από Φ/Β, μέρες με υψηλή ηλιοφάνεια, και (γ) μεταβλητή λειτουργία συστήματος ΑΟ τροφοδοτούμενο από Φ/Β, μέρες με πλήρη συννεφιά. Η τροφοδοσία του συστήματος αφαλάτωσης ελέγχθηκε μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας (VFD) συνδεδεμένο με έναν μικροελεγκτή Arduino, εξασφαλίζοντας ρεαλιστική προσομοίωση των διακυμάνσεων ισχύος. Κάθε σενάριο εφαρμόστηκε με και χωρίς καθαρισμό της μεμβράνης στο τέλος κάθε ημέρας λειτουργίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική μείωση στη ροή του αφαλατωμένου νερού (έως και 37%) καθώς και σημαντική μείωση στην απόρριψη αλάτων (έως και 17,6%) υπό συνθήκες μεταβλητής λειτουργίας με συννεφιά και χωρίς έκπλυση της μεμβράνης. Τα αποτελέσματα αυτά τονίζουν την ανάγκη ενσωμάτωσης προηγμένων συστημάτων ελέγχου όπως ρυθμιστές πίεσης, οικονομικών και βιώσιμων λύσεων αποθήκευσης ενέργειας συμβάλλοντας σε ομαλή και αποδοτική λειτουργία της μεμβράνης και στην ανάπτυξη ανθεκτικότερων και ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων αφαλάτωσης ΑΟ τροφοδοτούμενα από Φ/Β.

Λέξεις κλειδιά: Αφαλάτωση, Μεμβράνη Αντίστροφης Όσμωσης, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Μεταβλητή και διακοπτόμενη λειτουργία

EXPERIMENTAL EVALUATION OF A REVERSE OSMOSIS MEMBRANE UNDER EMULATED OPERATING CONDITIONS OF A PHOTOVOLTAIC-POWERED DESALINATION SYSTEM WITHOUT BATTERIES

E. Dimitriou✉, D. Loukatos, K.G. Arvanitis & G. Papapdakis

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, ✉*vdimt@aua.gr*

ABSTRACT

Desalination powered by Renewable Energy (RE) constitutes an attractive solution for meeting irrigation needs in remote and/or island regions. Reverse Osmosis (RO) desalination can be coupled with photovoltaic (PV) systems; however, the variable and intermittent nature of solar energy poses significant challenges to the operational stability of membranes. This study experimentally evaluates the performance of a flat sheet seawater RO membrane under variable and intermittent operating conditions, simulating the real power profile of a stand-alone PV system without batteries. The RO unit was operated for three days under three different scenarios: (a) stable operation of the RO system powered by PV with battery storage, (b) variable operation powered by PV during sunny days, and (c) variable operation powered by PV during cloudy days. System operation was controlled by a Variable Frequency Drive (VFD) connected to an Arduino microcontroller, ensuring realistic emulation of PV power fluctuations. Each scenario was conducted with and without end-of-day rinsing of the membrane. Results revealed a significant decrease in permeate flow (up to 37%) and in salt rejection (up to 17.6%) under variable operation during cloudy conditions without rinsing. These findings highlight the need for incorporating advanced control systems, such as pressure regulators, and for adopting cost-effective and sustainable energy storage solutions, to ensure smooth and efficient membrane operation and to support the development of more resilient and energy-efficient PV-powered RO desalination systems.

Keywords: Desalination, Reverse Osmosis Membrane, Renewable Energy, Variable and Intermittent Operation

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έλλειψη νερού συγκαταλέγεται μεταξύ των μεγαλύτερων προκλήσεων του 21ου αιώνα. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών (United Nations, 2021), περισσότεροι από 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως στερούνται άμεση πρόσβαση σε πόσιμο νερό, ενώ έως το 2050 ο αριθμός αυτών που θα ζουν σε περιοχές με υψηλό υδατικό στρες αναμένεται να ξεπεράσει τα 5 δισεκατομμύρια. Η γεωργία καταναλώνει περίπου το 70% των διαθέσιμων υδατικών πόρων, γεγονός που καθιστά την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών νερού κρίσιμη για την επισιτιστική ασφάλεια και την αειφόρο ανάπτυξη. Στην περιοχή της Μεσογείου, η άνιση κατανομή των υδατικών πόρων, σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή και τη μείωση των βροχοπτώσεων, επιδεινώνει το πρόβλημα ιδιαίτερα σε νησιωτικές και παράκτιες ζώνες (United Nations, 2023).

Η αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού έχει αναδειχθεί ως μία αξιόπιστη και τεχνικά ώριμη λύση για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας. Σήμερα λειτουργούν περισσότερες από 22.000 μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως, με συνολική δυναμικότητα που ξεπερνά τα 100 εκατομμύρια m^3/ημέρα. Οι κυριότερες τεχνολογίες που εφαρμόζονται είναι οι θερμικές μέθοδοι (Multi-Stage Flash – MSF, Multi-Effect Distillation – MED) και η μέθοδος με μεμβράνες (Αντίστροφης Όσμωσης – ΑΟ) (Eyl-Mazzega, 2022). Η ΑΟ κατέχει περίπου το 70% της παγκόσμιας εγκατεστημένης δυναμικότητας, χάρη στην υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, το χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας και την τεχνολογική ωριμότητά της. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η ΑΟ παραμένει ιδιαίτερα ενεργοβόρα, με την κατανάλωση ενέργειας να αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του κόστους λειτουργίας, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια στις περισσότερες περιπτώσεις εξακολουθεί να προέρχεται από ορυκτά καύσιμα (Elsaid et al., 2020).

Η ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), και ειδικότερα των φωτοβολταϊκών (Φ/Β), στα συστήματα ΑΟ προσφέρει μια περιβαλλοντικά φιλική και βιώσιμη εναλλακτική λύση (Kyriakarakos and Papadakis, 2021). Η άμεση τροφοδότηση από Φ/Β συστήματα έχει το πλεονέκτημα της μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος και της ενεργειακής ανεξαρτησίας σε απομονωμένες ή νησιωτικές περιοχές (Chae and Kim, n.d.). Ωστόσο, η μεταβλητή και διακοπτόμενη φύση της ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί λειτουργικές προκλήσεις. Οι απότομες διακυμάνσεις στην ισχύ εισόδου προκαλούν μεταβολές στην πίεση και στη ροή τροφοδοσίας του συστήματος, οδηγώντας σε μηχανικές και υδραυλικές καταπονήσεις της μεμβράνης. Αυτές οι συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν φυσική συμπίεση, μείωση της διαπερατότητας και μείωση της απόρριψης των αλάτων, με αποτέλεσμα την πρόωρη υποβάθμιση της μεμβράνης (Dimitriou et al., 2025, 2017; Freire-Gormaly and Bilton, 2019).

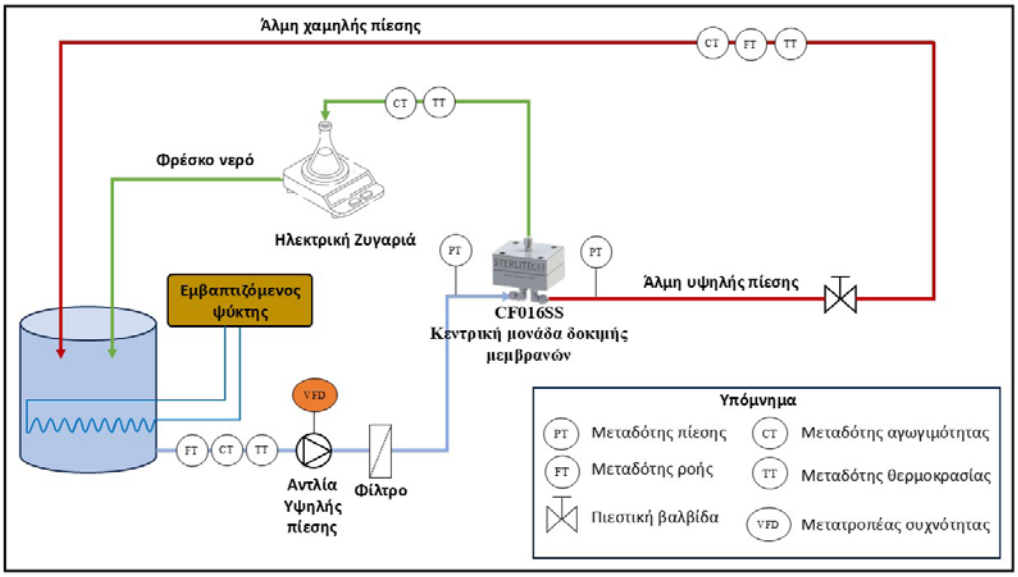
Παραδοσιακά, η ενσωμάτωση συσσωρευτών στα Φ/Β συστήματα χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων ισχύος (Karavas et al., 2018). Ωστόσο, οι συσσωρευτές αυξάνουν σημαντικά το αρχικό κόστος επένδυσης, έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής, προβλήματα ανακύκλωσης και επιβαρύνουν το συνολικό κόστος του παραγόμενου νερού. Για τον λόγο αυτό, η επιστημονική έρευνα στρέφεται σε λύσεις «χωρίς συσσωρευτές», όπου η λειτουργία του συστήματος αφαλάτωσης ακολουθεί άμεσα το προφίλ της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας. Αν και τέτοιες προσεγγίσεις μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου νερού (Dimitriou et al., 2015),προκαλούν λειτουργικές αστάθειες που δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς, ειδικά σε επίπεδο μηχανισμών υποβάθμισης της μεμβράνης (Dimitriou et al., 2025, 2024; Freire-Gormaly and Bilton, 2017).

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία διερευνά πειραματικά την απόδοση μιας επίπεδης μεμβράνης ΑΟ θαλασσινού νερού υπό συνθήκες που εξομοιώνουν την άμεση τροφοδότηση από Φ/Β σύστημα χωρίς συσσωρευτές. Η χρήση επίπεδης μεμβράνης παρέχει υψηλή ακρίβεια μετρήσεων σε βασικές παραμέτρους όπως πίεση στην είσοδο των μεμβρανών, ροή αφαλατωμένου νερού και απόρριψη αλάτων, επιτρέποντας την αναλυτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς της μεμβράνης σε σενάρια σταθερής, μεταβλητής και διακοπτόμενης λειτουργίας. Στόχος της μελέτης είναι να αναδείξει τις επιπτώσεις των λειτουργικών διακυμάνσεων στην απόδοση και να προτείνει στρατηγικές μετριασμού, όπως η εφαρμογή καθημερινού καθαρισμού της μεμβράνης.

2. ΥΛΙΚΑ

2.1 Σύστημα αφαλάτωσης

Μια πειραματική μονάδα, εργαστηριακής κλίμακας δοκιμής, μεμβρανών (Membrane Fouling Simulator - MFS) χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της απόδοσης επίπεδων μεμβρανών υπό συνθήκες διακοπτόμενης και μεταβλητής λειτουργίας. Η διάταξη αυτή σχεδιάστηκε ειδικά ώστε να αναπαράγει τη δυναμική ροή μεγαλύτερων, εμπορικά διαθέσιμων στοιχείων μεμβράνης, όπως τις εμπορικά διαθέσιμες μεμβράνες ΑΟ σπειροειδής περιέλιξης (spiral wound). Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα που επιτρέπουν την προσομοίωση πραγματικών διεργασιών αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, ενώ παράλληλα παρέχει ακριβή έλεγχο βασικών παραμέτρων, όπως η πίεση, η παροχή, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θερμοκρασία σε όλες τις ροές νερού που κυκλοφορούν στο σύστημα (τροφοδοσίας, άλμης και αφαλατωμένου). Περιλαμβάνει δεξαμενή τροφοδοσίας, σύστημα προ-επεξεργασίας, αντλία υψηλής πίεσης, καθώς και την κεντρική μονάδα δοκιμής μεμβρανών όπου τοποθετείται η επίπεδη μεμβράνη. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το διάγραμμα της διάταξης αφαλάτωσης, ενώ παρακάτω δίνεται λεπτομερής περιγραφή των επιμέρους τμημάτων της.



Σχήμα 1: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αφαλάτωσης.

2.1.1 Δεξαμενή τροφοδοσίας

Η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιήθηκε από τη δεξαμενή τροφοδοσίας κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο και χωρητικότητα 50 L. Στην δεξαμενή παρασκευάστηκε διάλυμα NaCl με αγωγιμότητα 50 mS/cm έτσι ώστε να προσομοιωθεί το θαλασσινό νερό. Η δεξαμενή ήταν συνδεδεμένη με εμβαπτισμένο ψύκτη με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας να διατηρείται σταθερή στους 25 °C καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διεργασίας.

2.1.2 Σύστημα προ-επεξεργασίας

Το σύστημα προεπεξεργασίας αποτελείται από τρία φίλτρα: φίλτρο ενεργού άνθρακα για αποχλωρίωση, φίλτρο 25 μm για την συγκράτηση μεγάλων σωματιδίων και φίλτρο 5 μm για την τελική κατακράτηση μικρότερων σωματιδίων.

2.1.3 Αντλία υψηλής πίεσης

Η είσοδος του νερού στην μεμβράνη σε υψηλή πίεση επιτεύχθηκε με μια αντλία διαφραγματικού τύπου θετικής εκτόπισης με μέγιστη παροχή 3.1 L/min και μέγιστη πίεση 103 bar. Η αντλία υψηλής πίεσης ήταν συνδεδεμένη με έναν μετατροπέα συχνότητας (Variable Frequency Drive – VFD) για τον ακριβή έλεγχο των στροφών.

2.1.4 Κεντρική μονάδα δοκιμής μεμβρανών

Η καρδιά του συστήματος είναι η κεντρική μονάδα δοκιμής μεμβρανών (MFS) η οποία είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο ατσάλι της εταιρείας Sterlitech τύπου CF016SS. Τα χαρακτηριστικά της κεντρικής μονάδας παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά κεντρικής μονάδας δοκιμής μεμβρανών

Ενεργή επιφάνεια μεμβράνης	20.6 cm^2
Μέγιστη πίεση	69 bar
Μέγιστη θερμοκρασία	150 °C
Διαστάσεις	
Βάθος υποδοχής	2.28 mm
Πλάτος υποδοχής	39 mm

2.1.5 Επίπεδη μεμβράνη

Η επίπεδη μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διερεύνηση ήταν εμπορική μεμβράνη θαλασσινού νερού τύπου SW30XFR (Polyamide TFC) της εταιρείας DOW με τυπική απόρριψη αλάτων 99.8% και χαρακτηριστική διαπερατότητα 31.5 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ σε πίεση 55 bar.

2.1.6 Όργανα μέτρησης

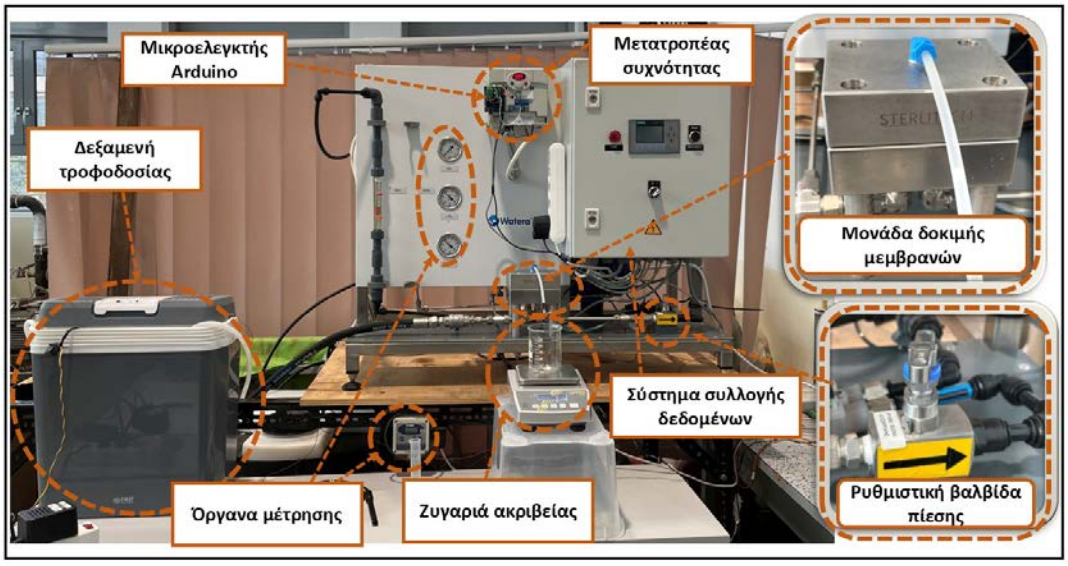
Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες και όργανα μέτρησης για τη συνεχή παρακολούθηση κατά την ώρα λειτουργίας του:

- Τρεις μεταδότες πίεσης για τον έλεγχο και καταγραφή της πίεσης τροφοδοσίας, εισόδου και εξόδου της επίπεδης μεμβράνης.
- Τρεις μεταδότες ηλεκτρικής αγωγιμότητας για την καταγραφή και τον έλεγχο της αγωγιμότητάς τροφοδοσίας, άλμης και προϊόντος.
- Τρία θερμοζεύγη τύπου Κ για την καταγραφή των θερμοκρασιών σε όλα τα ρεύματα (τροφοδοσία, άλμη και προϊόν).
- Ηλεκτρική ζυγαριά για την μέτρηση της παροχής του προϊόντος.
- Ροόμετρο για την μέτρηση της παροχής της άλμης
- Ψηφιακό μετρητή ενέργειας για την καταγραφή της κατανάλωσης.

Όλα τα όργανα ήταν συνδεδεμένα σε σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων (Siemens LOGO!), επιτρέποντας τον πλήρη έλεγχο και την καταγραφή των παραμέτρων λειτουργίας της μεμβράνης.

2.2 Σύστημα ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας υψηλής πίεσης ελέγχεται μέσω μετατροπέα συχνότητας (VFD) που είναι συνδεδεμένος με έναν μικροελεγκτή Arduino. Ο Arduino έχει προγραμματιστεί ώστε να εφαρμόζει προκαθορισμένα σενάρια λειτουργίας, ρυθμίζοντας με ακρίβεια την παροχή και την πίεση τροφοδοσίας και εξομοιώνοντας έτσι ρεαλιστικά τις διακυμάνσεις ισχύος φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς συσσωρευτές.



Σχήμα 2: Σύστημα αφαλάτωσης εγκατεστημένο στο εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Ο VFD (μοντέλο SV022iC5-1F) επιτρέπει τη ρύθμιση της ταχύτητας της αντλίας με σήμα ελέγχου 0–10 V. Δεδομένου ότι το Arduino Uno δεν διαθέτει αναλογική έξοδο, υλοποιήθηκε ένα απλό κύκλωμα εξομάλυνσης και ενίσχυσης σήματος (μέσω βαθυπερατού φίλτρου RC και τελεστικού ενισχυτή Op-Amp) για τη μετατροπή της διαμορφωμένης παλμοσειράς (PWM) σε αναλογικό σήμα συμβατό με την είσοδο ελέγχου του VFD. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε πλήρως ο έλεγχος της αντλίας και αναπαραγωγή συνθηκών μεταβλητής και διακοπτόμενης λειτουργίας στο σύστημα αφαλάτωσης. Το ολοκληρωμένο σύστημα αφαλάτωσης με όλα τα επιμέρους τμήματα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Μεθοδολογία πειραματικής διερεύνησης

Η λειτουργία του συστήματος πραγματοποιήθηκε υπό τρία διαφορετικά σενάρια, τα οποία σχεδιάστηκαν ώστε να εξομοιώσουν πραγματικές συνθήκες τροφοδοσίας της μονάδας αφαλάτωσης από φωτοβολταϊκά (Φ/Β):

A. Σενάριο 1 – Σταθερή λειτουργία: το σύστημα τροφοδοτήθηκε με σταθερή παροχή και πίεση, ώστε να εξομοιώνει λειτουργία Φ/Β με χρήση συσσωρευτών.

B. Σενάριο 2 – Μεταβλητή λειτουργία με ηλιοφάνεια: το προφίλ λειτουργίας βασίστηκε σε δεδομένα πραγματικής ηλιοφάνειας, με ομαλές ημερήσιες διακυμάνσεις.

C. Σενάριο 3 – Μεταβλητή λειτουργία με συννεφιά: το προφίλ λειτουργίας βασίστηκε σε δεδομένα πλήρους συννεφιάς, με έντονες διακυμάνσεις και απότομες μεταβολές.

Κάθε σενάριο εφαρμόστηκε για τρεις συνεχόμενες ημέρες, με διάρκεια 8 ωρών λειτουργίας ανά ημέρα και διακοπή του συστήματος για τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας. Επιπλέον, κάθε σενάριο εκτελέστηκε σε δύο παραλλαγές: (α) με καθαρισμό της μεμβράνης στο τέλος κάθε ημέρας και (β) χωρίς καθαρισμό της μεμβράνης.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών μετρήθηκαν σε πραγματικό χρόνο οι παράμετροι λειτουργίας της μεμβράνης όπως πίεση, ροή, αγωγιμότητα και θερμοκρασία σε κάθε ρεύμα νερού (τροφοδοσίας, παραγόμενου και άλμης. Από τα δεδομένα αυτά, υπολογίστηκαν οι βασικοί δείκτες απόδοσης: Καθαρή Διωθούσα Πίεση (Net Driving Pressure – NDP), διαπερατότητα, αντίσταση στην μεμβράνη και απόρριψη αλάτων. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων παρουσιάζονται αναλυτικά στην δημοσίευση Dimitriou et al., 2025.

3.2 Εξομοίωση μεταβλητής λειτουργίας συστήματος

Για την εξομοίωση της μεταβλητής λειτουργίας του συστήματος αφαλάτωσης, το σύστημα ελέγχου με μικροελεγκτή Arduino (βλ. Ενότητα 2.2) τροφοδοτήθηκε με πραγματικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας. Τα δεδομένα προήλθαν από το μετεωρολογικό σταθμό φωτοβολταϊκής εγκατάστασης που είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και αντιπροσώπευαν δύο χαρακτηριστικές ημέρες: μία με πλήρη ηλιοφάνεια και μία με συννεφιά.

Τα δεδομένα αυτά κανονικοποιήθηκαν και μετατράπηκαν σε σενάρια λειτουργίας με χρήση κώδικα σε Python και στη συνέχεια φορτώθηκαν στον μικροελεγκτή ως πίνακες αναφοράς. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, ο Arduino διάβαζε διαδοχικά (ανά πέντε λεπτά) τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και παρήγαγε αντίστοιχα σήματα PWM για τον έλεγχο

του VFD, ο οποίος ρύθμιζε την ταχύτητα της αντλίας υψηλής πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο αναπαράχθηκαν/εξομοιώθηκαν οι συνθήκες λειτουργίας τόσο σε ηλιόλουστες (Σενάριο 2) όσο και σε συννεφιασμένες ημέρες (Σενάριο 3).

Η μέθοδος αυτή επέτρεψε τη ρεαλιστική προσομοίωση διακυμάνσεων ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων χωρίς συσσωρευτές, εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια μεταξύ της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της συχνότητας λειτουργίας του VFD.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Γενική εικόνα και αρχικές παράμετροι

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η επίπεδη μεμβράνη ΑΟ αξιολογήθηκε υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας: σταθερή, μεταβλητή με ηλιοφάνεια και μεταβλητή με συννεφιά. Κάθε σενάριο εφαρμόστηκε με και χωρίς καθημερινό καθαρισμό. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος.

Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας συστήματος

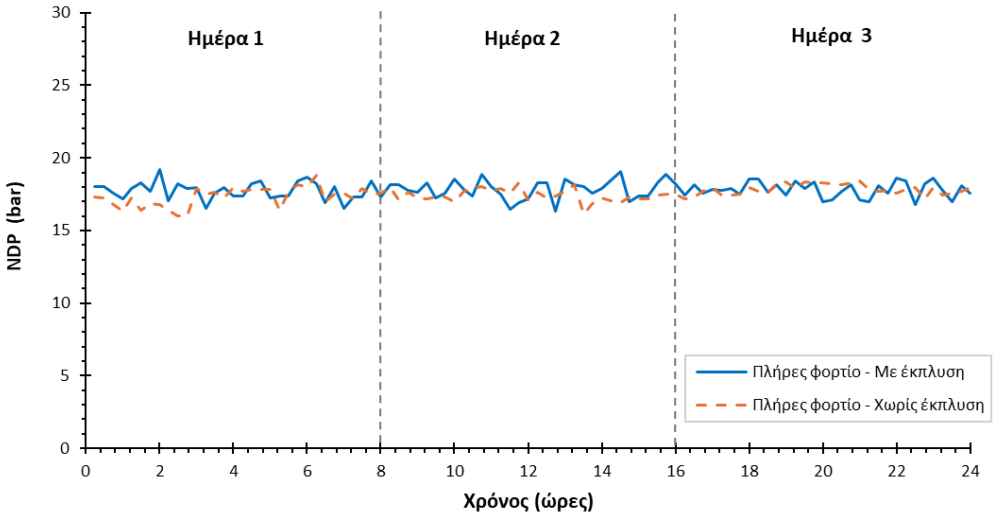
Αλατότητα νερού τροφοδοσίας	32 kg/m^3 (32.000 ppm)
Οσμοτική πίεση	26.19 bar
Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας	25 °C
Ενεργή επιφάνεια μεμβράνης	20,6 cm^2
Μέγιστη πίεση	50 bar

4.2 Μεταβολή της Καθαρής Διωθούσας Πίεσης

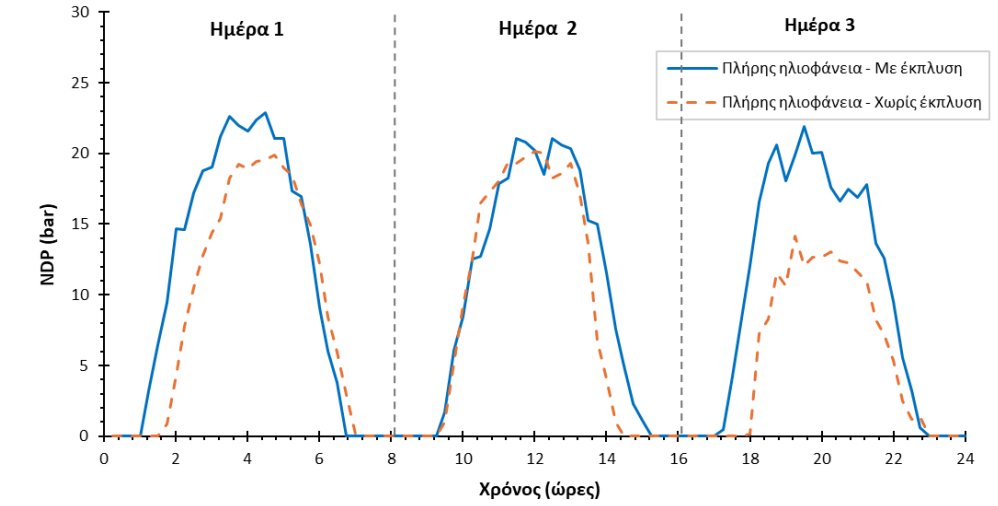
Η NDP αποτελεί βασικό δείκτη για την αξιολόγηση της λειτουργίας μεμβρανών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3α, στη σταθερή λειτουργία (Σενάριο 1) οι τιμές παρέμειναν σταθερές (16–19 bar) σε όλη τη διάρκεια των τριών ημερών. Την ημέρα με πλήρη ηλιοφάνεια - Σενάριο 2 (Σχήμα 3β) παρατηρήθηκε μείωση περίπου 6% με καθαρισμό και 35% χωρίς καθαρισμό της μεμβράνης. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση εμφανίστηκε την ημέρα με συννεφιά - Σενάριο 3 (Σχήμα 3γ) όπου η NDP αυξήθηκε από 13 bar στα 20 bar, τόσο με έκπλυση της μεμβράνης όσο και χωρίς έκπλυση. Η αύξηση αυτή οφείλεται σε φαινόμενα συμπίεσης και επικαθίσεων, που απαιτούν μεγαλύτερη πίεση για τη διατήρηση της ροής του παραγόμενου νερού.

4.3 Διαπερατότητα μεμβράνης

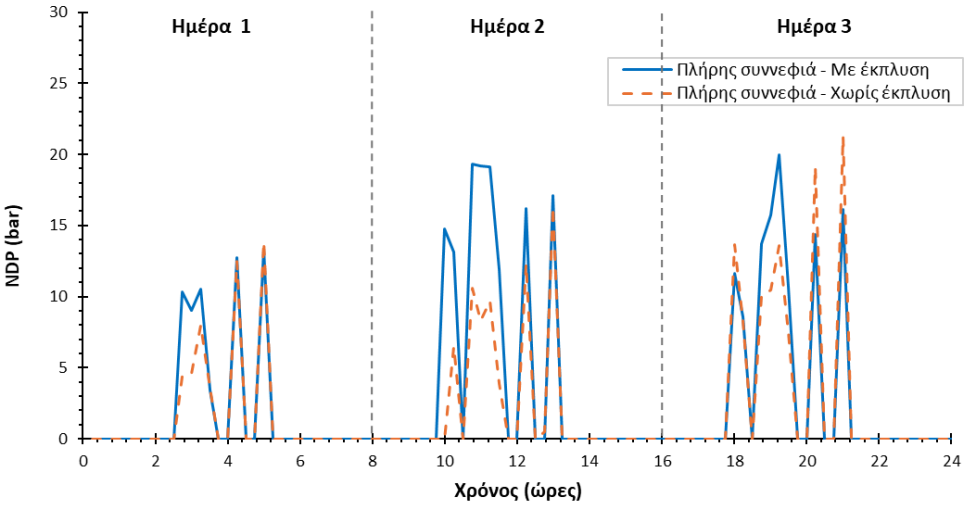
Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται η μέση τιμή της διαπερατότητας της μεμβράνης για όλα τα σενάρια λειτουργίας κατά τη διάρκεια τριών συνεχόμενων ημερών, μαζί με τις τυπικές αποκλίσεις. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, η διαπερατότητα παρέμεινε σταθερή σε συνθήκες πλήρες φορτίου και σε ικανοποιητικά επίπεδα τις ημέρες με πλήρη ηλιοφάνεια, με αμελητέα πτώση την τρίτη ημέρα. Ωστόσο, τις ημέρες με συννεφιά καταγράφηκε η μεγαλύτερη μείωση της διαπερατότητας. Με καθαρισμό της μεμβράνης οι τιμές μειώθηκαν από $5{,}6\times10^{-7}$ σε $4{,}4\times10^{-7}$ m/s·bar, ενώ χωρίς καθαρισμό η πτώση της διαπερατότητας ήταν μεγαλύτερη με τις τιμές να μειώνονται από $7{,}0\times10^{-7}$ σε $4{,}4\times10^{-7}$ m/s·bar. Η αύξηση της μεταβλητότητας υπό συννεφιά (Σενάριο 3) προκάλεσε αστάθεια στη λειτουργία και μείωση της απόδοσης της μεμβράνης. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στις απότομες μεταβολές πίεσης που οδηγούν σε συμπίεση και μείωση της διαπερατότητας.



(α)

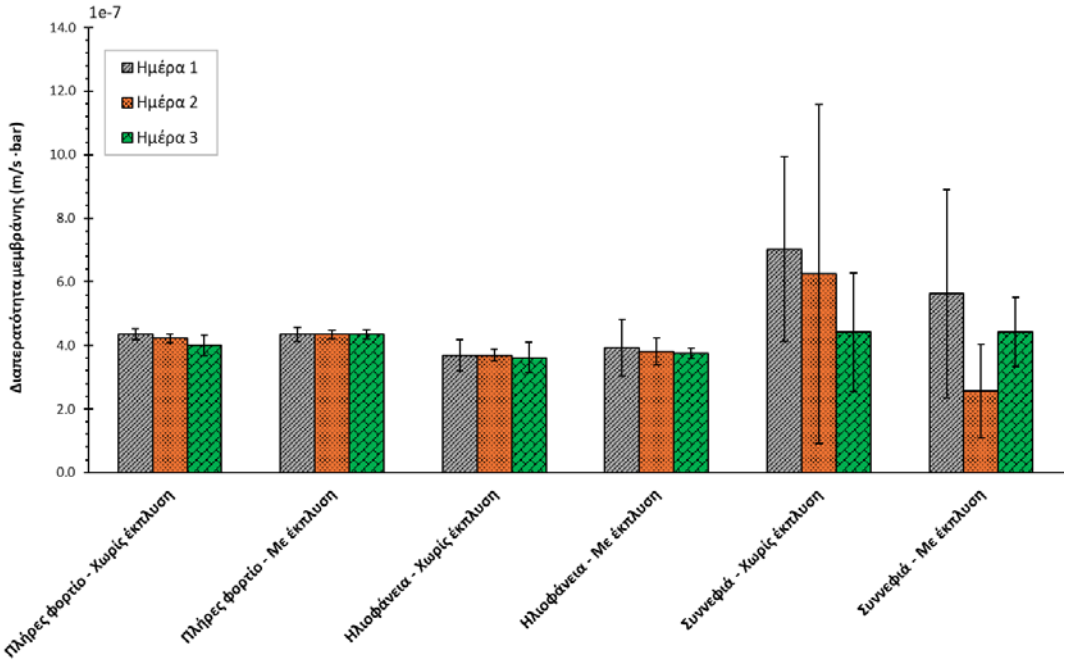


(β)



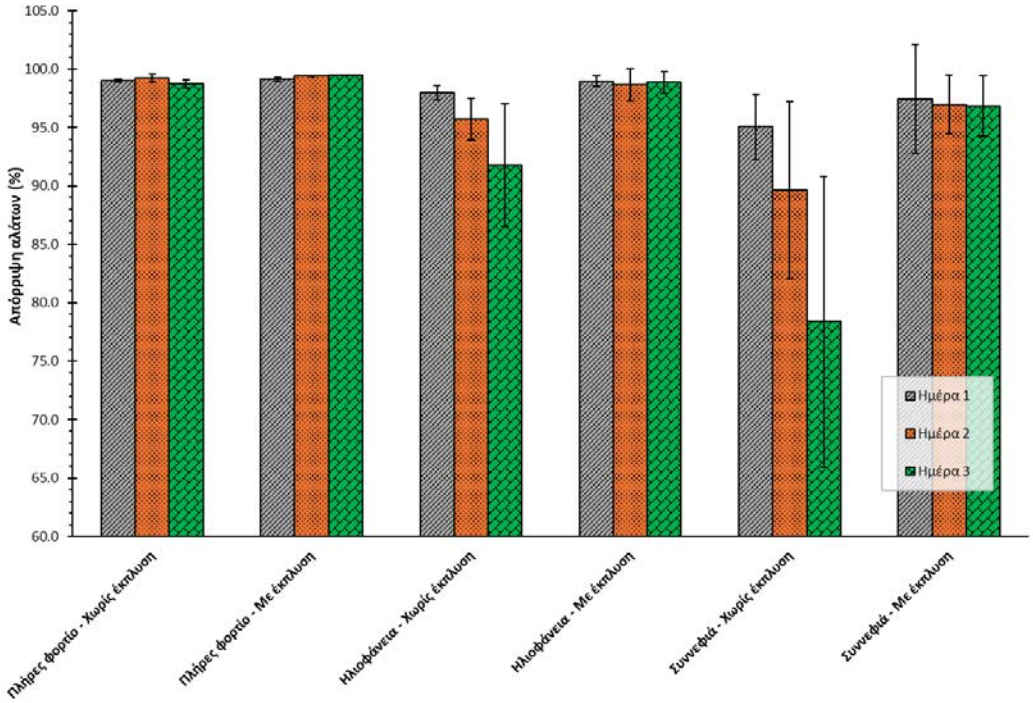
(γ)

Σχήμα 3: Μεταβολή της Καθαρής Διωθούσας Πίεσης (NDP) κατά τη διάρκεια τριών ημερών λειτουργίας για κάθε σενάριο με και χωρίς έκπλυση: (α) πλήρες φορτίο, (β) πλήρης ηλιοφάνεια, (γ) πλήρης συννεφιά.



Σχήμα 4: Συγκριτικά ραβδογράμματα της διαπερατότητας της μεμβράνης κατά τη διάρκεια τριών ημερών για όλα τα σενάρια λειτουργίας του συστήματος.

4.4 Απόρριψη αλάτων



Σχήμα 5:Συγκριτικά ραβδογράμματα της απόρριψης αλάτων κατά τη διάρκεια τριών ημερών για όλα τα σενάρια λειτουργίας του συστήματος.

Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται η μέση τιμή της απόρριψης αλάτων για όλα τα σενάρια λειτουργίας κατά τη διάρκεια τριών συνεχόμενων ημερών, μαζί με τις τυπικές αποκλίσεις. Η απόρριψη αλάτων (Σχήμα 5) σε σταθερή λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης διατηρήθηκε πολύ υψηλή (~ 99%). Τις ημέρες με πλήρη ηλιοφάνεια παρατηρήθηκε πτώση με τις τιμές να φτάνουν έως 91,7% χωρίς καθαρισμό, ενώ με καθαρισμό οι τιμές παρέμειναν σχεδόν αμετάβλητες, περίπου στο 99%. Αντιθέτως τις ημέρες με συννεφιά σημειώθηκε η πιο σοβαρή υποβάθμιση: η απόρριψη μειώθηκε δραματικά. Από 95,1% που ήταν την πρώτη μέρα έφτασε στο 78,4% χωρίς έκπλυση, ενώ με έκπλυση η απόρριψη αλάτων διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα (~96,8%). Η έντονη πτώση σε συνθήκες συννεφιάς χωρίς έκπλυση αποδεικνύει ότι η μεμβράνη επιβαρύνεται σημαντικά από τις απότομες διακυμάνσεις.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη εξέτασε την απόδοση επίπεδης μεμβράνης ΑΟ θαλασσινού νερού υπό διαφορετικά σενάρια λειτουργίας τροφοδοτούμενα από φωτοβολταϊκά, με και χωρίς εφαρμογή ημερήσιου καθαρισμού. Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε βασικούς δείκτες απόδοσης της μεμβράνης: διαπερατότητα, απόρριψη αλάτων και Καθαρή Διωθούσα Πίεση (NDP). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Σε πλήρες φορτίο με χρήση συσσωρευτών (Σενάριο 1) η μεμβράνη διατήρησε σταθερή απόδοση σε όλους τους δείκτες, επιβεβαιώνοντας τα πλεονεκτήματα της σταθερής τροφοδοσίας.
- Στη μεταβλητή λειτουργία με ηλιοφάνεια (Σενάριο 2) καταγράφηκαν μικρές μεταβολές στην απόρριψη αλάτων και στην διαπερατότητα χωρίς καθαρισμό, ενώ με την εφαρμογή έκπλυσης οι δείκτες παρέμειναν σχεδόν αμετάβλητοι.
- Στη μεταβλητή λειτουργία με συννεφιά (Σενάριο 3) σημειώθηκε η πιο έντονη υποβάθμιση: η NDP αυξήθηκε σημαντικά, η διαπερατότητα μειώθηκε έως και 37% και η απόρριψη αλάτων ελλατώθηκε 17% χωρίς έκπλυση. Η εφαρμογή ημερήσιου καθαρισμού περιόρισε τις απώλειες, χωρίς όμως να αποτρέψει πλήρως την υποβάθμιση της απόδοσης.

Συνολικά, η μελέτη έδειξε ότι η σταθερότητα λειτουργίας και η εφαρμογή καθημερινού καθαρισμού είναι κρίσιμοι παράγοντες για τη διατήρηση της απόδοσης των μεμβρανών σε συστήματα ΑΟ που τροφοδοτούνται απευθείας από Φ/Β. Ωστόσο, σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας (πλήρης συννεφιά), ο καθαρισμός της μεμβράνης δεν επαρκεί. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται πιο ανθεκτικές στρατηγικές λειτουργίας, όπως προηγμένοι ελεγκτές πίεσης, ενδιάμεσοι μηχανισμοί αποθήκευσης ή συνδυαστικές τεχνολογίες, ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη και αποδοτική λειτουργία των συστημάτων.

Τα ευρήματα αυτά προσφέρουν χρήσιμα δεδομένα για τον σχεδιασμό ανθεκτικών και ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων αφαλάτωσης με ΑΟ, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στην αξιοποίηση των ΑΠΕ σε απομακρυσμένες και νησιωτικές περιοχές.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Chae, S.H., Kim, J.H., n.d. A forecast for the environmental effect of pressure-retarded osmosis on CO 2 emissions from seawater reverse osmosis in Korea: a scenario-based study. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26962

Dimitriou, E., Boutikos, P., Mohamed, E.S., Koziel, S., Papadakis, G., 2017. Theoretical performance prediction of a reverse osmosis desalination membrane element under

variable operating conditions. Desalination 419. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.06.001

Dimitriou, E., Camacho-Espino, J., Anastasiou, A., Papadakis, G., 2025. Experimental investigation of the performance of a seawater reverse osmosis desalination system operating under variable feed flowrate pressure and temperature conditions. J Environ Chem Eng 13, 115778. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2025.115778

Dimitriou, E., Loukatos, D., Tampakakis, E., Arvanitis, K.G., Papadakis, G., 2024. An Experimental Investigation of an Open-Source and Low-Cost Control System for Renewable-Energy-Powered Reverse Osmosis Desalination. Electronics (Basel) 13, 813. https://doi.org/10.3390/electronics13050813

Dimitriou, E., Mohamed, E.S., Kyriakarakos, G., Papadakis, G., 2015. Experimental investigation of the performance of a reverse osmosis desalination unit under full- and part-load operation. Desalination Water Treat 53. https://doi.org/10.1080/19443994.2014.933623

Elsaid, K., Sayed, E.T., Abdelkareem, M.A., Mahmoud, M.S., Ramadan, M., Olabi, A.G., 2020. Environmental impact of emerging desalination technologies: A preliminary evaluation. J Environ Chem Eng 8, 104099. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.104099

Eyl-Mazzega, M.-A., 2022. The Geopolitics of Seawater Desalination In association with. Ifri.Freire-Gormaly, M., Bilton, A., 2017. An experimental system for characterization of membrane fouling of solar photovoltaic reverse osmosis systems under intermittent operation. Desalination Water Treat 73, 54–63. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20391

Freire-Gormaly, M., Bilton, A.M., 2019. Design of photovoltaic powered reverse osmosis desalination systems considering membrane fouling caused by intermittent operation. Renew Energy 135, 108–121. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.11.065

Karavas, C.S., Arvanitis, K.G., Kyriakarakos, G., Piromalis, D.D., Papadakis, G., 2018. A novel autonomous PV powered desalination system based on a DC microgrid concept incorporating short-term energy storage. Solar Energy 159, 947–961. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.11.057

Kyriakarakos, G., Papadakis, G., 2021. Is Small Scale Desalination Coupled with Renewable Energy a Cost-Effective Solution? Applied Sciences 11, 5419. https://doi.org/10.3390/app11125419

The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water. Handbook of Water Purity and Quality 1–15.

The United Nations, 2021. Summary Progress Update 2021:SDG 6 — water and sanitation for al [WWW Document]. URL https://www.unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-all (accessed 4.24.25).

64. RES4LIVE: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ

Δ. Τύρης, Β. Ανέστης, Α. Σκιαδόπουλος, Θ. Μπαρτζάνας & Δ. Μανωλάκος

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, dtyris@aua.gr

Περίληψη

Η εντατική κτηνοτροφία αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενεργοβόρο τομέα της πρωτογενούς παραγωγής και σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), με υψηλή εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Στόχος του ερευνητικού έργου RES4LIVE (Horizon 2020) ήταν η μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων στην εντατική κτηνοτροφία μέσω της εισαγωγής οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) που ενισχύουν τη βιώσιμη λειτουργία των μονάδων. Στο πλαίσιο του έργου αναπτύχθηκαν και αξιολογήθηκαν καινοτόμες λύσεις, όπως φωτοβολταϊκά (PV), θερμικά φωτοβολταϊκά (PVT), αντλίες θερμότητας, αποθήκευση θερμικής ενέργειας μέσω κατακόρυφων γεωεναλλακτών (BTES), αναβάθμιση βιοαερίου σε βιομεθάνιο (BioCNG) και ελκυστήρες καύσης BioCNG. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην τεχνική αξιολόγηση των ολοκληρωμένων συστημάτων μετά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας τους σε τέσσερις ευρωπαϊκές πιλοτικές εκμεταλλεύσεις, καθώς και στα ευρήματα και τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα, πρωτίστως σε περιβαλλοντικό και οικονομικό επίπεδο.

Λέξεις κλειδιά: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), Βιώσιμη κτηνοτροφία, Τεχνο-οικονομική και Περιβαλλοντική Αξιολόγηση

RES4LIVE: SUSTAINABILITY OUTCOMES FROM THE IMPLEMENTATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES TECHNOLOGIES IN LIVESTOCK FARMS

D. Tyris*, V. Anestis, A. Skiadopoulos, T. Bartzanas & D. Manolakos

*Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering, Iera Odos 75, 11855, Athens, * dtyris @aua.gr*

ABSTRACT

Intensive livestock farming—highly energy-consuming and heavily dependent on fossil fuels—is a major contributor to global greenhouse gas (GHG) emissions. The H2020 RES4LIVE project aimed to help phase out fossil fuels in intensive livestock by introducing cost-effective Renewable Energy Sources (RES) technologies for sustainable production. The project developed and evaluated a suite of innovations, including PV/PVT, heat pumps, borehole thermal energy storage (BTES), biogas upgrading to biomethane (BioCNG), and biomethane- fueled tractors. This study reports key performance outcomes from the first year of operation of the integrated systems across four European pilot farms, together with the associated environmental and economic sustainability findings and challenges.

Keywords: Renewable Energy Sources (RES), Sustainable Livestock Production, Techno- economic and Environmental Assessment

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εντατική κτηνοτροφία είναι ένας ιδιαίτερα ενεργοβόρος τομέας της πρωτογενούς παραγωγής και αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα για την κάλυψη αναγκών σε θέρμανση, ψύξη, εξαερισμό και φωτισμό, καθώς και για τη λειτουργία του λοιπού εξοπλισμού. Η σταδιακή απεξάρτηση του τομέα από τα ορυκτά καύσιμα αποτελεί προτεραιότητα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), ενώ η μείωση του κόστους και η βελτίωση της αξιοπιστίας των τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) συνιστούν ρεαλιστικό μέσο για την επίτευξή της, ενισχύοντας παράλληλα τις δυνατότητες ενεργειακής αυτάρκειας των κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων.

Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου RES4LIVE (Horizon 2020, GA No 101000785) αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν σε πραγματικές συνθήκες ολοκληρωμένα συστήματα ΑΠΕ που συνδυάζουν: (i) φωτοβολταϊκά (PV), (ii) υβριδικά φωτοβολταϊκά-θερμικά (PVT), (iii) αντλίες θερμότητας πολλαπλών πηγών, (iv) αποθήκευση θερμικής ενέργειας μέσω κατακόρυφων γεωεναλλακτών (BTES), (v) αναβάθμιση βιοαερίου σε βιομεθάνιο (BioCNG) και
(vi) μετασκευή γεωργικών ελκυστήρων για χρήση BioCNG. Οι παρεμβάσεις στόχευσαν στην οικονομική αποδοτικότητα και στις χαμηλές ανάγκες συντήρησης, βελτιώνοντας παράλληλα τη θερμική άνεση των ζώων.

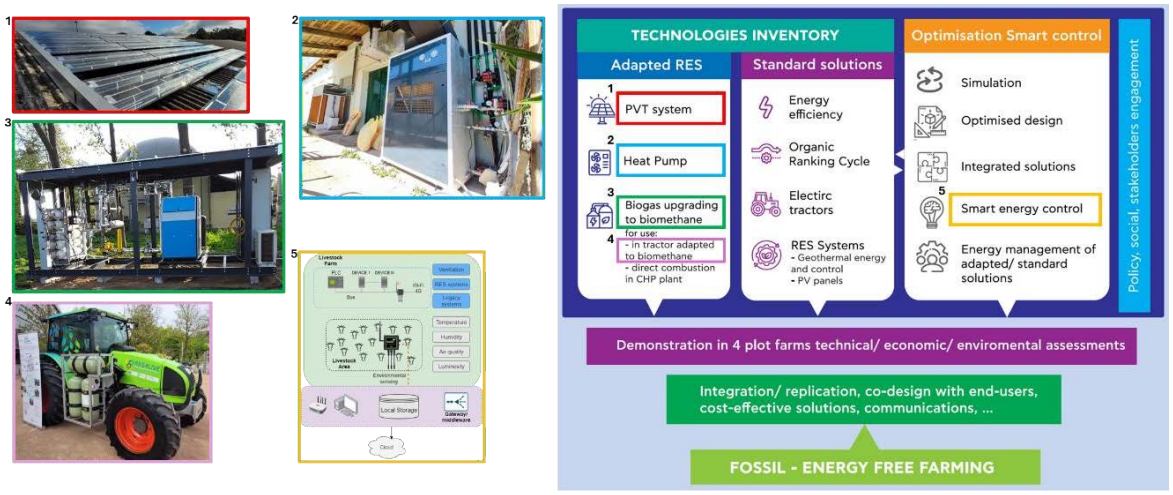
1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η αξιολόγηση των συστημάτων πραγματοποιήθηκε μετά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας τους σε τέσσερις ευρωπαϊκές πιλοτικές μονάδες: μια πειραματική χοιροτροφική στο Βέλγιο (EV ILVO), μια εμπορική χοιροτροφική στην Ιταλία (GOLINELLI), μια πειραματική μονάδα γαλακτοπαραγωγής στη Γερμανία (LVAT) και μια πειραματική μονάδα ωοπαραγωγής στην Ελλάδα (Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών - ΓΠΑ). Η εκτίμηση των δεικτών αξιολόγησης έγινε σε τρία επίπεδα: τεχνικό (μετρήσεις ισχύος και ενέργειας, συντελεστές απόδοσης), περιβαλλοντικό (περιβαλλοντικό αποτύπωμα ανά μονάδα προϊόντος) και οικονομικό (CAPEX/OPEX, περίοδος αποπληρωμής). Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται λεπτομερώς στα παραδοτέα του έργου (RES4LIVE 2024a, RES4LIVE 2024b, RES4LIVE 2024c).

2. ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ

Στο βελγικό χοιροτροφείο EV ILVO εγκαταστάθηκε σύστημα PVT (8.4 kWp_{el} και 28.8 kWp_{th}) και δύο αντλίες θερμότητας: μεσαίων θερμοκρασιών (40 kW_{th}, για θερμό αέρα και ZNX) και χαμηλών θερμοκρασιών (25 kW_{th}, για ενδοδαπέδια θέρμανση). Οι αντλίες θερμότητας αντικαθιστούν τον υφιστάμενο λέβητα φυσικού αερίου και μπορούν να λειτουργούν είτε ως αέρα-νερού είτε ως νερού-νερού. Στην ιταλική φάρμα GOLINELLI εγκαταστάθηκε αντίστοιχο πεδίο PVT (7.7 kWp_{el} και 25 kWp_{th}) και αντλία θερμότητας 35 kW_{th}. Η αντλία θερμότητας δύναται να λειτουργεί ως αέρα-νερού, ως νερού-νερού (τροφοδοτούμενη από το σύστημα BTES και τα PVT) ή υβριδικά (αξιοποιώντας και τις δύο πηγές θερμότητας), αντικαθιστώντας τον υφιστάμενο λέβητα LPG. Στη γερμανική μονάδα γαλακτοπαραγωγής LVAT εγκαταστάθηκε μονάδα αναβάθμισης βιοαερίου για παραγωγή BioCNG, το οποίο αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται σε κατάλληλα μετασκευασμένο γεωργικό ελκυστήρα. Παράλληλα, εγκαταστάθηκαν συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά-θερμικά (C-PVT) για παραγωγή ZNX και για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του υφιστάμενου ηλεκτρικού λέβητα. Τέλος, στο πειραματικό πτηνοτροφείο ωοπαραγωγής του

ΓΠΑ εγκαταστάθηκε σύστημα PV 9 kWp για ιδιοκατανάλωση και αντλία θερμότητας 10 kW_{th} για την κάλυψη των αναγκών της εγκατάστασης σε θέρμανση, ψύξη και αφύγρανση. Σε όλα τα παραπάνω έχουν ενσωματωθεί έξυπνα συστήματα ελέγχου με μετεωρολογικούς σταθμούς, περιβαλλοντικούς αισθητήρες και μετρητές κατανάλωσης ενέργειας. Η γενική διάρθρωση των τεχνολογικών παρεμβάσεων του έργου RES4LIVE παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Τεχνολογικές παρεμβάσεις του έργου RES4LIVE.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο χοιροτροφείο της GOLINELLI, περιβαλλοντικά, παρατηρήθηκε μείωση του αποτυπώματος κατά 4,06% ανά kg απογαλακτισμένου χοιριδίου. Η μείωση αυτή οφείλεται πρωτίστως στην κατάργηση του LPG, ενώ η μικρή αύξηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης αντισταθμίστηκε από την αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ. Η συμβολή των τεσσάρων εγκατεστημένων τεχνολογιών ΑΠΕ στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ήταν εξαιρετικά μικρή, μόλις 0,21%. Οικονομικά, παρότι οι δαπάνες αυξήθηκαν οριακά, η συνολική οικονομική επίδοση βελτιώθηκε σχεδόν κατά 14%. Η περίοδος επανάκτησης επενδυμένων κεφαλαίων (DPBP) για το συνολικό σύστημα εκτιμάται σε 33 έτη, με δυνατότητα μείωσης σε 21–22 έτη με 20% επιδότηση ή σε 13–14 έτη με 40% επιδότηση.

Στο χοιροτροφείο του EV ILVO, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μειώθηκε κατά 11,53% ανά kg ζώντος ζώου, με κύριο μοχλό την κατάργηση της κατανάλωσης φυσικού αερίου. Η μικρή αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αντισταθμίστηκε από την αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ. Η συνεισφορά των εγκατεστημένων τεχνολογιών ΑΠΕ στο συνολικό αποτύπωμα ήταν αμελητέα (περίπου 0,29% συνολικά), με τις επιμέρους τεχνολογίες να παραμένουν σε χαμηλά ποσοστά. Οικονομικά, η συνολική επίδοση βελτιώθηκε σημαντικά (περίπου 3,5 φορές), με την DPBP του συστήματος να εκτιμάται σε 18 έτη, ή σε 13–14 έτη με 20% επιδότηση και 9–10 έτη με 40%.

Στη μονάδα γαλακτοπαραγωγής του LVAT, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μονάδας BioCNG εκτιμήθηκαν σε 7,59 mPt ανά m^3 παραγόμενου BioCNG. Η αντικατάσταση πετρελαίου κίνησης στον γεωργικό ελκυστήρα οδήγησε σε μείωση κατά 8,61%, ενώ σε επίπεδο συνδυασμένων συστημάτων (υφιστάμενη μονάδα συμπαραγωγής – παραγωγή BioCNG – μετασκευασμένος γεωργικός ελκυστήρας) καταγράφηκε μείωση κατά 20,55% της ετήσιας περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Επιπλέον, η προσθήκη PVT μείωσε κατά 59,74% το εκτιμώμενο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της θερμότητας που παρέχεται από τον

ηλεκτρικό λέβητα. Οικονομικά, η μονάδα BioCNG αποφέρει περίπου €0,8/Nm^3 BioCNG, με DPBP περίπου 10 έτη (δυσμενές σενάριο). Συμπεριλαμβανομένου του γεωργικού ελκυστήρα, η επένδυση εκτιμάται ότι αποσβένεται σε περίπου 12 έτη. Η αύξηση της δυναμικότητας διαφαίνεται ως βασικός μοχλός βελτίωσης της κερδοφορίας. Τέλος, αν και το PVT (σε συνδυασμό με τον υφιστάμενο ηλεκτρικό λέβητα) αποφέρει ετήσια εξοικονόμηση περίπου €2.200, ο χρόνος αποπληρωμής του υπερβαίνει τη διάρκεια ζωής του συστήματος λόγω του υψηλού αρχικού κόστους.

Στο πειραματικό πτηνοτροφείο του ΓΠΑ, περιβαλλοντικά, το συνολικό εκτιμώμενο αποτύπωμα αυξήθηκε ανά kg παραγόμενου αυγού, εξέλιξη που συνδέεται κυρίως με σημαντική αύξηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης, κατά βάση για εξαερισμό. Κάποια δοκιμαστικά σενάρια με ανεμιστήρες μικρότερης ισχύος έδειξαν βελτίωση, υποδεικνύοντας περιθώριο περαιτέρω βελτιστοποίησης. Οικονομικά, παρότι η ακαθάριστη πρόσοδος αυξήθηκε περίπου 25%, το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και το ενεργειακό κόστος οδήγησαν σε χαμηλότερες επιδόσεις σε σχέση με το αρχικό σύστημα. Εύλογος χρόνος αποπληρωμής προϋποθέτει ουσιώδεις επιδοτήσεις και ταυτόχρονη αύξηση της σχετικά χαμηλής τιμής πώλησης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση τεχνολογιών ΑΠΕ σε μονάδες εντατικής κτηνοτροφίας αποδεικνύεται τεχνικά ώριμη και μπορεί να αποφέρει ουσιαστικά περιβαλλοντικά οφέλη, ιδίως όταν επιτυγχάνεται υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων (λ.χ. φυσικό αέριο, LPG) και εφαρμόζεται βελτιστοποιημένη στρατηγική ελέγχου. Αυτό τεκμηριώνεται από τις εκτιμώμενες μειώσεις του συνολικού αποτυπώματος στο EV ILVO και στη GOLINELLI, καθώς και από επιμέρους βελτιώσεις στα συστήματα του LVAT. Παρ' όλα αυτά, αυξήσεις σε κρίσιμες κατηγορίες επίπτωσης (όπως η κλιματική αλλαγή και η χρήση πόρων) παρατηρήθηκαν στο πτηνοτροφείο του ΓΠΑ, όπου η αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση των νέων συστημάτων έτεινε να αντισταθμίσει τα κέρδη.

Σε οικονομικό επίπεδο, τα αποτελέσματα είναι θετικά, αλλά εξαρτώνται σαφώς από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε μονάδας. Σημαντικές βελτιώσεις επιδόσεων καταγράφηκαν στο EV ILVO και στη GOLINELLI, ενώ στο LVAT η αύξηση της δυναμικότητας της μονάδας BioCNG διαφαίνεται ως αποτελεσματική στρατηγική ενίσχυσης της κερδοφορίας. Αντίθετα, στο πτηνοτροφείο του ΓΠΑ η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και το υψηλό αρχικό κόστος περιορίζουν την οικονομική απόδοση. Γενικά, οι δείκτες αποπληρωμής επηρεάζονται ιδιαίτερα τόσο από τη σωστή διαστασιολόγηση και τη συνετή ενσωμάτωσή τους στην κτηνοτροφική μονάδα (π.χ., ιδιοκατανάλωση έναντι πώλησης) όσο και από χρηματοδοτικούς μηχανισμούς, όπως οι επιδοτήσεις σε εθνικό επίπεδο.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

RES4LIVE, 2024. Technical assessment and validation of the numerical platform. Deliverable 5.1, Version 2.0. RES4LIVE – Energy Smart Livestock Farming towards Zero Fossil Fuel Consumption (H2020, GA 101000785). RES4LIVE Consortium. https://res4live.eu/wp-content/uploads/2025/03/RES4LIVE_D5.1_Tech.assessment_validation-of-the num.plat_CERTH_v1.pdfAthens, 07/02/2025.

RES4LIVE, 2024. Economic assessment report. Deliverable 5.2, Version 2.0. RES4LIVE – Energy Smart Livestock Farming towards Zero Fossil Fuel Consumption (H2020, GA 101000785). RES4LIVE Consortium. https://res4live.eu/wp-

content/uploads/2025/03/RES4LIVE_D5.2_Economic_assessment_report_AUA_v2.pdf

RES4LIVE, 2024. Environmental assessment report. Deliverable 5.3, Version 2.0. RES4LIVE – Energy Smart Livestock Farming towards Zero Fossil Fuel Consumption (H2020, GA 101000785). RES4LIVE Consortium. https://res4live.eu/wp-content/uploads/2025/03/RES4LIVE_D5.3_Environmental_assessment_report_AUA_v2.p df

ΕΝΟΤΗΤΑ 8η

Μετασυλλεκτικοί χειρισμοί γεωργικών προϊόντων

65. ΕΥΦΥΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΣΥΛΛΕΚΤΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΡΠΩΝ ΚΕΛΥΦΩΤΟΥ ΦΙΣΤΙΚΙΟΥ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΑΘΙΑΣ ΜΑΘΗΣΗΣ

Κ. Καραμανλής & Ξ.Ε. Πανταζή

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Αγίου Δημητρίου, 54124, Θεσσαλονίκη xpantazi@agro.auth.gr

Περίληψη

Η επιτυχής αναγνώριση μορφολογικών αλλοιώσεων και χαρακτηριστικών των καρπών αποτελεί κρίσιμη πρόκληση για τη μετασυλλεκτική διαχείριση και την ασφάλεια κατανάλωσής τους, καθώς η παρουσία τυχόν αλλοιώσεων στα διάφορα μορφολογικά χαρακτηριστικά του καρπού επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα και ασφάλεια κατανάλωσης του τελικού προϊόντος. Στην παρούσα έρευνα, αναπτύχθηκε καινοτόμο ευφυές σύστημα ταξινόμησης των παρακάτω επτά διαφορετικών μορφολογικών αλλοιώσεων και χαρακτηριστικών σε καρπούς κελυφωτού φιστικιού, ποικιλίας Αιγίνης (Pistacia vera): (1) προσκόλληση περικαρπίου (adhering_hull), (2) κατεστραμμένο περικάρπιο (broken), (3) κλειστό περικάρπιο (closed_hull), (4) προσβολή από έντομο *Ephestia elutella* (ephestia_e), (5) μυκητιασική προσβολή (fungi), (6) κηλιδωμένος καρπός (stain), (7) ανοικτός καρπός (open). Αναπτύχθηκαν δυο μοντέλα Βαθιάς Μάθησης, συγκεκριμένα τα Inception v3 και EfficientNet B2, τα οποία αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα σύνολο 1778 εικόνων RGB υψηλής ανάλυσης οι οποίες ελήφθησαν απευθείας στο ξηραντήριο. Εφαρμόστηκε στρατηγική εκπαίδευσης με διαφορετικά επίπεδα κανονικοποίησης προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στη γενίκευση των μοντέλων σε πραγματικές συνθήκες μετασυλλεκτικής διαχείρισης. Το μοντέλο Inception v3 σημείωσε εξαιρετική απόδοση με ακρίβεια 97,79% στο σύνολο ελέγχου, υπερτερώντας σημαντικά του EfficientNet B2 (93,37%). Ιδιαίτερα αξιοσημείωτη είναι η ικανότητα του Inception v3 να διακρίνει με ακρίβεια τις κλάσεις "adhering_hull" (94,55%) και "ephestia_e" (94,12%), οι οποίες συχνά συγχέονται στις συμβατικές μεθόδους οπτικής παρακολούθησης λόγω της μεγάλης ομοιότητας τους. Αντίθετα, το EfficientNet B2 παρουσίασε σημαντική αδυναμία στην αναγνώριση της κλάσης "fungi" (52,94%) συγκριτικά με το Inception v3 (100%). Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας αποδεικνύουν τη σημαντική συμβολή της υπολογιστική όρασης και της Βαθιάς Μάθησης στην εξέλιξη των τεχνολογιών μετασυλλεκτικής διαχείρισης, παρέχοντας αποτελεσματικές και οικονομικές λύσεις για τη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών και την ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά την ξήρανση και αποθήκευση αγροτικών προϊόντων.

Λέξεις κλειδιά: συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα, υπολογιστική όραση, ποιοτικός έλεγχος γεωργικών προϊόντων, εκτίμηση ασφάλειας γεωργικών προϊόντων, ξήρανση

INTELLIGENT POST-HARVEST QUALITY CONTROL OF IN-SHELL PISTACHIO NUTS USING DEEP LEARNING TECHNIQUES

K. Karamanlis & X.E. Pantazi

Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture., Agiou Dimitriou, 54124, Thessaloniki xpantazi@agro.auth.gr

ABSTRACT

Successful identification of crop morphological alterations and characteristics is a critical challenge for crop post-harvest management and their consumption safety, as the presence of

alterations in the various morphological characteristics of crops negatively affects the quality and consumption safety of the final product. In the current study, an innovative intelligent quality control system based on the following seven different morphological alterations and characteristics in shelled Pistacia vera (Greek “Aegina” variety) nuts has been developed: (1) adhering hull (adhering_hull), (2) broken hull (broken), (3) closed hull (closed_hull), (4) infestation by *Ephestia elutella* (ephestia_e), (5) fungal infection (fungi), (6) stained nut (stain), and (7) open nut (open). Two Deep Learning (DL) models have been developed, namely Inception v3 and EfficientNet B2, which were evaluated using a set of 1778 high-resolution RGB images obtained directly in dryer chamber conditions. A training strategy of different normalization levels has been adopted in order to evaluate its effect on the employed DL models’ generalization capacity under real post-harvest management conditions. Inception v3 achieved an accuracy of 97.79% in testing phase, significantly outperforming that of EfficientNet B2 (93.37%). Moreover, Inception v3 accurately discriminated "adhering_hull" (94.55%) class and "ephestia_e" (94.12%) class, which are often confused in conventional optical tracking methods due to their great similarity, while EfficientNet B2 failed to recognize the "fungi" class (52.94%) compared to Inception v3 (100%). The results indicate the significant contribution of computer vision and DL techniques to the advancement of post-harvest management technologies, providing effective and cost-efficient solutions for preserving quality attributes while minimizing losses during the drying a storage processes of agricultural products.

Keywords: Convolutional Neural Networks (CNNs), computer vision, postharvest quality control, safety assessment, drying

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χειροκίνητη διαλογή έχει αποδειχτεί αναποτελεσματική για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης αγροπροϊόντων υψηλής διατροφικής και οικονομικής σημασίας, γεγονός που απαιτεί την εύρεση εναλλακτικών αυτοματοποιημένων προσεγγίσεων (Soleimanipour et al., 2022). Η αυτοματοποίηση διαδραματίζει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στη μετασυλλεκτική διαχείριση, λόγω πλεονεκτημάτων όπως η αδιάκοπη παραγωγή και οι βελτιωμένες συνθήκες υγιεινής· ωστόσο η εφαρμογή της δυσχεραίνεται, καθώς ο έλεγχος είναι πολυπαραγοντικός και πολυεπίπεδος. Ειδικότερα, ο εντοπισμός ελαττωμάτων στην εσωτερική δομή των αγροπροϊόντων παραμένει απαιτητικός λόγω των περιορισμών των σχετικών μηχανών και αισθητήρων εκτίμησης φυσικών ιδιοτήτων, του αυξημένου χρόνου απόκρισης καθώς και του κόστους. Η μη καταστροφική διερεύνηση των εσωτερικών δομών αποτελεί βιώσιμη και πρακτική προσέγγιση, με επιτυχείς εφαρμογές σε υψηλή χωρική ανάλυση και μικρούς χρόνους απόκρισης (Donis-Gonzalez et al., 2014). Εντούτοις, οι προκλήσεις συνεχίζουν να υπάρχουν ως προς την διασφάλιση αξιοπιστίας σε βιομηχανική κλίμακα και τη μετασυλλεκτική διαχείριση για εξασφάλιση της μέγιστης επιθυμητής ποιότητας, οδηγώντας στην αναζήτηση νέων αυτοματοποιημένων ελέγχων (Chhetri, 2024). Πρόσφατα, οι τεχνικές επεξεργασίας εικόνας με βαθιά μάθηση υπερέχουν των κλασικών μεθόδων, προσφέροντας πολλά υποσχόμενα εργαλεία για ολοκληρωμένους και αξιόπιστους ελέγχους ποιότητας και ασφάλειας (Pantazi & Tsitsopoulos, 2024). Ωστόσο, για το κελυφωτό φυστίκι οι υπάρχουσες εργασίες εστιάζουν κυρίως σε απλές ταξινομήσεις (π.χ. ανοικτό/κλειστό κέλυφος, εκτίμηση μεγέθους/μάζας, διάκριση άρτιου/ελαττωματικού) (Liu et al., 2024; Vidyarthi et l., 2020; Singh et al., 2022). Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία αναπτύσσει και αξιολογεί ένα ευφυές σύστημα ταξινόμησης επτά διακριτών κατηγοριών αλλοιώσεων και χαρακτηριστικών κελυφωτών φιστικιών ποικιλίας Αιγίνης (*Pistacia vera*), αξιοποιώντας δύο Βαθιά Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (ΒΣΝΔ), το Inception v3 και το EfficientNet-B2, τα οποία τροδοφοτήθηκαν με εικόνες RGB υψηλής ανάλυσης που συλλέχθηκαν απευθείας στο

ξηραντήριο, με στόχο την αυτόματη αναγνώριση μορφολογικών αλλοιώσεων σχετιζόμενων με την υποβάθμιση ποιότητας και πιθανούς κινδύνους για την ασφαλή κατανάλωση τους.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1.Βαθιά Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (ΒΣΝΔ) EfficientNet B2

Η αρχιτεκτονική EfficientNet βασίζεται στην ενοποιημένη κλιμάκωση (compound scaling) η οποία αυξάνει ταυτόχρονα βάθος, πλάτος και ανάλυση εισόδου με συστηματικό τρόπο, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια με λιγότερες παραμέτρους. αποτελώντας μια από τις πιο αποδοτικές αρχιτεκτονικές ταξινόμησης εικόνας με ευρεία εφαρμογή στη μηχανική όραση (Koonce et al., 2021). Περιλαμβάνει τα μοντέλα B0 έως B7, όπου το B0 είναι το απλούστερο και το B7 το πιο σύνθετο, με περίπου 5,3M έως 66M παραμέτρους αντίστοιχα (Tan & Le, 2019). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε το EfficientNet B2, εκμεταλλευόμενοι την αρχιτεκτονική του η οποία βασίζεται σε MBConv blocks με μηχανισμό συμπίεσης-και-διέγερσης (squeeze-and-excitation, SE), γεγονός που επιτρέπει την ανακατανομή ανά κανάλι χαρακτηριστικών ώστε να αναδεικνύονται κρίσιμες πληροφορίες χρώματος και υφής.

2.2 Inception V3

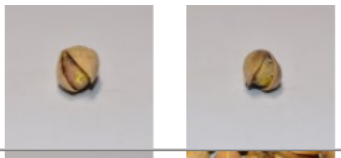
Η αρχιτεκτονική Inception v3 αποτελεί εξέλιξη των πρώτων μοντέλων GoogLeNet. Χαρακτηρίζεται από την παράλληλη επεξεργασία πληροφοριών σε διαφορετικές χωρικές κλίμακες, μέσω των ενοτήτων Inception (Inception modules), επιτρέποντας στο δίκτυο να εξάγει πιο πλούσια χαρακτηριστικά (Szegedy et al., 2016). Πιο συγκεκριμένα το Inception module ενσωματώνει ταυτόχρονα πολλαπλά συνελικτικά επίπεδα με διαφορετικά μεγέθη πυρήνων (1x1, 3x3, και 5x5), καθώς και ένα επίπεδο μέγιστης συγκέντρωσης (max-pooling), επιτρέποντας την ανίχνευση χαρακτηριστικών σε διαφορετικές κλίμακες και αύξηση τα απόδοση του δικτύου χωρίς να αυξάνεται η υπολογιστική πολυπλοκότητα (Ioffe & Szegedy, 2015). Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε τεχνική fine-tuning με ανακλιμάκωση και κανονικοποίηση εικόνων στο [0,1] και είσοδο 1500×1500 pixel.

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Δημιουργία του Συνόλου δεδομένων

Λόγω μη ύπαρξης σχετικών δεδομένων σε κάποιο πιστοποιημένο αποθετήριο, για την ανάπτυξη του ευφυούς συστήματος ταξινόμησης δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων, η οποία απαρτίζεται από 1.778 εικόνες κελυφωτού φυστικιού, ποικιλίας Αιγίνης (*Pistacia vera)*. Για τη δημιουργία συνόλου εικόνων για τις κλάσεις που αφορούν προσβολές τόσο από έντομο όσο και από μύκητα, διαμορφώθηκαν ελεγχόμενες συνθήκες σε ορισμένους καρπούς κελυφωτού φιστικιού, ώστε να αναπτυχθούν οι δύο προσβολές και να ληφθούν οι αντίστοιχες εικόνες. Οι εικόνες για τις υπόλοιπες πέντε κλάσεις, δηλαδή αυτές του προσκολλημένου, του κατεστραμμένου, του κλειστού, του ανοικτού και του κηλιδωμένου περικαρπίου, συλλέχθηκαν κατά τη μηχανική διαλογή του καρπού, όπου φιστίκια με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά απομονώθηκαν τόσο μηχανικά όσο και χειρωνακτικά. Οι εικόνες για τις υπόλοιπες πέντε κλάσεις, του προσκολλημένου, του κατεστραμμένου, του κλειστού, του ανοικτού και του κηλιδωμένου περικαρπίου, συλλέχθηκαν κατά τη μηχανική διαλογή του καρπού, όπου οι καρποί με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά απομονώθηκαν τόσο μηχανικά όσο και χειρωνακτικά. Οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν με DSLR κάμερα (Nikon D7100), σε διαστάσεις 6000×4000 pixel, ανάλυση 300 dpi και χρωματικό βάθος 24-bit. Από τις λήψεις προέκυψαν επιμέρους σύνολα εικόνων που απεικονίζουν τον καρπό μεμονωμένο είτε σε ομάδες, για καθεμία από τις επτά μετασυλλεκτικές κλάσεις του συνόλου δεδομένων (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Υπο μελέτη κλάσεις ταξινόμησης μετασυλλεκτικής ποιότητας κελυφωτού φυστικιού

Κλάση	Αριθμός Εικόνων	Εικόνα
Προσκόλληση περικαρπίου/Adhering hull	462	
Κατεστραμμένο περικάρπιου/Broken	79	
Κλειστό περικάρπιο/Closed hull	213	
Προσβολή από *Ephestia elutella*	177	
Προσβολή από μύκητες	178	
Κηλιδωμένος καρπός/Stain	292	
Ανοικτός καρπός/Open	377	

3.2 Επιλογή Υπερπαραμέτρων & Διαδικασία Εκπαίδευσης αλγορίθμων

Για την εκπαίδευση και αξιολόγηση των μοντέλων εφαρμόστηκε συστηματική διαδικασία επιλογής υπερπαραμέτρων με εφαρμογή Αναζήτησης Πλέγματος (Grid Search). Εξετάστηκαν δύο σχήματα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου: 70%–20%–10% και 80%–10%–10%, τα οποία δοκιμάστηκαν ομοιόμορφα και στα δύο ΒΣΝΔ που αναπτύχθηκαν. Οι υπερπαράμετροι που διερευνήθηκαν συμπεριλάμβαναν τον αριθμό εποχών (epochs), το μέγεθος δέσμης (batch size), το ποσοστό dropout και τον ρυθμό μάθησης (learning rate). Τα ΒΣΝΔ τα οποία αναπτύχθηκαν, αξιολογήθηκαν σε 20, 30 και 40 εποχές εκπαίδευσης, με μεγέθη δέσμης (batch size) 8, 16 και 32, σε ποσοστά dropout 0%, 20% και 30%, και ρυθμούς μάθησης 0.001 και 0.0001. Ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιλέχθηκε ο Adam, ως πιο αποτελεσματικός σε σχέση με τον αλγόριθμο Ρίζα Μέσης Τετράγωνης Διάδοσης (Root Mean Square Propogation, RMSProp).

Στη συνέχεια, αναδείχθηκαν δύο βέλτιστες διαμορφώσεις ανά ΒΣΝΔ: το EfficientNet-B2 απέδωσε καλύτερα όταν εκπαιδεύτηκε με μέγεθος δέσμης 32, ρυθμό μάθησης ίσο με 0.0001,

για 30 εποχές και χωρίς dropout, ενώ το Inception-v3 πέτυχε την υψηλότερη επίδοση έπειτα από εκπαίδευση με μέγεθος δέσμης 16, ρυθμό μάθησης ίσο με 0.0001, για 30 εποχές και dropout 30% (Πίνακας 2). Οι παραπάνω ρυθμίσεις υιοθετήθηκαν τελικώς για την ανάπτυξη των παραπάνω ΒΣΝΔ , καθώς μεγιστοποίησαν τη γενίκευση τους χωρίς να επιβαρύνουν τον χρόνο εκπαίδευσης τους. Ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ο Adam και ως σχήμα διαχωρισμού επιλέχθηκε το 70%–20%–10% για εκπαίδευση, επικύρωση και έλεγχο αντίστοιχα και για τα δύο ΒΣΝΔ.

Η επιλογή των παραπάνω ρυθμίσεων ευθυγραμμίστηκε πλήρως με τις ιδιαιτερότητες των δύο αρχιτεκτονικών των ΒΣΝΔ τα οποία αναπτύχθηκαν. Στο EfficientNet B2, ο συνδυασμός υψηλότερου μεγέθους δέσμης και χαμηλότερου ρυθμού μάθησης με μηδενικό dropout οδήγησε σε ομαλότερη σύγκλιση και σταθερή βελτίωση της απόδοσης χωρίς ενδείξεις υπερπροσαρμογής. Στο Inception-v3, η εισαγωγή dropout στο 30% αποδείχθηκε κρίσιμη για την αποτροπή υπερπροσαρμογής, ενώ ο χαμηλός ρυθμός μάθησης (0.0001) και η επιλογή μέτριου μεγέθους δέσμης ίση με 16, συνέβαλαν στη σταθερότερη εκμάθηση των παραμέτρων από το δίκτυο.

Πίνακας 2. Επιλεγμένοι Υπερπαράμετροι ανά ΒΣΝΔ

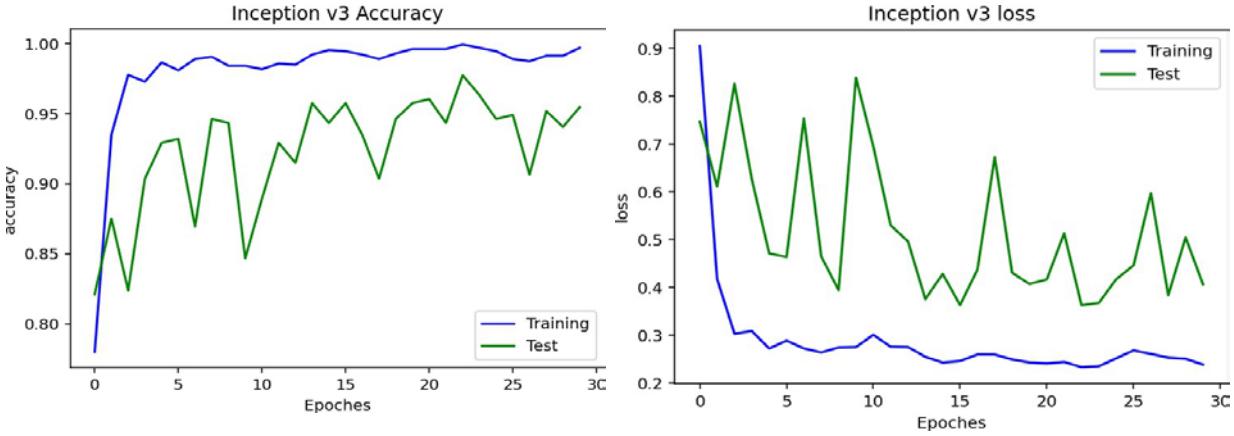
ΒΣΝΔ	Μέγεθος Δέσμης	Ρυθμός Μάθησης	Εποχές	Dropout	Αλγ. Βελτιστοποίησης	Σχήμα εκπ/σης, επικ/σης & ελέγχου
EfficientNet B2	32	0,0001	30	0	Adam	70-20-10
Inception v3	16	0,0001	30	30	Adam	70-20-10

Ο αριθμός εποχών ορίστηκε τελικά ίσος με 30 και για τα δύο ΒΣΝΔ, καθώς παρατηρήθηκε ότι διασφαλίζει καλή ισορροπία μεταξύ επαρκούς εκπαίδευσης και ταυτόχρονης αποφυγής υπερπροσαρμογής, χωρίς σημαντικά περιθώρια βελτίωσης να προκύπτουν από την προσθήκη επιπλέον εποχών.

Τέλος, οι εικόνες ανακλιμακώθηκαν στις απαιτούμενες διαστάσεις ανά αρχιτεκτονική και κανονικοποιήθηκαν στο [0,1] μέσω διαίρεσης με 255 (8-bit εύρος), για σταθερότερη και ταχύτερη εκπαίδευση. Εξετάστηκε η επαύξηση δεδομένων(data augementation), αλλά δεν βελτίωσε την απόδοση και τελικώς δεν υιοθετήθηκε. Για την εξασφάλιση αποδοτικότητας και σταθερότητας, οι αρχικές εικόνες μειώθηκαν σε ανάλυση από 6000×4000 σε 1500×1500 pixels, αυξάνοντας τον ρυθμό διέλευσης και επιταχύνοντας τη σύγκλιση χωρίς απώλεια ακρίβειας.

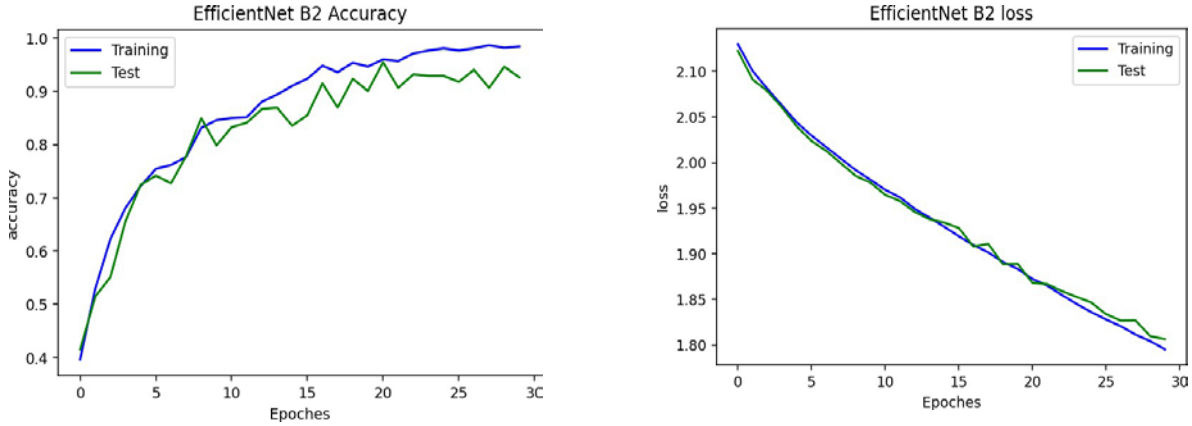
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 (αριστερά), το ΒΣΝΔ Inception v3 παρουσιάζει σταθερά υψηλές τιμές ακρίβειας από τις πρώτες εποχές της εκπαίδευσης, ξεκινώντας με ακρίβεια μεγαλύτερη του 90% και αγγίζοντας σχεδόν το 100% στο τέλος της αυτής. Επίσης, κατά τον έλεγχο παρουσιάζει υψηλή και σταθερή επίδοση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπαίδευσης, διατηρώντας τιμές πάνω από 90% ήδη από τις πρώτες εποχές, γεγονός που υποδεικνύει καλή γενίκευση. Παρά τις μικρές διακυμάνσεις, το μοντέλο παραμένει ανταγωνιστικό μέχρι το τέλος της διαδικασίας. Αυτό υποδεικνύει εξαιρετική προσαρμογή του μοντέλου στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ενδεχομένως λόγω της ικανότητάς του να εξάγει πολυεπίπεδα χαρακτηριστικά μέσω των ενοτήτων του δικτύου Inception (Szegedy et al., 2016).



Σχήμα 1. Ακρίβεια (αριστερά) και Απώλεια (δεξιά) εκπαίδευσης για το Inception v3

Επιπρόσθετα το Inception v3 παρουσιάζει εντυπωσιακά χαμηλή αρχική απώλεια κατά την εκπαίδευση, η οποία υποχωρεί ταχύτατα στις πρώτες πέντε εποχές και παραμένει σχεδόν σταθερή κάτω από τις 0,3 μονάδες. Η σταθερότητα και η χαμηλή τελική τιμή απώλειας υποδηλώνουν ότι το μοντέλο προσαρμόζεται γρήγορα στα χαρακτηριστικά των δεδομένων.



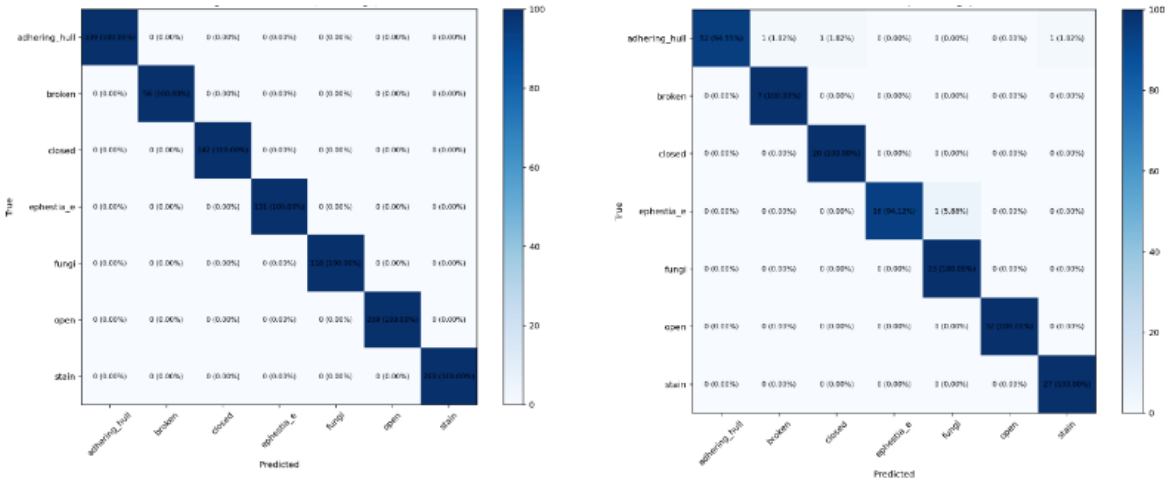
Σχήμα 2. Ακρίβεια (αριστερά) και Απώλεια (δεξιά) εκπαίδευσης & ελέγχου για το EfficientNet B2

Αντίθετα, το EfficientNet B2 ξεκινά την εκπαίδευση του με σημαντικά χαμηλή ακρίβεια, αλλά παρουσιάζει σταθερή βελτίωση. Στην 15η εποχή φτάνει 90% και στο τέλος της εκπαίδευσης επιτυγχάνει 98,88%. Επίσης, στο έλεγχο παρουσιάζει πολύ καλή απόδοση ξεπερνώντας το 90%. Όσον αφορά το διάγραμμα απώλειας του μοντέλου (Σχήμα 2 (δεξιά)), η τιμή απώλειας είναι υψηλή, μεγαλύτερη των 2,0 μονάδων, παρουσιάζοντας βραδύτερη αλλά σταθερή μείωση. Στο τέλος της εκπαίδευσης, αν και έχει μειώσει αισθητά την απώλειά του, εξακολουθεί να διατηρεί υψηλότερες τιμές σε σχέση με το Inception v3.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα σχετικά στατιστικά μετρικά και για τα δυο μοντέλα ΒΣΝΔ τόσο κατά τη φάση εκπαίδευσης όσο και κατά τη φάση ελέγχου. Το Inception v3 είναι το δίκτυο που απέδωσε άριστα-97,79%, συγκριτικά με το EfficientNet B2 (93,37%). Η τελική απώλεια του Inception v3 και του EfficientNet B2 είναι 0,36 και 1,79 μονάδες αντίστοιχα.

Πίνακας 3. Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων των ΒΣΝΔ κατά τη φάση ελέγχου

ΒΣΝΔ		Accuracy	Loss	Precision	Recall	F1 score
EfficientNet B2	Εκπαίδευση	98,88%	1,79	98,94	98,88	98,87
	Έλεγχος	93,37	1,79	94,59	93,34	93,02
Inception V3	Εκπαίδευση	100,00%	0,18	100,00%	100,00%	100,00%
	Έλεγχος	97,79	0,36	97,93	97,78	97,79

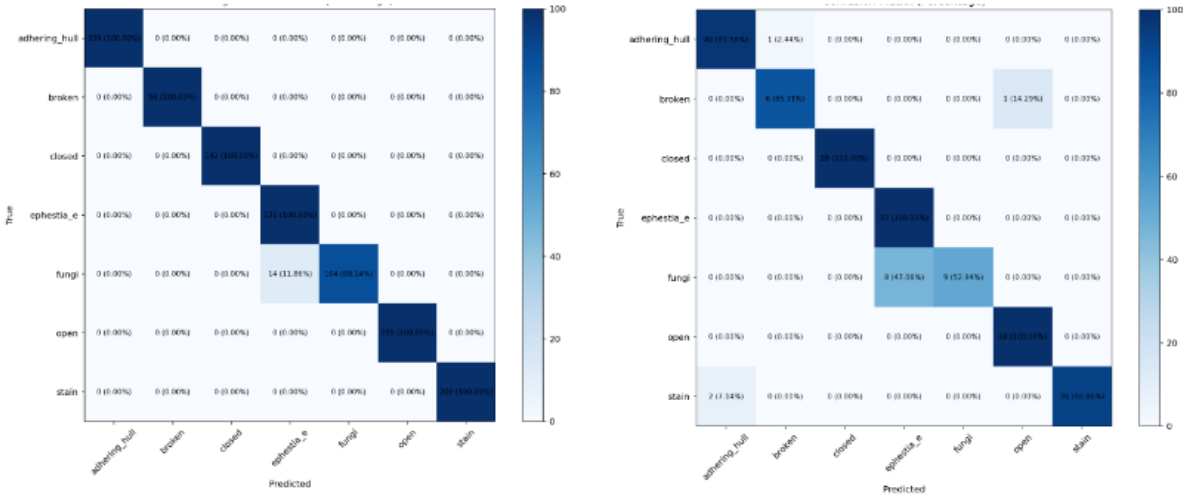


Σχήμα 3. Πίνακας σύγχυσης για τη φάση εκπαίδευσης (αριστερά) και ελέγχου (δεξιά) για το μοντέλο Inception v3

Τα αποτελέσματα των πινάκων σύγχυσης (Σχήμα 1, Σχήμα 2) τεκμηριώνουν την υπεροχή του Inception v3 ως προς την ολική και ανά κλάση απόδοση σε ρεαλιστικές συνθήκες διαλογής. Το Inception v3 επιτυγχάνει συνολική ακρίβεια 97,79% και παρουσιάζει έντονα κυριαρχική διαγώνιο με περιορισμένες εκτός διαγωνίου καταχωρήσεις· ειδικότερα, επιδεικνύει υψηλή ανάκληση και θετική προγνωστική τιμή στις απαιτητικές κλάσεις που αφορούν αυτή της προσκόλλησης περικαρπίου (adhering_hull και ephestia_e) και της προσβολής Ephestia elutella (ephestia_e), με ποσοστά ορθής ταξινόμησης 94,55% και 94,12% αντίστοιχα, ενώ οι σφάλματα κατανέμονται σχεδόν αποκλειστικά ως αμοιβαίες συγχύσεις μεταξύ των δύο (ενδεικτικό εγγύτητας οπτικών γνωρισμάτων). Στην κλάση που αφορά την προσβολή από μύκητες (fungi), το Inception v3 σημείωσε ακρίβεια 100%, υποδηλώνοντας ικανή εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών χρώματος και υφής που συμβάλλουν στη διάκριση των αλλοιώσεων από σε μύκητα από αυτές των κακών συνθηκών αποθήκευσης ή από προσβολές από έντομα. Οι υπόλοιπες κλάσεις (broken, closed, open, stain) εμφανίζουν εξαιρετικά υψηλές επιδόσεις (περίπου 98–100%) ως προς την ορθή ταξινόμηση τους, με σποραδικές αστοχίες χωρίς συστηματικά μοτίβα

Αντιθέτως, το EfficientNet B2, παρά την υψηλή συνολική ακρίβεια (93,37%), εμφανίζει σαφώς υποβαθμισμένη επίδοση ως προς την ταξινόμηση της κλάσης που αφορά την προσβολή από μύκητες (52,94% ορθές ταξινομήσεις) με εκτροπές κυρίως προς την κλάση open και δευτερευόντως προς την κλάση Ephestia, γεγονός που υποδηλώνει αδυναμία στη σύλληψη διακριτών υφών που σχετίζονται με προσβολή από μύκητες υπό συνθήκες μεταβαλλόμενου φωτισμού και επιφανειακές αντανακλάσεις. Επιπλέον, οι αμοιβαίες συγχύσεις μεταξύ των κλάσεων adhering_hull και ephestia_e είναι εντονότερες στο μοντέλο Inception v3, στοιχείο που υποδηλώνει μικρότερη ικανότητα διάκρισης στην περίπτωση μορφολογικά όμοιων

φαινόμενων.



Σχήμα 4. Πίνακας σύγχυσης για τη φάση εκπαίδευσης (αριστερά) και ελέγχου (δεξιά) για το μοντέλο EffecientNet B2

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν την πρακτική αξία της προτεινόμενης προσέγγισης σε ρεαλιστικές συνθήκες διαλογής και ελέγχου μετασυλλεκτικής ποιότητας, με ακρίβειες άνω του 93% στο σύνολο ελέγχου για την πλειονότητα των κλάσεων και για τα δύο ΒΣΝΔ. Τα αποτελέσματα ενισχύουν ότι σύγχρονες αρχιτεκτονικές Βαθιάς Μάθησης, σε συνδυασμό με τεχνικές υπολογιστικής όρασης, μπορούν να υποστηρίξουν αξιόπιστη, οικονομικά αποδοτική και κλιμακώσιμη αυτοματοποίηση της μετασυλλεκτικής διαχείρισης του κελυφωτού φιστικιού. Η προτεινόμενη λύση αυτοματοποιεί τη διαλογή, μειώνει το επιχειρησιακό κόστος και περιορίζει την ανάγκη για δαπανηρό εξοπλισμό (π.χ. πολυφασματικές κάμερες), καθιστώντας την εφαρμόσιμη τόσο σε βιομηχανική κλίμακα όσο και σε επίπεδο παραγωγού χωρίς πρόσθετη επιβάρυνση εργασίας. Επιπλέον, η δυνατότητα πρώιμης ανίχνευσης προσβεβλημένων καρπών από έντομα αποθηκών και μύκητες, οι οποίοι αποτελούν παράγοντες που συνδέονται με την ανάπτυξη αφλατοξινών και άλλων μυκοτοξινών, προσφέρει σαφές πλεονέκτημα έναντι των υφιστάμενων προσεγγίσεων, συμβάλλοντας σε αποτελεσματικότερη διαλογή, βελτιωμένο ποιοτικό έλεγχο και ενίσχυση της ασφάλειας του τελικού προϊόντος.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Dini, A.; Zadeh, H.G.; Rahimifard, A.; Fayazi, A.; Eftekhari, M.; Abbaszadeh, M. Designing a Hardware System to separate Defective Pistachios From Healthy Ones Using Deep Neural Networks. Iran. J. Biosyst. Eng. 2020, 51, 149–159.

Chhetri, K. B. (2024). Applications of artificial intelligence and machine learning in food quality control and safety assessment. Food Engineering Reviews, 16(1), 1-21.

Liu, X., Yang, L., Zhu, H., Zhang, L., An, Y., Wei, L., & Han, Z. (2024). The pistachio quality detection based on deep features plus unsupervised clustering. Journal of Food Process Engineering, 47(1), e14519.

Ioffe, S., & Szegedy, C. (2015, June). Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. In International conference on machine learning (pp.

448-456). pmlr.

Singh, D., Taspinar, Y. S., Kursun, R., Cinar, I., Koklu, M., Ozkan, I. A., & Lee, H. N. (2022). Classification and analysis of pistachio species with pre-trained deep learning models. Electronics, 11(7), 981. Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2016). Rethinking the inception architecture for computer vision. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 2818-2826).

Pantazi, X. E., & Tsitsopoulos, C. (2024, September). Deep Transfer Learning for Improved Quality Control in Organic Tomatoes. In 2024 IEEE 2nd Conference on AgriFood Electronics (CAFE) (pp. 120-124). IEEE.

Tan, M., & Le, Q. (2019, May). Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In International conference on machine learning (pp. 6105-6114). PMLR.

Vidyarthi, S. K., Tiwari, R., Singh, S. K., & Xiao, H. W. (2020). Prediction of size and mass of pistachio kernels using random Forest machine learning. Journal of Food Process Engineering, 43(9), e13473.

66. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΣΤΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΝΝΑΒΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ >0.2% THC

Νικόλαος Κουκοβίνος[1], Ευστράτιος Μαλλής[1], Ειρήνη Σάρρου[2], Απόστολος Καλύβας[2], Ιωάννης Γανόπουλος[2], Ελένη Τσαλίκη[2], Παναγιώτης Καρνούτσος[1], Μάριος Καραγιοβανίδης[1], Ξανθούλα Ειρήνη Πανταζή[1], Βασίλειος Φράγκος[1]

[1] Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Πανεπιστημιούπολη, 54624, Θεσσαλονίκη, email: nkoukov@agro.auth.gr
[2] Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός ΔΗΜΗΤΡΑ, Ινστιτούτο Γενετικής Βελτίωσης & Φυτογενετικών Πόρων, Θέρμη, 57001, Θεσσαλονίκη, e-mail: esarrou@elgo.gr

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη αξιολόγησε συγκριτικά τέσσερις μεθόδους ξήρανσης ανθών Cannabis sativa L. ποικιλίας “Royal Gorilla” (>0,2% THC): (1) φυσική ξήρανση με ανάρτηση (hang drying) και σε δίσκους (tray drying), (2) ξήρανση σε κλίβανο (oven drying), (3) ξήρανση με μικροκύματα (microwave drying) και (4) λυοφιλίωση (freeze drying). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ειδικά αδειοδοτημένη υποδομή του Ινστιτούτου Γενετικής Βελτίωσης και Φυτογενετικών Πόρων του ΕΛΓΟ–ΔΗΜΗΤΡΑ, στο αγρόκτημα Θέρμης. Ως κριτήριο τερματισμού κάθε διαχείρισης ξήρανσης ορίστηκε το τελικό ποσοστό υγρασίας ~11% κ.β., ενώ η ανάλυση των κύριων κανναβινοειδών (THCA, THC, CBD) έγινε με HPLC–DAD. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι οι φυσικές μέθοδοι (hang, tray drying) οδήγησαν σε απώλειες THCA χωρίς αντίστοιχη αύξηση του THC, ενώ η ξήρανση σε κλίβανο παρουσίασε μερική αποκαρβοξυλίωση. Η ξήρανση με μικροκύματα προκάλεσε σχεδόν πλήρη μετατροπή του THCA σε THC, μεταβάλλοντας ριζικά το προφίλ κανναβινοειδών του αρχικού προϊόντος. Αντίθετα, η λυοφιλίωση παρουσίασε τη βέλτιστη απόδοση, με υψηλή συγκράτηση του THCA, περιορίζοντας θερμικές και οξειδωτικές απώλειες. Συμπερασματικά, η επιλογή μεθόδου ξήρανσης επηρεάζει καθοριστικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος, με τη λυοφιλίωση (freeze drying) να συνιστάται ως η πλέον κατάλληλη τεχνολογία για εφαρμογές υψηλής προστιθέμενης αξίας στη φαρμακευτική κάνναβη.

Λέξεις-κλειδιά: *φαρμακευτική κάνναβη, κανναβινοειδή, ξήρανση, λυοφιλίωση, HPLC–DAD*

COMPARATIVE EVALUATION OF DRYING METHODS ON THE QUALITY CHARACTERISTICS OF PHARMACEUTCIAL CANNABIS OF >0.2% THC CONTENT

Nikolaos Koukovinos[1], Efstratios Mallis[1], Eirini Sarrou[2], Apostolos Kalivas[2], Ioannis Ganopoulos[2], Eleni Tsaliki[2], Panagiotis Karnoutsos[1], Marios Karagiovanidis[1], Xanthoula Eirini Pantazi[1], Vasileios Fragos[1]

[1]Aristotle University of Thessaloniki, School of Agriculture, University Campus, 54624, Thessaloniki, e-mail: nkoukov@agro.auth.gr
[3]Hellenic Agricultural Organization (HAO) Dimitra, Institure of Plant Breeding and Genetic Resources, Thermi, 57001, Thessaloniki, e-mail: esarrou@elgo.gr

ABSTRACT

This study comparatively evaluated four drying methods for Cannabis sativa L.

inflorescences of the “Royal Gorilla” cultivar (>0.2% THC): hang drying, tray drying, oven drying, microwave heating, and freeze-drying. Experiments were conducted at the licensed facilities of the Institute of Plant Breeding and Genetic Resources (ELGO–DEMETER, Thermi farm). Drying was terminated at a final moisture content of ~11% (w.b.), and the main cannabinoids (THCA, THC, CBD) were quantified using HPLC–DAD. Results showed that natural drying methods led to substantial THCA loss without proportional THC increase, whereas oven drying induced partial decarboxylation. Microwave drying caused nearly complete conversion of THCA to THC, drastically altering the chemical profile. In contrast, freeze-drying exhibited the most effective performance, retaining higher THCA levels, low THC, and the highest CBD concentration, thereby minimizing thermal and oxidative degradation. Overall, the choice of drying method critically affects the pharmacological value of cannabis products, with freeze- drying being recommended as the most suitable technology for high-value pharmaceutical applications.

Keywords*: medical cannabis, cannabinoids, drying, freeze-drying, HPLC–DAD*

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φαρμακευτική κάνναβη (Cannabis sativa L.) έχει αναδειχθεί ως καλλιέργεια υψηλής προστιθέμενης αξίας, με αυξανόμενη ζήτηση στην παγκόσμια φαρμακοβιομηχανία λόγω της περιεκτικότητάς της σε βιοδραστικά συστατικά, κυρίως κανναβινοειδή και τερπένια. Η ποιότητα και σταθερότητα των τελικών προϊόντων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις μετασυλλεκτικές επεξεργασίας, με κυριότερη τη διαδικασία της ξήρανσης, η οποία επηρεάζει τόσο τη διατήρηση των δραστικών ουσιών όσο και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος (Spadafora et al., 2024).

Διάφορες τεχνικές ξήρανσης έχουν εφαρμοστεί σε αρωματικά και φαρμακευτικά φυτά, με σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την αποτελεσματικότητα και την επίδρασή τους στη χημική σύσταση του τελικού προϊόντος. Η λυοφιλίωση θεωρείται μέθοδος αναφοράς για τη διατήρηση θερμοευαίσθητων συστατικών, λόγω της απομάκρυνσης υγρασίας μέσω εξάχνωσης υπό κενό (freeze drying) (Addo et al., 2023). Η φυσική ξήρανση σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας είναι παραδοσιακή αλλά χρονοβόρα διαδικασία, με πλεονέκτημα την ήπια αφυδάτωση και μειονέκτημα την πιθανή οξειδωτική υποβάθμιση (Baek et al., 2025). Η ξήρανση με μικροκύματα προσφέρει υψηλή ταχύτητα, όμως ενέχει τον κίνδυνο τοπικής υπερθέρμανσης και απώλειας ευαίσθητων συστατικών. Πολλαπλές μελέτες έχουν δείξει ότι, παρόλο που επιτυγχάνεται αποδοτική ξήρανση παρατηρείται ταυτόχορνη μετατροπή των όξινων κανναβινοειδών σε ουδέτερες μορφές (π.χ. THCa σε THC) και ταυτόχρονη μείωση της συγκέντρωσης τερπενίων έως και 43% (Das et al., 2024), (Addo et al., 2024).

Η ξήρανση σε κλίβανο με εξαναγκασμένη ροή θερμού αέρα είναι βιομηχανικά εφαρμόσιμη λύση, αλλά συνδέεται με αυξημένες απώλειες τερπενίων και σημαντικές μετατροπές στην σύσταση κανναβινοειδών, ειδικά με αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από 60 °C (Chen et al., 2021), (Chasiotis et al., 2021). Παρά την ύπαρξη μεμονωμένων μελετών σε συγγενή είδη ή σε μικρής κλίμακας εφαρμογές, η συστηματική συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων ξήρανσης στη φαρμακευτική κάνναβη παραμένει περιορισμένη. Πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες έχουν επισημάνει την ανάγκη για πρότυπα που να διασφαλίζουν τη μέγιστη διατήρηση δραστικών συστατικών και ελαχιστοποίηση απωλειών (Uziel et al., 2022), (Spadafora et al., 2024). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης τεσσάρων διαφορετικών μεθόδων ξήρανσης (λυοφιλίωση, φυσική ξήρανση, μικροκύματα και κλίβανος) στη χημική σύσταση (κανναβινοειδή και τερπένια) και στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ανθών Cannabis sativa L., με στόχο τη διαμόρφωση βάσης γνώσης για βελτιστοποίηση και τυποποίηση της διαδικασίας ξήρανσης στη βιομηχανική παραγωγή.

1. ΘΕΩΡΙΑ

Η ξήρανση των φυτικών υλικών είναι μία σύνθετη διεργασία μεταφοράς μάζας και ενέργειας, όπου η απομάκρυνση της υγρασίας περιγράφεται κυρίως μέσω της διάχυσης σύμφωνα με τον 2ο νόμο του Fick (Moussaoui et al., 2020). Για ισότροπο υλικό η θεμελιώδης σχέση δίνεται από:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\text{eff}} \nabla X) \quad [1]$$

όπου X είναι η περιεχόμενη υγρασία (kg.kg^{-1}) και D_{eff} ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης (m^2.s^{-1}), ο οποίος ενσωματώνει όλους τους μηχανισμούς μεταφοράς (μοριακή διάχυση, τριχοειδής ροή, μεταφορά λόγω συρρίκνωσης) (Luisetti et al., 2023).

1.1. Διάχυση και μεταφορά υγρασίας

Η απώλεια νερού κατά την ξήρανση περιγράφεται κυρίως μέσω του νόμου διάχυσης του Fick, όπου η ροή J (mol.m^{-2}.s^{-1}) είναι ανάλογη του βαθμού συγκέντρωσης της υγρασίας. Ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης (D_{eff}) χρησιμοποιείται για να ενσωματώσει όλους τους μηχανισμούς μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων της μοριακής διάχυσης, της τριχοειδούς ροής και της μεταφοράς λόγω συρρίκνωσης. Η εξάρτηση του D_{eff} από τη θερμοκρασία συχνά περιγράφεται με μια εξίσωση τύπου Arrhenius (Guiné et al., 2017), γεγονός που επιτρέπει την εκτίμηση της ενέργειας ενεργοποίησης (E_a) της διαδικασίας (Waramit et al., 2021).

1.2. Ενεργότητα νερού και σταθερότητα προϊόντος

Η ενεργότητα νερού (a_w) αποτελεί κρίσιμο δείκτη για τη μικροβιακή σταθερότητα και τη χημική ακεραιότητα του προϊόντος. Τιμές κάτω από 0.60 αποτρέπουν μικροβιακή ανάπτυξη και χημική υποβάθμιση, αυξάνοντας τη διάρκειας ζωής (Guiné et al., 2017) του προϊόντος. Η διατήρηση χαμηλής ενεργότητας νερού είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για προϊόντα όπως η φαρμακευτική κάνναβη.

1.3. Αποικοδόμηση κανναβινοειδών και απώλεια τερπενίων

Τα κανναβινοειδή, όπως τα THCA και CBDA, είναι θερμοευαίσθητες ενώσεις που αποκαρβοξυλιώνονται με θέρμανση και ακολουθούν κινητική πρώτης τάξης. Οι αντιδράσεις αποκαρβοξυλίωσης και οξειδωτικής υποβάθμισης περιγράφονται από τις εξισώσεις:

$$\frac{d[\text{THCA}]}{dt} = -k_1 [\text{THCA}] \quad [2]$$

$$\frac{d[\text{THC}]}{dt} = k_1[\text{THCA}] - k_2[\text{THC}] \quad [3]$$

$$k_i(T) = k_{0,i} \exp\left(-\frac{E_{a,i}}{RT}\right) \quad [4]$$

όπου k_1 ο ρυθμός αποκαρβοξυλίωσης και k_2 ο ρυθμός περαιτέρω αποικοδόμησης (π.χ. προς CBN). Οι σταθερές ακολουθούν και αυτές τη σχέση Arrhenius (Sharifian et al., 2015):

1.4. Συσχέτιση Μεθόδων ξήρανσης και ποιότητας

Η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών ξήρανσης και η αξιολόγηση των μεθόδων ως προς τη χημική και μικροδομική σταθερότητα των ανθών της κάνναβης είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη τυποποιημένων, ασφαλών και αποτελεσματικών πρωτοκόλλων μετασυλλεκτικής επεξεργασίας.

- Η λυοφιλίωση θεωρείται η πλέον αποτελεσματική μέθοδος για τη διατήρηση θερμοευαίσθητων συστατικών, αν και απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας και είναι αρκετά δαπανηρή.
- Η φυσική ξήρανση σε ελεγχόμενες συνθήκες προσφέρει ήπια αφυδάτωση αλλά έχει μεγάλη διάρκεια και πιθανή οξειδωτική υποβάθμιση.
- Η ξηρανση με μικροκύματα επιτυγχάνει ταχεία αφυδάτωση, ωστόσο ο κίνδυνος τοπικής υπερθέρμανσης επηρεάζει αρνητικά τα κανναβινοειδή.
- Η ξηρανση σε κλίβανο με εξαναγκασμένη ροή θερμού αέρα αποτελεί βιομηχανικά εφικτή λύση, αλλά συνδέεται με απώλειες τερπενίων και μεταβολές στη χημική σύσταση.

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. Φυτικό Υλικό

Το πειραματικό φυτικό υλικό αποτέλεσαν ανθοί του Cannabis sativa L., ποικιλίας “Royal Gorilla”, με περιεκτικότητα σε τετραϋδροκανναβινόλη (THC) μεγαλύτερη του 0,2%. Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε στο στάδιο πλήρους άνθησης, προκειμένου να διασφαλιστεί η μέγιστη συγκέντρωση των κύριων κανναβινοειδών. Η καλλιέργεια, η συγκομιδή και ο χειρισμός του φυτικού υλικού πραγματοποιήθηκαν σε αδειοδοτημένη υποδομή, εγκεκριμένη για έρευνα σε φαρμακευτική κάνναβη με περιεκτικότητα >0,2% THC. Η εν λόγω μονάδα ανήκει στο Ινστιτούτο Γενετικής Βελτίωσης και Φυτογενετικών Πόρων (ΙΓΒ&ΦΠ) του ΕΛΓΟ–ΔΗΜΗΤΡΑ, στο αγρόκτημα Θέρμης. Αμέσως μετά τη συγκομιδή, οι ανθοί υπέστησαν ήπια προετοιμασία και μεταφέρθηκαν άμεσα σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις ξήρανσης για περαιτέρω επεξεργασία.

3.2. Πειραματικός Σχεδιασμός

Στο πλαίσιο της μελέτης αξιολογήθηκαν τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι ξήρανσης, με στόχο τη σύγκριση της επίδρασής τους στη χημική σύσταση και την ποιότητα των ξηραμένων ανθών. Οι μέθοδοι που εξετάστηκαν ήταν οι εξής:

1. Φυσική Ξήρανση (σε περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας και υγρασίας)
2. Ξήρανση σε Κλίβανο με Εξαναγκασμένη Κυκλοφορία Αέρα
3. Ξήρανση με Μικροκύματα
4. Λυοφιλίωση (Κατάψυξη και Υποπίεση)

Για κάθε μέθοδο, παρασκευάστηκαν τρία ανεξάρτητα βιολογικά δείγματα (n = 3), τα οποία υποβλήθηκαν σε ξήρανση μέχρι να επιτευχθεί τελικό ποσοστό υγρασίας περίπου 11% κ.β. Παράλληλα, αναλύθηκαν και τρία νωπά δείγματα, τα οποία συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν αμέσως μετά τη συγκομιδή, λειτουργώντας ως δείγματα αναφοράς (μάρτυρες).

3.3.Κριτήριο Τερματισμού Ξήρανσης

Ως κοινό κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας ξήρανσης ορίστηκε η επίτευξη τελικού ποσοστού υγρασίας ~11% κ.β. Η παρακολούθηση της υγρασίας πραγματοποιήθηκε με διαδοχικές ζυγίσεις σε θερμοζυγό KERN Moisture Analyzer DAB 100-3 έως ότου σταθεροποιηθεί το βάρος των δειγμάτων, ένδειξη ολοκλήρωσης της αφυδάτωσης.

3.4.Πρωτόκολλα ξήρανσης

Οι συνθήκες λειτουργίας για κάθε μέθοδο ξήρανσης παρατίθενται στον Πίνακα 1. Οι παράμετροι βασίστηκαν τόσο σε βιβλιογραφικές αναφορές όσο και σε προκαταρκτικές δοκιμές, ώστε να εξασφαλιστεί η αντιπροσωπευτικότητα και η επαναληψιμότητα κάθε μεθόδου.

Πινακας 1. Συνθήκες ξήρανσης και φυσικοχημικές παράμετροι ανά μέθοδοι

Μέθοδος Ξήρανσης	**Διάρκεια**	**Θερμοκρασία**	**Σχετική Υγρασία (RH)**	**Ισχύς / Ειδικές Συνθήκες**	**Τελική Υγρασία**
Φυσική Ξήρανση	10 ημέρες	18,5 °C	55%	Θάλαμος ελεγχόμενου κλίματος, ήπια ροή αέρα	~11%

Μέθοδος Ξήρανσης	**Διάρκεια**	**Θερμοκρασία**	**Σχετική Υγρασία (RH)**	**Ισχύς / Ειδικές Συνθήκες**	**Τελική Υγρασία**
Ξήρανση σε Κλίβανο	48 ώρες	40 °C	–	Κλίβανος με εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα	~11%
Μικροκύματα	6 ώρες	–	–	Ειδική ισχύς 2 W/g υλικού (ως προς τη μάζα δείγματος)	~11%
Λυοφιλίωση	6 ώρες	−40 °C (Main drying)	–	0,12 mbar (Main); −5 °C / 4,0 mbar (Τελική Ξήρανση)	~11%

3.5.Αναλυτικές μέθοδοι

Η ποσοτική ανάλυση των κυριότερων κανναβινοειδών – Δ⁹-τετραϋδροκανναβινόλη (Δ⁹- THC), τετραϋδροκανναβινολικό οξύ (THCA), κανναβιδιόλη (CBD) και κανναβιδιολικό οξύ (CBDA) – πραγματοποιήθηκε με τη χρήση υγρής χρωματογραφίας υψηλής απόδοσης με ανιχνευτή διατάξεως φωτοδιοδίου (HPLC–DAD, Shimadzu). Η εκχύλιση των δραστικών συστατικών έγινε με οργανικό διαλύτη, ενώ τα δείγματα διηθήθηκαν μέσω μικροπορώδους φίλτρου πριν την ανάλυση. Η διαδικασία ανάλυσης βασίστηκε σε πιστοποιημένα και επαληθευμένα πρωτόκολλα, με χρήση πρότυπων αναφοράς για την ακριβή ποσοτικοποίηση των κανναβινοειδών.

3.6.Συγκριτική ανάλυση

Τα αποτελέσματα των τεσσάρων μεθόδων ξήρανσης συγκρίθηκαν με εκείνα των νωπών δειγμάτων. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με περιγραφική στατιστική προσέγγιση, μέσω παρουσίασης των μέσων όρων των τριών επαναλήψεων ανά μέθοδο, συνοδευόμενων από το εύρος τιμών (ελάχιστη–μέγιστη). Η ανάλυση επικεντρώθηκε στον εντοπισμό ποιοτικών και ποσοτικών διαφορών μεταξύ των μεθόδων, με ιδιαίτερη έμφαση στη διατήρηση των κανναβινοειδών.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η ποσοτική ανάλυση των δειγμάτων μέσω υγρής χρωματογραφίας υψηλής απόδοσης με ανιχνευτή διαδοχικών μηκών κύματος (HPLC–DAD) ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις στο προφίλ των κανναβινοειδών, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο ξήρανσης, σε σύγκριση με το νωπό (μη επεξεργασμένο) φυτικό υλικό (Πίνακας 2).

Στα νωπά δείγματα, η χημική σύσταση χαρακτηριζόταν από υψηλή συγκέντρωση του όξινου μορφολογικού κανναβινοειδούς THCA (18,4%) και εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα του αποκαρβοξυλιωμένου THC (0,21%), υποδεικνύοντας ελάχιστη ενζυματική ή θερμική αποικοδόμηση και επιβεβαιώνοντας την υψηλή φαρμακευτική καθαρότητα των ανθών.

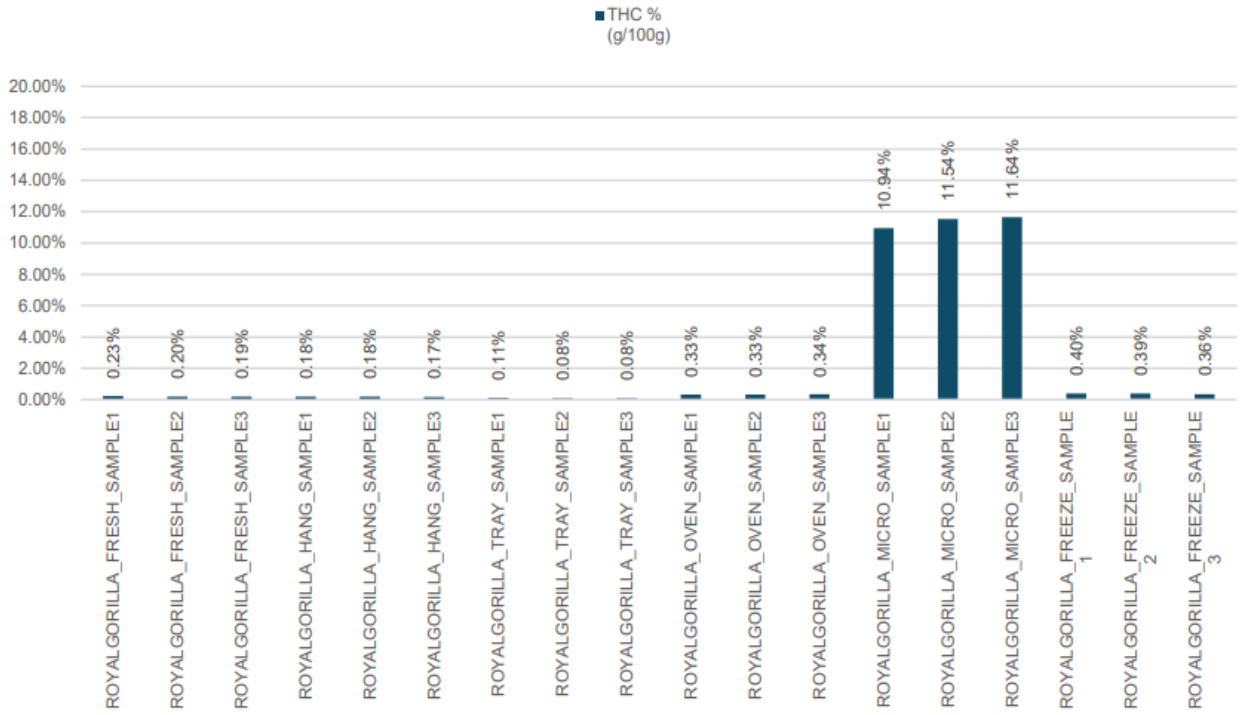
Η αποξήρανση με ανάρτηση (Hang drying) και φυσική ξήρανση σε δίσκους (Tray drying) οδήγησαν σε μείωση του THCA (11,2% και 9,9% αντίστοιχα), χωρίς ανάλογη αύξηση του THC. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει μερική αποδόμηση των δραστικών συστατικών, πιθανώς μέσω μη-ελεγχόμενης αποκαρβοξυλίωσης ή οξειδωτικής υποβάθμισης, χωρίς αποτελεσματική μετατροπή του THCA σε THC.

Στη μέθοδο ξήρανσης με κλίβανο (Oven drying), παρατηρήθηκε περιορισμένη αποκαρβοξυλίωση, όπως συμπεραίνεται από την αύξηση του THC (0,33%) και τη μείωση του THCA (~10,7%).

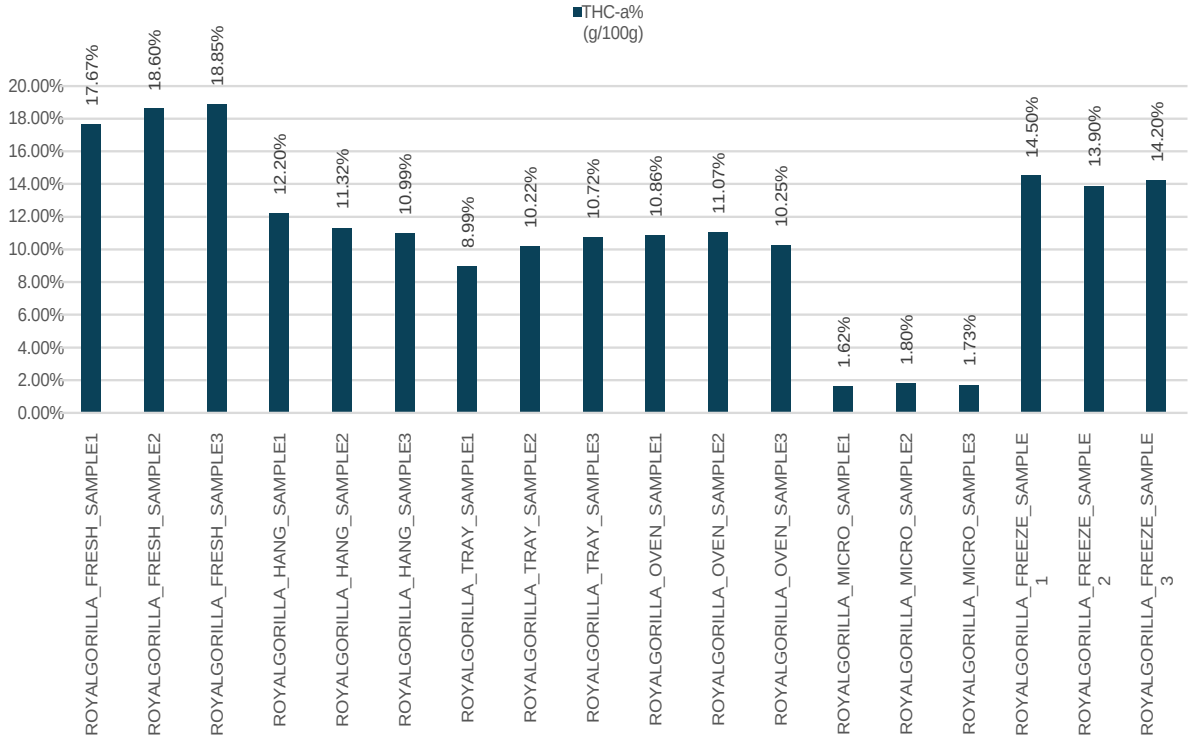
Η ξήρανση με μικροκύματα (Microwave drying) είχε ως αποτέλεσμα σχεδόν πλήρη αποκαρβοξυλίωση, οδηγώντας σε δραστική μεταβολή του προφίλ των κανναβινοειδών. Τα επίπεδα THC αυξήθηκαν σημαντικά (11,4%), ενώ το THCA μειώθηκε σε 1,7%, γεγονός που υποδηλώνει έντονη θερμική αποδόμηση και μετατροπή των όξινων μορφών.

Αντιθέτως, η λυοφιλίωση (Freeze-drying) αναδείχθηκε ως η πλέον αποτελεσματική μέθοδος για τη διατήρηση του αρχικού χημικού προφίλ. Τα δείγματα διατήρησαν υψηλή συγκέντρωση THCA (14,2%) και χαμηλά επίπεδα THC (0,28%), ενώ παρουσίασαν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση CBD (0,20%) σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Τα ευρήματα αυτά καταδεικνύουν ότι η λυοφιλίωση ελαχιστοποιεί τις θερμικές και οξειδωτικές αλλοιώσεις, περιορίζοντας την αποκαρβοξυλίωση και διατηρώντας τη σταθερότητα των βιοδραστικών ενώσεων.

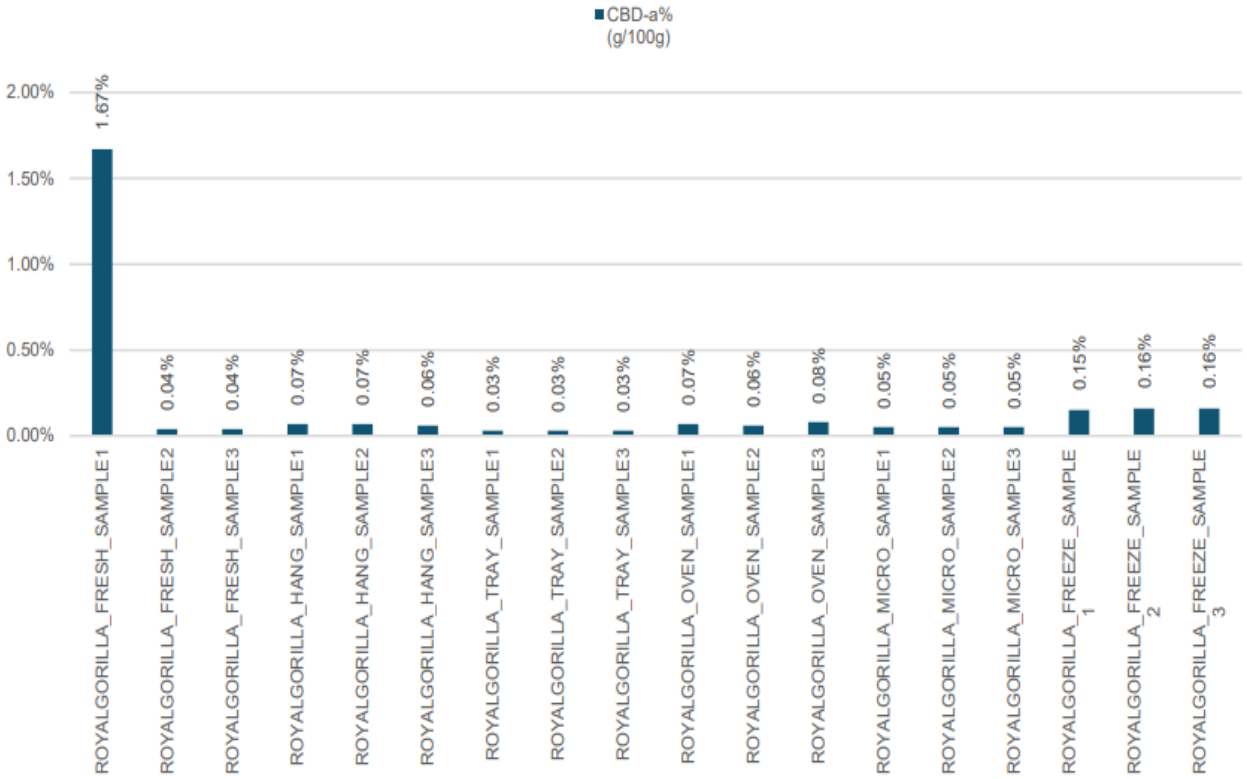
Συνολικά, η επιλογή της μεθόδου ξήρανσης επηρεάζει καθοριστικά τη σύσταση των κανναβινοειδών στο τελικό προϊόν, με τη λυοφιλίωση να υπερέχει σαφώς όσον αφορά τη διατήρηση της φαρμακολογικής δραστικότητας και τη χημική ακεραιότητα του φυτικού υλικού.



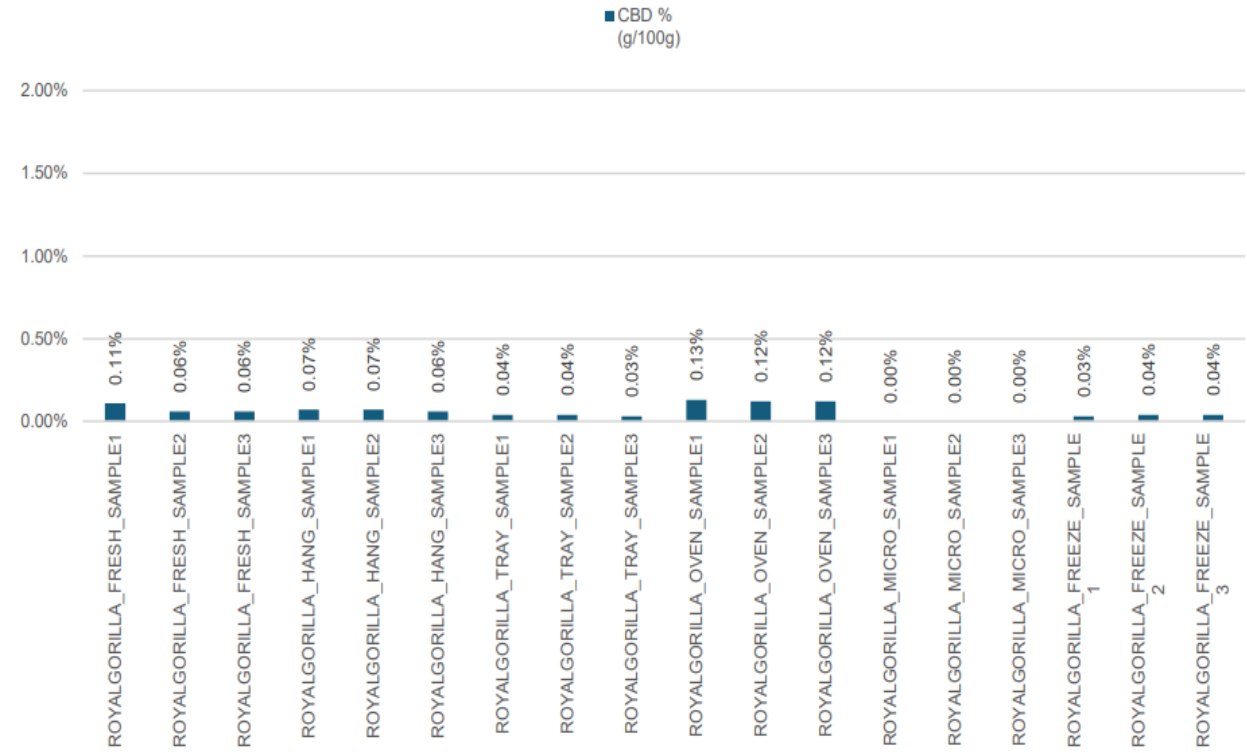
Σχήμα 1(β). Συγκεντρώσεις THC (%) σε νωπά και αποξηραμένα δείγματα Cannabis sativa L..



Σχήμα 1(α). Συγκεντρώσεις THCA (%) σε νωπά και αποξηραμένα δείγματα Cannabis sativa L..



Σχήμα 2(α). Συγκεντρώσεις CBDA (%) σε νωπά και αποξηραμένα δείγματα Cannabis sativa L..



Σχήμα 2(β). Συγκεντρώσεις CBD (%) σε νωπά και αποξηραμένα δείγματα Cannabis sativa L..

Πίνακας 2. Συγκεντρώσεις (%) κύριων κανναβινοειδών σε νωπά και αποξηραμένα δείγματα Cannabis sativa L.

Royal Gorilla (pre-expirement)	HPLC-DAB															
	Moisture Correction (%)	Sample Dried Mass (grams)	Methanol Volume (mL)	THC-a% (g/100g)	THC % (g/100g)	CBD-a% (g/100g)	CBD % (g/100g)	CBG-a % (g/100g)	CBG % (g/100g)	CBN-a % (g/100g)	CBN % (g/100g)	CBC-a % (g/100g)	CBC % (g/100g)	THCV-a % (g/100g)	TCHV % (g/100g)
ROYALGORILLA_FRESH_SAMPLE1	78.34%	0.082	10.00	17.67%	0.23%	1.67%	0.11%	0.44%	0.00%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_FRESH_SAMPLE2	78.34%	0.079	10.00	18.60%	0.20%	0.04%	0.06%	0.44%	0.00%	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_FRESH_SAMPLE3	78.34%	0.079	10.00	18.85%	0.19%	0.04%	0.06%	0.44%	0.00%	NOT TESTED	0.01%	NOT TESTED	0.01%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_HANG_SAMPLE1	0.00%	0.100	10.00	12.20%	0.18%	0.07%	0.07%	0.14%	0.11%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.01%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_HANG_SAMPLE2	0.00%	0.100	10.00	11.32%	0.18%	0.07%	0.07%	0.14%	0.09%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.02%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_HANG_SAMPLE3	0.00%	0.100	10.00	10.99%	0.17%	0.06%	0.06%	0.13%	0.67%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.01%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_TRAY_SAMPLE1	0.00%	0.100	10.00	8.99%	0.11%	0.03%	0.04%	0.17%	0.09%	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	0.01%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_TRAY_SAMPLE2	0.00%	0.100	10.00	10.22%	0.08%	0.03%	0.04%	0.18%	0.01%	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	0.01%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_TRAY_SAMPLE3	0.00%	0.100	10.00	10.72%	0.08%	0.03%	0.03%	0.16%	0.01%	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	0.01%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_OVEN_SAMPLE1	0.00%	0.100	10.00	10.86%	0.33%	0.07%	0.13%	0.25%	0.05%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_OVEN_SAMPLE2	0.00%	0.100	10.00	11.07%	0.33%	0.06%	0.12%	0.24%	0.04%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_OVEN_SAMPLE3	0.00%	0.100	10.00	10.25%	0.34%	0.08%	0.12%	0.23%	0.17%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_MICRO_SAMPLE1	0.00%	0.100	10.00	1.62%	10.94%	0.05%	0.00%	0.05%	0.08%	NOT TESTED	0.18%	NOT TESTED	0.19%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_MICRO_SAMPLE2	0.00%	0.100	10.00	1.80%	11.54%	0.05%	0.00%	0.05%	0.08%	NOT TESTED	0.14%	NOT TESTED	0.19%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_MICRO_SAMPLE3	0.00%	0.100	10.00	1.73%	11.64%	0.05%	0.00%	0.05%	0.09%	NOT TESTED	0.16%	NOT TESTED	0.19%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_FREEZE_SAMPLE1	0.00%	0.100	10.00	14.50%	0.28%	0.21%	0.03%	0.15%	0.05%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.01%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_FREEZE_SAMPLE2	0.00%	0.100	10.00	13.90%	0.26%	0.19%	0.04%	0.16%	0.12%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.01%	NOT TESTED	NOT TESTED
ROYALGORILLA_FREEZE_SAMPLE3	0.00%	0.100	10.00	14.20%	0.27%	0.20%	0.04%	0.16%	0.11%	NOT TESTED	LOQ	NOT TESTED	0.00%	NOT TESTED	NOT TESTED

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα συγκριτική μελέτη τεσσάρων μεθόδων ξήρανσης των ανθών του φυτού Cannabis sativa L. (φυσική ανάρτηση, φυσική ξήρανση σε δίσκους, ξήρανση σε κλίβανο, μικροκυματική θέρμανση και λυοφιλίωση) ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις στη χημική σύσταση των τελικών προϊόντων, επηρεάζοντας καθοριστικά τη βιοδραστικότητα και φαρμακευτική αξία των παραγόμενων εκχυλισμάτων (Chasiotis et al., 2021).

Οι φυσικές μέθοδοι ξήρανσης (ανάρτηση και δίσκος) χαρακτηρίστηκαν από παρατεταμένο χρόνο διεργασίας και αξιοσημείωτη αποδόμηση του όξινου κανναβινοειδούς THCA, χωρίς αντίστοιχη αύξηση της περιεκτικότητας σε THC, υποδεικνύοντας χαμηλή αποδοτικότητα και απώλεια βιοδραστικότητας.

Η ξήρανση σε θερμαινόμενο κλίβανο οδήγησε σε μερική αποκαρβοξυλίωση, προκαλώντας μέτρια μείωση του THCA και σχετική αύξηση των επιπέδων του THC. Αν και ταχύτερη από τις φυσικές μεθόδους, συνοδεύτηκε από μερική απώλεια του θεραπευτικού προφίλ.

Η ξήρανση με μικροκύματα προκάλεσε σχεδόν πλήρη αποκαρβοξυλίωση του THCA σε THC, με αποτέλεσμα σημαντική μεταβολή του χημικού προφίλ υπέρ της ψυχοδραστικότητας, υποβαθμίζοντας τη φαρμακευτική αξία του προϊόντος.

Αντίθετα, η λυοφιλίωση ανέδειξε τη βέλτιστη απόδοση όσον αφορά τη διατήρηση των κύριων κανναβινοειδών. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε υψηλή συγκράτηση του THCA, χαμηλά επίπεδα THC.

Συνοψίζοντας, η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής ξήρανσης αποτελεί κρίσιμο βήμα στην αλυσίδα μετασυλλεκτικής επεξεργασίας της φαρμακευτικής κάνναβης, επηρεάζοντας άμεσα τη διατήρηση των κανναβινοειδών και, κατ' επέκταση, την αποτελεσματικότητα του τελικού φαρμακευτικού προϊόντος (Yoon et al., 2024). Η λυοφιλίωση, παρά το αυξημένο κόστος σε ενέργεια και εξοπλισμό, προτείνεται ως η βέλτιστη προσέγγιση για εφαρμογές υψηλής προστιθέμενης αξίας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Addo, P. W., Gariépy, Y., Shearer, M., Taylor, N., MacPherson, S., Raghavan, V., Orsat, V., & Lefsrud, M. (2024). Microwave-assisted hot air drying of Cannabis sativa: Effect of vacuum and pre-freezing on drying kinetics and quality. Industrial Crops and Products. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119015

Addo, P. W., Chauvin-Bossé, T., Taylor, N., MacPherson, S., Paris, M., & Lefsrud, M. (2023). Freeze-drying Cannabis sativa L. using real-time relative humidity monitoring and mathematical modeling for the cannabis industry. Industrial Crops and Products. 10.1016/j.indcrop.2023.116754

Baek, Y., Grab, H., & Chen, C. (2025). Postharvest drying and curing affect cannabinoid contents and microbial levels in industrial hemp (Cannabis sativa L.). Plants. https://doi.org/10.3390/plants14030414

Chen, C., Wongso, I., Putnam, D., Khir, R., & Pan, Z. (2021). Effect of hot air and infrared drying on the retention of cannabidiol and terpenes in industrial hemp (Cannabis sativa L.). Industrial Crops and Products.10.1016/j.indcrop.2021.114051

Chasiotis, V., Tsakirakis, A., Termentzi, A., Machera, K., & Filios, A. (2021). Drying and quality characteristics of Cannabis sativa L. inflorescences under constant and time-varying convective drying temperature schemes. Thermal Science and Engineering Progress. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101076

Das, P. C., Baik, O., & Tabil, L. (2024). Microwave-infrared drying of cannabis (Cannabis sativa L.): Effect on drying characteristics, energy consumption and quality. Industrial Crops and Products. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118215

Guiné, R., Brito, M. F., & Ribeiro, J. R. P. (2017). Evaluation of mass transfer properties in convective drying of kiwi and eggplant. *International Journal of Food Engineering*. 10.1515/ijfe-2016-0257

Luisetti, J., Balzarini, M. F., & Ciappini, M. (2023). Estimation of effective water vapour diffusion and mass transfer during quinoa drying. *Agronomía Colombiana*. DOI: 10.15446/agron.colomb.v41n2.108843

Moussaoui, H., Idlimam, A., Lamharrar, A., Tagnamas, Z., Kouhila, M., & Bahammou, Y. (2020). Modeling of mass transfer during continuous drying of Urtica urens leaves. Medicinal and Aromatic Plants. DOI: 10.48347/IMIST.PRSM/AJMAP-V6I1.20415

Sharifian, F., Nikbakht, A., Arefi, A., & Motlagh, A. M. (2015). Experimental Assessment of Energy and Mass Transfer in Microwave Drying of Fig Fruit. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17, 1695–1705.

Spadafora, N. D., Felletti, S., Chenet, T., Sirangelo, T., Cescon, M., Catani, M., De Luca, C., Stevanin, C., Cavazzini, A., & Pasti, L. (2024). The influence of drying and storage conditions on the volatilome and cannabinoid content of Cannabis sativa L. inflorescences. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 416, 3797–3809. 10.1007/s00216-024-05321-w

Uziel, A., Milay, L., Procaccia, S., Cohen, R., Burstein, A., Sulimani, L., Shreiber-Livne, I., Lewitus, D., & Meiri, D. (2022). Solid-state microwave drying for medical cannabis inflorescences: A rapid and controlled alternative to traditional drying. Cannabis and Cannabinoid Research. 10.1089/can.2022.0051

Waramit, P., Krittakom, B., & Luampon, R. (2021). Experimental Investigation to Evaluate the Effective Moisture Diffusivity and Activation Energy of Cassava. *Applied Science and Engineering Progress*. 10.14416/j.asep.2021.10.008

67. ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ BLOCKCHAIN ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΖΥΘΟΠΟΙΙΑ: ΠΡΟΣ ΜΙΑ ΔΙΑΦΑΝΗ ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΟ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ

Β. Ιωάννου[1] & Ε. Αδαμοπούλου[2]

[1] *Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αγροτικής Οικονομίας και Ανάπτυξης, Ιερά Οδός 75, Τ.Κ. 11855, Αθήνα*
[2] *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Τ.Κ. 15773, Ζωγράφου, eadam@cn.ntua.gr*

Περίληψη

Η εργασία εξετάζει τη συμβολή του Blockchain και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) στη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στη ζυθοποιία. Μέσα από συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και μελέτη περίπτωσης της Anheuser-Busch InBev αναλύεται πώς οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να ενισχύσουν τη διαφάνεια της εφοδιαστικής αλυσίδας, να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση πόρων και να προωθήσουν πρακτικές κυκλικής οικονομίας. Τα ευρήματα αναδεικνύουν σημαντικά οφέλη, όπως η μείωση εκπομπών, η πρόληψη της απάτης και η συμμόρφωση με κανονιστικά πρότυπα, αλλά και προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος, την τεχνική πολυπλοκότητα και την ανάγκη για διαλειτουργικά πρότυπα. Συμπεραίνεται ότι ο συνδυασμός Blockchain και IoT μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης για μια πιο βιώσιμη και υπεύθυνη ζυθοποιία, ενώ μελλοντικές κατευθύνσεις περιλαμβάνουν την αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης και τη διεύρυνση συνεργειών στην αγροδιατροφική βιομηχανία.

Λέξεις κλειδιά: Ζυθοποιία, Εφοδιαστική αλυσίδα, Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), Ιχνηλασιμότητα, Blockchain, Βιωσιμότητα

COMBINED APPLICATION OF BLOCKCHAIN AND INTERNET OF THINGS IN BREWING: TOWARDS A TRANSPARENT AND SUSTAINABLE SUPPLY CHAIN

V. Ioannou[1] & E. Adamopoulou[2,✉]

[1]*Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Economics and Rural Development, Iera Odos 75, 11855, Athens, ✉eadam@cn.ntua.gr*
[2]*National Technical University of Athens, School of Electrical and Computer Engineering, Iroon Polytexneiou 9, 15773, Zografou*

ABSTRACT

This paper examines the contribution of Blockchain and the Internet of Things (IoT) to enhancing traceability and reducing the environmental footprint in the brewing industry. Through a systematic literature review and a case study of Anheuser-Busch InBev, it analyzes how these technologies can strengthen supply chain transparency, optimize resource consumption, and promote circular economy practices. The findings highlight key benefits, such as emission reduction, fraud prevention, and compliance with regulatory standards, but also challenges related to cost, technical complexity, and the need for interoperability standards. It is concluded that the combined use of Blockchain and IoT can act as a catalyst for a more sustainable and responsible brewing sector, while future directions include the integration of artificial intelligence and the expansion of collaborations within the agri-food industry.

Keywords: Brewing, Supply chain, Internet of Things (IoT), Traceability, Blockchain, Sustainability

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανία ζυθοποιίας αποτελεί έναν από τους πλέον δυναμικούς κλάδους της αγροδιατροφικής οικονομίας, με σημαντική συμβολή στην παγκόσμια παραγωγή και κατανάλωση τροφίμων και ποτών. Παράλληλα, χαρακτηρίζεται από υψηλή κατανάλωση νερού και ενέργειας, πολυπλοκότητα στην εφοδιαστική αλυσίδα και αυξανόμενες περιβαλλοντικές προκλήσεις (Simate et al., 2011; Raffa et al., 2022). Σε αυτό το πλαίσιο, η ανάγκη για βελτίωση της ιχνηλασιμότητας, ενίσχυση της διαφάνειας και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος καθίσταται ολοένα και πιο επιτακτική (Fraser et al., 2020).

Οι τεχνολογίες Blockchain και Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) αναδύονται ως ισχυρά εργαλεία για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της ζυθοποιίας. Το blockchain, ως κατανεμημένη και αμετάβλητη βάση δεδομένων, διασφαλίζει τη διαφάνεια και την ασφάλεια στις συναλλαγές της εφοδιαστικής αλυσίδας (Nakamoto, 2008; Tapscott & Tapscott, 2016), ενώ το IoT, μέσω ενός δικτύου αισθητήρων και συσκευών, παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για κρίσιμες παραμέτρους της παραγωγής και της κατανάλωσης πόρων (Nurgazina et al., 2021). Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών μπορεί να οδηγήσει σε πιο βιώσιμες και υπεύθυνες πρακτικές, απαντώντας στις αυξανόμενες απαιτήσεις καταναλωτών και ρυθμιστικών αρχών (Saberi et al., 2019).

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να αναλύσει τον ρόλο και τη δυναμική της ενσωμάτωσης Blockchain και IoT στη ζυθοποιία, εξετάζοντας τις δυνατότητες εφαρμογής τους για την ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η ανάλυση τοποθετείται στο ευρύτερο πλαίσιο των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης, αναδεικνύοντας πώς η υιοθέτηση τέτοιων τεχνολογιών μπορεί να αποτελέσει πρότυπο και για άλλους κλάδους της αγροδιατροφικής βιομηχανίας.

2. ΘΕΩΡΙΑ

Η εφαρμογή νέων τεχνολογιών στην αγροδιατροφική αλυσίδα αποτελεί βασικό μοχλό για την αντιμετώπιση προκλήσεων που σχετίζονται με την ασφάλεια, την ποιότητα και τη βιωσιμότητα των προϊόντων. Στο πλαίσιο αυτό, δύο από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες είναι το Blockchain και το IoT.

Το Blockchain είναι μια κατανεμημένη ψηφιακή βάση δεδομένων, όπου οι συναλλαγές καταγράφονται σε «μπλοκ» που συνδέονται μεταξύ τους με κρυπτογραφικές μεθόδους, σχηματίζοντας μια αλυσίδα που δεν μπορεί να τροποποιηθεί αναδρομικά (Nakamoto, 2008). Χάρη στη διαφάνεια και στη μη μεταβλητότητά του, το blockchain βρίσκει εφαρμογές σε τομείς όπου η ιχνηλασιμότητα, η εμπιστοσύνη και η ασφάλεια δεδομένων αποτελούν κρίσιμες απαιτήσεις, όπως η αγροδιατροφική εφοδιαστική αλυσίδα (Tapscott & Tapscott, 2016; Saberi et al., 2019). Μέσω έξυπνων συμβολαίων (smart contracts), οι επιχειρήσεις μπορούν να αυτοματοποιούν διαδικασίες, μειώνοντας το κόστος και περιορίζοντας την πιθανότητα ανθρώπινων λαθών (Wood, 2014).

Το IoT αναφέρεται σε ένα δίκτυο φυσικών συσκευών εξοπλισμένων με αισθητήρες, λογισμικό και δυνατότητες επικοινωνίας, που συλλέγουν και ανταλλάσσουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (Nurgazina et al., 2021). Στη βιομηχανία τροφίμων, οι τεχνολογίες IoT επιτρέπουν την παρακολούθηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η κατανάλωση νερού και ενέργειας, καθώς και η ποιότητα πρώτων υλών και τελικών προϊόντων (Patel et al., 2023). Η δυνατότητα συνεχούς μέτρησης και αποθήκευσης δεδομένων παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την πρόληψη απωλειών, την ενίσχυση της αποδοτικότητας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Ο συνδυασμός Blockchain και IoT προσφέρει νέες δυνατότητες στη ζυθοποιία. Η διασύνδεση των IoT αισθητήρων με μια αλυσίδα blockchain επιτρέπει την αυτόματη και αδιάβλητη καταγραφή δεδομένων σε όλα τα στάδια της παραγωγής: από την καλλιέργεια του κριθαριού και τη μεταφορά πρώτων υλών, μέχρι τη διαδικασία ζυθοποίησης, τη συσκευασία και τη διανομή (Chandra et al., 2019; Subramanian et al., 2023). Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η πλήρης ιχνηλασιμότητα, ενισχύεται η εμπιστοσύνη των καταναλωτών, και παρέχεται στις επιχειρήσεις ένα εργαλείο συμμόρφωσης με κανονιστικά πρότυπα και περιβαλλοντικούς στόχους (Kamath, 2018).

Η ενσωμάτωση των δύο τεχνολογιών δεν είναι απαλλαγμένη προκλήσεων, καθώς απαιτεί επενδύσεις σε υποδομές, τεχνική εξειδίκευση και σαφή στρατηγική υιοθέτησης. Παρά ταύτα, η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η εφαρμογή τους μπορεί να αποτελέσει θεμέλιο για μια πιο διαφανή, ασφαλή και αειφόρο εφοδιαστική αλυσίδα στον κλάδο της ζυθοποιίας.

3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας στηρίχθηκε σε δύο βασικούς άξονες: (α) τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και (β) τη μελέτη περίπτωσης.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας με σκοπό την καταγραφή και ανάλυση των πιο πρόσφατων εξελίξεων σχετικά με την εφαρμογή του Blockchain και του IoT στη βιομηχανία τροφίμων και ειδικότερα στη ζυθοποιία. Η αναζήτηση έγινε σε επιστημονικές βάσεις δεδομένων όπως *Scopus, Web of Science* και *Google Scholar*. Χρησιμοποιήθηκαν λέξεις-κλειδιά όπως *“Blockchain in food industry”, “IoT in brewing”, “sustainable supply chain”* και *“traceability in beer production”*. Τα κριτήρια επιλογής περιλάμβαναν: (i) δημοσιεύσεις σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά ή πρακτικά συνεδρίων, (ii) χρονικό εύρος 2008–2023, ώστε να συμπεριληφθούν τόσο οι πρώιμες θεωρητικές προσεγγίσεις όσο και πιο πρόσφατες εμπειρικές μελέτες, και (iii) εστίαση σε εφαρμογές που σχετίζονται με ιχνηλασιμότητα, διαφάνεια και βιωσιμότητα στην αγροδιατροφική αλυσίδα.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε ως μελέτη περίπτωσης η διεθνής ζυθοποιία *Anheuser-Busch InBev*, μία από τις μεγαλύτερες επιχειρήσεις στον κόσμο στον κλάδο της μπύρας. Η επιλογή αυτή έγινε διότι η εταιρεία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ενσωμάτωσης ψηφιακών τεχνολογιών για τη βελτίωση της βιωσιμότητας και της διαφάνειας της εφοδιαστικής αλυσίδας. Συγκεντρώθηκαν δεδομένα από ερευνητικά άρθρα, εταιρικές αναφορές βιωσιμότητας και τεχνικές εκθέσεις, με στόχο την καταγραφή πρακτικών που αφορούν: (i) χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση κατανάλωσης νερού και ενέργειας, (ii) αξιοποίηση blockchain για την ασφαλή αποθήκευση δεδομένων και τη διασφάλιση της ιχνηλασιμότητας, και (iii) στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων και παραπροϊόντων, όπως το ξοδεμένο κριθάρι.

Ο συνδυασμός βιβλιογραφικής ανασκόπησης και μελέτης περίπτωσης παρείχε μια ολοκληρωμένη εικόνα τόσο της θεωρητικής βάσης όσο και της πρακτικής εφαρμογής των τεχνολογιών Blockchain και IoT στη ζυθοποιία, επιτρέποντας την εξαγωγή συγκριτικών συμπερασμάτων.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η συστηματική ανασκόπηση και η μελέτη περίπτωσης της Anheuser-Busch InBev ανέδειξαν σημαντικές δυνατότητες αλλά και προκλήσεις από την ενσωμάτωση Blockchain και IoT στη ζυθοποιία.

4.1 Οφέλη εφαρμογής

Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη είναι η ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας και της διαφάνειας καθ’ όλη την εφοδιαστική αλυσίδα. Η καταγραφή δεδομένων σε blockchain επιτρέπει τη δημιουργία ενός αδιάβλητου ιστορικού που μπορεί να ελεγχθεί από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς

(Kamath, 2018). Παράλληλα, η χρήση IoT αισθητήρων επιτρέπει την παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, όπως θερμοκρασία, υγρασία, κατανάλωση ενέργειας και νερού, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής (Patel et al., 2023).

Στον τομέα της βιωσιμότητας, η υιοθέτηση των δύο τεχνολογιών βοηθά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Συστήματα IoT που μετρούν την κατανάλωση πόρων παρέχουν δεδομένα για τη μείωση της σπατάλης, ενώ η αξιοποίηση των πληροφοριών αυτών στο πλαίσιο στρατηγικών βιώσιμης διαχείρισης οδηγεί σε πιο αποδοτική χρήση νερού και ενέργειας (Raffa et al., 2022). Επιπλέον, καταγράφηκαν πρακτικές αξιοποίησης των παραπροϊόντων, όπως το ξοδεμένο κριθάρι, για παραγωγή ενέργειας ή ζωοτροφή, ενισχύοντας την κυκλική οικονομία.

Η ανάλυση ανέδειξε επίσης τον ρόλο των τεχνολογιών αυτών στην πρόληψη της απάτης και στη συμμόρφωση με κανονιστικά πρότυπα. Μέσω της αδιάβλητης καταγραφής, είναι δυνατή η αποτροπή παραποιήσεων και η διασφάλιση ότι τα προϊόντα πληρούν τις απαιτήσεις ποιότητας και ασφάλειας τροφίμων (Subramanian et al., 2023).

4.2 Προκλήσεις εφαρμογής

Παρά τα οφέλη, η μελέτη κατέδειξε και σημαντικές προκλήσεις. Το υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας αποτελεί βασικό εμπόδιο, ιδιαίτερα για μικρότερες ζυθοποιίες που δεν διαθέτουν τους απαραίτητους πόρους (Saberi et al., 2019). Επιπλέον, η τεχνική πολυπλοκότητα των συστημάτων απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό και εκπαίδευση, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω το κόστος (Nurgazina et al., 2021).

Ένα ακόμη ζήτημα αφορά τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και πλατφορμών. Η απουσία κοινών προτύπων μπορεί να δυσχεράνει την ευρεία υιοθέτηση και να περιορίσει τα οφέλη από την ολοκληρωμένη αξιοποίηση Blockchain και IoT στην εφοδιαστική αλυσίδα της ζυθοποιίας (Chandra et al., 2019).

4.3 Μελέτη περίπτωσης Anheuser-Busch InBev

Η διεθνής ζυθοποιία Anheuser-Busch InBev έχει ήδη προχωρήσει στην πιλοτική εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών. Μέσω συνεργασιών με τεχνολογικούς παρόχους, υλοποίησε προγράμματα παρακολούθησης κατανάλωσης νερού και ενέργειας με χρήση IoT αισθητήρων, ενώ αξιοποίησε blockchain για την ιχνηλασιμότητα της αλυσίδας προμηθευτών κριθαριού. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση στη σπατάλη πόρων, καλύτερη διαχείριση αποβλήτων και ενίσχυση της εμπιστοσύνης των καταναλωτών απέναντι στο τελικό προϊόν.

Συνολικά, τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι ο συνδυασμός Blockchain και IoT μπορεί να αποτελέσει καταλύτη για τον ψηφιακό και βιώσιμο μετασχηματισμό της ζυθοποιίας, αρκεί να υπάρξουν οι κατάλληλες στρατηγικές για την αντιμετώπιση των τεχνικών και οικονομικών προκλήσεων

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση έδειξε ότι ο συνδυασμός Blockchain και Διαδικτύου των Πραγμάτων μπορεί να ενισχύσει καθοριστικά τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα και τη βιωσιμότητα στη ζυθοποιία. Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και τη μελέτη περίπτωσης της Anheuser-Busch InBev αναδείχθηκαν πρακτικές που οδηγούν σε πιο αποδοτική χρήση πόρων, μείωση σπατάλης, καλύτερη διαχείριση αποβλήτων και αύξηση της εμπιστοσύνης των καταναλωτών. Οι τεχνολογίες αυτές προσφέρουν τη δυνατότητα συμμόρφωσης με κανονιστικά πρότυπα και συνδέονται άμεσα με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης.

Παράλληλα, εντοπίστηκαν προκλήσεις που αφορούν το κόστος εφαρμογής, την τεχνική πολυπλοκότητα και την έλλειψη κοινών προτύπων διαλειτουργικότητας. Η αντιμετώπισή τους απαιτεί συνεργασίες μεταξύ βιομηχανίας, τεχνολογικών παρόχων και ερευνητικών φορέων. Μελλοντικές κατευθύνσεις περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης για περαιτέρω ανάλυση και πρόβλεψη, καθώς και την ανάπτυξη προτύπων που θα διευκολύνουν την κλιμάκωση.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Chandra, S., Stanford, D.A., Fletcher, E.J. and Walker, L. (2019). Raw Materials Production and Manufacturing Process Control Strategies. *AAPS advances in the pharmaceutical sciences series*. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-11751-1_10.

Fraser, I.J., Müller, M. and Schwarzkopf, J. (2020). Transparency for Multi-Tier Sustainable Supply Chain Management: A Case Study of a Multi-tier Transparency Approach for SSCM in the Automotive Industry. *Sustainability*, 12(5), p.1814. doi:https://doi.org/10.3390/su12051814.

Kamath, R. (2018). Food traceability on blockchain: Walmart's pork and mango pilots with IBM. *The Journal of the British Blockchain Association, 1*(1), 3712.

Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.* https://bitcoin.org/bitcoin.pdf

Nurgazina, J., Pakdeetrakulwong, U., Moser, T. and Reiner, G. (2021). Distributed Ledger Technology Applications in Food Supply Chains: A Review of Challenges and Future Research Directions. *Sustainability*, 13(8), p.4206. doi:https://doi.org/10.3390/su13084206.

Patel, A. S., Brahmbhatt, M. N., Bariya, A. R., Nayak, J. B., & Singh, V. K. (2023). Blockchain technology in food safety and traceability concern to livestock products. *Heliyon*, 9(6). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16526

Raffa, S.L., Bennett, N. S., & Clemon, L. M. (2023). Opportunities for Energy Efficiency Improvements in Craft and Micro-Breweries. ASME Digital Collection. *Proceedings of the ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 6: Energy*. Columbus, Ohio, USA. doi: 10.1115/IMECE2022-94374

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J. and Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), pp.2117–2135. doi:https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261.

Simate, G.S., Cluett, J., Iyuke, S.E., Musapatika, E.T., Ndlovu, S., Walubita, L.F. and Alvarez, A.E. (2011). The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. *Desalination*, [online] 273(2-3), pp.235–247. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.02.035.

Subramanian, N., Joshi, A. and Bagga, D. (2023). Transparent and Traceable Food Supply Chain Management. *arXiv (Cornell University)*. doi:https://doi.org/10.48550/arxiv.2305.12188.

Tapscott, D., & Tapscott, A. (2016). *Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World.* Penguin.

Wood, G. (2014). *Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger.* Ethereum Project Yellow Paper.

68. ΙΧΝΗΛΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗ ΠΑΤΑΤΑΣ ΜΕΣΩ BLOCKCHAIN: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΤΑΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Μ. Παπουτσάκη[1] & Ε. Αδαμοπούλου[2]

[1] *Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αγροτικής Οικονομίας και Ανάπτυξης, Ιερά Οδός 75, Τ.Κ. 11855, Αθήνα*
[2] *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Τ.Κ. 15773, Ζωγράφου* eadam@cn.ntua.gr

Περίληψη

Η ιχνηλασιμότητα στην αγροδιατροφική αλυσίδα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια και την ποιότητα των τροφίμων. Η εργασία αυτή εξετάζει τη δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain στην καλλιέργεια και διάθεση της πατάτας, μέσω συστηματικής ανασκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας (πρωτόκολλο PRISMA). Αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας, όπως η διαφάνεια, η ασφάλεια και η αξιοπιστία των δεδομένων, καθώς και οι προκλήσεις υλοποίησης σε μικρής κλίμακας αγροτικές παραγωγές. Η μελέτη προτείνει τεχνολογικά σενάρια εφαρμογής, εστιάζοντας στη διαλειτουργικότητα, τη βιωσιμότητα και την ενίσχυση της διαπραγματευτικής θέσης των παραγωγών. Τέλος, επισημαίνονται οι προοπτικές συνδυασμού του blockchain με αισθητήρες, τεχνητή νοημοσύνη και γεωργία ακριβείας, ως στρατηγική μετάβασης προς έξυπνες και βιώσιμες αγροδιατροφικές αλυσίδες.

Λέξεις κλειδιά: Blockchain, ιχνηλασιμότητα, αγροδιατροφική Αλυσίδα, τεχνητή νοημοσύνη

BLOCKCHAIN-BASED DATA TRACEABILITY IN POTATO FARMING AND DISTRIBUTION: A TECHNOLOGICAL ASSESSMENT AND APPLICATION FRAMEWORK

M. Papoutsaki[1] & E. Adamopoulou [2, ✉]

[1]*Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Economics and Rural Development., Iera Odos 75, 11855, Athens,* ✉eadam@cn.ntua.gr
[2]*National Technical University of Athens, School of Electrical and Computer Engineering, Iroon Polytexneiou 9, 15773, Zografou*

ABSTRACT

Traceability in the agri-food supply chain is essential for ensuring food safety and quality. This study explores the feasibility of applying blockchain technology in the cultivation and distribution of potatoes, through a systematic review of international literature (PRISMA protocol). The findings highlight the advantages of blockchain, such as transparency, data integrity, and trust, while addressing implementation challenges in small-scale agricultural systems. The research proposes technological application scenarios, focusing on interoperability, sustainability, and empowering producers within the supply chain. Finally, the study emphasizes the potential of integrating blockchain with sensors, artificial intelligence, and precision agriculture as a strategic pathway toward smart and sustainable agri-food systems.

Keywords: Blockchain, traceability, agri-food supply chain, artificial intelligence

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για αξιόπιστη ιχνηλασιμότητα στην αγροδιατροφική αλυσίδα έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια, καθώς οι καταναλωτές, οι ρυθμιστικές αρχές και οι εμπλεκόμενοι φορείς ζητούν αυξημένη διαφάνεια, ασφάλεια και ποιοτικό έλεγχο στα τρόφιμα. Η καλλιέργεια και διακίνηση της πατάτας, ως προϊόντος υψηλής κατανάλωσης και στρατηγικής σημασίας για την ελληνική γεωργία, δεν αποτελεί εξαίρεση. Οι προκλήσεις που απορρέουν από τη διάσπαρτη παραγωγή, τις διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, αλλά και την έλλειψη ενοποιημένων συστημάτων καταγραφής και ελέγχου καθιστούν την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain μία πολλά υποσχόμενη λύση (Treiblmaier & Garaus, 2023· Ahmad & Sharma, 2023).

Η παρούσα μελέτη επιχειρεί να αξιολογήσει τη σκοπιμότητα και τη λειτουργικότητα της τεχνολογίας blockchain στην ιχνηλάτηση της πατάτας. Μέσω συστηματικής ανασκόπησης της βιβλιογραφίας, ακολουθώντας το πρωτόκολλο PRISMA (Page et al., 2021), επιχειρείται η ανάδειξη των τεχνολογικών δυνατοτήτων, των περιορισμών, των εφαρμογών και των προϋποθέσεων επιτυχούς ενσωμάτωσης αυτής της τεχνολογίας στον αγροδιατροφικό τομέα.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Η έννοια και τα πλεονεκτήματα του Blockchain

Η τεχνολογία blockchain, που αρχικά εισήχθη από τον Nakamoto (2008) στο πλαίσιο του ψηφιακού νομίσματος Bitcoin, αποτελεί μια κατανεμημένη και αποκεντρωμένη βάση δεδομένων, η οποία επιτρέπει την ασφαλή, διαφανή και αμετάβλητη καταγραφή συναλλαγών χωρίς την ανάγκη μεσολάβησης από τρίτους (Christidis & Devetsikiotis, 2016). Τα βασικά χαρακτηριστικά της – όπως η ακεραιότητα των δεδομένων, η ασφάλεια μέσω κρυπτογράφησης, η διαφάνεια και η αποτροπή απάτης – καθιστούν το blockchain ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές στην εφοδιαστική αλυσίδα (Zhao et al., 2016).
Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά μοντέλα, όπου η εμπιστοσύνη βασίζεται σε κεντρικές αρχές, το blockchain εδραιώνει την εμπιστοσύνη μέσω μηχανισμών συναίνεσης και του κατανεμημένου καθολικού, όπως περιγράφουν οι Sultan et al. (2018). Αυτή η νέα μορφή ψηφιακής εμπιστοσύνης καθιστά δυνατή την αυτόματη και αποκεντρωμένη επιβεβαίωση της προέλευσης και των ιδιοτήτων ενός προϊόντος, όπως η πατάτα, χωρίς εξάρτηση από κάποιον φορέα ή ενδιάμεσο.

2.2 Αρχές λειτουργίας

Σύμφωνα με τους Iansiti & Lakhani (2017), η τεχνολογία blockchain βασίζεται σε πέντε αρχές: την κατανεμημένη βάση δεδομένων, τις peer-to-peer συναλλαγές, τη διαφάνεια με ψευδωνυμία, τη μη αναστρεψιμότητα των εγγραφών και την υπολογιστική λογική (smart contracts). Οι ιδιότητες αυτές δημιουργούν τις προϋποθέσεις για ένα σύστημα ιχνηλασιμότητας που όχι μόνο καταγράφει, αλλά και αυτοματοποιεί την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των δεδομένων. Ειδικότερα, τα έξυπνα συμβόλαια μπορούν να ενεργοποιούν αυτόματες ενέργειες – όπως ειδοποιήσεις για απόκλιση ποιότητας – προσδίδοντας προστιθέμενη αξία στα συστήματα ιχνηλάτησης.

2.3 Εφαρμογές και προοπτικές στον αγροδιατροφικό τομέα

Η εφαρμογή του blockchain στην αγροδιατροφή αναδεικνύεται ως στρατηγική επιλογή για την αντιμετώπιση σύνθετων προκλήσεων. Έρευνες όπως των Jahanbin et al. (2023) και Patel et al. (2023) καταδεικνύουν ότι η τεχνολογία μπορεί να μειώσει δραματικά τον χρόνο εντοπισμού κινδύνων – από ημέρες σε δευτερόλεπτα – βελτιώνοντας την ασφάλεια τροφίμων. Η ενοποίηση του blockchain με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και με εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης (AI) προσφέρει επιπλέον δυνατότητες για αυτοματοποιημένη καταγραφή παραμέτρων, όπως

θερμοκρασία, υγρασία, γεωγραφική θέση και φαινολογικά στάδια της πατάτας (Kharche et al., 2024).

Η PwC (2020) εκτιμά ότι μέχρι το 2030 η παγκόσμια συνεισφορά του blockchain στο ΑΕΠ θα υπερβεί τα 1,76 τρισεκατομμύρια δολάρια, με μεγάλο μέρος να αποδίδεται στον πρωτογενή τομέα και την εφοδιαστική αλυσίδα. Σε αυτό το πλαίσιο, η υιοθέτηση της τεχνολογίας από μικρούς παραγωγούς και συνεταιρισμούς, ιδίως στον τομέα της πατάτας, δύναται να ενισχύσει τη διαπραγματευτική τους δύναμη και την πρόσβασή τους σε νέες αγορές.

3. ΥΛΙΚΑ - ΜΕΘΟΔΟΙ

Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας βασίστηκε στο πλαίσιο PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), όπως προτείνεται από τους Page et al. (2021), το οποίο εξασφαλίζει τη διαφάνεια, την αναπαραγωγιμότητα και τη δομημένη αξιολόγηση της διεθνούς βιβλιογραφίας. Ο σκοπός ήταν η ανάδειξη των προκλήσεων, των ευκαιριών και των καλών πρακτικών που σχετίζονται με την εφαρμογή του blockchain στην ιχνηλάτηση γεωργικών προϊόντων, με έμφαση στην πατάτα.

Η διαδικασία περιλάμβανε:

- τον καθορισμό ερευνητικών ερωτημάτων,
- τη διαμόρφωση κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού μελετών,
- την αναζήτηση σε βάσεις δεδομένων όπως Scopus, ScienceDirect, Google Scholar,
- την ανάλυση και σύνθεση αποτελεσμάτων μέσω ποιοτικής αξιολόγησης.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της ανασκόπησης κατηγοριοποιήθηκαν σε πέντε βασικούς άξονες:

4.1 Τεχνολογίες Ιχνηλασιμότητας και Ασφάλειας Τροφίμων μέσω Blockchain

Πλήθος μελετών επιβεβαιώνουν ότι το blockchain συμβάλλει καθοριστικά στη βελτίωση της ασφάλειας τροφίμων, μειώνοντας τους χρόνους εντοπισμού επιμολύνσεων και αυξάνοντας τη λογοδοσία των εμπλεκόμενων (Silvestri et al., 2024). Η εφαρμογή αποκεντρωμένων καθολικών επιτρέπει τον συγχρονισμό πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο μεταξύ παραγωγών, μεταποιητών και διανομέων.

Στην περίπτωση της πατάτας, ένα πιλοτικό σύστημα ιχνηλασιμότητας με καταγραφή κρίσιμων σημείων (σπορά, άρδευση, λίπανση, συγκομιδή, αποθήκευση, μεταφορά) κρίνεται υλοποιήσιμο τεχνικά, αν και απαιτεί αρχικά επενδύσεις σε αισθητήρες, λογισμικό και εκπαίδευση.

4.2 Βιώσιμες Πρακτικές και Περιβαλλοντική Υπευθυνότητα

Το blockchain ενισχύει την παρακολούθηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών, μέσω καταγραφής πιστοποιήσεων (π.χ. βιολογικής γεωργίας) και περιβαλλοντικών επιδόσεων, όπως μειωμένη χρήση εισροών ή αποτύπωμα άνθρακα (Mol, 2015). Έτσι, διευκολύνεται η επικοινωνία της προστιθέμενης αξίας των προϊόντων προς τον τελικό καταναλωτή, ιδιαίτερα σε αγορές με αυστηρά πρότυπα.

4.3 Ψηφιακά Διαβατήρια Προϊόντων και Κυκλική Οικονομία

Η έννοια του “digital twin” μέσω ψηφιακών διαβατηρίων, όπου κάθε προϊόν – στην περίπτωσή μας η πατάτα – συνοδεύεται από ένα πλήρως ενημερωμένο και αδιάβλητο ψηφιακό ιστορικό, αναδεικνύεται ως κεντρική εφαρμογή του blockchain. Αυτό ενισχύει την κυκλική οικονομία, διότι επιτρέπει την ανάλυση κύκλου ζωής, επαναχρησιμοποίηση υποπροϊόντων και στοχευμένη ανακύκλωση (Golini et al., 2017).

4.4 Ενδυνάμωση Μικροκαλλιεργητών και Δίκαιο Εμπόριο

Η εφαρμογή blockchain ενισχύει τη διαφάνεια τιμολόγησης και την αναγνώριση των παραγωγών, προσφέροντας νέες ευκαιρίες ένταξης μικρών αγροτών σε δίκτυα δίκαιου εμπορίου. Ειδικά στην πατάτα, που αποτελεί συχνά προϊόν χαμηλής διαπραγματευτικής αξίας για τους παραγωγούς, το blockchain μπορεί να ενισχύσει την ιχνηλασιμότητα ανά παραγωγική μονάδα, αποδίδοντας προστιθέμενη αξία (Boyacı et al., 2014).

4.5 Συνδυασμός Blockchain με IoT, AI και άλλες τεχνολογίες

Το δυναμικό του blockchain ενισχύεται όταν συνδυάζεται με αισθητήρες (IoT), τεχνητή νοημοσύνη (AI), γεωεντοπισμό (GPS), και big data analytics. Ο συνδυασμός αυτών μπορεί να οδηγήσει σε «έξυπνες εφοδιαστικές αλυσίδες» με δυνατότητα αυτοπροσαρμογής, έγκαιρης προειδοποίησης για κινδύνους και δυναμικού ελέγχου ποιότητας σε πραγματικό χρόνο (Kharche et al., 2024).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συστηματική ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας ανέδειξε τις σημαντικές δυνατότητες της τεχνολογίας blockchain στη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας στον αγροδιατροφικό τομέα. Ωστόσο, η εφαρμογή της δεν είναι άμοιρη προκλήσεων, ιδιαίτερα σε μικρές αγροτικές οικονομίες όπως η ελληνική.

Η πατάτα, ως προϊόν υψηλής εγχώριας κατανάλωσης αλλά συχνά χαμηλής τεχνολογικής υποστήριξης στις φάσεις παραγωγής και διακίνησης, συνιστά κατάλληλη περίπτωση για πιλοτική υιοθέτηση λύσεων blockchain. Οι τεχνικές απαιτήσεις ενός τέτοιου συστήματος, όπως αισθητήρες IoT, πλατφόρμες καταγραφής, δικαιώματα πρόσβασης και υποδομές αποθήκευσης δεδομένων, είναι εφικτές, αλλά απαιτούν συγκροτημένο σχεδιασμό και στήριξη των εμπλεκομένων (Zhao et al., 2017· Kharche et al., 2024).

Η πολυπλοκότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας, σε συνδυασμό με την ανάγκη για διαλειτουργικότητα μεταξύ υφιστάμενων συστημάτων (π.χ. ERP, συστήματα HACCP), καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη προσαρμόσιμων λύσεων και την ενεργή εμπλοκή όλων των κρίκων της αλυσίδας – από τους αγρότες έως τους διανομείς και λιανέμπορους (Golini et al., 2017).

Η ανάλυση ανέδειξε επίσης ότι, πέραν της τεχνικής διάστασης, σημαντικό ρόλο παίζουν και οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες: η αποδοχή από τους αγρότες, η ανάγκη για κατάρτιση, καθώς και τα κίνητρα συμμετοχής. Ιδιαίτερα για μικροκαλλιεργητές, ο φόβος για τεχνολογική επιβάρυνση ή απώλεια αυτονομίας μπορεί να αποτελέσει φραγμό, εάν δεν υπάρξει επαρκής υποστήριξη και ενσωμάτωση σε υφιστάμενες γεωργικές πρακτικές.

Η παρούσα μελέτη κατέδειξε ότι η τεχνολογία blockchain μπορεί να προσφέρει ένα αποτελεσματικό και διαφανές πλαίσιο για την ιχνηλάτηση της πατάτας σε όλα τα στάδια της παραγωγής και διακίνησης. Η υιοθέτησή του μπορεί να επιφέρει τα ακόλουθα οφέλη:

- Ενίσχυση της διαφάνειας στην παραγωγική και εμπορική διαδικασία
- Καταπολέμηση της απάτης και της παραπλάνησης του καταναλωτή
- Βελτίωση της εμπιστοσύνης μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων
- Διευκόλυνση της συμμόρφωσης με κανονιστικά και ποιοτικά πρότυπα
- Ανάδειξη της αξίας του προϊόντος και των παραγωγών στην αγορά

Ωστόσο, προκειμένου να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα του blockchain, απαιτούνται:

2. Τεχνικός σχεδιασμός με έμφαση στην κλιμακωτή υλοποίηση (modular approach), ξεκινώντας από συγκεκριμένα στάδια (π.χ. αποθήκευση, διανομή).

3. Εκπαίδευση και ενδυνάμωση των παραγωγών, μέσω αγροτικών συμβούλων και πανεπιστημιακών εταίρων.
4. Κίνητρα συμμετοχής, οικονομικά ή θεσμικά, για τους παραγωγούς και μεταποιητές.
5. Διαλειτουργικότητα με υφιστάμενα συστήματα, για αποφυγή διπλής καταγραφής ή απώλειας δεδομένων.
6. Νομική και θεσμική στήριξη, για την αναγνώριση των αρχείων blockchain ως έγκυρων εγγράφων σε ελέγχους ή πιστοποιήσεις.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahmad, U., & Sharma, L.K. (2023). *A review of best management practices for potato crop using precision using precision agricultural technologies*. Smart Agricultural Technology.

Boyacı, I. H., Temiz, H. T., Uysal, R. S., Velioğlu, H. M., Yadegari, R. J., & Rishkan, M. M. (2014). *A novel method for discrimination of beef and horsemeat using Raman spectroscopy*. Food Chemistry, 148, 37-41.

Christidis, K., & Devetsikiotis, M. (2016). *Blockchains and smart contracts for the internet of things*. IEEE Access, 4, 2292-2303.

Golini, R., Moretto, A., Caniato, F., Caridi, M., & Kalchschmidt, M. (2017). *Developing sustainability in the Italian meat supply chain: An empirical investigation*. International Journal of Production Research, 55(4), 1183-1209.

Iansiti, M., & Lakhani, K. R. (2017). *The truth about blockchain*. Harvard Business Review, 95(1), 118-127.

Jahanbin, P., Wingreen, S.C., Sharma, R., Ijadi, B., & Reis, M.M. (2023). *Enabling affordances of blockchain in agri-food supply chains: a value-driver framework using the Q-methodology*. International Journal of Innovation Studies.

Kharche, A., Badholia, S., & Upadhyay, R.K. (2024). *Implementation of blockchain technology in integrated IoT networks for constructing scalable ITS systems in India*. Blockchain: Research and Applications.

Mol, A. P. (2015). *Transparency and value chain sustainability*. Journal of Cleaner Production, 107, 154-161.

Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system*. Decentralized Business Review, 21260

Page at al. (2021). T*he PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews*. BMJ 2021;372:n71

Patel, A., Brahmbhatt, M.N., Bariya, A., Nayak, J.B., & Singh, V. (2023). *Blockchain technology in food safety and traceability concern to livestock products*. Heliyon, 9.

Price Waterhouse Coopers. (2020). *Time for trust: The trillion-dollar reasons to rethink blockchain.* Retrieved from https://www.pwc.com.cy/en/issues/assets/blockchain-time-for-trust.pdf

Silvestri, R., Carloni, E., Morrone, D., & Santovito, S. (2024). *The role of blockchain technology in supply chain relationships: Balancing efficiency and relational dynamics*. Journal of Purchasing and Supply Management.

Sultan, K., Ruhi, U., & Lakhani, R. (2018). *Conceptualizing blockchains: Characteristics & applications*. arXiv preprint arXiv:1806.03693.

Treiblmaier, H., & Garaus, M. (2023). *Using blockchain to signal quality in the food supply chain: The impact on consumer purchase intentions and the moderating effect of brand familiarity*. International Journal of Information Management 68, 102514.

Zhao, J. L., Fan, S., & Yan, J. (2016). *Overview of business innovations and research opportunities in blockchain and introduction to the special issue*. Financial Innovation, 2(1), 28. Retrieved from https://doi.org/10.1186/s40854-016-0049-2

ΕΝΟΤΗΤΑ 9η

Εφαρμογές κυκλικής οικονομίας

69. POLICY RECOMMENDATIONS FOR ACCELERATING AND INTEGRATING A CIRCULAR RURAL BIOECONOMY IN THE EU

B. Paris, D. Michas, I. Thermos and A. Balafoutis

Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, 6ο χλμ Χαριλάου – Θέρμης, 57001, Θέρμη, b.paris@certh.gr

ABSTRACT

The transition to a circular bioeconomy is a key pillar of the European Green Deal and the updated EU Bioeconomy Strategy. Yet, despite political commitment, implementation remains uneven, particularly across rural regions where biomass resources and innovation potential are greatest. The Horizon Europe BioRural project addressed this gap by mobilising empirical evidence from grassroots actors—farmers, SMEs, advisors, and policymakers—to identify barriers, enablers, and actionable policy levers for a sustainable rural bioeconomy transition.Drawing on a mixed-methods approach—including surveys of over 400 stakeholders, 43 national co-creation workshops, and the establishment of the European Rural Bioeconomy Network (ERBN)—BioRural co-developed 23 evidence-based policy briefs. These include 12 horizontal recommendations targeting systemic issues such as policy coherence, innovation ecosystems, financing, and education, and 11 sector-specific briefs focused on value chains such as forestry, fertilisers, aquaponics, and bio-based materials.The results highlight that coherence between EU frameworks (Green Deal, CEAP, CAP, and CRCF), harmonised regulation, and targeted investment in innovation infrastructure are critical to unlocking rural circularity. The paper argues that combining bottom-up innovation with top- down policy alignment can accelerate systemic change, positioning rural territories as key enablers of Europe's circular bioeconomy. The policy recommendations directly support the objectives of the forthcoming EU Bioeconomy Strategy update (2025).

Keywords: circular bioeconomy, rural development, policy coherence, innovation systems, EU Green Deal, BioRural

1. INTRODUCTION

The transition toward a sustainable and circular bioeconomy is one of the European Union's cornerstone ambitions for achieving climate neutrality, environmental regeneration, and rural revitalisation. Rooted in the European Green Deal, the updated EU Bioeconomy Strategy, and the Circular Economy Action Plan (CEAP), this transformation envisions a system where biological resources are sustainably produced, valorised, and reintegrated into value chains that simultaneously address ecological, social, and economic objectives. Despite high- level commitment and growing innovation activity, implementation challenges persist — particularly in rural areas, which remain underrepresented in bioeconomy development and investment flows.

Rural regions hold significant untapped potential to support Europe's bio-based transition. They offer access to biomass, embedded knowledge systems, and the opportunity to develop decentralised, inclusive circular systems that align with local environmental conditions and community needs. However, the uptake of small-scale bio-based innovations in rural areas has been uneven. Numerous technological, regulatory, financial, and sociocultural barriers hinder the scale-up and integration of sustainable bioeconomy models. At the same time, fragmented policy frameworks and low visibility of grassroots innovation further exacerbate the rural-urban bioeconomy divide.

In response, the Horizon Europe project BioRural was established to map, assess, and promote

innovative bio-based solutions in rural Europe, and to facilitate their integration into national and European bioeconomy strategies. One of the project's core outputs has been the co-development of a comprehensive set of 23 policy briefs — each designed to reflect evidence gathered through direct engagement with rural stakeholders, including farmers, SMEs, advisors, researchers, and policymakers. These briefs respond to the need for grounded, context-specific policy interventions that can support the development of a circular bioeconomy from the bottom up.

The BioRural policy briefs cover a wide range of themes, from smart farming and modular biorefineries to end-of-waste criteria and biobased plastics. They are structured around two categories: (1) horizontal policy briefs, which offer cross-cutting recommendations relevant to governance, financing, innovation systems, and regulatory alignment across the bioeconomy; and (2) sector-specific briefs, which provide targeted guidance for particular bioeconomy domains or value chain stages such as forestry, aquaculture, biotextiles, and urban green waste valorisation.

This paper presents the theoretical framing, methodology, and key findings from the development of the BioRural policy briefs. Drawing on extensive fieldwork — including a stakeholder survey with over 400 respondents, 43 national workshops in 14 countries, and dozens of interviews with technical experts — it offers a unique window into the actual conditions under which rural bioeconomy solutions can succeed or fail. It further reflects on how policy can support systemic change through improved alignment, knowledge transfer, and place-based investment strategies.

The paper is structured as follows: Section 2 provides a brief overview of the current policy and academic discourse on circular bioeconomy governance, with a focus on rural contexts. Section 3 outlines the methodological framework of the BioRural project, including data collection, stakeholder engagement, and analysis processes. Section 4 presents the main results — categorised into horizontal and sectoral policy domains — along with key policy insights. Section 5 discusses the broader implications for EU policy coherence, rural innovation ecosystems, and future research. Section 6 concludes with recommendations for translating these insights into action at multiple governance levels.

2. LITERATURE REVIEW

2.1. The Circular Bioeconomy and Policy Integration

The bioeconomy has gained significant traction in European policy discourse as a pathway to reconcile economic growth with environmental sustainability and resource efficiency. Defined by the European Commission as the production of renewable biological resources and their conversion into value-added products such as food, feed, bio-based products, and bioenergy (EC, 2018), the bioeconomy is increasingly seen through a circular lens— emphasising the regeneration, reuse, and cascading of resources throughout the value chain (Dietz et al., 2018; Carus & Dammer, 2018).

However, policy fragmentation remains a persistent challenge. The EU Bioeconomy Strategy, the Circular Economy Action Plan (CEAP), and the Common Agricultural Policy (CAP) each pursue overlapping goals but often lack mechanisms for coordination and coherence (D'Amato & Toppinen, 2021). Scholars argue that the success of the bioeconomy depends not only on technological innovation but on systemic policy alignment that integrates ecological boundaries, social justice, and territorial development (Bugge et al., 2016; Hausknost et al., 2017).

2.2.Rural Regions: Untapped Potential and Structural Barriers

Rural areas are home to the majority of biomass production and offer significant potential for

place-based bioeconomy models. Yet, as observed by Pülzl et al. (2014) and Kneafsey et al. (2021), rural regions often face structural disadvantages — including weak innovation infrastructures, limited investment flows, and lower policy visibility. These disparities threaten to exacerbate rural-urban divides in bioeconomy deployment and miss opportunities for inclusive green transitions.

A growing body of literature calls for a shift towards decentralised, participatory, and territorialised bioeconomy strategies (Vural et al., 2021; D'Amico et al., 2016). These approaches centre on local actors, resources, and knowledge systems — aligning with the European Green Deal's emphasis on a just transition. Local bioeconomies can foster social innovation, short supply chains, and value retention, but require tailored policy frameworks and support mechanisms to reach scale (Knierim et al., 2021).

2.3.The Role of Policy Instruments in Innovation Uptake

Policy instruments are key levers for influencing the direction and pace of innovation uptake in the bioeconomy (Sanz-Hernández et al., 2020). Research by Borrás and Edquist (2013) categorises instruments into regulatory, financial, and soft (informational) types — all of which can shape market conditions, reduce uncertainty, and influence stakeholder behaviour. However, studies also note that poorly designed instruments can create lock-ins, favouring large-scale biorefineries and industrial actors at the expense of small-scale, community-led innovations (Meyer, 2017; Birner et al., 2021).

Recent scholarship has emphasised the need for policy mixes that combine top-down strategic direction with bottom-up experimentation and feedback loops (Schot & Steinmueller, 2018). In the context of the rural bioeconomy, this implies designing instruments that are flexible, inclusive, and attuned to local capacities (Backhouse et al., 2022). Participatory governance, policy co-creation, and real-time learning are emerging as critical components for supporting viable, context-specific transitions.

2.4.Knowledge Gaps and the Need for Practice-Informed Policy

Despite the growing body of literature, significant knowledge gaps persist—particularly regarding the real-world enablers and barriers faced by rural actors when adopting bio-based solutions. Most existing frameworks remain high-level and technocratic, while empirical evidence from grassroots actors is underrepresented in strategic policy design (Ladu et al., 2020). This has led to calls for more practice-based policy intelligence, incorporating end-user perspectives to ensure that interventions respond to local realities and innovation dynamics (Klerkx & Begemann, 2020).

Projects like BioRural aim to bridge this gap by systematically gathering evidence from farmers, SMEs, cooperatives, and regional innovators. By integrating insights from end-users into structured policy briefs, such initiatives contribute to more grounded, pluralistic, and actionable policy design for the circular bioeconomy.

3. METHODOLOGY

This study draws on a multi-method, practice-oriented approach developed under the Horizon Europe BioRural project (2022–2025), the research integrates both qualitative and quantitative data collected across 14 EU Member States. The methodology underpinning the policy briefs and subsequent analysis was designed to identify stakeholder needs and drivers for circular transitions, integrate stakeholder knowledge, empirical case studies, and systemic policy insights,

ensuring that recommendations are both evidence-based and aligned with grassroots needs. Key project results that informed the development of the policy briefs were:

- EU Rural Bioeconomy Assessment: Comprehensive literature review and data mapping of structural, technological, economic, and regulatory conditions across EU rural regions to identify gaps, opportunities, and policy inconsistencies.
- Stakeholder and Expert Surveys: Quantitative survey of 422 rural stakeholders and 46 expert interviews conducted across five bioeconomy themes to analyse adoption drivers, barriers, and enabling factors for small-scale bio-based innovations.
- Success Story Analysis: Comparative assessment of 8 flagship and 20+ supplementary bioeconomy case studies across 12 Member States to extract key success factors and replication potential.
- Network Development (ERBN): Establishment and monitoring of the European Rural Bioeconomy Network (ERBN) and four Regional Platforms, capturing over 600 engaged actors to evaluate stakeholder collaboration and governance models.
- National Workshops: 43 co-creation workshops held in EU Member States to identify regulatory bottlenecks, policy fragmentation issues, and stakeholder-driven recommendations for harmonisation and innovation support.
- BioRural Toolkit Design: Development and user testing of an open-access online platform integrating technical, financial, and policy resources, serving as a practical knowledge and networking infrastructure for rural bioeconomy stakeholders.

3.1.Policy Brief Development and Refinement Process

The development of the BioRural policy briefs followed a structured, multi-stage process to ensure their scientific robustness, practical relevance, and policy credibility. Based on insights generated from surveys, stakeholder workshops, case studies, and literature reviews, initial drafts were prepared by consortium partners with thematic expertise in the respective policy areas. These partners synthesised evidence into concise and actionable briefs, each including a challenge definition, evidence base, policy recommendations, expected impacts, and future research needs.

The draft briefs were then circulated within the internal consortium for peer review and optimisation. Feedback from project partners — including researchers, technical experts, and engagement leads — was used to refine both the content and clarity of the recommendations. Following this internal iteration, all 23 policy briefs were submitted for external expert review. External stakeholders, including policymakers, researchers, and practitioners from relevant domains, provided structured feedback on the feasibility, accuracy, and added value of the proposed recommendations. To further validate and promote uptake, the complete set of policy briefs was presented as a keynote speech in Rome (April 2025), gathering insights from EU-level and national policy actors, civil society, and sectoral associations.

Incorporating the feedback from all stages, the policy briefs were redrafted and finalised to ensure alignment with real-world needs, coherence with existing policy frameworks, and high usability for decision-makers. This rigorous and participatory approach ensured that the briefs are evidence-based, stakeholder-informed, and policy-relevant across the EU’s diverse rural and bioeconomy contexts.

The core analytical output of the study is a set of 23 policy briefs, developed in an iterative, evidence-informed process. The policy briefs were categorised as:

- 12 horizontal briefs addressing system-wide issues (e.g., CAP alignment, waste regulation, carbon certification, innovation frameworks), and
- 11 sector-specific briefs offering targeted recommendations for key value chain stages

(e.g., modular biorefineries, smart farming, algae valorisation, rural bioenergy villages).

Each policy brief includes a structured narrative: (1) a clearly defined challenge supported by empirical evidence, (2) policy recommendations tailored to EU and national levels, (3) expected impacts, and (4) future research needs. Briefs were validated through internal review and stakeholder consultations and later submitted to the European Commission as part of BioRural's contribution to the 2025 EU Bioeconomy Strategy revision public consultation.

4. Key BioRural Results Feeding into Policy and Research Gaps

4.1. Assessment of the Current Performance of the EU Rural Bioeconomy

BioRural conducted an extensive literature review and data analysis to assess the performance, barriers, and opportunities of the EU rural bioeconomy. Findings show that while the circular bioeconomy is central to achieving the European Green Deal, the Circular Economy Action Plan, and the EU Bioeconomy Strategy, its integration into national and regional frameworks remains uneven.

Conceptual ambiguity persists around the terms *bioeconomy*, *bio-based economy*, and *circular bioeconomy*, leading to inconsistent policy application and risks of maintaining linear, extractive models. Embedding circularity as a defining feature is thus essential for ensuring sustainability alignment.

Sustainable biomass supply is a cornerstone. Current systems face constraints related to land use, environmental impact, and competition with food production. The study highlights underutilised feedstocks such as perennial biomass crops (e.g. miscanthus, switchgrass), algae, agricultural residues, and urban biowaste as promising options. However, policy support for these remains limited, and biowaste valorisation infrastructure is insufficient across most regions.

Biorefineries represent a second critical pillar. Although the EU hosts over 800 facilities, regional disparities persist, and many focus on conventional bioenergy rather than diversified, high-value bioproducts. Smaller, decentralised biorefineries tailored to local resources show greater potential for circularity than large-scale, centralised operations.

Persistent systemic barriers include weak logistics infrastructure, challenges in scaling bioconversion technologies, and low consumer demand for bio-based products. The transition requires stronger policy support to de-risk investments, enhance market uptake, and stimulate demand through incentives and awareness measures.

BioRural identified over 30 operational small-scale circular bio-based solutions—such as Staramaki (wheat-stem straws), ALGEN (algae-based wastewater treatment), and NaturePlast (bioplastics)—that demonstrate high replicability potential. These cases confirm that localised, modular systems tailored to regional resource bases are both viable and socially embedded.

Finally, research gaps remain around adoption dynamics, harmonised standards for bio- based product certification, and regional equity. A clearer, circularity-focused policy framework—supported by consistent funding and monitoring—can strengthen Europe's green transition, particularly in rural areas where bio-based resources and innovation potential converge.

4.2. Factors Influencing Adoption and Diffusion of Bio-Based Solutions

A stakeholder survey of 422 respondents (farmers, SMEs, researchers, and policymakers) and 46 expert interviews revealed the conditions influencing uptake of small-scale bio-based

innovations. Core barriers include limited awareness, inadequate financing, regulatory complexity, and weak technical advisory systems. Enablers include strong local networks, effective knowledge transfer, and supportive policies.

Adoption is significantly higher where multi-actor collaboration exists. Co-creation and early involvement of advisors and end-users were identified as crucial to ensuring contextual relevance and social acceptance. While economic incentives remain key motivators, non- financial enablers—such as demonstration sites, peer-to-peer learning, and trusted advisory support—are equally important, especially in low-capacity rural regions.

Access to finance remains the leading obstacle, but regulatory and administrative burdens are also decisive. Differences between adopters and non-adopters underscore the need for differentiated, locally adapted policy support. Demand-side factors also play a strong role: supplier and consumer demand often outweighs the effect of subsidies. Measures such as green public procurement, sustainability labelling, and consumer education can help generate this market pull.

Nearly 80% of respondents emphasised the importance of *local adaptation*—preferring small-scale technologies and business models aligned with local biomass and community needs. This reinforces the view that circular bioeconomy initiatives must be place-based, decentralised, and ecosystem-driven.

The results point to a multidimensional policy mix that combines financial incentives with systemic interventions: capacity building, regulatory simplification, advisory networks, and targeted innovation support. Uniform EU-wide approaches are unlikely to succeed; tailored, regionally grounded strategies are essential for a just rural bioeconomy transition.

4.3.Lessons from Rural Bioeconomy Success Stories

Eight flagship case studies and over 20 additional examples across 12 Member States were assessed to identify success factors in rural bio-based innovation. Successful ventures share six common features:

1. Sustainable local biomass management;
2. Niche market focus and targeted value chains;
3. Practical, locally relevant solutions;
4. Adaptive growth and flexibility;
5. Reliance on research and piloting;
6. Strong local stakeholder collaboration.

These initiatives, often emerging in niche or underserved markets, achieve competitive advantage through specialisation and local resource alignment. Early-stage research and pilot testing were vital for de-risking and credibility, while community engagement and partnerships with municipalities, research institutes, and civil society ensured acceptance and access to infrastructure. Crucially, these cases show that the circular bioeconomy transition is not only technological or commercial—it is social and participatory. Locally embedded business models that combine innovation with community engagement are most likely to succeed and scale. Policymakers should therefore prioritise capacity building, regulatory clarity, finance access, and local innovation ecosystems that connect grassroots entrepreneurship with institutional frameworks.

4.4.The European Rural Bioeconomy Network (ERBN)

BioRural established the European Rural Bioeconomy Network (ERBN)—a permanent structure connecting four Regional Rural Bioeconomy Platforms and over 600 active members (exceeding

the initial target of 280). ERBN functions as a strategic interface between grassroots actors and policymakers, promoting cross-border coordination and knowledge exchange.

Through collaboration with initiatives such as EU-Farmbook, modernAKIS, Tools4CAP, and the EU CAP Network, ERBN contributes to continuity in knowledge flows and aligns rural practice with EU-level frameworks like the Green Deal and Circular Economy Action Plan.

Its governance model—based on thematic boards (e.g. bioenergy, agroforestry, aquatic systems)—ensures participatory management and long-term sustainability beyond the project.
Policy relevance:

- ERBN exemplifies scalable, stakeholder-driven governance, enabling rural actors to directly shape sustainability pathways.
- It provides a structural mechanism for capacity building, innovation diffusion, and policy alignment.
- Network-based governance itself emerges as an effective policy instrument for the rural circular bioeconomy.

4.5.Policy and Regulatory Challenges from National Workshops

BioRural's 43 national workshops revealed several persistent regulatory bottlenecks:

- Waste legislation: Ambiguity in the EU Waste Framework Directive and End-of-Waste Criteria hampers investment in residue valorisation. Clear, sector-specific end-of- waste definitions are urgently needed.
- Policy fragmentation: Inconsistent waste, environmental, and certification standards across Member States impede cross-border operations and discourage innovation. The identical treatment of fossil- and bio-based chemicals under REACH is a notable disincentive.
- Lack of harmonised standards: The absence of EU-wide sustainability criteria for bio-based products, particularly packaging and bioplastics, hinders market confidence and competitiveness.
- Agricultural and food regulations: Some CAP and EFSA provisions unintentionally restrict circular practices such as the use of residues in food or energy production.

Stakeholders called for harmonisation, flexibility, and clearer sustainability benchmarks. Additionally, technological gaps—particularly in local biorefining and residue processing—were identified as major obstacles. Investments in modular, scalable technologies and regional clusters could address logistical inefficiencies and promote local value retention.
Overall, the workshops underscored that regulatory coherence, investment in enabling infrastructure, and regionally coordinated innovation ecosystems are prerequisites for unlocking the circular bioeconomy's potential.

4.6 The BioRural Toolkit

The BioRural Toolkit serves as a digital "one-stop shop" for rural bioeconomy stakeholders.
Integrated with the ERBN, it hosts:

- EU/national bioeconomy factsheets;
- Inventories of bio-based technologies, business models, and funding options;
- Over 30 audiovisual success stories;
- Online tutorials, policy briefs, and business model templates.

The platform includes an interactive network map that visualises actors and resources across Europe, enabling matchmaking, partnership building, and replication. By connecting knowledge resources, geospatial data (e.g. biomass potential), and training materials, the Toolkit supports

evidence-based policymaking and local innovation planning.

Together, the Toolkit and ERBN constitute the project's enduring knowledge and governance infrastructure—facilitating co-design, accelerating innovation, and supporting the transition to a circular rural bioeconomy.

5. DISCUSSION

The transition to a circular bioeconomy represents one of the most ambitious systemic shifts within the European Green Deal framework, yet its operationalisation remains highly uneven across Member States and sectors. The results of the BioRural project demonstrate that the persistence of fragmented governance, uneven access to finance, and limited regional innovation capacity continue to slow the uptake of bio-based solutions in rural areas. This finding aligns with earlier research stressing the importance of coherence between bioeconomy policy instruments and broader sustainability frameworks (D'Amato & Toppinen, 2021; Ladu et al., 2020).

Drawing on BioRural's extensive stakeholder engagement—surveys, workshops, and success stories—the analysis highlights that the barriers to a circular rural bioeconomy are systemic rather than purely technological. A lack of harmonised regulatory definitions, insufficient end-of-waste (EoW) criteria, and limited recognition of rural-specific carbon removal practices in EU certification schemes all contribute to underutilised biomass potential. At the same time, financial and knowledge gaps inhibit local innovation ecosystems, echoing earlier calls for integrated, place-based approaches (Knierim et al., 2021; Vural et al., 2021).

The 23 policy briefs produced by the project serve as a synthesis of these insights, translating them into targeted, evidence-based recommendations. They can be understood as operating across two interlinked policy dimensions—horizontal and sector-specific—which together form a coherent policy architecture for accelerating and integrating the circular rural bioeconomy.

5.1.Horizontal Policy Dimensions: Coherence, Innovation, and Capacity

The horizontal policy briefs respond to system-level barriers that cut across sectors, focusing on policy coherence, innovation support, and capacity building. They reflect the need to improve alignment between the EU Bioeconomy Strategy (EC, 2018), the Circular Economy Action Plan (EC, 2020), and the Common Agricultural Policy (EC, 2021)—a coherence gap long identified in the literature as a major barrier to transition (Bugge et al., 2016; Dietz et al., 2018).

These briefs emphasise the integration of circular bioeconomy models into frameworks such as the Carbon Removal Certification Framework (CRCF) and the CAP Strategic Plans, ensuring that rural actors are not excluded from emerging green markets.

Crucially, they call for streamlined End-of-Waste (EoW) processes and harmonised product classification and certification systems to enhance market confidence, cross-border trade, and investment security. These measures correspond with the European Commission's ongoing efforts to establish consistent sustainability criteria for bio-based products (European Commission, 2022).

A second group of horizontal briefs addresses innovation and human capital, recognising that technological solutions alone are insufficient. Systemic innovation requires enabling environments—structured pipelines, digital platforms, and network-based governance—to link research, SMEs, and communities (Klerkx & Begemann, 2020; Backhouse et al., 2022). The development of the European Rural Bioeconomy Network (ERBN) and integration with Agricultural Knowledge and Innovation Systems (AKIS) exemplify how multi-actor

collaboration can enhance learning, diffusion, and trust among stakeholders.

Education, training, and advisory systems are likewise identified as critical levers for change. By promoting accessible, modular education frameworks, the EU can strengthen workforce readiness and ensure that rural communities actively participate in the bioeconomy rather than remain passive suppliers of raw materials.

Policy Brief Title	Key Recommendation	Why It Matters (Context)
Strengthen Coherence Between the EU Bioeconomy Strategy and Key Sustainability Agendas	Ensure policy alignment between the Bioeconomy Strategy and other EU green frameworks (e.g. Green Deal, CEAP).	Fragmented policies risk inefficiency and conflicting goals. Coherent strategies amplify impact and sustainability.
Streamline End-of-Waste Criteria	Develop sector-specific, material-specific EoW criteria.	Current approval processes for reused bio-based materials are slow and inconsistent, hampering circular practices.
Harmonise Classification and Certification Protocols for Biobased Products	Introduce EU-wide harmonised standards and certifications.	Fragmented classification systems lower consumer confidence and create trade barriers.
Develop (Public) Market Information Systems	Improve access to data on biomass supply, by-products, and market conditions.	Lack of reliable data restricts efficient resource use and discourages SME participation.
Integrating Rural Circular Bioeconomy Models into the EU Carbon Removal Certification Framework (CRCF)	Include rural circular practices in CRCF methodologies.	Many valid rural carbon removal methods (e.g. composting) are not currently recognised, limiting their impact and funding eligibility.
Systematically Embed Innovation in the Circular Bioeconomy	Establish structured innovation pipelines and	Innovation remains fragmented; structured
	platforms across the bioeconomy.	embedding would support scaling and systemic impact.
Support Local and Micro-Regional Biomass Storage and Logistics Centres	Promote intermediate depots in decentralized biomass chains.	Local biomass is underutilised due to inconsistent availability and high logistics costs.
Develop a Supportive Framework for Rural Circular Bioeconomy Networks	Institutionalise support for regional networks and collaborative schemes.	Effective collaboration drives innovation and sustainability but is currently ad hoc and under-supported.

Enhance Education, Knowledge Transfer and Training Policies	Create a standardised, accessible education and training system for CB.	Disjointed curricula and low outreach weaken workforce readiness for the circular bioeconomy.
Strengthen Competences and Innovation via Integrated AKIS Framework	Leverage Agricultural Knowledge and Innovation Systems (AKIS) to support applied research.	Connecting stakeholders through AKIS enhances innovation uptake and rural development.
Boosting Rural Bioeconomy: Support Emerging Industries and Clusters	Promote green innovation in both new and traditional rural industries.	Rural industries face barriers to green transition and lack support for biobased clustering.
Accelerating Circular Business Models in the EU	Scale up circular business models via funding, guidance, and partnerships.	Circular models are underutilised despite their potential for sustainability and growth.

5.2.Sectoral Policy Dimensions: Targeted Actions for Key Value Chains

Complementing the systemic recommendations, the sector-specific policy briefs translate high-level principles into actionable interventions tailored to particular value chains and rural contexts. These briefs demonstrate how differentiated policies can accelerate sustainability transitions across diverse production systems—from forestry and agriculture to aquaculture, textiles, and bioplastics.

The forestry and fertiliser briefs, for example, advocate regulatory and financial mechanisms to decarbonise forestry operations and harmonise sustainable fertiliser use, consistent with the EU Soil Strategy (2021) and LULUCF Regulation. Similarly, briefs on smart farming and modular biorefineries promote decentralised, small-scale systems that enhance resilience and reduce dependency on fossil-based value chains—reflecting the principles of rural circularity identified by Hausknost et al. (2017) and Meyer (2017).

Other sectoral recommendations, such as those targeting aquaponics, algae valorisation, and bio-based textiles, address emerging industries where regulatory gaps and classification barriers currently inhibit growth. These interventions are especially relevant to the forthcoming EU Circular Economy Action Plan 2.0, which prioritises the sustainable scaling of biobased materials and advanced recycling technologies.

Importantly, these sectoral briefs are not isolated technical fixes but rather contextualised instruments for policy learning and experimentation. They highlight how differentiated, locally attuned measures can complement system-level reforms to foster a cohesive yet adaptable transition.

Policy Brief Title	Key Recommendation	Why It Matters (Context)
Accelerating the Decarbonization of Forestry Sector Activities in the EU	Incentivise clean fuels and sustainable practices in forestry operations.	Logging and residue management contribute significantly to emissions; policy gaps limit cleaner alternatives.

Advancing Sustainable Fertilizer Use in Europe	Harmonise regulations and support organic/bio-based alternatives.	Fragmented policies hinder uptake of sustainable fertilizers, conflicting with EU green objectives.
Unlocking the Potential of Promising Crop Types	Support market creation and long-term contracting for new bio-crops.	Innovative crops lack incentives and are uncompetitive versus fossil-based alternatives.
Smart Farming for Optimised Biomass Production	Offer shared-access and subsidies for smart farming technologies.	Tech costs and knowledge gaps prevent farmers from adopting precision agriculture.
Empowering Rural Bioeconomy through Small-Scale Modular Biorefineries	Fund R&D and implementation of scalable modular biorefineries.	Small biorefineries can enhance rural development but need long-term investment plans.
Urban Green Residues: Wood, You Waste It?	Clarify EoW criteria for urban green residues to enable valorisation.	Unclear regulation results in usable biomass being discarded, increasing municipal costs.
Encourage Investments in (Biomass-Based) Bioenergy Villages	Classify BEVs within EU Bioenergy Communities for access to finance.	BEVs promote local energy sovereignty but lack institutional and regulatory support.
Reclassifying Waste-Derived Algae in Aquaculture	Update classification to allow algae grown on waste to lose "waste" status.	Current waste classification hinders use of algae in high- value products.
Support the Implementation of Innovative Aquaponics Systems	Create a tailored regulatory and funding framework for aquaponics.	Aquaponics is efficient and sustainable but faces legislative and funding gaps.
Recycled and Biobased Plastics: Promoting a Complementary Approach	Integrate biobased plastics in EU recycling and circularity policies.	Biobased plastics are underutilised despite environmental benefits and innovation potential.
Bio-Based Textiles in the EU: Growth Barriers and Policy Solutions	Support sourcing, production innovation, and EoL solutions for biotextiles.	Bio-based textiles face sourcing, cost, and scalability issues, limiting market penetration.

5.3. **Cross-Cutting Implications for Policy Integration**

Across both horizontal and sectoral domains, several overarching themes emerge. First, policy coherence remains the foundation for a functioning circular bioeconomy. Without alignment between the Green Deal, CEAP, and Bioeconomy Strategy, fragmented incentives risk perpetuating inefficiency and regulatory overlap. Second, regulatory clarity and harmonisation—especially regarding EoW and sustainability standards—are indispensable for building investor and consumer confidence. Third, targeted investment in enabling infrastructure, such as modular biorefineries and rural logistics hubs, is essential for unlocking local value chains. Finally,

knowledge systems—including AKIS, ERBN, and digital platforms like the BioRural Toolkit—must serve as continuous learning infrastructures that translate policy into practice.

Together, these findings support a multi-level governance model in which bottom-up innovation and top-down policy alignment reinforce one another. They also validate existing scholarship that sees the bioeconomy transition as a process of transformative governance (Backhouse et al., 2022; Schot & Steinmueller, 2018). The BioRural approach demonstrates how participatory, evidence-based policymaking can deliver both legitimacy and effectiveness, providing a blueprint for future EU programmes such as Horizon Europe, CAP networks, and Cohesion Policy instruments.

6. CONCLUSIONS

The BioRural project delivers one of the most comprehensive, practice-based analyses to date of how Europe's rural regions can drive the transition to a circular bioeconomy. Its findings reaffirm that success will depend not only on technological innovation but on coherent governance, targeted investment, and locally grounded policy support.

Drawing on direct engagement with over a thousand stakeholders, BioRural has translated empirical evidence into 23 policy briefs that collectively provide a roadmap for policy and research. The 12 horizontal briefs address systemic enablers—policy coherence, end-of-waste reform, harmonised product standards, innovation networks, education, and capacity building—ensuring that the overall policy environment supports sustainable, inclusive, and competitive bio-based development.

Equally important, the 11 sector-specific briefs translate these enabling conditions into targeted actions for key value chains. They propose concrete measures to decarbonise forestry, promote sustainable fertilisers, scale smart farming, deploy modular biorefineries, and unlock innovation in algae, aquaponics, bioplastics, and bio-textiles. These briefs respond directly to regulatory bottlenecks and market gaps identified through BioRural's surveys and workshops, demonstrating how evidence-based, sectoral interventions can reinforce horizontal policy frameworks.

Taken together, the BioRural policy briefs offer an integrated strategy for scaling the circular rural bioeconomy—linking bottom-up innovation with top-down policy reform. Their implementation through instruments such as the CAP Strategic Plans, Cohesion Policy, and Horizon Europe partnerships will be critical for embedding circularity in rural territories and ensuring that Europe's bioeconomy transition is sustainable, competitive, and socially just.

References:

Backhouse, M., Lehmann, R., Lorenzen, K., & Hagemann, N. (2022). Transformative governance for a sustainable bioeconomy. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 42, 100–115. https://doi.org/10.1016/j.eist.2022.01.003

Birner, R., Sonnino, R., & D'Amico, G. (2021). Policy mixes for a circular and sustainable bioeconomy: Lessons from the European context. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126328. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126328

Borrás, S., & Edquist, C. (2013). The choice of innovation policy instruments. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(8), 1513–1522. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.03.002

Brandão, A. S., et al. (2022). Rural regions as key locations for the circular bioeconomy. *One Earth*, 5(4), 430–445. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.03.003

Bugge, M. M., Hansen, T., & Klitkou, A. (2016). What is the bioeconomy? A review of the literature. *Sustainability*, 8(7), 691. https://doi.org/10.3390/su8070691

Carus, M., & Dammer, L. (2018). The circular bioeconomy—Concepts, opportunities and limitations. *Bio-based and Applied Economics*, 7(1), 1–26. https://doi.org/10.13128/BAE-6831

D'Amato, D., & Toppinen, A. (2021). Towards a circular bioeconomy: European policy frameworks and transition pathways. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129552. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129552

D'Amico, G., Testa, R., & Monaco, M. (2016). The development of bioeconomy in Europe: Policy framework and key strategies. *Agricultural and Food Economics*, 4, 18. https://doi.org/10.1186/s40100-016-0061-3

Dietz, T., Börner, J., Förster, J. J., & von Braun, J. (2018). Governance of the bioeconomy: A global comparative approach. *Environmental Science & Policy*, 86, 93–100. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.008

European Commission. (2018). *A sustainable bioeconomy for Europe: Strengthening the connection between economy, society and the environment* (Updated Bioeconomy Strategy). Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2777/792130

European Commission. (2019). *The European Green Deal* (COM(2019) 640 final). Brussels: European Commission. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640

European Commission. (2020). *Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe* (COM(2020) 98 final). Brussels: European Commission. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098

European Commission. (2020). *Long-term vision for the EU's rural areas – Towards stronger, connected, resilient and prosperous rural areas by 2040*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2771/710394

European Commission. (2021). *EU Soil Strategy for 2030: Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate* (COM(2021) 699 final). Brussels: European Commission.

European Commission. (2021). *The new Common Agricultural Policy: 2023–27 – Key policy objectives*. Brussels: European Commission. https://agriculture.ec.europa.eu

European Commission. (2022). *EU Bioeconomy Progress Report 2022*. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2777/99764

European Commission. (2022). *Proposal for a Regulation establishing a Union certification framework for carbon removals* (COM(2022) 672 final). Brussels: European Commission. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0672

European Commission. (2023). *Horizon Europe Strategic Plan 2025–2027*. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2777/597139

Hausknost, D., Schriefl, E., Lauk, C., & Kalt, G. (2017). A transition to which bioeconomy? An exploration of diverging techno-political choices. *Ecological Economics*, 131, 60–69. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.018

Klerkx, L., & Begemann, S. (2020). Supporting innovation processes in the circular bioeconomy: The role of intermediaries. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120365. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120365

Knierim, A., Galli, F., & Oppermann, R. (2021). Territorial governance and innovation in the rural bioeconomy. *European Planning Studies*, 29(10), 1805–1827. https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1865152

Ladu, L., Morone, P., & Amato, D. (2020). Policy coherence and the circular bioeconomy: A systematic review. *Resources, Conservation and Recycling*, 160, 104931. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104931

Meyer, R. (2017). Bioeconomy strategies: Contexts, visions, and guiding implementation principles. *Sustainability*, 9(6), 1030. https://doi.org/10.3390/su9061030

Pülzl, H., Kleinschmit, D., & Arts, B. (2014). Bioeconomy—An emerging meta-discipline? *Forest Policy and Economics*, 49, 87–95. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2014.04.009

Sanz-Hernández, A., Esteban, E., & Garrido, P. (2020). Transition to a bioeconomy: Perspectives from social innovation and socio-technical systems. *Sustainability*, 12(3), 1231. https://doi.org/10.3390/su12031231

Schot, J., & Steinmueller, W. E. (2018). Three frames for innovation policy: R&D, systems of innovation and transformative change. *Research Policy*, 47(9), 1554–1567. https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.011

Vural, Z., Martin, M., & Rydberg, T. (2021). Place-based approaches to circular bioeconomy development: European lessons. *Land Use Policy*, 109, 105616. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105616

70. P2GREEN: ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΡΟΩΝ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΒΙΟΛΙΠΑΣΜΑΤΩΝ

Bas Paris, Δημήτρης Μίχας, Μιχάλης Μωραίτης, Ιωάννης Θερμός, Αθανάσιος Μπαλαφούτης, Ειρήνη-Ευαγγελία Θωμλούδη & Απόστολος Σκαρλάτος

Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, 6ο χλμ Χαριλάου – Θέρμης, 57001, Θέρμη, SUSTCHEM Τεχνική Συμβουλευτική Α.Ε., 3ης Σεπτεμβρίου 144, 11251, Αθήνα, i.thermos@certh.gr

Περίληψη

Το P2GreeN, ένα τετραετές έργο Horizon Europe που επικεντρώνεται στο κλείσιμο της αλυσίδας μεταξύ αγροκτήματος και πιρουνιού για κυκλικές ροές θρεπτικών ουσιών. Θα δοκιμάσει και θα προσαρμόσει τη χρήση των ανθρώπινων υγειονομικών αποβλήτων για την παραγωγή ασφαλών, βιολογικών λιπασμάτων για τη γεωργία, τα οποία θα αντικαταστήσουν τα λιπάσματα ορυκτής προέλευσης. Δοκιμάζει τρεις καινοτόμες τεχνολογίες ανακύκλωσης θρεπτικών ουσιών σε τρεις πιλοτικές περιοχές στη Γερμανία, την Ισπανία και τη Σουηδία. Οι πιλοτικές περιοχές έχουν επιλεγεί προσεκτικά, καθώς καταδεικνύουν τη σύνδεση μεταξύ των αστικών (πιρούνι) και των αγροτικών (αγρόκτημα) κοινοτήτων. Ταυτόχρονα, διερευνάται η δυνατότητα αναπαραγωγής και κλιμάκωσης αυτών των τεχνολογιών σε άλλες χώρες της ΕΕ όπως η Ιταλία, η Ελλάδα, η Ουγγαρία και η Γαλλία. Σκοπός είναι να προσαρμοστεί κάθε πιλοτική τεχνολογία σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή με βάση τα χαρακτηριστικά και τις ανάγκες της. Στην Ελλάδα θα πραγματοποιηθούν τρεις μελέτες σκοπιμότητας, μια για κάθε πιλοτική τεχνολογία του P2GreeN, για να εξακριβωθεί η δυνατότητα εφαρμογής σε εθνικό επίπεδο. Η πρώτη λύση διαχωρίζει τα πολύτιμα ούρα στην πηγή χρησιμοποιώντας μια τουαλέτα εκτροπής ούρων ή ουρητήριο και το τελικό προϊόν λίπανσης είναι σε μορφή pellet. Στην Ελλάδα έχει προσδιοριστεί ως σημείο εφαρμογής μια εταιρεία μίσθωσης φορητών τουαλετών, καθώς απαιτείται μόνο η αντικατάσταση των τουαλετών χωρίς να διαφοροποιείται ιδιαίτερα η καθημερινή λειτουργία της επιχείρησης. Η δεύτερη λύση αξιοποιεί μια τουαλέτα εκτροπής ούρων και το τελικό προϊόν λίπανσης είναι σε υγρή μορφή. Η εγκατάσταση πραγματοποιείται σε κτηριακά συγκροτήματα και απαιτεί την ύπαρξη ενός δεύτερου δικτύου αποχέτευσης που θα συλλέγει μόνο τα ούρα και θα τα επεξεργάζεται επί τόπου σε κάποιο βοηθητικό χώρο του κτηρίου. Συνεπώς η εφαρμογή της κρίνεται οικονομοτεχνικά συμφέρουσα σε κτήρια υπό κατασκευή ή ριζική ανακαίνιση όπως το κτήριο Ρουσόπουλου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Τέλος, η τρίτη λύση αξιοποιεί τη δευτεροβάθμια εκροή επεξεργασίας μιας εγκατάστασης επεξεργασίας αστικών αποβλήτων για την παραγωγή ενός πλούσιου σε θρεπτικά συστατικά νερού για άρδευση. Ο βιολογικός καθαρισμός της Καρδίτσας αποτελεί μια χαρακτηριστική περίπτωση λόγω της εγγύτητάς του σε αγροτικές εκμεταλλεύσεις. Παράλληλα, η εφαρμογή των εν λόγω τεχνολογιών εξετάζεται υπό το πρίσμα του υφιστάμενου νομοθετικού πλαισίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ελλάδας, το οποίο ρυθμίζει τη διαχείριση των συγκεκριμένων υλικών σε διάφορα επίπεδα, από την πρώτη ύλη έως το τελικό προϊόν. Η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί νομοθετικά τη μετάβαση προς την κυκλική οικονομία, ενισχύοντας την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση πόρων, ωστόσο εξακολουθούν να υπάρχουν κενά και προκλήσεις στην πλήρη εφαρμογή των αρχών κυκλικότητας σε επιμέρους ρεύματα αποβλήτων.

Λέξεις κλειδιά: κυκλικές ροές θρεπτικών ουσιών, από το αγρόκτημα στο τραπέζι, αέρια και υδάτινη ρύπανση, λιπάσματα, διαχείριση λυμάτων

P2GREEN: PROMOTING NUTRIENT RECYCLING THROUGH THE DEVELOPMENT OF BIOFERTILIZERS

Bas Paris, Dimitris Michas, Michalis Moraitis, Ioannis Thermos, Athanasios Balafoutis, Eirini-Evangelia Thomloudi & Apostolos Scarlatos

CERTH/IBO Centre for Research and Technology, Institute for Bio-Economy and Agri-Technology (IBO), 6th km Charilaou-Thermi Rd, 57001, Thermi, Greece,
SUSTCHEM Technical Consulting S.A., 3is Septemvriou 144, 11251, Athens, Greece,
** i.thermos@certh.gr*

ABSTRACT

P2GreeN, a four-year Horizon Europe project focusing on closing the chain between farm and fork for cyclical nutrient flows. It will test and adapt the use of human sanitary waste to produce safe, bio-based fertilizers for agriculture, which will replace fertilizers of mineral origin. It is testing three innovative nutrient recycling technologies in three pilot sites in Germany, Spain and Sweden. The pilot sites have been carefully selected as they demonstrate the link between urban (fork) and rural (farm) communities. At the same time, the possibility of replicating and scaling up these technologies in other EU countries such as Italy, Greece, Hungary and France is being explored. The aim is to adapt each pilot technology to a specific geographical area based on its characteristics and needs. In Greece, three feasibility studies will be carried out, one for each P2GreeN pilot technology, to verify the feasibility of implementation at national level. The first solution separates valuable urine at source using a urine diversion toilet or urinal and the final fertilization product is in pellet form. In Greece, a company renting portable toilets has been identified as a point of application, as only the replacement of the toilets is required without any significant deviation to the daily operation of the business. The second solution utilizes a urine diversion toilet, and the final fertilization product is in liquid form. It is installed in building complexes and requires the existence of a second. sewerage system that collects only the urine and treats it on site in an ancillary area of the building. It is therefore considered to be economically advantageous in buildings under construction or undergoing radical renovation, such as the Roussopoulos building of the Agricultural University of Athens. Finally, the third solution utilises the secondary treatment effluent of a municipal waste treatment plant to produce a nutrient-rich water for irrigation. The biological treatment of Karditsa is a typical case due to its proximity to agricultural holdings. At the same time, the application of these technologies is examined in the light of the existing legislative framework of the European Union and Greece, which regulates the management of these materials at various levels, from raw material to final product. The European Union is legislatively promoting the transition towards a circular economy, enhancing recycling and reuse of resources, but there are still gaps and challenges in the full implementation of circularity principles in individual waste streams.

Keywords: circular nutrient flows, farm to fork, air and water pollution control, fertilizer, wastewater management

1. INTRODUCTION

Worldwide food demand is on the rise, driven primarily by population growth and increasing per capita consumption, particularly in developing nations. Projections indicate a significant increase in global food production will be needed to meet this demand by 2050 (OECD/FAO, 2025). To cope with the increased food demand, farmers are using more and more mineral fertilizers, such

as nitrogen (N) and phosphorus (P), to combat soil degradation in over-exploited agricultural land. Due to the excessive use of fertilizers, nutrient losses cause a major threat to the environment, especially on aquatic ecosystems. They cause surface and groundwater pollution and phenomena such as eutrophication (Mustafa et al., 2023). Additionally, mineral-based ferilisers are heavily dependent on fossil fuels, both during the production and application phase, contributing significantly to the release of CO_2e emissions in the atmosphere and therefore intensifying climate change (Walling et al., 2020). Mineral fertilizers are not only a potential threat to the environment but also a liability for the European Union since they are typically being produced outise the EU. Due to limited supplies of fossil fuels and high price-volatility of energy prices, imported fertilizers are a direct threat to the Union's food security (Vermeulen et al., 2012).

Overfertilization leads also to high nutrient concentration, through food consumption, in human excreta and ultimately to water bodies after undergoing treatment in wastewater treatment plants. Typically, the majority of nitrogen is being removed from the wastewater stream, through denitrification, but is being released into the atmosphere in the form of molecular nitrogen. The removal of phosphorus takes place only in some cases (Papp et al., 2023).

2. P2GREEN: Fostering a paradigm shift

Agriculturally grown food is produced with the addition of energy-intensive fertilizers. Then the food is transported to large city centers and is being consumed. Wastewater treatment plants treat human excreta by removing the majority of the nutrients where disposing the rest in water bodies causing major environmental problems. It would make more sense to turn this linear chain of events into a cycle that reduces the production of mineral fertilizers, minimize the environmental impact and increase food security. P2GreeN's goal is to close the nutrient loop between the cities (fork) and the rural areas where food is being produced (farm) as shown in figure 1.

Figure 1: Developing a nutrient cycle between urban (fork) and rural (farm) areas.

To achieve this paradigm shift, P2GreeN will bring together industry, farmers, researchers, policy makers, public entities and local governments to develop various pathways on how nutrients can be recovered and reused. It will follow a multi-sectoral approach, ranging from innovative technologies and circular business models to value chain and governance framework development. The innovative technologicalapproaches will be tested and validated to efficiently

recover nutrients at the source through the implementation of three living labs in Sweden, Germany and Spain. Additionally, it will maximize its impact by implementing feasibility studies in France, Greece, Hungary and Italy.

2.1.Methodology in the pilot regions

P2GreeN's technological concept will be demonstrated and validated in the three P2GreeN pilot regions and will be later scaled up to four follower regions. Each approach is suited to the specificalities of each region taking into account the waste streams, crop production, available resources as well as the policy framework.

In the Swedish pilot region, urine is typically being collected from portable toilets installed in festivals in the island of Gotland. Instead of being disposed to the city's wastewater treatment plant, urine is stabilized by adding a chemical stabilizer and then dried to increase its concentration and minimize its volume. Once dry it is then pelletized and ready to be applied on the fields using conventional farming equipment as shown in figure 2. The circular bio-fertilizer is mostly used to fertigate barley for beer production so that the cycle can repeat itself.

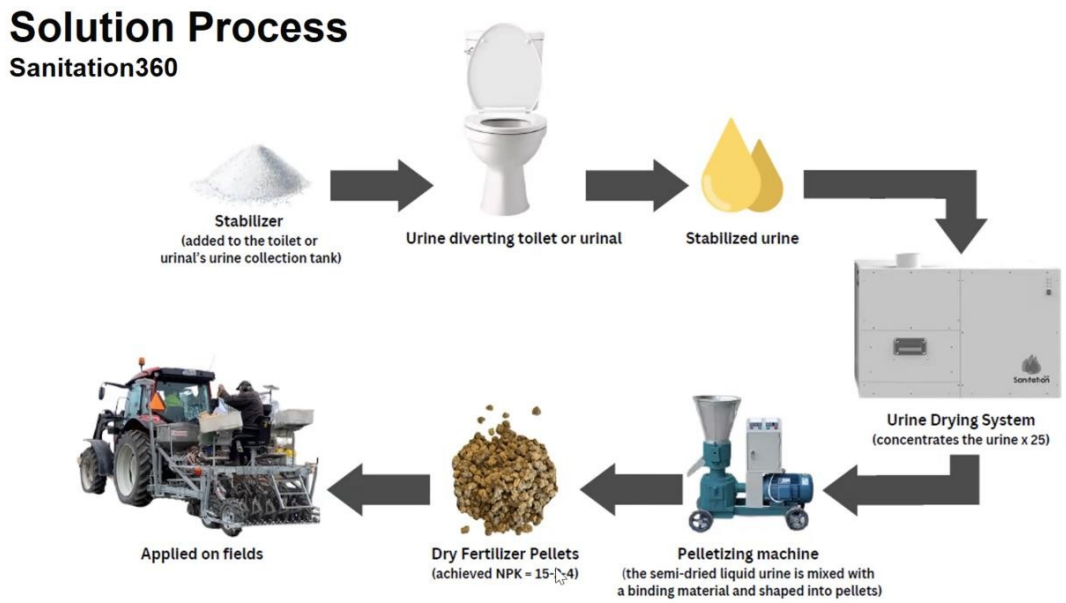


Figure 2: The Swedish pilot region solution.

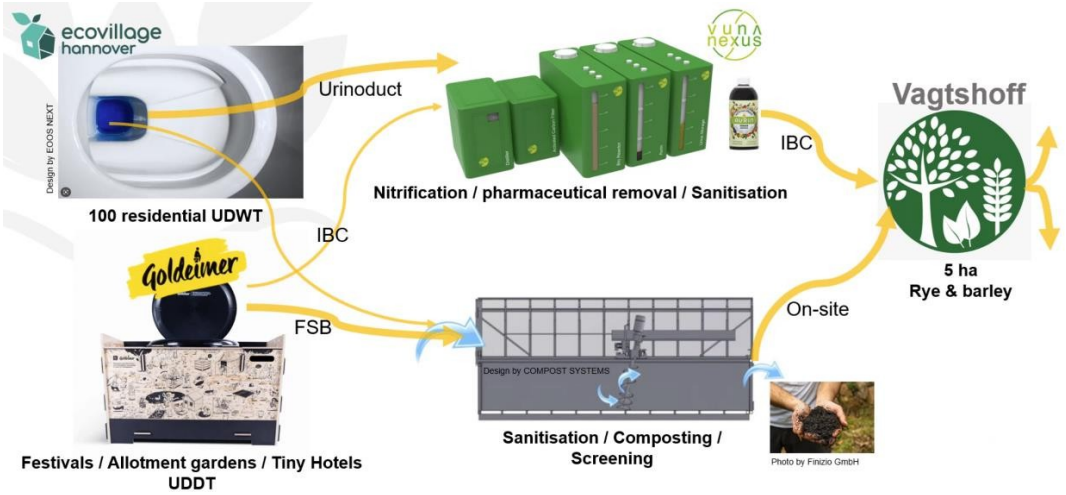


Figure 3: The German pilot region solution

The German pilot region follows the same principle by collecting urine at the source. It utilizes portable toilets to collect the urine, but it also separates the urine by installing urine-diverting toilets and separation networks in buildings. Once collected, urine goes through a bioreactor for nitrification and then an activated carbon filter for pharmaceuticals elimination. Then water evaporates to increase concentration. The final product is liquid fertilizer. Additionally, the German pilot collects faeces, from the portable toilets, and produces a nutrient-rich compost as shown in figure 3.

The Spanish pilot region follows a different approach by utilizing the outflow of the secondary treatment of the municipal wastewater treatment plant. After treatment through a membrane bioreactor (MBR), the recycled water is rich in nutrients and suitable for irrigation/fertigation. A smart fertigation is being developed to measure the crops' intake of nutrients, and conventional fertilizer is added if necessary.

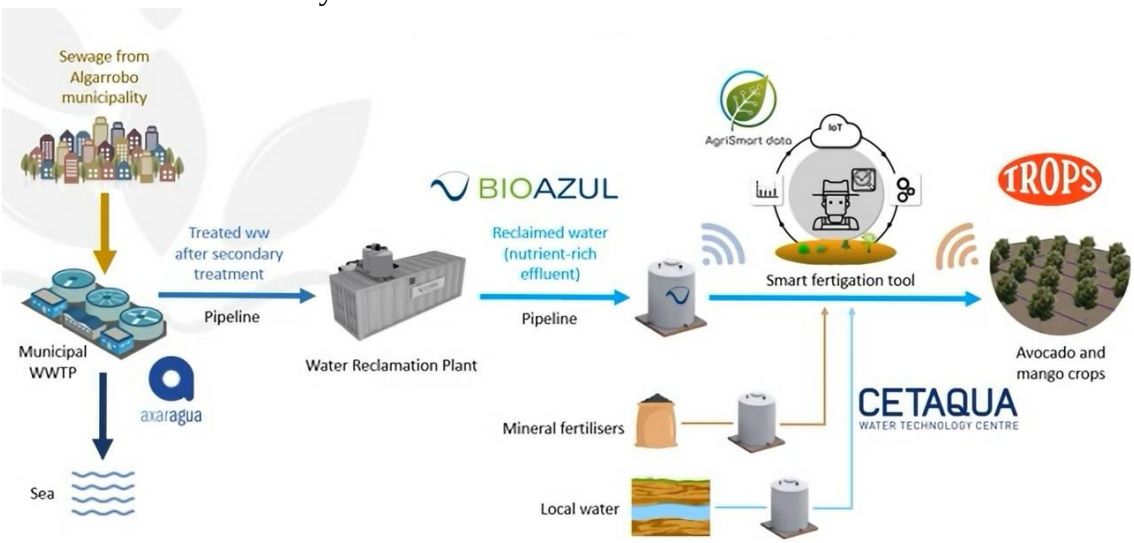


Figure 4: The Spanish pilot region solution.

3. Legislative framework for scaling P2GreeN solutions

The legislative framework plays a critical role in determining whether P2GreeN's pilot solutions can be scaled-up. Even effective solutions may face legal restrictions, making early analysis essential. This is especially relevant when scaling across regions or countries with differing legal systems. A legal and regulatory expert team within P2GreeN conducted a scoping review of the regulatory landscape affecting P2GreeN solutions. Key frameworks reviewed relate to waste, fertilizing products, reclaimed water, and organic farming. Their final report will include tailored recommendations for implementing circular solutions in the pilot and follower regions.

3.1. Waste and Urban Wastewater

At the EU level, the Waste Framework Directive (WFD) and the Urban Waste Water Treatment Directive (UWWTD) are key. However, they do not clearly define separately collected human urine as wastewater. As EU Directives, these require national transposition, leaving Member States to interpret and implement provisions independently. Treated urine's intended use as fertilizer complicates classification; whether it remains waste or reaches "end-of-waste" status is still unclear and depends on national interpretation, given the absence of EU-wide end-of-waste criteria.

In Greece, Law No. 4042/2012 and Ministerial Decision 5673/400/1997 transpose the WFD and UWWTD, respectively. However, neither clarifies how to categorize source- separated excreta. Discussions with authorities revealed that although urine does not enter the sewage system, it might still be classified as domestic wastewater. Alternatively, since it is not discharged into water bodies, the UWWTD may ultimately not apply and therefore would be categorized as waste under the WFD, necessitating classification in the European Waste Catalogue. Legal uncertainty over the classification impacts permitting and transport, underscoring the need for EU and national clarification.

3.2.Fertilizing products

Fertilizing products, such as fertilizers, biostimulants, and soil improvers, can be placed on the EU market via:

- National authorization in a Member State (limited to that Member State)
- EU Fertilizing Products Regulation (FPR) (Regulation EU 2019/1009), allowing CE-marked products to be sold EU-wide.

To qualify as an EU fertilizing product under the Regulation, a product must a) comply with a Product Function Category (PFC) based on its intended use and quality characteristics, b) contain ingredients compliant with a Component Material Category (CMC), c) undergo and pass a suitable conformity assessment and d) carry the appropriate labelling.

While the Regulation allows certain waste streams as inputs under categories like CMC15, source-separated urine is not yet included. However, a technical study by NMI B.V., commissioned by the European Commission, is currently evaluating the inclusion of (treated) urine as an allowed input material in the Regulation.

In Greece, the core regulatory framework consists of Law No. 1565/85, laying general rules for fertilizers, and the recently published Ministerial Decision 50424/2025, which define the types of fertilizers that may be placed on the market without prior authorization as well as types of non-fertilizing products. This provision specifies minimum nutrient content thresholds, permitted raw materials, and acceptable production methods.

The urine-derived fertilizer developed in the German pilot region, does not meet the minimum nutrient quantities to qualify as fertilizer under these rules. In contrast, Sweden’s pelletized fertilizer meets the criteria for classification as a compound solid fertilizer. Moreover, national regulations currently allow only “solid products or solutions from chemical synthesis or physical mixing.” The production processes used by P2GreeN may not conform to this requirement, since the fertilizers are produced through the treatment of urine to recover nutrients and not by chemical synthesis or by mixing various raw materials together. So, potentially the introduction of a new fertilizer type that also accounts for the nutrient content found in the liquid urine-derived fertilizer is needed. This can be achieved by submitting a technical dossier for evaluation in accordance with Ministerial Decision 291180/11034/2002.

3.3.Reclaimed water for irrigation

The EU Water Reuse Regulation (EU 2020/741) promotes reclaimed water for agricultural irrigation. It mandates additional treatment of treated wastewater under the UWWTD to meet defined water quality classes (based on crop risk levels), covering microbiological and chemical parameters, and requires Risk Management Plans addressing 11 key risk elements. Member States can opt out or limit reuse based on local conditions.

In Greece, Joint Ministerial Decision 145/116/2011 governs reuse of treated wastewater and permits its use for various purposes, including agricultural irrigation. It distinguishes restricted (e.g., animal feed, processed crops) and unrestricted (e.g., raw-consumed crops) irrigation based on crop exposure, with detailed treatment and safety requirements. Permits are needed for water reuse which are granted to users or operators and may fall under broader environmental permitting regimes, depending on the case.

A new Ministerial Decision is being drafted to harmonize Greece's legal framework on water reuse with EU requirements.

4. Feasibility Studies in Greece – Data and initial results

Greece is one of the four follower regions of the project. All three pilot cases will be tested in Greece to showcase their strengths, weaknesses and adaptability in southern Europe.

4.1.Swedish pilot region feasibility in Greece

In Greece we have identified a portable toilet renting company to test the feasibility of the Swedish pilot region. The portable toilet market in Greece is dominated by mainly two companies based in Athens which serve other Greek major cities as well. Many smaller companies do exist and operate at the local level. The typical portable toilet holds around 260 liters of liquid and requires 25 ml of treatment chemical to avoid odor issues.

Portable toilets are typically used at events (e.g. music festivals) and construction sites. For events, one toilet is required for every 70-80 attendees. On the other hand, one toilet is required for every 10 construction site workers with cleaning/emptying on a weekly basis. On average, each toilet generates 16 liters of wastewater per day, but this figure varies significantly depending on the occasion. For events, each toilet generates around 27 liters of wastewater daily.

Utilizing a portable urine diverting toilet or portable urinal will slightly increase the complexity of transportation and handling logistics. Additionally, the cleaning staff should be trained in how to handle the valuable urine. The vast majority of the operation's costs are associated with cleaning and transportation costs. While the cost of disposing the wastewater in the conventional treatment plant is currently minimal at 8 euros for 10 m^3 of wastewater. Therefore, under the current **legislative** framework and the fact that wastewater treatment plants do not measure the quality of incoming pollutants but just the quantity, there is no financial benefit to allow room for such initiatives. Lastly, such enterprises are typically located in peri-urban areas and thus the transportation cost of treated urine to the field needs to be accounted for.

4.2.German pilot region feasibility in Greece

The majority of Greek population resides in large city centers with almost half living in Athens metropolitan area. Multistory buildings in Greece are typically built between 1960-1970 with minimal backup spaces that treatment equipment could potentially be installed. Therefore, installing a secondary pipping network to collect urine proves to be a financial and technical challenge that can potentially be applied only in new construction or in buildings undergoing major renovations. Additionally, to benefit from the economies of scale such applications prove to be ideal for large public buildings such as schools, hospitals etc.

For the above reasons, the Roussopoulos building of the Athens Agricultural University, that recently went through major renovations, was chosen as the best candidate for the conduction of the feasibility study. The first step was to calculate the people using the building (students,

academic and technical staff) based on the academic curriculum and in-person interviews. The average urine production per adult and day is 1.3 liters (Martin et al., 2020), resulting in a total of around 51 liters per day for the building based on student attendance data. Given the fact that the German urine treatment system is designed for an input of around 500 liters per day, initial results show that the system is better suited for larger building complexes or urine collected elsewhere could potentially compensate to make it more feasible.

4.3.**Spanish pilot region feasibility in Greece**

For the Spanish pilot technology, the city of Karditsa was identified as a feasibility case. First, the wastewater treatment plant is ideally located at the edge of the city and close to agricultural fields that require irrigation. Second, the facility outflow exceeds certain discharge quality criteria, such as total nitrogen. Therefore, the municipal utility will need to address this issue in the near future, potentially by utilizing a similar technology to the Spanish pilot. Additionally, the region faces water scarcity that threatens to impact agricultural production.

The most prominent method to tackle such problems seems to be water recycling. Combining water with nutrient recycling will not only provide solutions to two major problems but also minimize the facility's treatment costs. We have identified the facility's inflow and outflow characteristics as well as the needs of the crops (irrigation, fertigation, prices, yields, etc.). To better illustrate the potential pathways, four scenarios will be developed with each one simulating irrigation water complying with class A (food crops consumed raw) and class D (energy crops).

- Scenario 0: Business as usual
- Scenario 1: WWTP compliant with limits, apply water recycling
- Scenario 2: WWTP not compliant with limits, apply water recycling
- Scenario 3: WWTP not compliant with limits, apply nature-based solution and water recycling

5. CONCLUSIONS

Water scarcity in the European Union has been identified as one of the main challenges for the foreseeable future. Together with the food crisis and price uncertainty, they pose a great threat to the livelihoods of millions in the EU. P2GreeN offers three solutions to tackle these emerging challenges in a local context. Each pilot technology can be applied at various points along the wastewater stream based on the needs and specificalities of each application.

Each technology has its strengths and weaknesses. All of them are applicable in the Greek ecosystem but the Spanish technology, based on our research and initial data, stands out. It has the biggest impact in terms of water recycling and can be applied on a large scale to existing infrastructure. Collecting urine from portable toilets and urinals can be applied easily but has limited impact due to the low volume of wastewater processed. On the other hand, urine diverting toilets separate urine efficiently on the source buy pose a significant technical difficulty to install in existing buildings. Additionally, the legislation governing wastewater reuse is more clearly defined and comprehensive, especially at the EU level, compared to the regulatory framework for separated urine and its by-products, which remains relatively underdeveloped and fragmented. However, the Greek framework for water reuse in agriculture must soon be updated to align with Regulation (EU) 2020/741.However, steps forward are required in terms of operational efficiency and local engagement. Currently, wastewater treatment plants do not measure the quality of incoming wastewater but rather the quantity. Therefore, key actors are not motivated to reduce the pollutant load of their waste stream. Additionally, municipalities must

create a symbiotic environment between the utilities, farmers, local associations and business owners to make the most out of a “wasted” resource.

References

OECD/FAO (2025), OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034, OECD Publishing, Paris/FAO, Rome, https://doi.org/10.1787/601276cd-en.

Mustafa, G., Hayat, N., Alotaibi, B. (2023). How and why to prevent over fertilization to get sustainable crop production. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00019-5

Walling, E., Vaneeckhaute, C. (2020). Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: A review of emission factors and their variability. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111211

Vermeulen, S. J., Campbell, B. M., & Ingram, J. S. I. (2012). Climate change and food systems. Annual Review of Environment and Resources. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020411-130608

Papp, L., Cardinali-Rezende, J., Júdice, W., Sanchez, M., Araújo, W. (2023). Total phosphorus contents currently found in the raw wastewater – Problems and technical solutions for its removal in full-scale wastewater treatment plants, Resources, Conservation and Recycling. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107026

Martin, T., & Esculier, F., Levavasseur, F., Houot, S. (2020). Human urine-based fertilizers: A review. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1838214

European Council. (1991). *Council Directive 91/271/EEC concerning urban waste-water treatment (Urban Wastewater Treatment Directive)*. Official Journal of the European Union, L 135/40.

European Parliament and Council. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives (Waste Framework Directive)*. Official Journal of the European Union, L 312/3.

European Parliament and Council. (2019). *Regulation (EU) 2019/1009 laying down rules on the making available on the market of EU fertilizing products (Fertilizing Products Regulation)*. Official Journal of the European Union, L 170/1.

European Parliament and Council. (2020). *Regulation (EU) 2020/741 on minimum requirements for water reuse*. Official Journal of the European Union, L 177/32.

European Parliament and Council. (2024). *Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast)*. Official Journal of the European Union, (entered into force 1 January 2025)

Hellenic Republic. (1985). *Law No. 1565/1985: Fertilizers*. Government Gazette A’ 164/26.9.1985.

Hellenic Republic. (1997). *Ministerial Decision No. 5673/400/1997: Measures and conditions for the treatment of urban wastewater*. Government Gazette B’/192/14.3.1997.

Hellenic Republic. (2002). *Joint Ministerial Decision No. 291180/11034/02: Fertilizer marketing licenses for new types of fertilizers*. Government Gazette B’ 1274/30.9.2022.

Hellenic Republic. (2011). *Ministerial Decision No. 145116/2011: Establishment of measures, conditions, and procedures for the reuse of treated wastewater and other provisions.* Government Gazette B’/354/8.3.2011.

Hellenic Republic. (2012). *Law 4042/2012 on waste management and environmental protection. Government Gazette A’ 24/13.2.2012*.

Hellenic Republic. (2025). *Ministerial Decision No. 50424/2025: Marketing of fertilizers and products that are not considered fertilizers in the country*. Government Gazette B’ 1074/10. 3.2025

71. ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΛΥΣΙΔΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΧΟΙΡΩΝ ΚΑΙ ΟΡΝΙΘΙΩΝ ΚΡΕΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Σ. Γεωργίου, Β. Ανέστης & Θ. Μπαρτζάνας

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, vanestis@aua.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη πρότυπης διαδικτυακής πλατφόρμας για τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων από εντατικές εκτροφές χοίρων και ορνιθίων, με στόχο την περιβαλλοντική τους αξιολόγηση βάσει της μεθόδου PEF (Product Environmental Footprint) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Αρχικά, συντάχθηκαν φύλλα Excel για την καταγραφή ετήσιων εισροών/εκροών, όπως αριθμός ζώων, σύνθεση ζωοτροφών και κατανάλωση καυσίμων, σύμφωνα με διεθνείς οδηγίες απογραφής ρύπων (IPCC 2019, EMEP/EEA 2023). Στη συνέχεια, τα φύλλα αυτά ενσωματώθηκαν σε διαδραστική διαδικτυακή πλατφόρμα βασισμένη σε Next.js και TypeScript, με χρήση του Supabase για διαχείριση backend και αυθεντικοποίηση χρηστών μέσω RLS (Row-Level Security). Οι χρήστες μπορούν να εισάγουν, αποθηκεύουν και εξάγουν δεδομένα σε μορφή CSV, διευκολύνοντας τη μελλοντική επεξεργασία και ενσωμάτωσή τους σε λογισμικά Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για την επιτάχυνση των διαδικασιών ΑΚΖ, τη βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων και την ταχύτερη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε επίπεδο εκμετάλλευσης. Μακροπρόθεσμα, αναμένεται να υποστηρίξει τη δημιουργία εθνικής βάσης δευτερογενών δεδομένων ΑΚΖ για τη ζωική παραγωγή, να βελτιώσει τον προσδιορισμό των εκπομπών και να ενισχύσει τη βιώσιμη λήψη αποφάσεων στον κλάδο αγροδιατροφής.

Λέξεις κλειδιά: Ψηφιοποίηση, συλλογή πρωτογενών δεδομένων, περιβαλλοντική επίδοση, ανάλυση κύκλου ζωής, εντατική κτηνοτροφία

DATA DIGITIZATION FOR ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF PIG AND POULTRY FOOD SUPPLY CHAINS, USING THE LIFE CYCLE ASSESSMENT METHODOLOGY

S. Georgiou, V. Anestis* & T. Bartzanas

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, *vanestis@aua.gr

ABSTRACT

This study presents the design and development of an integrated system for collecting primary data from intensive pig and poultry farms, aiming to support environmental performance assessment based on the European Commission's Product Environmental Footprint (PEF) methodology. The process began with the creation of structured Excel templates, designed to capture detailed annual data on inputs and outputs – such as livestock numbers, feed composition and fuel and electricity use – following internationally recognized guidelines (e.g., IPCC, 2019; EMEP/EEA, 2023). These templates formed the basis for a user-friendly, web-based platform that enables the users to input data directly into a secure digital environment. The web application, built using Next.js and TypeScript, employs Supabase as its backend infrastructure, offering seamless data management and robust user authentication via Row- Level Security (RLS). Users can enter, edit, and export data in CSV format, allowing for easy processing and integration with

life cycle assessment (LCA) software. By facilitating structured, farm-level data collection, the system aims to accelerate LCA processes, improve data quality, and support faster and more reliable environmental evaluations. In the long term, it is expected to contribute to the development of a national livestock secondary LCA database and enhance sustainability decision-making across the agri-food sector.

Keywords: Digitisation, primary data collection, environmental performance, life cycle assessment, intensive livestock systems

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιωσιμότητα αποτελεί πλέον βασικό πυλώνα της αγροδιατροφικής πολιτικής και των απαιτήσεων της αγοράς, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιβαλλοντική επίδοση των συστημάτων ζωικής παραγωγής, ιδίως των εντατικών εκτροφών χοίρων και πουλερικών. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) προσφέρει μια δομημένη και επιστημονικά τεκμηριωμένη μεθοδολογία για τον ποσοτικό προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τροφίμων. Ωστόσο, η εφαρμογή της ΑΚΖ σε επίπεδο εκμετάλλευσης εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση, κυρίως λόγω κατακερματισμένων ή ελλιπών δεδομένων, περιορισμένης πρόσβασης σε αξιόπιστες πληροφορίες σε επίπεδο εκμετάλλευσης και έλλειψης τυποποιημένων εργαλείων.

Μία από τις κύριες δυσκολίες στην εκτέλεση ΑΚΖ σε επίπεδο εκμετάλλευσης είναι η χαμηλή ποιότητα και η διαθεσιμότητα των πρωτογενών δεδομένων. Πολλές μελέτες βασίζονται σε γενικές ή απαρχαιωμένες υποθέσεις για τη χρήση ζωοτροφών, την κατανάλωση ενέργειας, τη διαχείριση της κοπριάς και τις εκπομπές, γεγονός που επηρεάζει την ακρίβεια των περιβαλλοντικών δεικτών (Cederberg et al., 2013; Nemecek et al., 2016). Επιπλέον, η διαφοροποίηση στις μεθοδολογίες υπολογισμού των εκπομπών περιορίζει τη συγκρισιμότητα και τη διαφάνεια. Αυτή η ασυνέπεια αποθαρρύνει παραγωγούς και φορείς χάραξης πολιτικής από τη χρήση των αποτελεσμάτων ΑΚΖ ως εργαλείο λήψης αποφάσεων.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η παρούσα εργασία συμβάλλει στην υλοποίηση της Μελέτης Περίπτωσης Ε (Case Study E - CS-E) του έργου Horizon Europe Digi4Live[1], η οποία στοχεύει στην ενίσχυση της εφαρμογής ΑΚΖ σε εντατικές μονάδες εκτροφής χοίρων και πουλερικών. Ειδικότερα, εστιάζει στην ανάπτυξη δύο αλληλοσυνδεόμενων εργαλείων: (i) πρότυπα υπολογιστικά φύλλα Excel για τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων και (ii) μιας ασφαλούς, διαδικτυακής πλατφόρμας που ψηφιοποιεί και διευρύνει τη διαδικασία συλλογής. Τα δύο αυτά εργαλεία προωθούν την ευθυγράμμιση με τη μεθοδολογία Product Environmental Footprint (PEF) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission, 2021), εξασφαλίζοντας συνέπεια και διαφάνεια στην περιβαλλοντική αξιολόγηση.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Καταγραφή αναγκών σε δεδομένα

Η διαδικασία ξεκίνησε με την καταγραφή και αποσαφήνιση των απαραίτητων δεδομένων για συστήματα εκτροφής χοίρων (farrow-to-finish) και κοτόπουλων κρεοπαραγωγής. Η αποσαφήνιση κάλυψε τα βασικά στάδια απογαλακτισμού, ανάπτυξης και πάχυνσης για τους χοίρους, καθώς και στάδια εκκίνησης, ανάπτυξης και πάχυνσης για τα πτηνά. Οι κατηγορίες δεδομένων διαμορφώθηκαν σύμφωνα με τα διεθνώς αναγνωρισμένα πρωτόκολλα υπολογισμού εκπομπών, συγκεκριμένα τις Κατευθυντήριες Οδηγίες του IPCC 2019 (IPCC, 2019) και τον Οδηγό Απογραφής Εκπομπών Ρύπων της EMEP/EEA (2023). Οι οδηγίες αυτές ενσωματώνουν μεθοδολογίες Tier 1 και Tier 2 για την εκτίμηση εκπομπών από διαχείριση κοπριάς, ζύμωση (enteric fermentation) και κατανάλωση ενέργειας.

Οι κατηγορίες εκπομπών που εξετάζονται περιλαμβάνουν εκείνες που προέρχονται από τη διαχείριση κοπριάς (μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, αμμωνία), τη χρήση ενέργειας (π.χ. CO_2 από την καύση καυσίμων) και την εντερική ζύμωση. Υποστηρίζονται τόσο η προσέγγιση Tier 1 (προεπιλεγμένοι συντελεστές εκπομπών) όσο και η προσέγγιση Tier 2 (δεδομένα συγκεκριμένων εκμεταλλεύσεων), εξασφαλίζοντας ευελιξία για διαφορετικά περιβάλλοντα εκμετάλλευσης και επίπεδα διαθεσιμότητας δεδομένων.

1.1.Υπολογιστικά φύλλα συλλογής δεδομένων (Excel)

Μετά την αποσαφήνιση των κατηγοριών δεδομένων, αναπτύχθηκε μια σειρά από πρότυπα φύλλα Excel για να καταστεί δυνατή η δομημένη συλλογή δεδομένων απογραφής σε επίπεδο εκμετάλλευσης. Αυτά τα πρότυπα σχεδιάστηκαν με γνώμονα τη χρηστικότητα, τη σαφήνεια και την επιστημονική αξιοπιστία. Επιτρέπουν στο χρήστη να καταγράφει:

- Τις ροές προϊόντων, όπως πωλήσεις ζώων, ζωντανό βάρος και εκροές κοπριάς.
- Τις εισροές υλικών και ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των ζωοτροφών, των στρωμνών, των καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τις ροές από τη φύση, όπως η χρήση νερού και η χρήση γης

Τα πρότυπα έχουν σχεδιαστεί μεθοδολογικά ώστε να υποστηρίζουν τα όρια του συστήματος «από τη γέννηση έως την πύλη της εκμετάλλευσης», σύμφωνα με τα πρότυπα της μεθοδολογίας AKZ χαρακτηρισμού (attributional LCA). Τα δεδομένα αναλύονται ανά στάδιο παραγωγής και τύπο πόρου, ώστε να καταγράφεται η μεταβλητότητα και να είναι δυνατή η πιο ακριβής αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων.

1.2.Διαδικτυακή πλατφόρμα: τεχνολογική δομή και αρχιτεκτονική

Για να διευρυνθεί η προσβασιμότητα και να υποστηριχθεί η ευρύτερη ενοποίηση δεδομένων, υλοποιήθηκε μια διαδικτυακή έκδοση του εργαλείου συλλογής δεδομένων. Το frontend δημιουργήθηκε με χρήση του Next.js 14, ενός σύγχρονου διαδικτυακού πλαισίου βασισμένου στο React που υποστηρίζει rendering από την πλευρά του διακομιστή, αρθρωτή αρχιτεκτονική και βελτιωμένη απόδοση (Vercel, 2025). Για την ανάπτυξη του frontend, υιοθετήθηκε το TypeScript για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια τύπου, να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα εκτέλεσης και να βελτιωθεί η συντηρησιμότητα του κώδικα (Microsoft, 2025).

Στο backend, η πλατφόρμα χρησιμοποιεί το Supabase, ένα backend-as-a-service ανοιχτού κώδικα που παρέχει μια βάση δεδομένων βασισμένη σε PostgreSQL, έλεγχο ταυτότητας χρήστη και τερματικά API σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον (Supabase, 2025a). Το Supabase επιλέχθηκε για τη συμβατότητά του με εργαλεία ανοιχτού κώδικα, την ευκολία εφαρμογής του και την εγγενή υποστήριξη για Row-Level Security (RLS), ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό για την επιβολή πρόσβασης σε επίπεδο χρήστη σε ευαίσθητα δεδομένα αγροκτημάτων (Supabase, 2025b).

Η πιστοποίηση χρηστών γίνεται μέσω του Supabase Auth, το οποίο επιτρέπει στους χρήστες να εγγράφονται και να συνδέονται με ασφάλεια χρησιμοποιώντας τα στοιχεία σύνδεσης του email και του κωδικού πρόσβασης. Οι πολιτικές RLS διασφαλίζουν ότι οι χρήστες μπορούν να προβάλλουν, να τροποποιούν ή να εξάγουν μόνο τα δεδομένα που έχουν εισάγει οι ίδιοι, καθιστώντας το σύστημα συμβατό με τα βασικά πρότυπα προστασίας δεδομένων.

1.3.Σχήμα και λειτουργίες της βάσης δεδομένων

Το υποκείμενο σχήμα της βάσης δεδομένων σχεδιάστηκε για να διευκολύνει την αποθήκευση δεδομένων συγκεκριμένων χρηστών, τη δομημένη οργάνωση των δεδομένων και τον ασφαλή έλεγχο πρόσβασης. Περιλαμβάνει τρεις βασικούς πίνακες:

- auth.users: Διαχειρίζεται την πιστοποίηση και τις μοναδικές ταυτότητες των χρηστών.

- profiles: Αποθηκεύει μεταδεδομένα συγκεκριμένων χρηστών (π.χ. όνομα, διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου).
- user_data: Περιέχει όλες τις κύριες καταχωρήσεις δεδομένων που σχετίζονται με τον αριθμό των ζώων, την πρόσληψη τροφής, τη στέγαση, την κατανάλωση ενέργειας, κλπ.

Κάθε καταχώρηση δεδομένων συνδέεται με ένα αναγνωριστικό χρήστη για τη διατήρηση της ιχνηλασιμότητας και την αποτροπή της διασταυρούμενης πρόσβασης. Οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε τυπικές λειτουργίες CRUD (Δημιουργία, Ανάγνωση, Ενημέρωση, Διαγραφή) εντός της εφαρμογής και μπορούν επίσης να εξάγουν τα δεδομένα τους σε μορφή CSV.

1.4.Διεπαφή χρήστη και ροή εργασίας

Η διεπαφή χρήστη σχεδιάστηκε με γνώμονα την απλότητα και την επιστημονική ακρίβεια. Μετά τη σύνδεση, οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε έναν εξατομικευμένο πίνακα ελέγχου όπου επιλέγουν τον τύπο της εκμετάλλευσης (χοίροι ή πουλερικά) και καθοδηγούνται μέσω εξατομικευμένων φορμών εισαγωγής δεδομένων. Αυτές οι φόρμες περιλαμβάνουν διαδραστικούς πίνακες για την εισαγωγή πληροφοριών όπως η σύνθεση των ζωοτροφών, ο αριθμός των ζώων, η κατανάλωση ενέργειας και οι πρακτικές διαχείρισης της κοπριάς.

Για να βελτιωθεί η χρηστικότητα και να μειωθούν τα σφάλματα κατά την εισαγωγή, η διεπαφή παρέχει καθοδήγηση ανάλογα με το πλαίσιο, μηχανισμούς επικύρωσης και ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο. Ο αρθρωτός σχεδιασμός υποστηρίζει πολλαπλά συστήματα και σενάρια παραγωγής, ενώ τα πρώτα σχόλια από εσωτερικές δοκιμές έχουν επιβεβαιώσει ότι το σύστημα πληροί τόσο τις απαιτήσεις χρηστικότητας όσο και της μεθοδολογίας.

2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

2.1.Πρότυπα συλλογής δεδομένων με βάση το Excel: δομή και πρώιμα σχόλια

Η πρώτη έκδοση των προτύπων συλλογής δεδομένων με βάση το Excel έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία τόσο για τα συστήματα παραγωγής χοίρων όσο και για τα συστήματα παραγωγής κοτόπουλων κρεοπαραγωγής. Αυτά τα πρότυπα σχεδιάστηκαν ώστε να αντικατοπτρίζουν όσο το δυνατόν πιο πιστά τις πραγματικές λειτουργίες των εκμεταλλεύσεων, χρησιμοποιώντας μια αρθρωτή διάταξη που προσαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα συστημάτων παραγωγής, διατηρώντας παράλληλα τη συμβατότητα με τα διεθνή πρωτόκολλα καταγραφής εκπομπών.

Οι πρώτες δοκιμές από την ομάδα ανάπτυξης έδειξαν ότι τα πρότυπα υποστηρίζουν τόσο την προσέγγιση Tier 1 όσο και την προσέγγιση Tier 2 για την εκτίμηση των εκπομπών. Τα πρότυπα καθοδηγούν τον χρήστη μέσω δομημένων κατηγοριών εισροών, όπως ζωικό κεφάλαιο, συστήματα στέγασης, σύνθεση ζωοτροφών, κατανάλωση ενέργειας και διαχείριση κοπριάς. Οι υπάρχουσες ενότητες για χοίρους και πουλερικά επιτρέπουν την καταχώριση αναλυτικών στοιχείων με βάση το στάδιο παραγωγής και τον τύπο εισροών/εκροών, επιτρέποντας την ανάλυση με βάση σενάρια και την ενίσχυση της αντιπροσωπευτικότητας.

Επιπλέον, τα πρότυπα έχουν μεταφραστεί στα ελληνικά, καθιστώντας τα εύκολα προσβάσιμα στους τοπικούς ενδιαφερόμενους φορείς. Προγραμματίζονται ειδικές συνεδρίες κατάρτισης και ανατροφοδότησης με παραγωγούς χοίρων και πουλερικών, προκειμένου να προσαρμοστούν περαιτέρω τα πρότυπα στις πρακτικές ανάγκες και να εξασφαλιστεί η αποδοχή τους από τους χρήστες. Αυτός ο κύκλος συμμετοχικής ανατροφοδότησης αναμένεται να βελτιώσει τόσο την ποιότητα των δεδομένων όσο και τη συμμετοχή των κτηνοτρόφων, υποστηρίζοντας τη μακροπρόθεσμη χρήση των σχετικών εργαλείων.

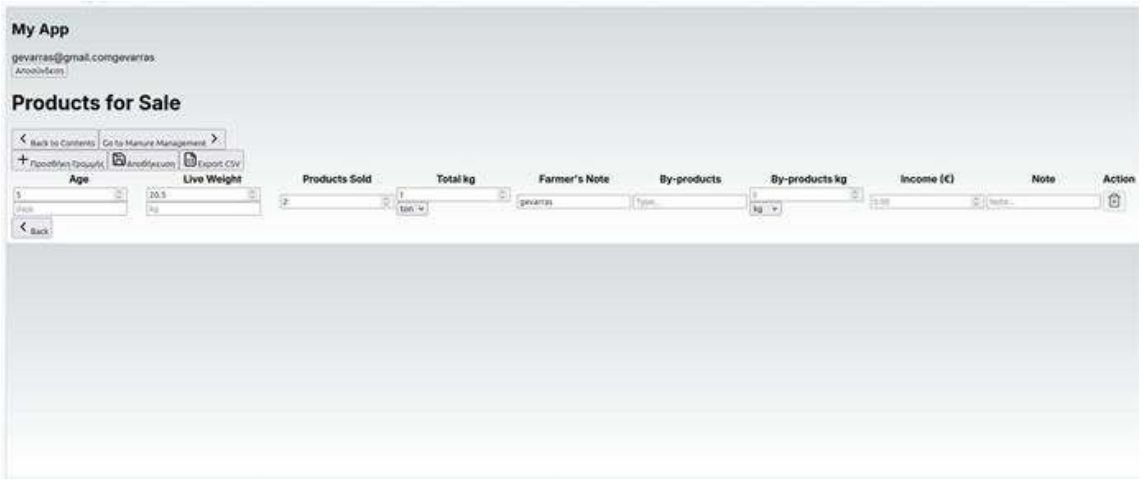
2.2.Διαδικτυακή πλατφόρμα: λειτουργικές δυνατότητες και κατάσταση υλοποίησης

Η beta έκδοση της διαδικτυακής πλατφόρμας συλλογής δεδομένων είναι πλέον πλήρως λειτουργική και ενσωματώνει βασικές λειτουργίες που υποστηρίζουν την δομημένη, ασφαλή και επεκτάσιμη καταχώριση δεδομένων σε επίπεδο εκμετάλλευσης. Σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης, είναι διαθέσιμες οι ακόλουθες βασικές λειτουργίες:

- Αυθεντικοποίηση χρήστη και ασφαλής σύνδεση
- Πρόσβαση βάσει ρόλου και ασφάλεια σε επίπεδο σειράς (RLS) για τη διασφάλιση της ιδιωτικότητας των δεδομένων
- Δομημένες ροές εργασίας εισαγωγής για συστήματα εκτροφής χοίρων και πουλερικών
- Λειτουργίες CRUD (Δημιουργία, Ανάγνωση, Ενημέρωση, Διαγραφή) για όλες τις κατηγορίες δεδομένων
- Λειτουργία εξαγωγής CSV για ενσωμάτωση σε εργαλεία LCA

Τα διαδραστικά έντυπα εισαγωγής δεδομένων (Σχήμα 1) είναι προσαρμοσμένα στον επιλεγμένο τύπο εκμετάλλευσης (π.χ. κοτόπουλα κρεοπαραγωγής ή χοίροι πάχυνσης), με φιλικούς προς τον χρήστη πίνακες που επιτρέπουν πολλαπλές καταχωρήσεις και περιλαμβάνουν μηχανισμούς ενσωματωμένης επικύρωσης. Κάθε καταχώριση συνδέεται αυτόματα με τον πιστοποιημένο χρήστη, εξασφαλίζοντας πλήρη ιχνηλασιμότητα των δεδομένων. Ο πίνακας ελέγχου της πλατφόρμας προσφέρει επίσης εισαγωγικές οδηγίες και εργαλεία πλοήγησης, καθιστώντας την εμπειρία προσβάσιμη σε χρήστες χωρίς τεχνικές γνώσεις.

Ο συνδυασμός δομημένης πλοήγησης, προσαρμοσμένων φορμών και ευέλικτων εργαλείων εισαγωγής δεδομένων καθιστά τη διεπαφή φιλική προς τον χρήστη και επιστημονικά αξιόπιστη, υποστηρίζοντας την αξιόπιστη συλλογή δεδομένων για την αναλύσεις κύκλου ζωής σε επίπεδο εκμετάλλευσης.



Σχήμα 1. Διαδραστικός πίνακας δεδομένων για τη συμπλήρωση εκροών προϊόντων χοίρων πάχυνσης.

2.3.Ευκαιρίες επέκτασης και ενσωμάτωσης

Ενώ η τρέχουσα έκδοση της πλατφόρμας προσφέρει ήδη ισχυρές λειτουργίες συλλογής δεδομένων, εξετάζονται διάφορες βελτιώσεις για ανάπτυξη στο εγγύς μέλλον:

- Βελτιωμένη επικύρωση εισόδου για περαιτέρω μείωση των σφαλμάτων των χρηστών
- Πολυγλωσσική υποστήριξη για βελτίωση της προσβασιμότητας σε όλες τις περιοχές της ΕΕ

- Διαχείριση χρηστών βάσει ρόλων για ερευνητές, ελεγκτές και διαχειριστές
- Άμεση ενσωμάτωση με μεθόδους εκτίμησης εκπομπών (π.χ. υπολογισμοί βάσει IPCC/PEF)
- Σύνδεση με το επόμενο εργαλείο LCA της CS-E του έργου Digi4Live, το οποίο θα μετατρέψει τα συλλεχθέντα δεδομένα σε πλήρη σύνολα δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής (LCI).

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη ενός συστήματος διπλού εργαλείου που έχει σχεδιαστεί για να διευκολύνει τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων σε επίπεδο εκμετάλλευσης για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων σε συστήματα εντατικής παραγωγής χοίρων και πτηνών. Συνδυάζοντας δομημένα πρότυπα βασισμένα στο Excel με μια ασφαλή, επεκτάσιμη διαδικτυακή πλατφόρμα, το σύστημα αντιμετωπίζει βασικούς περιορισμούς στη συλλογή πρωτογενών δεδομένων σε επίπεδο εκμετάλλευσης κατά την εφαρμογή των AKZ – συγκεκριμένα, την ασυνέπεια στην ποιότητα των δεδομένων, την έλλειψη τυποποίησης και την περιορισμένη ψηφιακή υποδομή.

Τα πρότυπα Excel παρέχουν ένα πρακτικό και οικείο σημείο εκκίνησης για τη συλλογή δεδομένων, επιτρέποντας στους κτηνοτρόφους και τους συμβούλους να καταγράφουν λεπτομερή δεδομένα εισροών/εκροών σύμφωνα με τα διεθνώς αποδεκτά πρωτόκολλα υπολογισμού εκπομπών. Η διαδικτυακή πλατφόρμα, με τη σειρά της, προσφέρει ένα ευέλικτο και ασφαλές ψηφιακό περιβάλλον που υποστηρίζει τη δομημένη εισαγωγή δεδομένων, τη διαχείριση δεδομένων ανά χρήστη και τη λειτουργικότητα εξαγωγής για ανάλυση σε μεταγενέστερο στάδιο.

Σε συμφωνία με τη μέθοδο του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος Προϊόντων (PEF) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής καθώς και με τις κατευθυντήριες γραμμές των IPCC και EMEP/EEA, τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν εδώ έχουν σχεδιαστεί για να ωφελήσουν ένα ευρύ φάσμα ενδιαφερομένων, συμπεριλαμβανομένων αγροτών, ερευνητών, συμβούλων και υπευθύνων χάραξης πολιτικής.

Καθώς τα εργαλεία συνεχίζουν να εξελίσσονται, μελλοντική ενσωμάτωση με την αυτοματοποιημένη εκτίμηση εκπομπών και τη δημιουργία πλήρους απογραφής κύκλου ζωής (LCI) αναμένεται να απλοποιήσει περαιτέρω τις περιβαλλοντικές εκθέσεις, να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων βάσει τεκμηρίων προς πιο βιώσιμα συστήματα κτηνοτροφίας και να χρησιμεύσει ως βάση για μια εθνική βάση δευτερογενών δεδομένων AKZ για την κτηνοτροφία.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου Digi4Live (101134866) το οποίο χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Cederberg, C., Henriksson, M. and Berglund, M., 2013. *An LCA researcher's wish list—data and emission models needed to improve LCA studies of animal production*. *Animal*, 7(2), pp.212–219. https://doi.org/10.1017/S1751731113000785.

European Commission, 2021. Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. Official Journal of the European Union, L 471, pp.1–396. http://data.europa.eu/eli/reco/2021/2279/oj.

EEA, 2023. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023 – Technical guidance to prepare national emission inventories*. European Environment Agency, Copenhagen.

https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023

IPCC, 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html

Microsoft, 2025. *TypeScript: JavaScript with syntax for types*. Microsoft Corporation. https://www.typescriptlang.org

Nemecek, T., Jungbluth, N., i Canals, L.M. and Schenck, R., 2016. *Environmental impacts of food consumption and nutrition: where are we and what is next?* International Journal of Life Cycle Assessment, 21(5), pp.607–620. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1071-3

Supabase, 2025a. *What is Supabase?*. Supabase Documentation. https://supabase.com/docs

Supabase, 2025b. *Row Level Security*. Supabase Documentation. https://supabase.com/docs/guides/auth/row-level-security

Vercel, 2025. *Next.js 14 Documentation*. Vercel Inc. https://nextjs.org/docs

72. ARGONAUT: AN AI-BASED TOOL FOR ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT AND DIGITAL PRODUCT PASSPORTS IN THE BIOECONOMY

Athanasios Balafoutis, Bruno Barrionuevo Sarmiento, M. Kosti, and B. Paris

CERTH-iBO, 80 Athinon Avenue and 2-4 Mirionou,104 41, Athens, a.balafoutis@certh.gr

Περίληψη

Ο κύριος στόχος του ARGONAUT είναι η ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού και εύκολα προσβάσιμου ψηφιακού εργαλείου τεχνητής νοημοσύνης που υπολογίζει με ακρίβεια τον περιβαλλοντικό και κλιματικό αντίκτυπο των βιολογικών προϊόντων σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας (από την παραγωγή έως την απόρριψη) χρησιμοποιώντας γλωσσικά μοντέλα από τη διεθνή βιβλιογραφία με βάση τις αρχές της ανάλυσης κύκλου ζωής και επιτρέπει την εύκολη και ασφαλή παρακολούθηση μέσω ενός ψηφιακού διαβατηρίου που βασίζεται στην τεχνολογία blockchain. Το εργαλείο αυτό θα περιλαμβάνει επίσης ένα εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων που χρησιμοποιεί τα δεδομένα αυτά για να χαρτογραφήσει διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις για την αλυσίδα αξίας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους, διευκολύνοντας έτσι την καλύτερη και πιο βιώσιμη λήψη αποφάσεων. Το ARGONAUT θα συμβάλει στην ενσωμάτωση βασικών αναδυόμενων ψηφιακών τεχνολογιών (τεχνητή νοημοσύνη και blockchain) και μιας μεθοδολογίας περιβαλλοντικής αξιολόγησης για τη δημιουργία ενός αξιόπιστου εργαλείου που θα μπορεί να βοηθήσει τους μικρούς και μεσαίους παραγωγούς να πλοηγηθούν στο περίπλοκο τοπίο των βιολογικών προϊόντων με επαρκείς σχετικές πληροφορίες, εγγυήσεις ασφάλειας όσον αφορά την προστασία των δεδομένων τους και με τρόπο φιλικό προς τον χρήστη, ικανό να καλύψει τα κενά γνώσης και ως εκ τούτου, να προσεγγίσει ένα ευρύτερο φάσμα παραγωγών. Το ARGONAUT θα συνεισφέρει στην εφαρμογή του κανονισμού της ΕΕ για τον οικολογικό σχεδιασμό βιώσιμων προϊόντων και θα επιτρέψει την ακριβή απεικόνιση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των εν λόγω βιολογικών προϊόντων, υποστηρίζοντας έτσι την ανάπτυξη πιο βιώσιμων αλυσίδων αξίας και τη μετάβαση σε μια κυκλική βιο-οικονομία σε ολόκληρη την ΕΕ.

Λέξεις κλειδιά: Τεχνητή Νοημοσύνη, Τεχνολογία Blockchain, Ψηφιακά Διαβατήρια, Προϊόντα Βιολογικής Προέλευσης

ABSTRACT

The main objective of ARGONAUT is to develop an effective and easily accessible AI digital tool that accurately calculates the environmental impact from bio-based products using language models from global literature based on Life Cycle Assessment principles and allows for easy and secure tracking through a digital passport based on blockchain technology. This tool will also include a decision support tool that uses this data to map out different alternatives for the value chain and their environmental impact thereby facilitating better and more sustainable decision making. ARGONAUT will contribute to the integration of key emerging digital technologies (AI and blockchain) and an environmental assessment methodology to create a reliable tool able to assist small and medium-sized producers to navigate the complex bio-product landscape with enough relevant information, security guarantees regarding the privacy of their data and in a user-friendly way capable of closing knowledge gaps and thereby of reaching to a wider range of producers. ARGONAUT will contribute to the implementation of the EU's Ecodesign for Sustainable Products Regulation and allow for an accurate depiction of the environmental impact of such bio-based products thereby supporting the development of

more sustainable value chains and the transition to a circular bioeconomy across the EU.

Keywords: Artificial Intelligence, Blockchain technology, Digital Passports, Bio-Based Products

EXTENDED ABSTRACT

The transition to a circular and sustainable bioeconomy requires reliable, transparent, and easily accessible tools to measure and communicate environmental impacts. The ARGONAUT project addresses this need by developing an AI-based digital tool that integrates Life Cycle Assessment (LCA) methodologies and blockchain-based Digital Product Passports (DPPs). The tool will allow users to accurately assess environmental impacts of bio-based products across different stages of their life cycle and will support better-informed decisions through an embedded decision support system. ARGONAUT aims to bridge the gap between advanced digital technologies and environmental science, providing small and medium-sized enterprises (SMEs) with a user-friendly and secure system that ensures data integrity, comparability, and compliance with EU sustainability policies, particularly the Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR).

The overall approach of ARGONAUT follows four main stages, each contributing to the integration of AI, blockchain, and LCA principles into a single digital ecosystem.

The first stage establishes the Environmental Impact Assessment (EIA) framework based on LCA methodology, ensuring that environmental impacts can be calculated consistently and scientifically. This framework serves as the methodological foundation for the AI tool. It involves: producing a structured EIA model compatible with AI training and automation, identifying key impact categories and indicators aligned with EU policy and scientific standards, and linking traditional LCA processes to digital, data-driven workflows.

The second step is the development of the AI Digital Tool. Building on the EIA framework, this stage focuses on developing the AI Digital Tool (named *JASON*) that integrates AI algorithms and blockchain infrastructure. The tool will automate the processing of environmental data from bio- based value chains, generate and store DPPs ensuring traceability and data security and provide a decision support system to assess variations in supply chains and identify more sustainable options.

The third stage will involve implementing the AI system for environmental assessments and DPP creation, conducting full LCAs for six bio-based product use cases to validate results and optimizing tool performance and decision-making accuracy across different value chains. The six case studies are: 1) Biomethane and biofertilizers, 2) Nutraceuticals, 3) Bioplastics, 4) Probiotic oat fibers, 5) Hemp and flax natural fibers and 6) Vegetables and by-products.

The final stage aims to increase the circularity and interoperability of the developed tool by enhancing data exchange between actors and systems, ensuring compliance with emerging EU Digital Product Passport standards and supporting the scaling-up of the tool for wider application in bio-based sectors.

The project is in an early phase, however the progress achieved so far concerns the methodological and technical foundation of ARGONAUT, encompassing three main tasks. First of all, T1.1 – Technological Analysis and Documentation, in which a comprehensive review of existing AI tools, environmental impact assessment methods and digital passport systems has been undertaken. This analysis has identified interoperability challenges, data gaps and alignment opportunities with the ESPR and DPP frameworks. Secondly, T1.2 – Analysis of Six

Bio-Based Value Chains, where a detailed mapping and documentation of the six representative bio-based product chains (biomethane and biofertilizers, nutraceuticals, bioplastics, vegetables and by-products, hemp and flax natural fibers and probiotic oat fibers) have been conducted. Each has been characterized from feedstock to production gate, defining critical data points and environmental hotspots. Finally, T1.3 – Definition of Technical Requirements for the AI Tool, through which technical specifications and data requirements have been established for the development of a functioning AI system capable of integrating environmental assessment modules, blockchain data security and user interaction layers. This work has resulted in a robust technical and methodological blueprint for the JASON AI tool.

Further progress achieved to date includes the Validation and Impact Assessment, specifically the first phase of conventional LCAs for all six bio-based value chains. The goal and scope definition have been completed for each case study, specifying functional units, system boundaries and intended applications. Also, preparation for inventory analysis is underway, ensuring data consistency and compatibility with the AI framework. These LCAs will serve as the reference datasets for validating and optimizing the AI tool once developed.

The upcoming activities include the Development and Integration of the AI Digital Tool (JASON) and Interoperability and Social Acceptability. Regarding the first one, this phase will operationalize the framework into a working prototype, combining natural language models, data ingestion pipelines and DPP functionalities. Interoperability and Social Acceptability focus on ensuring semantic interoperability, alignment with Digital Product Passport standards and user accessibility for diverse stakeholders (SMEs, policymakers and consumers). Together, these efforts will transition ARGONAUT from conceptual design to functional prototype and validation.

In conclusion, ARGONAUT is advancing toward its central objective: the creation of a scalable, AI- driven tool capable of assessing and communicating environmental performance across bio- based value chains. By combining AI, blockchain and LCA, the project contributes to a digitalized, transparent, and circular bioeconomy, supporting EU policies and enabling SMEs to make informed, sustainable choices. Future work will focus on integrating the JASON AI prototype with real-world value chain data, testing Digital Product Passport generation and engaging stakeholders to ensure interoperability and policy relevance.

73. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΕ ΕΝΑ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΑΛΛΗΛΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Σ. Φαλιάγκα, Ι. Ναουνούλης, Μ. Ασλανίδου, Φ. Λαζαρέλη, Ν. Μπακίρα, & Ν. Κατσούλας

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Οδός Φυτόκου, 38446 Βόλος Μαγνησίας, Ελλάδα, nkatsoul@uth.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα σύστημα επάλληλων καλλιεργειών που περιλάβανε μια καλλιέργεια τομάτας (δότη) και μια καλλιέργεια τοματινιού (δέκτης), ενσωματώνοντας έναν ιοντοεκλεκτικό αισθητήρα, για την παρακολούθηση των επιπέδων νιτρικών ιόντων ($NO3^-$) για τη δυναμική προσαρμογή του διαλύματος. Οι μεταχειρίσεις για την καλλιέργεια-δέκτη ήταν: (α) T1 (μάρτυρας, πλήρες διάλυμα) και T2 (cascade, χρήση απορροής με ρύθμιση pH και $NO3^-$), καθώς και οι συνδυασμοί τους. Η T2 αύξησε της αποδοτικότητας χρήσης του N, P και K κατά 4,0%, 6,6% και 6,6% αντίστοιχα, σε σύγκριση με το σύστημα μονοκαλλιέργειας τομάτας (T0), μειώνοντας παράλληλα την έκπλυση τους στο περιβάλλον κατά 65,6%, 80,4% και 85,6%. Ωστόσο, η παραγωγή μειώθηκε κατά 14,6% σε σχέση με τον μάρτυρα. Συνολικά, το σύστημα αναδεικνύεται βιώσιμη λύση για πιο αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον γεωργία.

Λέξεις κλειδιά: επάλληλες καλλιέργειες, αποδοτικότητα χρήσης λιπασμάτων, έκπλυση N, P, K

EVALUATION OF NITROGEN AND PHOSPHORUS LEACHING REDUCTION IN A SOILLESS CASCADE CROPPING SYSTEM

S. Faliagka, I. Naounoulis, M. Aslanidou, F. Lazareli, N. Bakira & N. Katsoulas*

*Laboratory of Agricultural Constructions and Environmental Control, Department of Agriculture Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446, Volos, Magnesia, Greece, *nkatsoul@uth.gr*

ABSTRACT

A cascade cropping system was developed, consisting of a tomato (donor) and a cherry tomato (receiver) crop, incorporating an ion-selective sensor to monitor nitrates (NO_3^-) to enable dynamic adjustment of the nutrient solution. The treatments for the receiver crop were: (a) T_1 (control, full-strength solution) and T_2 (cascade, drainage solution with adjusted pH and NO_3^-), as well as their combinations. Treatment T_2 increased the nutrient use efficiency of N, P, and K by 4.0%, 6.6%, and 6.6%, respectively, compared to the tomato monoculture system (T_0), while simultaneously reducing their leaching into the environment by 65.6%, 80.4%, and 85.6%. However, crop yield was reduced by 14.6% compared to the control. Overall, the system demonstrates a sustainable solution for more resource-efficient and environmentally friendly agriculture.

Keywords: cascade cropping, nutrient use efficiency, N, P, K leaching

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αν και η υδροπονική καλλιέργεια έχει καθιερωθεί ως μια αποτελεσματική και ευρέως αποδεκτή μέθοδος παραγωγής, εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται από υψηλές απαιτήσεις σε νερό και θρεπτικά στοιχεία. Η ενσωμάτωση συστημάτων επάλληλων καλλιεργειών (cascade hydroponics) αναδεικνύεται ως μια καινοτόμος προσέγγιση που μπορεί να ενισχύσει ουσιαστικά την αποδοτικότητα χρήσης των εισροών, αξιοποιώντας την απορροή της κύριας καλλιέργειας για την άρδευση δευτερευουσών καλλιεργειών (Hosseinzadeh et al., 2017, Elvanidi et al., 2020).

Αντιθέτως, τα ανοιχτά και ημι-κλειστά υδροπονικά συστήματα οδηγούν συχνά σε σημαντικές απώλειες νερού και θρεπτικών συστατικών μέσω απορροών, συμβάλλοντας στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος (Puccinelli et al., 2023α). Στο πλαίσιο αυτό, τα κλειστά συστήματα αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στις θερμοκηπιακές εφαρμογές, καθώς επιτρέπουν την ορθολογική χρήση των εισροών και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής (Katsoulas et al., 2015).

Η τεχνολογία των επάλληλων καλλιεργειών βασίζεται στην επαναχρησιμοποίηση των απορροών της κύριας καλλιέργειας για την άρδευση μιας ή περισσότερων δευτερευουσών καλλιεργειών, συνήθως με μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην αλατότητα. Παρότι η επαναλαμβανόμενη χρήση του ίδιου διαλύματος μπορεί να οδηγήσει σε σταδιακή αύξηση της αλατότητας, η πρακτική αυτή συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του συνολικού όγκου αποβλήτων. Όταν η περαιτέρω αξιοποίηση του διαλύματος στο ίδιο σύστημα δεν είναι εφικτή λόγω τεχνικών περιορισμών ή αυξημένης αλατότητας, μπορεί να κατευθυνθεί προς καλλιέργειες με υψηλή ανθεκτικότητα σε αλατότητα (Massa et al., 2020, Puccinelli et al., 2023β) ή να αξιοποιηθεί σε εναλλακτικά συστήματα, όπως η παραγωγή μικροφυκών (Richa et al., 2020, Faliagka et al., 2024).

Σε σύγκριση με τα υδροπονικά συστήματα μονοκαλλιέργειας, τα συστήματα επάλληλων καλλιεργειών παράγουν αισθητά λιγότερα υγρά απόβλητα, καθώς τα θρεπτικά διαλύματα επαναχρησιμοποιούνται αντί να απορρίπτονται μετά από κάθε κύκλο. Αυτό έχει διπλό όφελος: την εξοικονόμηση πολύτιμων πόρων και τη μείωση του οικολογικού κινδύνου που συνδέεται με τις απορροές (Incrocci et al., 2003, Naounoulis et al., 2024).

Ιδιαίτερη σημασία έχει η διαχείριση των νιτρικών ιόντων, τα οποία αποτελούν ένα από τα κύρια θρεπτικά συστατικά που καταλήγουν στο περιβάλλον μέσω της απορροής. Η επαναχρησιμοποίησή τους στην άρδευση δευτερευουσών καλλιεργειών μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης, υπό την προϋπόθεση της κατάλληλης παρακολούθησης και προσαρμογής τους. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιούνται προηγμένα τεχνολογικά μέσα, όπως οι ιοντοεκλεκτικοί αισθητήρες, οι οποίοι παρέχουν συνεχή και σε πραγματικό χρόνο δεδομένα για τα επίπεδα θρεπτικών στα συστήματα υδρολίπανσης (Xu et al., 2020). Οι τεχνολογίες αυτές ενισχύουν την ακρίβεια στη διαχείριση των λιπασμάτων και συμβάλλουν στη βιωσιμότητα των υδροπονικών πρακτικών.

Ωστόσο, μια από τις βασικότερες προκλήσεις στην εφαρμογή των συστημάτων επάλληλων καλλιεργειών είναι η αξιολόγηση της ικανότητας του ανακυκλωμένου διαλύματος να καλύψει επαρκώς τις θρεπτικές ανάγκες των δευτερευουσών καλλιεργειών. Επιπλέον, καθοριστικής σημασίας είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης αναλογίας καλλιεργούμενης επιφάνειας μεταξύ των καλλιεργειών, προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη αποδοτικότητα χρήσης γης. Παρότι η τεχνολογία παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες, οι ολοκληρωμένες μελέτες που εξετάζουν παραμέτρους όπως η αποδοτικότητα νερού, η απορρόφηση των θρεπτικών ουσιών και οι βέλτιστοι συνδυασμοί καλλιεργειών, παραμένουν περιορισμένες (Naounoulis et al., 2024). Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην αξιολόγηση

της μείωσης της έκπλυσης αζώτου και φωσφόρου σε ένα σύστημα επάλληλης υδροπονικής καλλιέργειας που περιλαμβάνει μία κύρια καλλιέργεια τομάτας και μία δευτερεύουσα καλλιέργεια τοματινιού. Πέραν των θρεπτικών απωλειών, εξετάστηκε επίσης η κατανάλωση νερού και η συνολική παραγωγικότητα του συστήματος. Τα αποτελέσματα της μελέτης παρέχουν επιπλέον χρήσιμες κατευθύνσεις για τη βέλτιστη κατανομή της καλλιεργούμενης επιφάνειας μεταξύ των δύο ειδών.

2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Πειραματικός Σχεδιασμός

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο θερμοκηπιακό πάρκο του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στην περιοχή του Βελεστίνου (39° 22', 22° 44', 85 μ.). Η μεταφύτευση της κύριας (*Solanum lycopersicum* cv. Ekstasis x Defensor) και της δευτερεύουσας (*Solanum lycopersicum* cv. Mojito x Defensor) καλλιέργειας πραγματοποιήθηκε στις 13 Μαρτίου 2024, σε δύο γοτθικού τύπου θαλάμους θερμοκηπίου από πολυαιθυλένιο, συνολικής, και καλλιεργούμενης έκτασης 240 m^2, και 190 m^2, ο καθένας αντίστοιχα. Κάθε θάλαμος περιλάμβανε 6 υδροπονικά κανάλια. Η οροφή διέθετε συνεχές άνοιγμα για αερισμό, ενώ το σύστημα ψύξης αποτελούνταν από υγρή παρειά και ανεμιστήρα. Τα φυτά τοποθετήθηκαν σε κύβους πετροβάμβακα (7,5x7,5 cm) και εν συνεχεία σε σάκους πετροβάμβακα (Grodan International, Roermond, Ολλανδία). Η πυκνότητα φύτευσης ήταν 2,5 φυτά ανά m^2. Το κλίμα (Sercom, Ολλανδία), και το σύστημα άρδευσης (Argos Electronics, Αθήνα, Ελλάδα) ρυθμίζονταν αυτόματα. Η μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας στον θάλαμο της τομάτας ήταν 23,4±0,06°C με σχετική υγρασία 71,7±0,23%, ενώ στον θάλαμο της τοματινιού ήταν 26,4±0,08°C με σχετική υγρασία 49,7±0,19%. Για την αξιολόγηση της επίδρασης της επαναχρησιμοποίησης των απορροών της κύριας καλλιέργειας τομάτας (T_0) στην ανάπτυξη της δευτερεύουσας καλλιέργειας τοματινιού, εφαρμόστηκαν δύο πειραματικές μεταχειρίσεις, (α) T_1: ο μάρτυρας, όπου τα φυτά τοματινιού αρδεύτηκαν με τυπικό υδροπονικό θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται σε ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας τομάτας, και (β) T_2: η μεταχείριση της επάλληλης καλλιέργειας (cascade), όπου τα φυτά τοματινιού αρδεύτηκαν με 100% ανακυκλωμένο θρεπτικό διάλυμα από την κύρια καλλιέργεια, αφού προηγουμένως έγινε ρύθμιση του pH και της συγκέντρωσης νιτρικών (NO_3^-). Επιπλέον, μελετήθηκε ο συνδυασμός των δυο καλλιεργειών λαμβάνοντας υπόψιν την ορθή αναλογία καλλιεργούμενης επιφάνειας (T_3).

Για την προετοιμασία του διαλύματος άρδευσης της μεταχείρισης T_2, απαιτήθηκε προσαρμογή των επιπέδων NO_3^- στην απορροή της τομάτας (T_0), χρησιμοποιώντας έναν ιοντοεκλεκτικό αισθητήρα ειδικό για νιτρικά ιόντα (s::can GmbH, Βιέννη, Αυστρία), ενσωματωμένο στη κεφαλή υδρολίπανσης. Αρχικά, το pH ρυθμιζόταν ώστε να βρίσκεται εντός του βέλτιστου εύρους για την απορρόφηση των θρεπτικών. Στη συνέχεια, γινόταν μέτρηση των συγκεντρώσεων των NO_3^-. Σε περιπτώσεις που η συγκέντρωση των NO_3^- υπερέβαινε τα επιθυμητά όρια, πραγματοποιούνταν αραίωση με προσθήκη νερού. Αντιθέτως, όταν τα επίπεδα των NO_3^- ήταν χαμηλότερα, προστίθετο συμπληρωματικό πυκνό διάλυμα. Πριν από τη διανομή του προσαρμοσμένου διαλύματος στα φυτά της μεταχείρισης T_2, καταγράφονταν ο όγκος του προστιθέμενου νερού, το τελικό pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και η συγκέντρωση των NO_3^-.

Η κύρια καλλιέργεια τομάτας (T_0) και η μεταχείριση μάρτυρας T_1 του τοματινιού αρδεύτηκαν με το εξής θρεπτικό διάλυμα για καλλιέργειες τομάτας σε ανοιχτά

συστήματα:12,9 mM N- NO_3^-, 1,0 mM N-NH_4^+, 1,5 mM P-$H_2PO_4^-$, 4,5 mM S-SO_4^{2-}, 4,9 mM Ca^{2+}, 7,5 mM K^+, 3,0 mM Mg^{2+}, 0,7 μM Cu^{2+}, 15,0 μM Fe^{2+}, 12,0 μM Mn^{2+}, 0,5 μM Mo^{2+} και 4,0 μM Zn^{2+}. Η μέση σύσταση του θρεπτικού διαλύματος της μεταχείρισης T_2 ήταν:13,5 mM N- NO_3^-, 0,27 mM N-NH_4^+, 0,78 mM P-$H_2PO_4^-$, 5,6 mM Ca^{2+}, 3,9 mM K^+. Για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του συστήματος επάλληλων καλλιεργειών πραγματοποιήθηκε εβδομαδιαία παρακολούθηση παραμέτρων, όπως η έκπλυση αζώτου και φωσφόρου, η αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων και η παραγωγικότητα των καλλιεργειών, καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

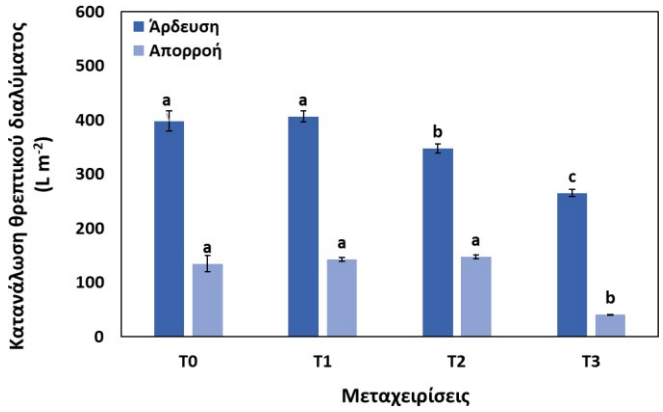
2.2.Στατιστική Ανάλυση

Η σύγκριση των μέσων όρων πραγματοποιήθηκε με ανάλυση One Way ANOVA σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($p \leq 0,05$), με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS (Statistical Package for Social Sciences, IBM, Armonk, NY, ΗΠΑ). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος LSD (Least Significant Difference) στο επίπεδο σημαντικότητας 5,0%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Διαχείριση θρεπτικού διαλύματος

Ένας σημαντικός παράγοντας στον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού συστήματος επάλληλων καλλιεργειών είναι η επιλογή της κατάλληλης αναλογίας μεταξύ των δυο καλλιεργούμενων επιφανειών. Αυτή η ισορροπία διασφαλίζει ότι η απορροή, πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, της κύριας καλλιέργειας μπορεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες της δευτερεύουσας καλλιέργειας. Στην παρούσα μελέτη, ο συνολικός όγκος άρδευσης και απορροής της κύριας καλλιέργειας τομάτας (T_0) ήταν 398,4 L m^{-2} και 134,5 L m^{-2} αντίστοιχα. Για την υδρολίπανση της μεταχείρισης T_2, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 348,0 L m^{-2}. Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι η απορροή από 1 m^2 της κύριας καλλιέργειας θα μπορούσε να αρδεύσει 0,4 m^2 της δευτερεύουσας καλλιέργειας. Σημαντικό είναι ότι μόνο το 10% του αρχικού όγκου άρδευσης χάθηκε στο περιβάλλον, σε σύγκριση με ένα τυπικό ποσοστό απορροής 33,8% (Σχήμα 1).



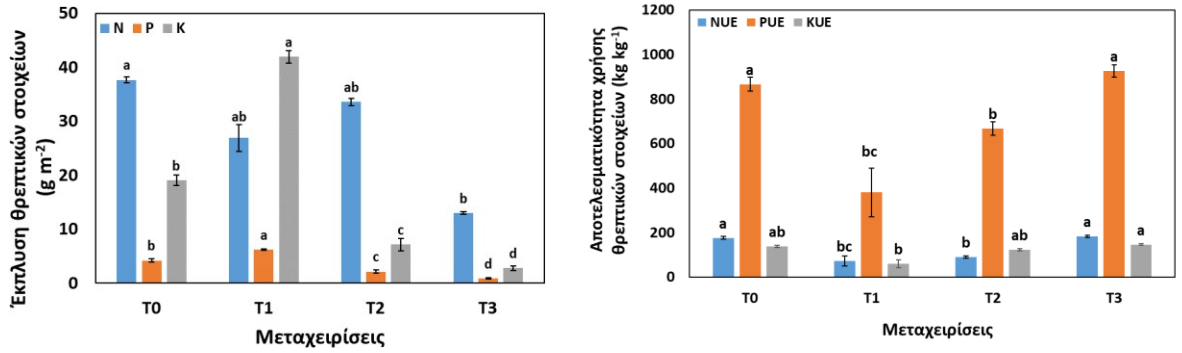
Σχήμα 1. Συνολική κατανάλωση θρεπτικού διαλύματος (L m^{-2}) που καταγράφηκε για την καλλιέργεια τομάτας (T_0), και τις μεταχειρίσεις τοματινιού (T_1: μάρτυρας, T_2: cascade) και το σύστημα επάλληλων καλλιεργειών (T_3).

Λίγες μελέτες έχουν διερευνήσει τις βέλτιστες αναλογίες για συστήματα επάλληλων καλλιεργειών. Για παράδειγμα, οι García-Caparrós et al. (2018) χρησιμοποίησαν μια αναλογία 1:4 με δενδρολίβανο που αρδευόταν από απορροές υδροπονικής καλλιέργειας

πεπονιού. Οι Incrocci et al. (2003) έδειξαν ότι η απορροή από ένα ημι-κλειστό σύστημα καλλιέργειας τομάτας θα μπορούσε να καλύψει έως και το 50% των αναγκών μιας δευτερεύουσας καλλιέργειας τομάτας. Πιο πρόσφατα, οι Naounoulis et al. (2024) εντόπισαν αναλογία επιφανειών 3:1 μεταξύ αγγουριού (κύρια καλλιέργεια) και πεπονιού (δευτερεύουσα καλλιέργεια).

3.1 Έκπλυση και Αποδοτικότητα Χρήσης Θρεπτικών Στοιχείων

Το Σχήμα 2(α) παρουσιάζει τις συνολικές απορρίψεις αζώτου (N), φωσφόρου (P) και καλίου (K) στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου για την κύρια καλλιέργεια, τη δευτερεύουσα καλλιέργεια και το σύστημα επάλληλων καλλιεργειών. Το σύστημα επάλληλων καλλιεργειών (T_3) παρουσίασε σημαντική μείωση στην έκπλυση θρεπτικών στοιχείων σε σύγκριση με όλες τις μονοκαλλιέργειες και τις μεταχειρίσεις της δευτερεύουσας καλλιέργειας. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μείωση 66%, 80%, και 86% στις απώλειες αζώτου, φωσφόρου και καλίου, αντίστοιχα, σε σχέση με τη μονοκαλλιέργεια τομάτας (T_0). Τα ευρήματα αυτά υποδεικνύουν ότι το σύστημα επάλληλων καλλιεργειών συμβάλλει ουσιαστικά στον περιορισμό της έκπλυσης βασικών μακροθρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον, που σχετίζονται με τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων επάλληλων καλλιεργειών στη μείωση των απωλειών θρεπτικών και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος έχει επιβεβαιωθεί και από προηγούμενες μελέτες (Incrocci et al., 2003; Muñoz et al., 2010; García-Caparrós et al., 2015; Elvanidi et al., 2020; Naounoulis et al., 2024).



(α) (β)

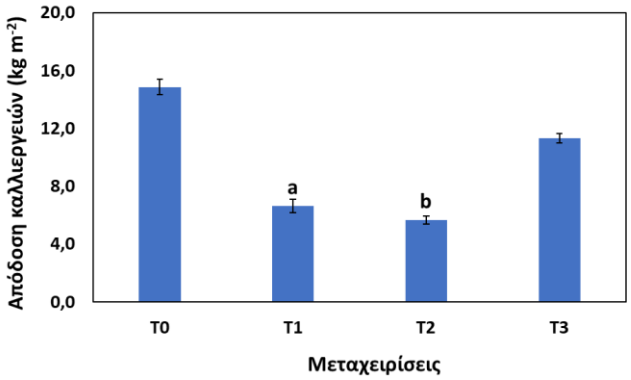
Σχήμα 2. (α) Έκπλυση θρεπτικών στοιχείων (g m^{-2}) αζώτου (N), φωσφόρου (P) και καλίου (K) στο περιβάλλον και (β) Αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE, kg kg^{-1}), φωσφόρου (PUE, kg kg^{-1}) και καλίου (KUE, kg kg^{-1}), όπως καταγράφηκαν για την καλλιέργεια τομάτας (T_0), και τις μεταχειρίσεις τοματινιού (T_1: μάρτυρας, T_2: cascade) και το σύστημα επάλληλων
καλλιεργειών (T_3).

Ομοίως, η αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE), φωσφόρου (PUE) και καλίου (KUE) βελτιώθηκε κατά 4,0%, 6,6% και 6,6% αντίστοιχα στο σύστημα επάλληλων καλλιεργειών σε σύγκριση με τη μονοκαλλιέργεια τομάτας. Παρόλο που αυτές οι αυξήσεις δεν ήταν στατιστικά σημαντικές σε σχέση με τη μονοκαλλιέργεια τομάτας, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση συγκρίνοντας το σύστημα επάλληλων καλλιεργειών με τη μονοκαλλιέργεια τοματινιού, με αύξηση της NUE, PUE και KUE κατά 60,7%, 59,0% και 59,7% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τα ευρήματα των Naounoulis et al. (2024), οι οποίοι κατέγραψαν αύξηση 22% στην NUE και PUE συγκρίνοντας ένα σύστημα επάλληλων

καλλιεργειών αγγουριού–πεπονιού με μια μονοκαλλιέργεια αγγουριού. Συνολικά, η αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων στο σύστημα των επάλληλων καλλιεργειών δεν διέφερε στατιστικά σημαντικά από αυτές της μονοκαλλιέργειας τομάτας, υποδηλώνοντας ότι η τομάτα, ως κύρια καλλιέργεια, μπορεί να υποστηρίξει επαρκώς τη συγκαλλιέργεια τοματινιού σε αναλογία κατανομής 1:0,4 m^2.

3.2 Απόδοση καλλιέργειας

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, οι τελικές αποδόσεις των δύο μεταχειρίσεων τοματινιού παρουσίασαν σημαντικές διαφορές, με την μεταχείριση του μάρτυρα (T_1) να αποδίδει 6,6 kg m^{-2} και τη μεταχείριση T_2 5,7 kg m^{-2}, αντιστοιχώντας σε μείωση της απόδοσης κατά 14,6%. Η μείωση στην απόδοση της μεταχείρισης T_2 μπορεί να αποδοθεί στις σχετικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα άρδευσης όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας. Αυτό επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα του Σχήματος 2(α), όπου η έκπλυση καλίου ήταν σημαντικά χαμηλότερη στη μεταχείριση T_2, γεγονός που υποδηλώνει την ανεπαρκή διαθεσιμότητα καλίου, ενός κρίσιμου μακροθρεπτικού για την ανάπτυξη των καρπών.



Σχήμα 3. Συνολική απόδοση (kg m^{-2}) που καταγράφηκε για την καλλιέργεια τομάτας (T_0), και τις μεταχειρίσεις τοματινιού .(T_1: μάρτυρας, T_2: cascade) και το σύστημα επάλληλων καλλιεργειών (T_3).

Τα αποτελέσματα αυτά διαφέρουν από αυτά των Naounoulis et al. (2024), οι οποίοι δεν ανέφεραν σημαντικές διαφορές στις αποδόσεις της δευτερεύουσας καλλιέργειας στο σύστημα τους. Ωστόσο, αυτή η διαφορά οφείλεται πιθανόν στα ειδικά χαρακτηριστικά των καλλιεργειών. Η τομάτα είναι γνωστή για τις αυξημένες ανάγκες σε θρεπτικά στοιχεία, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν σημαντική εξάντληση των θρεπτικών στο διάλυμα απορροής, ειδικά όταν αυτό ανακυκλώνεται, περιορίζοντας τη διαθεσιμότητα βασικών στοιχείων για τη δευτερεύουσα καλλιέργεια. Επιπλέον, οι ανάγκες σε κάλιο για το πεπόνι είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με το αγγούρι, ενώ στον συνδυασμό τομάτας – τοματινιού της παρούσας έρευνας, οι ανάγκες των δύο καλλιεργειών είναι παρόμοιες. Συνεπώς, τα μειωμένα επίπεδα θρεπτικών, ιδιαίτερα του καλίου, στο ανακυκλωμένο διάλυμα απορροής του συστήματος, πιθανόν συνέβαλαν στην παρατηρούμενη μείωση της παραγωγικότητας στη μεταχείριση T_2.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε τις δυνατότητες των συστημάτων επάλληλων καλλιεργειών να ενισχύσουν την αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων και να περιορίσουν τις περιβαλλοντικές απώλειες. Σε σύγκριση με τα συστήματα μονοκαλλιέργειας, η προσέγγιση ‘cascade’ μείωσε σημαντικά την έκπλυση αζώτου, φωσφόρου και καλίου. Παρά τη βελτίωση

της αποδοτικότητας των εισροών, παρατηρήθηκε μείωση της παραγωγικότητας της δευτερεύουσας καλλιέργειας τοματινιού, πιθανώς λόγω ελλείψεων, κυρίως καλίου. Ο συνδυασμός τομάτας-τοματινιού παρουσίασε προκλήσεις λόγω των παρόμοιων θρεπτικών απαιτήσεών τους, σε αντίθεση με άλλους συνδυασμούς καλλιεργειών που έχουν μελετηθεί στο παρελθόν. Παρά τις απώλειες στην απόδοση, τα περιβαλλοντικά οφέλη και η βελτίωση στην αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων υποστηρίζουν την περαιτέρω διερεύνηση αυτών των συστημάτων. Μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να επικεντρωθούν στη βελτιστοποίηση της στρατηγικής υδρολίπανσης και στην αξιολόγηση ευρύτερων συνδυασμών καλλιεργειών. Τα συστήματα αυτά αποτελούν μια βιώσιμη εναλλακτική για καλλιέργεια υπό συνθήκες περιορισμένων πόρων.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος του έργου ECONUTRI, το οποίο έχει λάβει χρηματοδότηση από το πρόγραμμα καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο της Συμφωνίας Επιχορήγησης Αρ. 101081858.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Elvanidi A., Reascos C.M.B., Gourzoulidou E., Kunze A., Max J.F.J., Katsoulas, N., 2020. *Implementation of the circular economy concept in greenhouse hydroponics for ultimate use of water and nutrients.* Horticulturae, 6 (4):83.

Faliagka S., Kountrias G., Dimitriou E., Álvarez-Gil M., Blanco-Vieites M., Magrassi F., Katsoulas N., 2024. *Development of a greenhouse wastewater stream utilization system for on-site microalgae-based biostimulant production.* AgriEngineering, 6 (3) (2024), pp. 1898-1923.

García-Caparrós P., Llanderal A., Maksimovic I., & Lao M. T., 2018. *Cascade cropping system with horticultural and ornamental plants under greenhouse conditions.* Water, 10(2), 125.

Hosseinzadeh S., Verheust Y., Bonarrigo G., Van Hulle S., 2017. *Closed hydroponic systems: operational parameters, root exudates occurrence and related water treatment.* Rev.Environ. Sci. Biotechnol. 16, 59–79.

Incrocci L., Pardossi A., Malorgio F., Maggini R., Campiotti C.A., 2003. *Cascade cropping system for greenhouse soilless culture.* Acta Hortic. 609, 297–300.

Katsoulas N., Savvas D., Kitta E., Bartzanas T., Kittas C., 2015. *Extension and evaluation of a model for automatic drainage solution management in tomato crops grown in semi-closed hydroponic systems.* Comput. Electron. Agric. 113, 61–71.

Massa D., Magan J.J., Montesano F.F., Tzortzakis N., 2020. *Minimizing water and nutrient losses from soilless cropping in southern Europe.* Agric. Water. Manage 241, 106395.

Munoz P., Paranjpe A., Montero J.I., Anton A., 2012. *Cascade crops: An alternative solution for increasing sustainability of greenhouse tomato crops in Mediterranean zone.* In: XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 927, pp. 801–805.

Naounoulis I., Faliagka S., Levizou E., & Katsoulas N., 2024. *Cascade hydroponics enhanced water and nutrients use efficiency in a greenhouse cucumber-melon crop combination.* Scientia Horticulturae, 338, 113822.

Puccinelli M., Carmassi G., Pardossi A., Incrocci L., 2023b. *Wild edible plant species grown hydroponically with crop drainage water in a Mediterranean climate: Crop yield, leaf quality, and use of water and nutrients.* Agric. Water. Manage 282, 108275.

Puccinelli M., Galati D., Carmassi G., Rossi L., Pardossi A., Incrocci L., 2023a. *Leaf*

production and quality of sea beet (Beta vulgaris subsp. maritima) grown with saline drainage water from recirculating hydroponic or aquaculture systems. Scientia Horticulturae 322, 112416.

Richa A., Touil S., Fizir M., Martinez V., 2020. *Recent advances and perspectives in the treatment of hydroponic wastewater: a review.* Rev. Environ. Sci. Bio/Technol. 19 (4), 945-966.

Xu K., Kitazumi Y., Kano K., Shirai O., 2020. *Automatic management of nutrient solution for hydroponics-construction of multi-ion stat.* Analytical Sciences, 36(9),

ΕΝΟΤΗΤΑ 10η

Εκπαίδευση και κατάρτιση στη γεωργική μηχανική και τη μηχανική βιο-συστημάτων

74. ΕΝΙΣΧΥΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΣΤΙΣ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ: ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ RELIEF ERASMOUS +

Δ. Μίχας, B.Paris, A. Μπαλαφούτης & I. Θέρμος

Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, 6ο χλμ. Χαριλάου – Θέρμης, 57001, Θέρμη, d.michas@certh.gr

Περίληψη

Το έργο RELIEF αποτελεί μια χρηματοδοτούμενη από την ΕΕ πρωτοβουλία Erasmus+, που στοχεύει στην ενίσχυση των γνώσεων και των δεξιοτήτων της βιοοικονομίας στις αγροτικές περιοχές, απευθυνόμενο τόσο στα Ιδρύματα Ανώτατης Εκπαίδευσης (ΑΕΙ) όσο και στην Επαγγελματική Εκπαίδευση και Κατάρτιση (ΕΕΚ). Το βασικό στάδιο του έργου περιλάμβανε την πιλοτική δοκιμή και αξιολόγηση σε διάφορες χώρες-εταίρους καθώς και τις καινοτόμες εκπαιδευτικές ενότητες που αναπτύχθηκαν από το έργο που είναι προσαρμοσμένες στην εκπαίδευση της βιοοικονομίας. Η πιλοτική δοκιμή διεξήχθη σε τέσσερις χώρες-εταίρους, με τη συμμετοχή φοιτητών, γεωπόνων, γεωργικών συμβούλων και αγροτών. Κάθε χώρα εφάρμοσε διαφορετικές εκπαιδευτικές ενότητες που κάλυπταν κρίσιμα θέματα βιοοικονομίας, όπως η βιώσιμη διαχείριση πόρων, οι πρακτικές κυκλικής οικονομίας και οι καινοτόμες γεωργικές τεχνικές. Οι συμμετέχοντες πήραν μέρος σε ένα μείγμα θεωρητικής κατάρτισης, πρακτικών επιδείξεων και ψηφιακών μαθησιακών πόρων, εξασφαλίζοντας μια ολοκληρωμένη και πρακτική μαθησιακή εμπειρία. Η φάση δοκιμής ενσωμάτωσε επίσης βρόχους ανατροφοδότησης, όπου οι μαθητές και οι εκπαιδευτικοί αξιολόγησαν τη συνάφεια, την αποτελεσματικότητα και τη δυνατότητα εφαρμογής του υλικού. Μετά το πιλοτικό στάδιο συντάχθηκαν τέσσερις εθνικές εκθέσεις, οι οποίες παρείχαν λεπτομερή ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η πιλοτική δοκιμή διευκόλυνε επίσης την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των εκπαιδευτικών ιδρυμάτων και των ενδιαφερόμενων φορέων της βιοοικονομίας, ενισχύοντας τους δεσμούς μεταξύ βιομηχανίας και εκπαίδευσης. Ωστόσο, οι διαφορές στις μαθησιακές ανάγκες μεταξύ των χωρών απαιτούσαν τοπικές προσαρμογές για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων πολιτικών, οικονομικών και βιομηχανικών συνθηκών. Ορισμένες περιοχές έδωσαν προτεραιότητα σε θέματα όπως η γεωργία ακριβείας, ενώ άλλες έδωσαν έμφαση στην ανάπτυξη προϊόντων βιολογικής βάσης. Επιπλέον, η διαδικασία βοήθησε στον εντοπισμό τομέων για βελτίωση, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης για ενισχυμένους ψηφιακούς πόρους, περισσότερο διαδραστικό περιεχόμενο και καλύτερη ευθυγράμμιση με τα υπάρχοντα προγράμματα σπουδών των ΑΕΙ και της ΕΕΚ. Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από αυτή τη διαδικασία συνέβαλαν καθοριστικά στην οριστικοποίηση του εκπαιδευτικού πλαισίου RELIEF, διασφαλίζοντας ότι το έργο θα παρέχει υψηλής ποιότητας, προσαρμόσιμο και αποτελεσματικό εκπαιδευτικό υλικό. Η επιτυχής πιλοτική εφαρμογή καταδεικνύει την αυξανόμενη ανάγκη για εκπαίδευση με επίκεντρο τη βιοοικονομία και τις δυνατότητες της συνεργασίας της ΕΕ για τη γεφύρωση των κενών γνώσεων στις αγροτικές περιοχές.

Λέξεις κλειδιά: βιοοικονομία, εκπαίδευση, κατάρτιση, ΑΕΙ, ΕΕΚ

ENHANCING BIOECONOMY EDUCATION IN RURAL AREAS: PILOT TESTING OF THE RELIEF ERASMOUS + PROJECT

D. Michas*, B. Paris, A. Balafoutis & I. Thermos

*Centre for Research and Technology, 6th km Charilaou – Thermi, 57001, Thermi, *d.michas@certh.gr*

ABSTRACT

The RELIEF project is an EU-funded Erasmus+ initiative that aims to strengthen bioeconomy knowledge and skills in rural areas, targeting both Higher Education Institutions (HEIs) and Vocational Education and Training (VET) institutions. The main phase of the project involved pilot testing and evaluation in various partner countries, as well as innovative educational modules developed by the project that are tailored to bioeconomy education. The pilot testing was conducted in four partner countries, with the participation of students, agronomists, agricultural advisors and farmers. Each country implemented different training modules covering critical bioeconomy topics, such as sustainable resource management, circular economy practices, and innovative agricultural techniques. Participants took part in a mix of theoretical training, practical demonstrations, and digital learning resources, ensuring a comprehensive and practical learning experience. The pilot testing phase also incorporated feedback loops, where students and teachers evaluated the relevance, effectiveness, and applicability of the material. Following the pilot testing phase, four national reports were compiled, providing a detailed analysis of the results. The pilot testing also facilitated the strengthening of cooperation between educational institutions and bioeconomy stakeholders, reinforcing the links between industry and education. However, variations in learning needs between countries required local adaptations to address specific political, economic, and industrial conditions. Some regions prioritized issues such as precision agriculture, while others emphasized the development of biobased products. In addition, the process helped identify areas for improvement, including the need for enhanced digital resources, more interactive content, and better alignment with existing HEI and VET curricula. The findings from this process have been crucial in finalizing the RELIEF educational framework, making sure the project will deliver high-quality, adaptable, and effective educational material. The successful pilot implementation demonstrates the growing need for education focused on the bioeconomy and the potential of EU cooperation to bridge knowledge gaps in rural areas.

Keywords: bioeconomy, education, training, HEI, VET

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία παραμένει θεμέλιο της ανθρώπινης διαβίωσης και βασικός πυλώνας για την επιχειρηματικότητα, την απασχόληση και την κοινωνική συνοχή στις αγροτικές περιοχές (European Investment Fund, 2018). Ωστόσο, ο γεωργικός τομέας στην Ευρώπη βρίσκεται αντιμέτωπος με μια σειρά από σύνθετες προκλήσεις, όπως η παγκοσμιοποίηση, η κλιματική αλλαγή, η οικονομική αστάθεια και η αυξανόμενη πίεση για αποδοτικότητα και βιωσιμότητα. Με δεδομένο ότι μέχρι το 2050 θα απαιτείται 70% περισσότερη τροφή (*The United Nations World Water Development Report. Wastewater: The Untapped Resource, UNESCO. 2017.*, n.d.) η ανάγκη για ένα νέο, βιώσιμο μοντέλο γεωργικής παραγωγής είναι επιτακτική.

Η βιοοικονομία, ως αναδυόμενη πολιτική και αναπτυξιακή έννοια, προσφέρει ένα νέο πλαίσιο για τη διαχείριση και αξιοποίηση των ανανεώσιμων βιολογικών πόρων (Patermann & Aguilar, 2018),(European Commission, 2018b). Μέσα από την παραγωγή προϊόντων βιολογικής προέλευσης, τροφίμων, υλικών και ενέργειας, η βιοοικονομία στοχεύει στην

επίτευξη ενός πιο κυκλικού και αειφόρου παραγωγικού μοντέλου (European Commission, 2018a). Ωστόσο, η επιτυχής μετάβαση προς τη βιοοικονομία προϋποθέτει υψηλά καταρτισμένο ανθρώπινο δυναμικό, με διεπιστημονικές και διατομεακές δεξιότητες, σε έναν τομέα όπου παραδοσιακά τα επίπεδα εκπαίδευσης παραμένουν χαμηλά (European Investment Fund, 2018). Η έλλειψη εξειδικευμένων προγραμμάτων σπουδών στη βιοοικονομία και η απουσία επιχειρηματικής κουλτούρας αποτελούν σοβαρά εμπόδια (Papadopoulou et al., 2018), (Mizdraković et al., 2018).

Για την ενίσχυση της βιοοικονομίας στον γεωργικό τομέα απαιτείται αναδιάρθρωση της Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης και της Επαγγελματικής Εκπαίδευσης και Κατάρτισης (ΕΕΚ), με στόχο την καλλιέργεια τεχνικών, διοικητικών και κοινωνικών δεξιοτήτων, καθώς και την ενσωμάτωση σύγχρονων προγραμμάτων κατάρτισης και συνεργασιών με τους φορείς της αγοράς (European Commission, 2018a). Η εργασία αυτή εξετάζει το ρόλο της εκπαίδευσης στη μετάβαση προς ένα βιώσιμο γεωργικό μοντέλο βασισμένο στη βιοοικονομία, αναδεικνύοντας τις ανάγκες, τις ελλείψεις και τις προτάσεις για την ενίσχυση της σχετικής κατάρτισης στον ευρωπαϊκό και εθνικό χώρο.

Το RELIEF είναι ένα ευρωπαϊκό έργο Erasmus+ διάρκειας 36 μηνών, το οποίο υλοποιείται με τη συνεργασία 17 οργανισμών από την Ελλάδα, την Ιταλία, την Πορτογαλία, την Κύπρο και τη Σουηδία. Το έργο ενώνει Ανώτατα Εκπαιδευτικά Ιδρύματα (ΑΕΙ), Ερευνητικά Ιδρύματα (ΕΙ), παρόχους Επαγγελματικής Εκπαίδευσης και Κατάρτισης (ΕΕΚ), επιχειρήσεις και εκπροσώπους του αγροτικού τομέα, διαμορφώνοντας ένα «τρίγωνο γνώσης» που στοχεύει στην υπέρβαση του κατακερματισμού της γνώσης στον γεωργικό τομέα και στη γεφύρωση της απόστασης μεταξύ ακαδημαϊκής γνώσης και εφαρμοσμένης καινοτομίας (European Investment Fund, 2018).

Στο πλαίσιο αυτό, το RELIEF αποσκοπεί στην αξιολόγηση και κάλυψη των δεξιοτήτων που απαιτούνται για την εφαρμογή της βιοοικονομίας στη γεωργία, αναπτύσσοντας μια καινοτόμο, διεπιστημονική και πρακτικά εφαρμόσιμη προσέγγιση. Στόχος είναι η δημιουργία δύο προγραμμάτων σπουδών – ενός για φοιτητές ΑΕΙ και ενός για γεωργούς και επαγγελματίες της γεωργίας μέσω της ΕΕΚ – τα οποία θα εστιάζουν σε δεξιότητες σχετικές με την καινοτομία, τη βιωσιμότητα, την ψηφιοποίηση, τις επιχειρηματικές και τις οριζόντιες δεξιότητες. Η ανάπτυξη των προγραμμάτων βασίζεται στην ανάλυση αναγκών που πραγματοποιήθηκε και θα υποστηρίζεται από εκπαιδευτική πλατφόρμα σε πέντε γλώσσες.

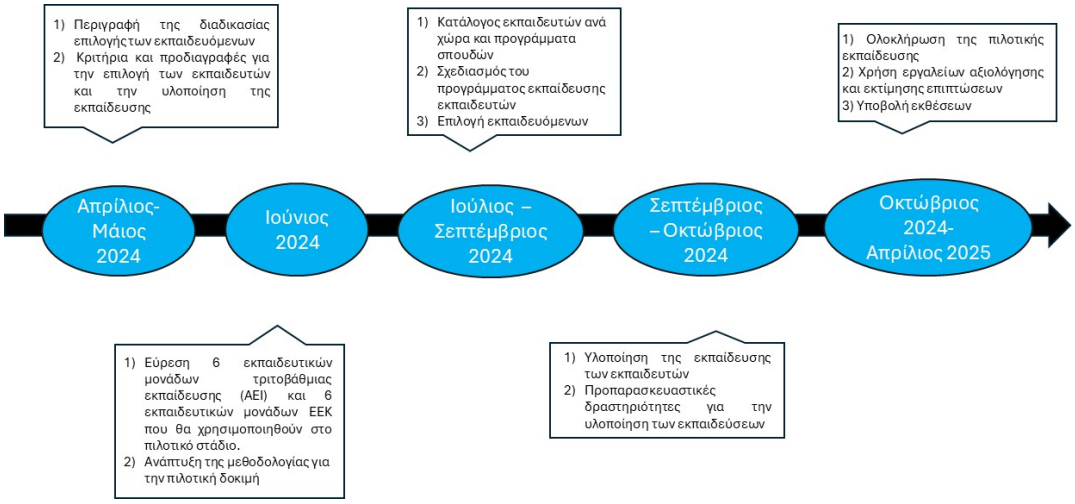
Το έργο RELIEF εισήγαγε μια σειρά από καινοτόμες εκπαιδευτικές προσεγγίσεις που αποσκοπούν στην αναβάθμιση της εκπαίδευσης στη βιοοικονομία, μέσω της ανάπτυξης μαθησιακών ενοτήτων και πόρων οι οποίοι ανταποκρίνονται στις σύγχρονες ανάγκες των ενδιαφερόμενων ομάδων του γεωργικού τομέα. Δημιουργήθηκε μια σειρά εκπαιδευτικών μονάδων επιπέδων 5 και 6 του Ευρωπαϊκού Πλαισίου Προσόντων (EFQ), οι οποίες ήταν κατάλληλες για ενσωμάτωση τόσο στην επαγγελματική εκπαίδευση και κατάρτιση όσο και στα προγράμματα των ΑΕΙ. Οι ενότητες αυτές σχεδιάστηκαν ώστε να είναι ευέλικτες, προσβάσιμες και εφαρμόσιμες σε διάφορα εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, αυξάνοντας τη χρηστικότητα και τη βιωσιμότητά τους.

Στην συγκεκριμένη εργασία, θα παρουσιαστούν τα ευρήματα από το στάδιο της πιλοτικής εφαρμογής της πρωτοβουλίας κατάρτισης RELIEF για την Ελλάδα, ενω παρουσιάζονται οι προκλησεις και τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν απο όλες τις συμμετέχοντες χώρες. Στόχος αυτής της πιλοτικής εφαρμογής ήταν η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας, της συνάφειας και της χρηστικότητας του εκπαιδευτικού υλικού, της πλατφόρμας και των μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν στο RELIEF, καθώς και ο προσδιορισμός των τομέων που χρήζουν βελτίωσης

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΑ

Η πιλοτική διαδικασία αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα στάδια κατά την υλοποίηση του έργου έχοντας ως στόχο την εξασφάλιση της αποτελεσματικής παροχής κατάρτισης στις χώρες – εταίρους που συμμετείχαν. Το στάδιο της πιλοτικής εφαρμογής διήρκησε ένα χρόνο, από τον Απρίλιο του 2024 έως και τον Απρίλιο του 2025.

Με σκοπό να υπάρξει μια δομημένη προσέγγιση και για να υπάρξουν εγγυημένα και ποιοτικά αποτελέσματα, η πιλοτική διαδικασία ακολούθησε μια κοινή μεθοδολογία που τηρήθηκε από όλους τους εταίρους. Το ολοκληρωμένο πλαίσιο περιλάμβανε διάφορα βήματα που σχεδιάστηκαν για να καθοδηγήσουν την πρωτοβουλία όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1. Η διαδικασία πιλοτικής εφαρμογής – κρίσιμα βήματα και χρονοδιάγραμμα

Όσον αφορά τις εκπαιδευτικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την πιλοτική εφαρμογή, όλες οι εκπαιδευτικές ενότητες που αναπτυχθήκαν στο έργο περιλάμβαναν τις τρεις παρακάτω:

1. Δια ζώσης διδασκαλία από τους εκπαιδευτές
2. Ασύγχρονη μέθοδος με το υλικό των διδακτικών ενοτήτων να ανεβαίνει στην δωρεάν ηλεκτρονική πλατφόρμα Relief e-platform
3. Εκπαίδευση με βάση την εργασία (work based learning)

Το υλικό που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε κατά το στάδιο της πιλοτικής εφαρμογής, αξιολογήθηκε από εξωτερικούς επιστημονικούς συνεργάτες προκειμένου να είναι υψηλού επιπέδου. Επίσης, κατά την ανάπτυξη της μεθοδολογίας τέθηκαν εξ αρχής κάποιοι βασικοί δείκτες επιδόσεων (KPIs), όπως φαίνονται και στον παρακάτω πίνακα, που αποσκοπούσαν στην αξιολόγηση της προόδου και των αποτελεσμάτων τα οποία επιτεύχθηκαν.

Πίνακας 1. Βασικοί δείκτες απόδοσης για πιλοτικές δοκιμές

Δείκτης απόδοσης	**Κατώτερο όριο**

Αριθμός φοιτητών τριτοβάθμιας εκπαίδευσης, γεωπόνων και γεωργικών συμβούλων	Συνολικά 450 εκπαιδευόμενοι, εκ των οποίων: • Περίπου 50% φοιτητές τριτοβάθμιας εκπαίδευσης, γεωπόνοι και γεωργικοί σύμβουλοι • Περίπου 50% αγρότες
Αριθμός αγροτών	
Αριθμός εγγεγραμμένων εκπαιδευόμενων στηνηλεκτρονική πλατφόρμα	450 εγγεγραμμένοι χρήστες
Αριθμός εκπαιδευόμενων που συμμετέχουν στα μαθήματα κατάρτισης (δια ζώσης και εκπαίδευση με βάση την εργασία)	450 εκπαιδευόμενων
Αριθμός εκπαιδευόμενων που ολοκλήρωσαν με επιτυχία την εκπαίδευση (δια ζώσης, ασύγχρονη εκπαίδευση και εκπαίδευση με βάση την εργασία)	75% του συνολικού αριθμού των συμμετεχόντων

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι εκπαιδευτικές ενότητες που επιλέχθηκαν στην Ελλάδα για την πιλοτική εφαρμογή σε επίπεδο ΑΕΙ θεωρήθηκαν ως οι πιο κατάλληλες για να καλύψουν τις ανάγκες των φοιτητών, γεωπόνων και γεωργικών συμβούλων. Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο έλαβε το γεγονός πως οι εκπαιδευτές που εργάστηκαν ήταν έμπειροι επιστήμονες, με εμπειρία στη διδασκαλία ενώ αρκετοί από αυτούς εργάστηκαν και κατά την ανάπτυξη του εκπαιδευτικού υλικού.

Όσον αφορά τις εκπαιδευτικές ενότητες που επιλέχθηκαν σε επίπεδο ΕΕΚ, απευθυνόμενες σε αγρότες, επιλέχθηκαν με κριτήριο το ενδιαφέρον των επαγγελματιών αλλά και τις επαγγελματικές ανάγκες που προσπαθούν να καλύψουν. Επιπλέον η επιλογή μια εκπαιδευτικής ενότητας που ανήκει στις ψηφιακές δεξιότητες βασίστηκε στο γεγονός ότι στην Ελλάδα υπάρχει μια αυξημένη ανάγκη για ψηφιακή μεταμόρφωση του γεωργικού τομέα ενώ πολλοί γεωργοί εξακολουθούν να στερούνται των βασικών ψηφιακών δεξιοτήτων που απαιτούνται προκειμένου να επωφεληθούν πλήρως από τα σύγχρονα εργαλεία, τις ψηφιακές πλατφόρμες και νέες πρακτικές. Εστιάζοντας με αυτό τον τρόπο στις ψηφιακές δεξιότητες, η πιλοτική εφαρμογή στοχεύει να καλύψει το κρίσιμο κενό δίνοντας την δυνατότητα στους γεωργούς να βελτιώσουν την παραγωγικότητά τους, έχοντας πρόσβαση σε χρήσιμα δεδομένα. Μέσω των ψηφιακών εργαλείων και την πλοήγηση σε ψηφιακές πλατφόρμες (π.χ. μετεωρολογικά στοιχεία) έχουν την δυνατότητα να υιοθετήσουν έξυπνες γεωργικές τεχνολογίες προς όφελός τους.

Οι παρακάτω επιλεγμένες εκπαιδευτικές ενότητες ευθυγραμμίζονται με τις τρέχουσες εθνικές και ευρωπαϊκές πολιτικές για την αναβάθμιση των δεξιοτήτων των επαγγελματιών.

Πολύ σημαντικό στάδιο κατα την υλοποίηση της πιλοτικής φάσης του έργου, αποτέλεσε η στρατηγική επικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκε απο όλους τους εταίρους για την έυρεση των συμμετεχόντων. Το κύριο κοινό στο οποίο απευθυνόταν, περιελάμβανε ενδιαφερόμενους φορείς απο τους τομείς της βιοοικονομίας και της γεωργίας όπως αγρότες, γεωπόνους καθώς και φοιτητές τριτοβάθμιας εκπαίδευσης. Πιο συγκεκριμένα για την Ελλάδα, χρησιμοποιήθηκαν ως εργαλεία τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, ενημερωτικά δελτία, και άρθρα ειδήσεων.

Πίνακας 2. Επιλεγμένες εκπαιδευτικές ενότητες για την Ελλάδα

Εκπαιδευτικό Επίπεδο	**Εκπαιδευτική Κατηγορία**	**Εκπαιδευτική Ενότητα**	**Περίοδος εφαρμογής**		**Διάρκεια**	**EQF**
			Έναρξη	**Τέλος**		
ΕΕΚ	Διατήρηση της γεωργικής βιωσιμότητας, διαχείριση φυσικών πόρων και μέτρα για την κλιματική αλλαγή	VET-A1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην γεωργία	12/12/24	05/02/25	20 ώρες	5
	Βιοικονομία, κυκλική οικονομία και προϊόντα βιολογικής βάσης	VET- C1 Κυκλική Οικονομία	06/12/24	31/01/25	20 ώρες	5
	Οριζόντιες Δεξιότητες	VET – E4 Ψηφιακές δεξιότητες	29/03/25	15/04/25	20ώρες	5
ΑΕΙ	Ψηφιακές τεχνολογίες και τεχνητή νοημοσύνη	HEI-D1 Τεχνολογία Ακριβείας και μέγα-δεδομένα	3/10/24	16/1/25	60ώρες	6
	Γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος	HEI-D1 Εισαγωγή στη γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος: αρχές, τεχνικές και καινοτομίες	30/10/24	02/01/25	60ώρες	6
		HEI-D2 Προηγμένες τεχνικές στην κάθετη γεωργία: Από τον φωτισμό LED έως τη θρέψη φυτών	30/10/24	02/01/25	60ώρες	6

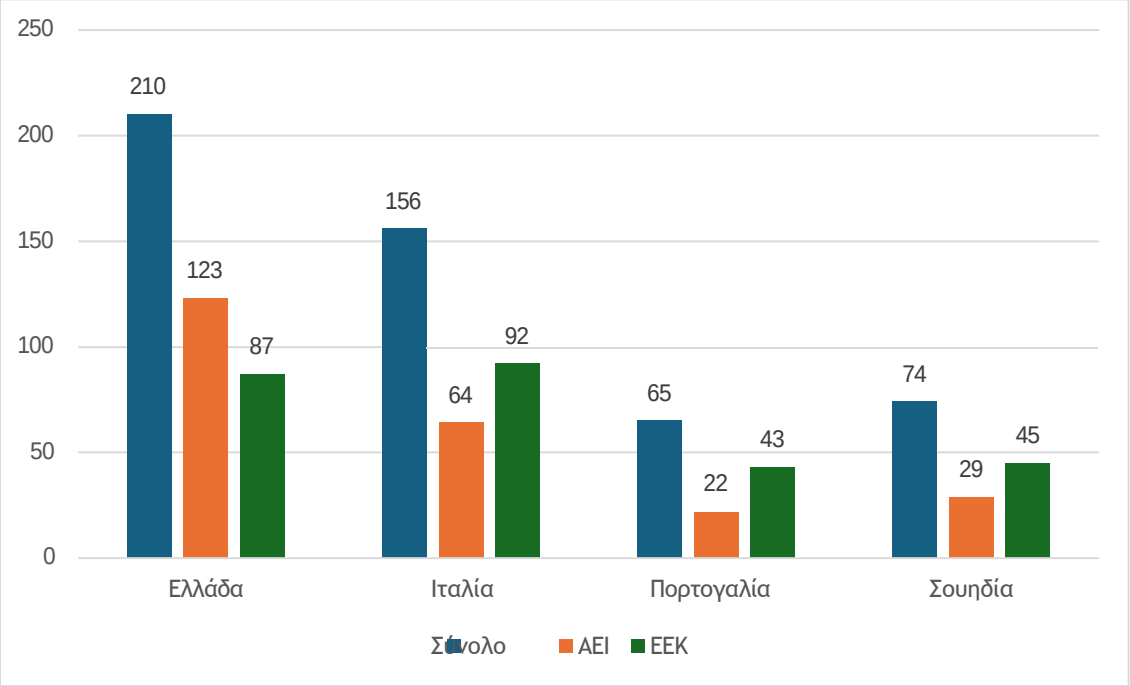
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προκλήσεις και άλλες παρατηρήσεις για όλες τις χώρες

Μετά το πέρας του έργου Relief και την ολοκλήρωση της πιλοτικής εφαρμογής σε όλες τις χώρες εταίρους που συμμετείχαν είχαν ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν κάποια συμπεράσματα.

Συνολικά και για τις 4 χώρες, 505 μαθητές συμμετείχαν στις πιλοτικές δραστηριότητες, αριθμός υψηλότερος από τον αρχικό κατώτερο στόχο των 450 που είχε τεθεί. Αυτό περιλάμβανε 238 συμμετέχοντες σε επίπεδο τριτοβάθμιας εκπαίδευσης και 267 σε επίπεδο ΕΕΚ (γεωργούς, και επαγγελματίες), με τη συμμετοχή σε επίπεδο χώρας να κατανέμεται μεταξύ Ελλάδας, Ιταλίας, Πορτογαλίας και Σουηδίας.

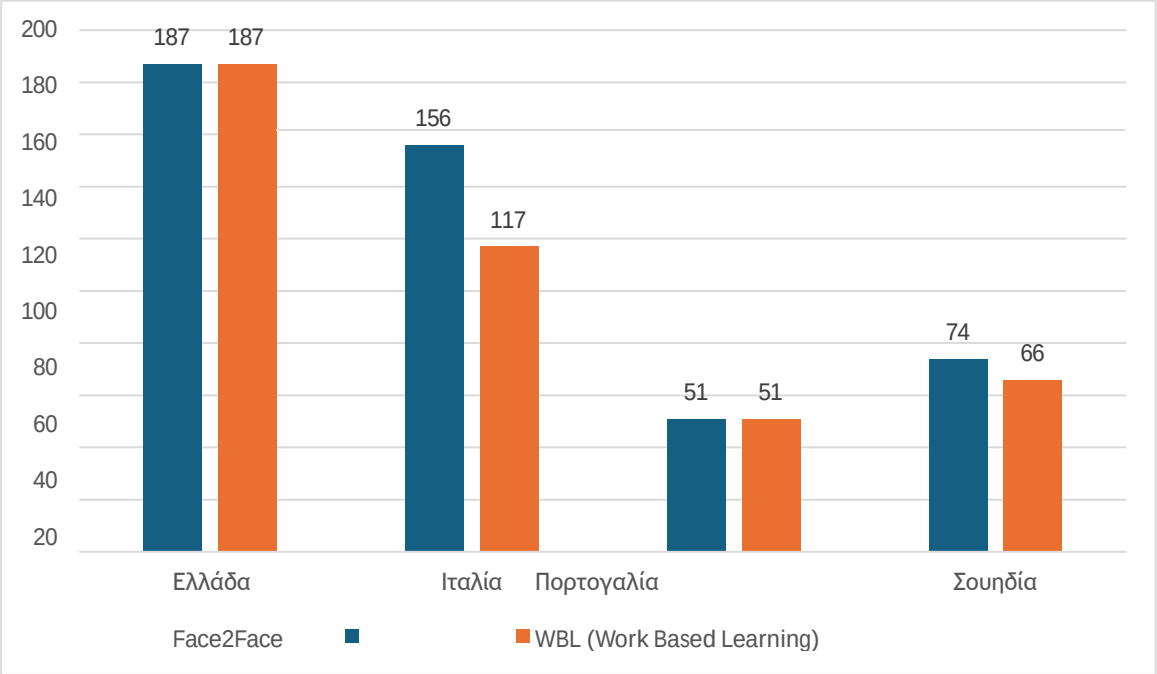
Επιπλέον, συμμετείχαν 36 διεθνείς φοιτητές από αφρικανικά πανεπιστήμια και την Κίνα, αν και δεν υπολογίστηκαν στους επίσημους δείκτες απόδοσης. Ο αριθμός των μαθητών που εγγράφηκαν στην πύλη ηλεκτρονικής μάθησης RELIEF έφτασε τους 538, ξεπερνώντας τον κατώτερο στόχο που είχε τεθεί. Σημαντικό αποτέλεσμα ήταν το υψηλό ποσοστό ολοκλήρωσης των μαθησιακών ενοτήτων (Learning Units), με 552 ολοκληρώσεις που αντιπροσωπεύουν επίτευξη 124% έναντι του στόχου που είχε τεθεί αρχικά, υποδηλώνοντας ότι πολλοί μαθητές ολοκλήρωσαν περισσότερες από μία διδακτικές ενότητες (LU).



Σχήμα 1. Αριθμός συμμετεχόντων στις πιλοτικές δραστηριότητες των 4 χωρών.

Επιπλέον, οι μαθητές είχαν την δυνατότητα να αξιολογηθούν μετά το πέρας της πιλοτικής εφαρμογής, πετυχαίνοντας μια εξαιρετική απόδοση με μέσο ποσοστό επιτυχίας 90,61%, ξεπερνώντας τον στόχο του 80%.

Όσον αφορά τις μορφές παράδοσης που χρησιμοποιήθηκαν, 468 μαθητές συμμετείχαν σε δια ζώσης εκπαίδευση (Face2Face) και 421 σε μάθηση με βάση την εργασία (WorkBasedLearning), με το 85,13% των μαθητών να ολοκληρώνουν και τις δύο συνιστώσες. Ωστόσο, μόνο το 56,81% των συμμετεχόντων ολοκλήρωσε και τις τρεις μορφές εκπαίδευσης (F2F, ηλεκτρονική μάθηση και WBL).



Σχήμα 2. Αριθμός μαθητών που συμμετείχαν σε εκπαιδευτικά προγράμματα (δια ζώσης και μάθηση με βάση την εργασία)

Τα ποσοστά ολοκλήρωσης διέφεραν σημαντικά ανά χώρα, με την Πορτογαλία να πετυχαίνει 100% ολοκλήρωση τόσο σε επίπεδο τριτοβάθμιας εκπαίδευσης όσο και σε επίπεδο ΕΕΚ, ενώΙταλία και η Σουηδία παρουσίασαν πολύ χαμηλότερα ποσοστά ολοκλήρωσης, ιδίως στον τομέα της ΕΕΚ.

Η ικανοποίηση των μαθητών από την αποτελεσματικότητα του προγράμματος κατάρτισης έφτασε το 71,8%, με βάση τις θετικές αξιολογήσεις της δομής, του περιεχομένου και των μεθοδολογιών της κατάρτισης. Αυτή η ανατροφοδότηση εξακολουθεί να δείχνει ένα υψηλό επίπεδο αποδοχής ενώ τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη συνάφεια και την ποιότητα του πλαισίου κατάρτισης RELIEF, ενώ παράλληλα επισημαίνουν τομείς, ιδίως τη συνέπεια ολοκλήρωσης σε όλες τις περιφέρειες, όπου περαιτέρω προσαρμογές θα μπορούσαν να ενισχύσουν τον αντίκτυπο και την επεκτασιμότητα.

Προκλήσεις και άλλες παρατηρήσεις για την Ελλάδα

Για την σωστή καταγραφή και κατανόηση των προκλήσεων και των παρατηρήσεων που συλλέχθηκαν, χωρίστηκαν στις δυο μεγάλες κατηγορίες. Σε αυτές που αναφέρονται στην κατάρτιση της Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης (ΑΕΙ) και σε αυτές που αναφέρονται στην Επαγγελματική Εργασία και Κατάρτιση (ΕΕΚ).

Όσον αφορά την Τριτοβάθμια Εκπαίδευση (ΑΕΙ), μια από τις κύριες προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια της πιλοτικής φάσης ήταν η εξασφάλιση της σταθερής συμμετοχής, καθώς τα αρχικά υψηλά επίπεδα εγγραφών μειώθηκαν σταδιακά με την πάροδο του χρόνου. Η μείωση αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η αρχική περιέργεια δεν διατηρήθηκε και στην αντίληψη ότι απαιτείται υπερβολικός χρόνος από τους συμμετέχοντες.

Ανταποκρινόμενοι στις αναδυόμενες ανάγκες, οι εκπαιδευτές των ΑΕΙ εμπλούτισαν τις δια ζώσης συνεδρίες με συμπληρωματικό υλικό, παρέχοντας πιο λεπτομερείς εξηγήσεις για τις πτυχές της βιοοικονομίας που επισημάνθηκαν κατά τη διάρκεια των μαθημάτων τόσο στην

τάξη όσο και κατα την υλοποίηση εργασιακών δραστηριοτήτων μάθησης.

Συνολικά, η υλοποίηση θεωρήθηκε επιτυχής, καθώς οι φοιτητές εισήχθησαν σε νέες γνώσεις σχετικά με τη βιώσιμη γεωργία, τη βιοοικονομία καθώς και τομείς που δεν περιλαμβάνονται επί του παρόντος στα υφιστάμενα προγράμματα σπουδών. Η κατάρτιση προκάλεσε σημαντικό ενδιαφέρον, με αρκετούς φοιτητές να εκφράζουν την προθυμία τους να εκπονήσουν μεταπτυχιακές διατριβές σε θέματα που σχετίζονται με τη βιοοικονομία. Το πιλοτικό πρόγραμμα απέδειξε ότι οι καταρτιζόμενοι ήταν σε θέση να αποκτήσουν μια κατανόηση της βιοοικονομίας ως γενικής έννοιας, ενσωματώνοντας και επεκτείνοντας αποτελεσματικά στοιχεία του υφιστάμενου ακαδημαϊκού τους υπόβαθρου.

Η πιλοτική φάση σε επίπεδο επαγγελματικής εκπαίδευσης και κατάρτησης (ΕΕΚ), αντιμετώπισε αρκετές προκλήσεις, κυρίως όσον αφορά την τοποθεσία και την προσβασιμότητα, καθώς η προσέγγιση των αγροτών στις αγροτικές περιοχές αποδείχθηκε δύσκολη. Για να μετριαστεί αυτό το πρόβλημα, οι εταίροι φρόντισαν ώστε οι δραστηριότητες κατάρτισης να πραγματοποιηθούν απευθείας εντός των κοινοτήτων αυτών.

Ένας άλλος περιορισμός που εντοπίστηκε ήταν το σχετικά χαμηλό ποσοστό ανταπόκρισης στο τελικό ερωτηματολόγιο αξιολόγησης, το οποίο οι συμμετέχοντες θεώρησαν υπερβολικά μακροσκελές. Επιπλέον, η συμμετοχή στις ενότητες ηλεκτρονικής μάθησης ήταν χαμηλότερη σε σύγκριση με τις δραστηριότητες δια ζώσης και μάθησης στο χώρο εργασίας (WBL). Προκειμένου να βελτιωθεί η προσβασιμότητα και η κατανόηση, έγιναν τεχνικές προσαρμογές στο εκπαιδευτικό υλικό, όπως η απλοποίηση της γλώσσας, η ενσωμάτωση οπτικών βοηθημάτων, η παροχή βήμα προς βήμα επιδείξεων και η πρόσθετη πρακτική υποστήριξη.

Παρά τις προκλήσεις αυτές, η υλοποίηση της πιλοτικής φάσης θεωρήθηκε επιτυχής, καθώς γεφύρωσε αποτελεσματικά το χάσμα μεταξύ της ψηφιακής εκπαίδευσης και των πρακτικών αναγκών της αγροτικής κοινότητας. Το εκπαιδευτικό περιεχόμενο έτυχε θετικής υποδοχής, με τους αγρότες να συμμετέχουν ενεργά και να παρέχουν ιδιαίτερα ευνοϊκά σχόλια, ιδίως όσον αφορά τις δραστηριότητες WBL, οι οποίες συνδύασαν επιτυχώς τις θεωρητικές γνώσεις με την πρακτική εφαρμογή. Η συνεργασία με τους τοπικούς φορείς συνέβαλε περαιτέρω στην ισχυρή συμμετοχή και διευκόλυνε την ομαλή υλοποίηση. Συνολικά, η πιλοτική διαδικασία επικύρωσε τόσο τη συνάφεια του περιεχομένου της κατάρτισης όσο και το ενδιαφέρον της αγροτικής κοινότητας για την απόκτηση ψηφιακών δεξιοτήτων προκειμένου να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της σύγχρονης γεωργίας, αποτελώντας έτσι ένα σημαντικό βήμα προς την υποστήριξη της μεταμόρφωσης του τομέα.

Το πιλοτικό πρόγραμμα του έργου RELIEF υλοποιήθηκε με επιτυχία σε Ιταλία, Ελλάδα, Πορτογαλία και Σουηδία, δοκιμάζοντας τις διαφορετικές μεθόδους εκπαίδευσης και αξιολόγησης, τα εκπαιδευτικά υλικά, την πλατφόρμα ηλεκτρονικής μάθησης, και παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους και τους τομείς που χρήζουν βελτίωσης.

Το πιλοτικό πρόγραμμα επιβεβαίωσε το δυναμικό του RELIEF να ενισχύσει τις γνώσεις, τις δεξιότητες και τις ικανότητες τόσο των μελλοντικών επαγγελματιών (φοιτητών τριτοβάθμιας εκπαίδευσης) όσο και των σημερινών επαγγελματιών (γεωπόνων, συμβούλων αγροτών) στον αγροτικό τομέα, υποστηρίζοντας παράλληλα τους αγρότες στην υιοθέτηση πρακτικών βιοοικονομίας. Το δομημένο περιεχόμενο, τα ποικίλα υλικά και η συμπερίληψη δραστηριοτήτων μάθησης με βάση την εργασία (WBL) εκτιμήθηκαν ιδιαίτερα, καθώς αύξησαν την κινητοποίηση, την αλληλεπίδραση και την ενεργό συμμετοχή.

Ωστόσο, σημειώθηκαν και ορισμένες προκλήσεις, όπως η συμμετοχή των αγροτών λόγω του βαρύ φόρτου εργασίας. Το πιλοτικό πρόγραμμα υπογράμμισε επίσης τη σημασία της προσαρμογής των προσεγγίσεων στο εθνικό πλαίσιο και στο προφίλ των ομάδων-στόχων, με

το μοντέλο μικτής μάθησης και την ευέλικτη μεθοδολογία να λαμβάνουν συνολικά θετική υποδοχή. Συνολικά, το πιλοτικό πρόγραμμα όχι μόνο επικύρωσε την αποτελεσματικότητα του RELIEF, αλλά προσέφερε και κρίσιμες κατευθύνσεις για μελλοντική προσαρμογή και ευρύτερη εφαρμογή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

European Commission. (2018a). *A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment*.

European Commission. (2018b). *A sustainable Bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment*. https://doi.org/10.2777/478385

European Investment Fund. (2018). *Agriculture and bioeconomy: Unlocking production potential in a sustainable and resource-efficient way*. 12-undefined.

Mizdraković, V., Kostić, M., & Stanković, J. (2018). Succeeding in bioeconomy: Serbian universities' blueprint. *Industrija*, *46*(4), 171–184. https://doi.org/10.5937/industrija46-19529

Papadopoulou, E., Vaitsas, K., Fallas, I., Tsipas, G., Chrissafis, K., Bikiaris, D., Kottaridi, C., & Vorgias, K. E. (2018). Bio-economy in Greece: Current trends and the road ahead. *The EuroBiotech Journal*, *2*(3), 137–145. https://doi.org/10.2478/ebtj-2018-0018

Patermann, C., & Aguilar, A. (2018). The origins of the bioeconomy in the European Union. *New Biotechnology*, *40*, 20–24. https://doi.org/10.1016/J.NBT.2017.04.002

The United Nations World Water Development Report. Wastewater: The Untapped Resource, UNESCO. 2017. (n.d.).

75. ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΥΠΟ ΚΑΛΥΨΗ- ΥΔΡΟΠΟΝΙΑ. ΜΙΑ ΝΕΑ ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΞ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΑΙ ΤΟ ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Π. Κόκκινος [1], Κ. Κίττας[3], Δ. Σάββας[2], Γ. Ντάτση[2], Ν. Κατσούλας[3], Ε. Κίττα[3], Ι. Καλαβρουζιώτης[1]

[1] *Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (ΕΑΠ), Πάτρα,*
[2] *Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΓΠΑ), Αθήνα,*
[3] *Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας, Βόλος pkokkin@eap.gr*

Περίληψη

Οι καλλιέργειες υπό κάλυψη (θερμοκήπια, δικτυοκήπια) αποτελούν το αντίδοτο στον κίνδυνο εξάντλησης των υδατικών πόρων, της υποβάθμισης του εδάφους και της κλιματικής αλλαγής. Το Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο και το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, ανταποκρινόμενα στην ανάγκη επέκτασης των καλλιεργειών υπό κάλυψη σχεδίασαν και υλοποιούν ένα καινοτόμο εξ αποστάσεως Διιδρυματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών (ΔΠΜΣ) με τίτλο «Καλλιέργειες υπό Κάλυψη-Υδροπονία (ΚΥΚ)», που στόχο έχει να καλύψει το κενό που υπάρχει στην ολοκληρωμένη κατάρτιση επιστημόνων σε θέματα θερμοκηπίων, διχτυοκηπίων και υδροπονίας. Απευθύνεται σε πτυχιούχους περιβαλλοντικών, γεωπονικών, πολυτεχνικών και θετικών επιστημών. Σήμερα, λόγω του μεγάλου παγκόσμιου αλλά και εθνικού ενδιαφέροντος για ανάπτυξη των καλλιεργειών υπό κάλυψη, η αγορά εργασίας για τους πτυχιούχους του ΚΥΚ είναι ευρύτατη.

Λέξεις κλειδιά: *καλλιέργειες υπό κάλυψη, θερμοκήπια, δικτυοκήπια.*

CROPS UNDER COVER - HYDROPONICS. A NEW CHALLENGE IN DISTANCE EDUCATION FROM THE HELLENIC OPEN UNIVERSITY AND THE AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS

P. Kokkinos[1*] ,C. Kittas[3], D. Savvas[2], G. Ntatsi[2], N. Katsoulas[3], E. Kitta[3], I. Kalavrouziotis[1]

[1]*Hellenic Open University, Patras,* [2]*Agricultural University of Athens, Athens,*
[3]*University of Thessaly, Department of Agriculture, Volos* [*]pkokkin@eap.gr

Abstract

Cultivations under cover, such as in greenhouses, screenhouses and low tunnels, serve as powerful tools in mitigating risks related to water depletion, soil degradation, and climate change. In response to the needs for further expansion of crops under cover, Hellenic Open University and Agricultural University of Athens have co-designed and implementing, since March 2021, an innovative distance learning Inter-Institutional Master's Program entitled "Cultivations under Cover - Hydroponics" (CUC). CUC aims to address the existing gap in the integrated training of scientists in the areas of greenhouses, screenhouses and hydroponics. This program has been designed for graduates of Environmental, Agricultural, Polytechnic and Natural Sciences. Since nowadays there is a national and global interest for development of protected horticulture, the job market for CUC graduates is broad.

Keywords*: crops under cover, greenhouses, screenhouses.*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναγκαιότητα ενός ΠΜΣ για τις «Καλλιέργειες Υπό Κάλυψη- Υδροπονία» είναι μεγάλη για τη χώρα μας, αλλά και παγκοσμίως. Πράγματι, αν ληφθεί υπόψη πως (FAO, 2000; Katsoulas et al., 2021):

- Τα επόμενα 35 χρόνια αναμένεται αύξηση του πληθυσμού κατά 30% και αύξηση των αναγκών σε ασφαλή ποιοτικά τρόφιμα κατά 70%.
- Υπάρχει δραματική μείωση των υδατικών πόρων (μέχρι το 2030, 50% του πληθυσμού της γης θα αντιμετωπίσει σημαντικά προβλήματα έλλειψης νερού).
- Έως το 2050, μόνο η μισή από τη συνολική διαθέσιμη γεωργική έκταση θα είναι διαθέσιμη για καλλιέργειες.
- Διαπιστώνεται διαρκής εξάντληση των ενεργειακών πόρων.
- Η κλιματική αλλαγή πλήττει ιδιαίτερα την ευάλωτη γεωργία.

Αναμένεται παγκοσμίως σημαντική στροφή προς τις καλλιέργειες υπό κάλυψη (Gruda et al., 2021). Έχει ιδιαίτερη σημασία για τη χώρα μας καθόσον: α) οι καλλιέργειες υπό κάλυψη μπορεί να αποτελέσουν διέξοδο και ταυτόχρονα σημαντικό παράγοντα δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας, ακόμα και για περιοχές οι οποίες παραδοσιακά έχουν σχέση μόνο με μεγάλες καλλιέργειες, β) Υπάρχει ανάγκη στελεχών, που θα είναι σε θέση να συμβάλουν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο κλάδος των καλλιεργειών υπό κάλυψη, γ) Υπάρχουν πρόσφατες αποφάσεις του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, με τις οποίες ενισχύονται καινοτόμες δράσεις στον τομέα των οπωροκηπευτικών, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται τα θερμοκήπια, η υδροπονία και τα διχτυοκήπια (ΥΑΑΤ, 2024).

1. ΣΚΟΠΟΣ- ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Αντικείμενο του Διϊδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Καλλιέργειες υπό Κάλυψη – Υδροπονία (ΚΥΚ)», είναι η επιστημονική μελέτη και έρευνα σε θέματα που αφορούν την κάλυψη της σύγχρονης ανάγκης της διαρκώς εξελισσόμενης αγοράς εργασίας, που αφορά τις Καλλιέργειες υπό Κάλυψη. Δηλαδή, ο σχεδιασμός των κατασκευών, η επιλογή των υλικών, οι καλλιεργητικές τεχνικές, οι νέες τεχνολογίες εξοικονόμησης νερού, όπως η υδροπονία (Σάββας, 2012), τα διχτυοκήπια (Kitta, 2014), οι τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας και η θρέψη και η φυτοπροστασία ολοκληρωμένης παραγωγής οπωροκηπευτικών με μειωμένες εισροές.

Βασική επιδίωξη του συγκεκριμένου ΔΠΜΣ είναι να προσφέρει τις απαραίτητες θεωρητικές γνώσεις, την πρακτική *(εργαστηριακή και πεδίου)* κατάρτιση, την εξοικείωση και άσκηση στη χρήση των νέων τεχνολογιών και την αφομοίωση της εφαρμοσμένης έρευνας στο πλαίσιο της προετοιμασίας πτυχιούχων σχετικών με το αντικείμενο, για τη διεκδίκηση θέσεων εργασίας και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας με αυτοαπασχόληση. Στο ΔΠΜΣ ΚΥΚ, αξιοποιούνται οι εργαστηριακοί χώροι του Εργαστηρίου Τεχνολογιών Αειφορικής Διαχείρισης Αποβλήτων του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, το νέο σύγχρονο θερμοκήπιο του ΕΑΠ και τα Εργαστήρια Αναλύσεων και οι Θερμοκηπιακές Εγκαταστάσεις του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών με τον σύγχρονο εξοπλισμό που διαθέτουν.

2. ΣΤΟΧΟΙ

Στόχοι του Προγράμματος «Καλλιέργειες υπό Κάλυψη - Υδροπονία» είναι:

- Η βελτίωση της ποιότητας και ποσότητας των παραγόμενων προϊόντων μέσω καλύτερων και νέων τεχνικών καλλιέργειας *(υδροπονία, νέα υποστρώματα, σύσταση και διαχείριση*

θρεπτικών διαλυμάτων).
- Η μείωση των εισροών ενέργειας *(εξοικονόμηση ενέργειας, αξιοποίηση βιομάζας και λοιπών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καλύτερη διαχείριση μικροκλίματος)*
- Η μείωση των χημικών εισροών *(ολοκληρωμένη παραγωγή, δίχτυα εντομοστεγανότητας, φωτοεκλεκτικά υλικά κάλυψης)*
- Η καλύτερη διαχείριση των υδάτινων πόρων *(κλειστά υδροπονικά συστήματα)*
- Η αναδιάρθρωση του φυτικού κεφαλαίου *(δοκιμή νέων ποικιλιών)*

– Η ιχνηλασιμότητα, τυποποίηση και πιστοποίηση των παραγομένων προϊόντων. Το Διϊδρυματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) αποβλέπει στην κάλυψη του υφιστάμενου κενού στην ολοκληρωμένη κατάρτιση επιστημόνων σε θέματα κατασκευής, εξοπλισμού, τεχνικών καλλιέργειας, διαχείρισης νερού και θρέψης και προστασίας του περιβάλλοντος.

Απευθύνεται σε επιστήμονες, πτυχιούχους περιβαλλοντικών, γεωπονικών, πολυτεχνικών και θετικών επιστημών, οι οποίοι θα αποκτήσουν οριζόντια γνώση του οικοσυστήματος *«Καλλιέργεια υπό Κάλυψη»* με κάθετες εξειδικευμένες γνώσεις εμβάθυνσης του γνωστικού τους αντικειμένου μέσω της μεταπτυχιακής τους διατριβής.

3. ΜΑΘΗΣΙΑΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα μαθησιακά αποτελέσματα που αναμένονται μετά από την επιτυχή ολοκλήρωση του προγράμματος ΚΥΚ συνοψίζονται ως εξής:

1. Η κατάρτιση επιστημόνων στις αρχές, τις μεθόδους και τον εξοπλισμό που απαιτούνται για την καλλιέργεια σε θερμοκήπια και διχτυοκήπια.
2. Η επιστημονική και τεχνολογική κατάρτιση επιστημόνων αναφορικά με τις εφαρμογές των σύγχρονων μεθόδων καλλιέργειας και βιοκλιματικού σχεδιασμού στην έρευνα, στη βιομηχανία γεωργικού εξοπλισμού και αγροτικών εφοδίων.
3. Η εξοικείωση των μεταπτυχιακών φοιτητριών/φοιτητών με σύγχρονο σχετικό εργαστηριακό και πειραματικό εξοπλισμό.
4. Η κατάρτιση των μεταπτυχιακών φοιτητριών/φοιτητών σε θέματα οργάνωσης και λειτουργίας θερμοκηπιακών μονάδων και μονάδων διχτυοκηπίων.
5. Η δημιουργία ικανού ανθρώπινου δυναμικού εξειδικευμένων επιστημόνων που θα μπορέσει αφενός να στελεχώσει υπάρχουσες μονάδες παραγωγής προϊόντων υπό κάλυψη, μελετητικά γραφεία, αγροτικά ερευνητικά κέντρα και υπηρεσίες του δημοσίου και αφετέρου να εργασθεί ως αυτοαπασχολούμενος σε ιδιόκτητες σχετικές μονάδες παραγωγής προϊόντων υπό κάλυψη.

5. ΠΙΣΤΩΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ECTS ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΠΟΥΔΩΝ

Το σύνολο των πιστωτικών μονάδων (ECTS) που απαιτούνται για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης είναι 120 ECTS.

6. ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΦΟΙΤΗΣΗΣ

Για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης (Μ.Δ.Ε.) είναι υποχρεωτική η επιτυχής ολοκλήρωση οκτώ (8) Θεματικών Ενοτήτων (Θ.Ε.), μίας (1) Ενότητας Πρακτικής Άσκησης και η εκπόνηση Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας. Η ελάχιστη χρονική διάρκεια για την ολοκλήρωση του προγράμματος είναι δύο (2) έτη ή τέσσερα (4) ακαδημαϊκά εξάμηνα.

7. ΔΙΔΑΚΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Το διδακτικό υλικό, στο οποίο βασίζεται το Πρόγραμμα ΚΥΚ και το οποίο οφείλουν οι φοιτήτριες και φοιτητές να μελετούν σε σταθερή βάση κατά τη διάρκεια των σπουδών τους, τίθεται στη διάθεσή τους σε έντυπη και/ή ψηφιακή μορφή. Πρόκειται για βασικό και συμπληρωματικό υλικό που αφορά στο περιεχόμενο κάθε Θεματικής Ενότητας (Θ.Ε.). Περιλαμβάνει: διαδικτυακό εκπαιδευτικό υλικό με ευθύνη της Επιτροπής Προγράμματος Σπουδών και των Ομάδων Διδακτικού Προσωπικού των ΘΕ, συγγράμματα που εκδίδονται στο εξωτερικό, έντυπο διδακτικό υλικό που δεν εκδίδεται από το ΕΑΠ («Εύδοξος»), εναλλακτικό διδακτικό υλικό (λογισμικά διαχείρισης θρεπτικών διαλυμάτων σε υδροπονικές καλλιέργειες και επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αστικών αποβλήτων (ΕΥΑΑ) και ιλύος), βοηθητικό διδακτικό υλικό.

8. ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

Προσφερόμενες θέσεις: 60 (εαρινό εξάμηνο) Γίνονται δεκτοί/ές:

1. Απόφοιτοι των Γεωπονικών Επιστημών και Επιστημών Διαιτολογίας-Διατροφής.
2. Απόφοιτοι των Θετικών Επιστημών (Χημείας, Βιολογίας, Φυσικής, Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών, Βιοχημείας και Βιοτεχνολογίας, Μοριακής Βιολογίας και Γενετικής, και Περιβάλλοντος).
3. Απόφοιτοι Πολυτεχνικών Σχολών.
4. Απόφοιτοι του προπτυχιακού προγράμματος του Ε.Α.Π. "Σπουδές στις Φυσικές Επιστήμες".
5. Απόφοιτοι αντίστοιχων ή συναφών, με τις παραπάνω, σχολών των Πανεπιστημίων, Πολυτεχνείων και Τεχνολογικών Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων της ημεδαπής ή της αλλοδαπής.
6. Κάτοχοι πτυχίου ελληνικού ή κυπριακού Πανεπιστημίου και αναγνωρισμένων ομοταγών Ιδρυμάτων της αλλοδαπής, καθώς και πτυχιούχοι ΤΕΙ συναφούς γνωστικού αντικειμένου.

Για την παρακολούθηση του προγράμματος είναι απαραίτητη επιπλέον της γλώσσας διδασκαλίας η πολύ καλή γνώση της Αγγλικής γλώσσας.

9. ΟΜΑΔΙΚΕΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΝΤΗΣΕΙΣ (Ο.Σ.Σ.)

Σε κάθε Θεματική Ενότητα (Θ.Ε.) προβλέπονται τρεις Ο.Σ.Σ., οι οποίες έχουν προαιρετικό χαρακτήρα και πραγματοποιούνται ηλεκτρονικά. Οι Ο.Σ.Σ. έχουν διάρκεια τεσσάρων ωρών έκαστη και προσφέρουν στις φοιτήτριες και στους φοιτητές τη δυνατότητα να συζητήσουν ερωτήματα, τα οποία αφορούν στο διδακτικό υλικό και στις γραπτές εργασίες.

10. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ/ Θ.Ε.

Το σύνολο των Πιστωτικών Μονάδων (ECTS) που απαιτούνται για την απόκτηση του ΜΔΕ ανέρχεται σε εκατόν είκοσι (120 ECTS). Κατά τη διάρκεια των σπουδών κάθε φοιτητής υποχρεούται να παρακολουθήσει οκτώ (8) Θεματικές Ενότητες, να πραγματοποιήσει Πρακτική Άσκηση και να εκπονήσει Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (ΜΔΕ). Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (ΜΔΕ) εκπονείται στο τρίτο (Γ') εξάμηνο σπουδών, ενώ η Πρακτική Άσκηση στο τέταρτο (Δ') εξάμηνο Σπουδών.

Το πρόγραμμα των Θεματικών Ενοτήτων διαμορφώνεται ανά εξάμηνο ως εξής:

Θ.Ε.	**Α' Εξάμηνο**	**ECTS**
ΚΥΚ50	Περιβάλλον καλλιεργειών υπό κάλυψη	Υ[1], 10 ECTS
ΚΥΚ51	Φυτοπροστασία καλλιεργειών υπό κάλυψη	Υ, 10 ECTS
ΚΥΚ52	Ολοκληρωμένη και βιολογική καλλιέργεια κηπευτικών υπό κάλυψη	Υ, 10 ECTS

Θ.Ε.	**Β' Εξάμηνο**	**ECTS**
ΚΥΚ53	Κατασκευές και εξοπλισμός καλλιεργειών υπό κάλυψη	Υ, 10 ECTS
ΚΥΚ54	Υδροπονικές καλλιέργειες υπό κάλυψη	Υ, 10 ECTS
ΚΥΚ55	Φυσιολογία καταπόνησης	Υ, 10 ECTS

Θ.Ε.	**Γ' Εξάμηνο**	**ECTS**
ΚΥΚ56	Παραγωγή δρεπτών ανθέων, γλαστρικών φυτών και φυτωριακού υλικού υπό κάλυψη	Υ, 10 ECTS
ΚΥΚ57	Περιβαλλοντική πολιτική, περιβαλλοντικές μελέτες και ανακύκλωση αποβλήτων καλλιεργειών υπό κάλυψη	Υ, 10 ECTS
ΚΥΚΔΕ	Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία	Υ, 10 ECTS

Θ.Ε.	**Δ' Εξάμηνο**	**ECTS**
ΚΥΚΠΑ	Πρακτική Άσκηση	Υ, 30 ECTS

Σημείωση:

Υ[1]: Υποχρεωτική

Σχήμα 1. Πρότυπο Θερμοκήπιο ΕΑΠ.

9. ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΠΜΣ ΚΥΚ

Σύμφωνα με την με Αριθ. Πρωτοκόλλου 48644/8-1-2025 απόφαση της Εθνικής Αρχής Ανώτατης Εκπαίδευσης (ΕΘΑΑΕ), το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Καλλιέργειες υπό Κάλυψη- Υδροπονία» της Σχολής Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, έλαβε πιστοποίηση για το επίπεδο σπουδών 7 του Εθνικού και Ευρωπαϊκού Πλαισίου Προσόντων διάρκειας 5 ετών από 20-12-2024 έως 19-12-2029.

10. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ- ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Στις αρχές του 2025, κατασκευάστηκε από το ΕΑΠ στις εγκαταστάσεις του στην Πάτρα, πρότυπο Ερευνητικό- Εκπαιδευτικό θερμοκήπιο (Σχήμα 1) για τις ανάγκες του Μεταπτυχιακού προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Καλλιέργειες υπό Κάλυψη-Υδροπονία ΚΥΚ». Το θερμοκήπιο θα αρχίσει να λειτουργεί περί το τέλος του 2025.

Βιβλιογραφία

FAO, 2009. How to Feed the World in 2050. Proceedings of the Expert Meeting on How to Feed the World in 2050 24-26 June 2009, FAO Headquarters, Rome.

Gruda, N., Bisbis, M., Katsoulas, N. and Kittas, C. (2021). Smart greenhouse production practices to manage and mitigate the impact of climate change in protected cultivation.Acta Hortic. 1320, 189-196. DOI:10.17660/ActaHortic.2021.1320.24. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1320.24

Katsoulas, N., Kitta, E. and Kittas, C. (2021). Technologies and techniques of greenhouse cultivation as tools to promote development education. Acta Hortic. 1320, 173-180

Kitta E., 2014. Physiological and Agronomic Behavior of Horticultural Crops in Screenhouses under Mediterranean conditions. PhD thesis, Polytechnic University of Cartagena, Department of Food Engineering and Agricultural Equipment (Spain).

Σάββας Δ. , 2012. Καλλιέργειες εκτός εδάφους: υδροπονία, υποστρώματα. Εκδόσεις ΑγροΤύπος, 528 σελ., ISBN: 978-960-7667-44-1.

ΥΠΑΑΤ, 2024. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΚΟΙΝΗΣ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ (Σ.Σ. Κ.Α.Π.) 2023- 2027, 19 σελ.

ΦΕΚ 2554, Τεύχος Β/26/6/2020. Ίδρυση Διιδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Καλλιέργειες υπό Κάλυψη-Υδροπονία» της Σχολής Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου και του Τμήματος Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και έγκριση της οργάνωσης και της λειτουργίας του.

76. DESIGN AND DEVELOPMENT OF SMART AGRICULTURAL TECHNOLOGIES FOR EDUCATIONAL PURPOSES AT POSTGRADUADE LEVEL

V. Arapostathis, D. Loukatos, K.G. Arvanitis, S. Fountas. T. Bartzanas & G. Papadakis

Agricultural University of Athens, Dept. of Natural Resources Management and Agricultural Engineering, Iera Odos 75, 11855, Athens, Greece, varapostathis@aua.gr

Abstract

This paper presents basic directions and first results regarding the utilization of modern technological advancements in the area of software, electronics, telecommunications and robotics, to improve the agricultural production and to foster the educational process in the field of agricultural engineering. Within the framework of the ongoing European research project AGRITECH EU (grant agreement number: 101123258), good practices are designed and implemented that aim to optimize the content and structure of the postgraduate study program "Digital Technologies and Smart Infrastructure in Agriculture", which is offered by the Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering of the Agricultural University of Athens. Some of these actions are explained herein. The first evaluation results of these actions show the usability and pedagogical value of integrating applied technological tools in agricultural education. Furthermore, their improved contribution to enhancing the professional prospects of students, compared with the conventional methods, is highlighted.

Keywords: Digital Agriculture, Autonomous Systems, Renewable Energy Sources, Engineering, Education, University Education

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΥΦΥΟΥΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΥΣ ΣΚΟΠΟΥΣ ΣΕ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Β. Αραποστάθης, Δ. Λουκάτος, Κ.Γ. Αρβανίτης, Σ. Φουντάς. Θ. Μπαρτζάνας & Γ. Παπαδάκης

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, varapostathis@aua.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει βασικές κατευθύνσεις και προκαταρκτικά αποτελέσματα, αναφορικά με την αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογικών εξελίξεων στους τομείς του λογισμικού, της ηλεκτρονικής, των τηλεπικοινωνιών και της ρομποτικής, για τη βελτίωση της αγροτικής παραγωγής και την ενίσχυση της εκπαιδευτικής διαδικασίας στο πεδίο της γεωργικής μηχανικής. Στο πλαίσιο του εν-εξελίξει ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου AGRITECH EU, μελετώνται και εφαρμόζονται καλές πρακτικές που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση του περιεχομένου και της δομής του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Digital Technologies and Smart Infrastructure in Agriculture», το οποίο προσφέρεται από το Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του ΓΠΑ. Ορισμένες από αυτές τις πρακτικές παρουσιάζονται στο παρόν άρθρο. Τα πρώτα αποτελέσματα αυτών των δράσεων μαρτυρούν τη χρηστικότητα και την παιδαγωγική αξία της ενσωμάτωσης

εφαρμοσμένων τεχνολογικών εργαλείων στη γεωργική εκπαίδευση. Επιπλέον, αναδεικνύεται η αυξημένη συμβολή τους στην ενίσχυση των επαγγελματικών προοπτικών των φοιτητών, σε σχέση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις διδασκαλίας και κατάρτισης.

Λέξεις κλειδιά: Ψηφιακή Γεωργία, Αυτόνομα Συστήματα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Εκπαίδευση, Μηχανικών, Πανεπιστημιακή Εκπαίδευση

1. INTRODUCTION

Effective solutions need to be provided for modern agriculture to tackle the challenges related to the degradation of natural resources and the food demand for feeding the continuously increasing global population. Amongst the most promising ones, digitalization in the farming sector can generate multiple benefits: it can increase productivity, improve the efficiency and quality of work, reduce pressure on natural resources, and promote market integration. Moreover, it can enhance farmers' access to knowledge, foster peer-to-peer learning, support innovation networks, improve rural-urban and producer-consumer links, and reduce bureaucratic burden. To maximize equitable opportunities and to mitigate the risks, companies of agriculture sector need to increase the training of specialists on digital transition that can act within farms and food companies to increase their know-how and capabilities to use digital technologies in effective and responsible ways (AGRITECH, 2025).

Therefore, researchers, students, farmers-producers, and agronomists must be aware and familiar with the new technological solutions and be able to apply them efficiently. This requires a combination of multi-level skills that should be developed through effective education in all levels. In this regard, agricultural universities need to properly upgrade the curricula they provide, with the delivery of postgraduate level studies not being an exception, despite several barriers and difficulties (Benavides et al., 2020; Conde et al., 2021).

In response to the above challenges, the primary objective of the AGRITECH EU project (AGRITECH, 2025), with grant agreement number: 101123258, is the design and delivery of higher education master programmes, the enrichment of existing bachelor and master's degrees and the development of related self-standing modules/courses to train specialists in digital transition for farms and food companies, leading to recognized certifications. These objectives will be achieved by a European consortium of seven higher education institutions, five businesses (SMEs and large companies) and one research and excellence centre. In this context, digital technologies are seen as enablers to develop capabilities to foster the competitiveness of farmers and more in general food sector.

As the Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering of the Agricultural University of Athens (AUA) participates in the aforementioned project, this paper outlines/proposes some innovative technological practices that have led to promising findings facilitating the convergence between university activities and the digital transition of the farming sector. These actions include but are not limited to (a) pilot equipment guidelines for a laboratory space to support relevant educational activities as well as directions for (b) the development of an integrated and simple small-scale IoT system for monitoring critical agricultural parameters, (c) the development of autonomous robotic vehicles to support agricultural tasks and (d) the upgrade of a photovoltaic panel system to optimize the energy gain from solar radiation.

Finally, some first corresponding evaluation results are presented both from the technical and the educational point of view. Thus, there are encouraging indications that the above actions accelerate the acquisition of skills by the persons getting involved, with multi-level benefits for current students and future agricultural engineers.

2.MATERIALS AND METHODS

2.1 Educational Design

The focus of the work being described is not the technical excellence but rather the educationally beneficial planning of activities, and thus the potential objectives and the progress monitoring process should be formed properly.

In this regard adequate recording of evidence during the learning process should be carried out, in parallel with the utilization of consent forms for students and educators, allowing the use/modification of audiovisual content and course assignment material. Occasional imperfections of laboratory assembled equipment should be seen as valuable learning opportunities rather than objective failures. Educational scenarios should be kept comparatively simple, as errors and malfunctions will definitely happen, requiring redesign and increasing complexity. During each activity, time enough should also be left to the students for useful feedback collection.

The main work is carried out with the participants of the postgraduate program "Digital Technologies and Smart Infrastructure in Agriculture" (SmartAg), which are 13-15 individuals per year. These persons are grouped into teams of 3-4 members, with priority each team to cover complementary roles, e.g., investigation, component assembly, programming, evaluation, etc. The professors are acting as consultants to these teams and provide little to more guidance according to the difficulties of each challenge. This is a common practice set for orchestrating and evaluating similar activities (Loukatos et al., 2022).

2.2 Technical Framework

The rapid advances in technological sector and the wide availability of components and of accompanying software and tutorials are making feasible the organization of laboratory activities of small, medium and large scale to facilitate the understanding of how agriculture can benefit from its digital transformation. Consequently, these priorities, utilizing the experience of AUA in the sector and the AGRITECH EU project objectives, can be translated properly as follows.

In small scale activities that may include:

- Microcontrollers (like Arduino)
- Single board computers (like Raspberry Pi)
- Specialized sensor equipment (temperature, humidity, soil/air, gas sensors, GNSS-RTK receivers, cameras (RGB/Depth/Thermal), etc.)
- Specialized actuator equipment (relays, servos, geared motors, water pumps, electric fans, electric valves, etc.)
- Communication equipment (radio transceivers (of various type), access points, routers, etc.)
- Powering modules (batteries, solar panels, chargers, inverters)
- Assistive equipment like 2D/3D printers, screens.

In medium scale activities that may include:

- Robotic Arms and tailored end-effectors (e.g., fruit grippers).
- Robotic Vehicles (aerial or ground ones), e.g. for carrying vegetables, for measurement collection.
- In scale greenhouse deployment and monitoring.
- Working with recycled/upcycled materials.

- Need for assistive modules as well (processing, powering, communication, soldering, cutting, drilling, 3D printing etc.)
- Retrofitting of pre-existing agricultural equipment.
- Field of application: close to the main university campus.

In Large scale activities that may include:

- Modern agri-technologies, and new equipment for vineyard crop and selected orchards in the AUA farms.
- Educational spraying test platform - New equipment for on hands training of the students.
- Sensors as complementary equipment for existing experimental farm buildings (greenhouse and animal facility) for demonstration and training.
- Upgrade of an existing computer-controlled thermal-solar energy unit
- Upgrade of an existing solar tracker system

We are focusing on the most characteristic of them, with respect to the limitations in budget, labor and skillset that any work-in-progress has, as apart from the cost and availability issues, the lack of deep expertise regarding the new cutting-edge systems and the need the educators to have multi-level skills is a considerable challenge to be addressed.

IMPLEMENTATION DETAILS

2.3 Laboratory Equipment Guidelines

While larger and full scale activities are more affected by the limitations in budget, labor and skillset, at first stage, considerable work can be carried out based on software tools (e.g., simulation environment, design environment, programming environment) and on pre-existing equipment. In many educational activity scenarios, credit card sized (Raspberry Pi) units are utilized as the main component for experimentation and interaction with the physical processes. These units have been equipped with keyboard, mouse, and TFT screens to act as conventional laboratory computers. They are used typically for browsing, programming, designing, storing and testing purposes. Indeed, the utilization of Raspberry Pi (as the main computer unit) supported laboratories along with a small set of microcontrollers, relays, small motors, LEDs, and basic sensors constitute a feasible arrangement. 3D printing facilities, comprised of comparatively low-cost equipment like a Snapmaker 3-in-1 3D Printer, multiply the benefits as several components can be printed resulting to multilevel exemplification. Characteristic actions related to the aforementioned laboratory specifications, involving postgraduate students, are shown in Figure 1.

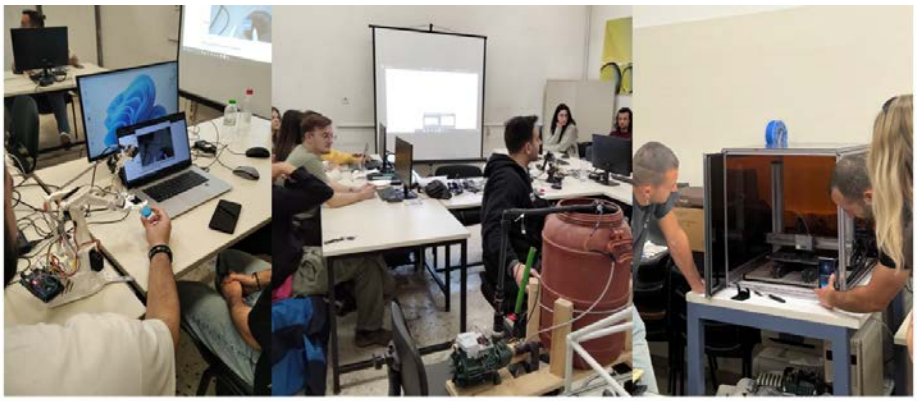


Figure 1: Actions related to the laboratory specifications, involving postgraduate students

2.4 Pilot IoT System

The Raspberry Pi units can also work without the aforementioned “traditional” peripherals as vital members of IoT platforms (either as sensor or sink nodes) or “brains” for intelligent robots, even in large rural lab scale. Furthermore, other devices (Arduinos and/or ESPs) can be interfaced and programmed using them. In this regard, a pilot IoT system is implemented in the laboratory, having the Raspberry Pi of each team to collect data coming from each one of four temperature and humidity sensor nodes implemented using ESP8266 units. A tablet application written in MIT App Inventor environment was visualizing the data. An elevated version of this setup, in real environment, is also under deployment. Characteristic instances of the discussed IoT system deployment and operation are shown in Figure 2.

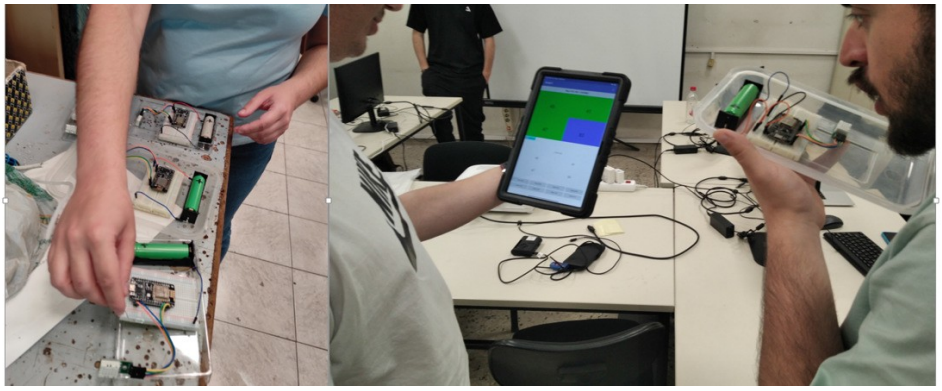


Figure 2: Instances of the discussed IoT system deployment and operation.

2.5 Autonomous Robotic Vehicles

Apparently, there is room for several new technological components, as they have capabilities that did not exist in the past (like fast and accurate sensing and perception modules, efficient and easy to control electric motors, precision agriculture tractor attachments, etc.) and their price and availability make them appealing to purchase and use, thus better preparing the students for their future careers. In pace with this potential, characteristic medium size robotic vehicles are implemented/upgraded, destined to fulfill comparatively lightweight tasks, such us carrying a fruit pallet bin or spraying. These vehicles have a Raspberry Pi as main controller and one or more Arduino microcontrollers to handle the repetitive strict real-time tasks. They also have RTK-GNSS system on them and stereovision cameras, for autonomous operation, and provide visual inspection/manual overdrive capabilities via a remote link with an Android OS tablet device. Characteristic actions related to the discussed robotic vehicles are shown in Figure 3.

Figure 3: Indicative actions related to the discussed robotic vehicles

2.6 Solar Tracking Photovoltaic System

Upgrading/retrofitting pre-existing equipment can save money, provide systems of satisfactory size and it is also good for the planet (in terms of agroecology). Consequently, applying this policy can have many benefits. The existence of old solar panels, worm drives and linear actuators in the AUA premises, provide fertile ground for retrofitting/upgrading these equipment into a functioning whole, using an Arduino-like microcontroller, batteries and cheap analog sensors, and mimicking the phenomenon of phototropism. Experiments start in laboratory desk scale, as in the work in (Loukatos et al., 2024), and later upscale using the aforementioned pre-existing equipment. The participants have to opportunity to clearly spot the differences during upscaling and the impact of environmental factors on the working system. Characteristic instances of the PV system upgrade process are shown in Figure 4

Figure 4: Instances of the discussed PV system upgrade process

3.RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Evaluation Process Details

The participants in the discussed activities at the Farm Systems Laboratory of the AUA premises have the opportunity to experiment investigate and contribute to the construction/evaluation of similar systems and communicate feedback between them and their professors. As this is an ongoing project activity set, it has not been fully evaluated but only partially, via oral opinion exchange and a five point Likert scale questionnaire following the design depicted in Figure 5. The results already collected during activities of similar type by the participants of the SmartAg postgraduate programme are shown in Table 1, where the statistical mean is calculated for each 5-point question category being answered. The close to “5” the value is the more positive the response.

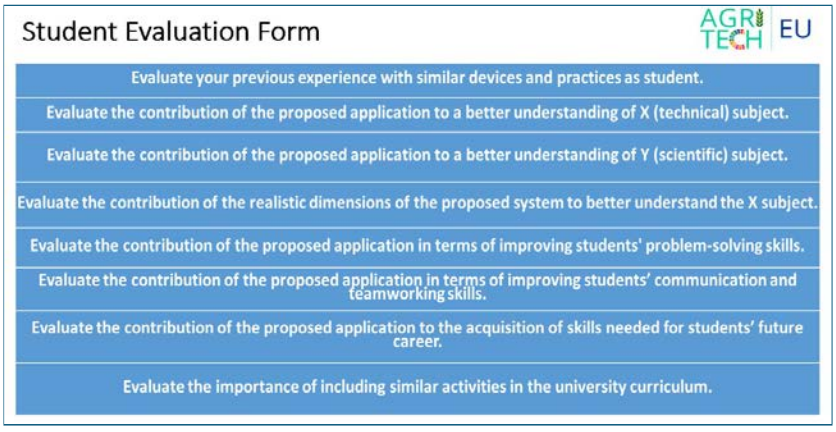


Figure 5: Suggested questionnaire form design.

Table 1: The statistical mean for each 5-point question being answered.

Question		Mean
Evaluate your previous experience with similar devices and practices.		3.7
Evaluate the contribution of the proposed application to the students' understanding of the scientific topics covered in the university's curriculum.		4.3
Evaluate the contribution of the proposed application to a better understanding of hardware assembly issues.		4.3
Evaluate the contribution of the proposed techniques to a better understanding of software issues		4.1
Evaluate the contribution of the proposed application to students' understanding of networking issues.		4.1
Evaluate the contribution of the proposed application to students' understanding of automatic control issues.		4.5
Evaluate the contribution of the proposed application to the students' understanding the role of sensors and actuators.		4.5
Evaluate the contribution of the elevated dimensions of the proposed system in terms of professional skill acquisition.		4.3
Evaluate the contribution of the proposed application in terms of improving students' problem-solving skills.		4.3
Evaluate the contribution of the proposed application in terms of improving students' communication and teamworking skills.		4.2
Evaluate the contribution of the proposed application to the acquisition of skills needed for the students' future career.		4.3
Evaluate the importance of including similar activities in the university curriculum.		4.7

The analysis of these results verifies the importance of this type of activities for understanding both theoretical and technical issues and for improving participants' problem solving and teamworking skills. It should be mentioned that many participants had prior experience with introductory technical practices (mainly during their undergraduate studies), while most of them find beneficial for their careers the upsized character (wherever possible) of the proposed activities and are definitely positive regarding the incorporation of similar practices into the formal university curriculum.

3.2 Future Improvement Considerations

The engagement into the planning and implementation of the aforementioned activities also indicates directions for further improvement such as:

- Improving the functionality of the laboratory premises.
- Prioritization to actions combining in-vivo and in-vitro components.
- Purchase of redundant equipment components (wherever possible) as failures/damages are expected during the living learning experiences.
- Remote access to the laboratory activities to widen their utilization.
- Teleoperation / Autonomous operation / Augmented Reality support.
- Provisioning for safety and (cyber-)security.

4.CONCLUSIONS

This paper presented directions and first results regarding the utilization of modern technological advancements in the area of software, electronics, telecommunications and robotics, to improve the agricultural production and to foster the educational process in the field of agricultural engineering. In line with the framework of the ongoing European research

project AGRITECH EU, indicative actions were explained herein aiming to optimize the content and structure of the postgraduate study program "Digital Technologies and Smart Infrastructure in Agriculture", which is offered by the Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering of the Agricultural University of Athens. These actions included the upgrade of existing electromechanical equipment for better energy management/production, the implementation of pilot robotic vehicles and IoT systems and the provision for low-cost but targeted laboratory equipment. The first evaluation results of these actions show the usability and pedagogical value of integrating applied technological tools in agricultural education.

5.REFERENCES

AGRITECH EU Project—Digital Agriculture for Sustainable Development. Available online: https://www.agridigital-skills.eu/ (accessed on 12 October 2025).

Benavides, L.M.C., Tamayo Arias, J.A., Arango Serna, M.D., Branch Bedoya, J.W., Burgos, D. Digital Transformation in Higher Education Institutions: A Systematic Literature Review. Sensors 2020, 20, 3291. https://doi.org/10.3390/s20113291.

Conde, J., López-Pernas, S., Pozo, A., Munoz-Arcentales, A., Huecas, G., Alonso, Á. Bridging the Gap between Academia and Industry through Students' Contributions to the FIWARE European Open- Source Initiative: A Pilot Study. Electronics 2021, 10, 1523. https://doi.org/10.3390/electronics10131523.

Loukatos, D., Androulidakis, N., Arvanitis, K. G., Peppas, K. P., & Chondrogiannis, E. (2022). Using Open Tools to Transform Retired Equipment into Powerful Engineering Education Instruments: A Smart Agri-IoT Control Example. Electronics, 11(6), 855. https://doi.org/10.3390/electronics11060855.

Loukatos, D., Kondoyanni, M., Kyrtopoulos, I. -V., Kiriakos, D. E., Psaromiligkos Y., Arvanitis, K. G. Innovative STEM Practices Fostering the Digital Transformation of Agriculture: The STEM4Agri Paradigm, 2024 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Kos Island, Greece, 2024, pp. 1-9. . https://doi.org/10.1109/EDUCON60312.2024.10578935.

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ

Βόλος 2025

ISBN : 978-618-82194-2-7