



Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος

# 11<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής

Η Γεωργική Μηχανική  
βασικό στοιχείο  
αιεφόρου ανάπτυξης  
της γεωργίας

ΒΙΒΛΙΟ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ

Βόλος 8 Νοε. 2019

Συνδιοργάνωση:



Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παράγωγης  
& Αγροτικού Περιβάλλοντος -  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

# ΧΟΡΗΓΟΙ ΤΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

## ΧΡΥΣΟΙ ΧΟΡΗΓΟΙ



## ΑΡΓΥΡΟΙ ΧΟΡΗΓΟΙ



## ΧΟΡΗΓΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ





ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ  
HELLENIC SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS

Οδός Φυτόκου, 38446, Ν. Ιωνία Μαγνησίας, Βόλος  
Τηλ: 2421093228, Fax: 2421093144, e-mail: gemots@uth.gr, nkatsoul@uth.gr

# 11<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο

Συνδιοργάνωση:

**Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής & Ζωικής Παραγωγής  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**

**Βόλος, 8 Νοεμβρίου 2019**

**Σχολή Γεωπονικών Επιστημών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**

Επιμέλεια έκδοσης: Ανθούλα Γιάκα  
Χρήστος Καβαλάρης

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η γεωργία σήμερα βρίσκεται σε ένα κρίσιμο σταυροδρόμι όπου θα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες επιλογές που θα εξασφαλίσουν τη συνέχεια και τη βιωσιμότητα του γεωργικού συνόλου. Από τη μια οι αυξημένες διατροφικές ανάγκες ενός ολοένα αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού και από την άλλη η υπερεκμετάλλευση των φυσικών πόρων πιέζουν να βρεθούν οι βέλτιστες λύσεις που θα επιτύχουν να αυξήσουν μεν την παραγωγή των τροφίμων, προστατεύοντας παράλληλα τους φυσικούς πόρους και εξασφαλίζοντας την αειφορία της γεωργικής παραγωγής. Οι λύσεις μπορούν να προέλθουν μόνο μέσα από τη συστηματική επιστημονική έρευνα και οι Γεωργικοί Μηχανικοί ή Μηχανικοί Βιοσυστημάτων καλούνται να διαδραματίσουν ένα κρίσιμο και καθοριστικό ρόλο συνδυάζοντας τις γνώσεις τους στις επιστήμες της Γεωπονίας, της Βιολογίας, της Μηχανικής και του Περιβάλλοντος για να προτείνουν νέες τεχνολογίες και συστήματα παραγωγής που θα αυξήσουν την αποτελεσματικότητα της παραγωγής γεωργικών προϊόντων με ορθολογικότερη διαχείριση των φυσικών πόρων, διασφαλίζοντας παράλληλα τη δημόσια υγεία και ενδυναμώνοντας την εμπιστοσύνη των καταναλωτών.

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος έχει καταφέρει μέσα από τα τακτικά της συνέδρια να συγκεντρώσει μια πλούσια βιβλιογραφία πάνω σε μια ευρεία θεματολογία όπως οι εδαφικοί και οι υδατικοί πόροι, η ενέργεια, το περιβάλλον, τα γεωργικά μηχανήματα και οι εξοπλισμοί, οι σύγχρονες τεχνολογίες, η αποθήκευση και μεταποίηση των γεωργικών προϊόντων κ.α. Κατάφερε παράλληλα να δώσει το κίνητρο και το μέσο σε πολλούς επιστήμονες και ερευνητές να δημοσιοποιήσουν τα αποτελέσματα των ερευνών τους στον Ελλαδικό χώρο. Το 11ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΓΜΕ που πραγματοποιείται στο Βόλο, στις 8 Νοεμβρίου 2019, στις εγκαταστάσεις της Γεωπονικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, φιλοδοξεί να συνεχίσει αυτή τη παράδοση, συγκεντρώνοντας τα ποιο πρόσφατα επιτεύγματα και αποτελέσματα των ερευνών. Επιπλέον, φιλοδοξεί να φέρει σε επαφή τους ανθρώπους που δραστηριοποιούνται στον τομέα της Γεωργικής Μηχανικής να καλλιεργήσει νέες συνεργασίες και να αναπτύξει δίαυλους επικοινωνίας με τη βιομηχανία και τον κλάδο του εμπορίου ώστε να γίνει εφικτή η διάχυση της έρευνας και η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων αυτής προς όφελος του ευρύτερου κοινωνικού συνόλου.

Στο παρόν τεύχος των πρακτικών περιέχονται 57 περιλήψεις των εργασιών που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια του 11<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής. Τα πλήρη κείμενα των εργασιών, έπειτα από την κρίση των κριτών, αποθέτονται σε ανοικτή βάση δεδομένων και μπορούν να αναζητηθούν στη ιστοσελίδα της ΕΓΜΕ <https://egme.gr/proceedings/>

Βόλος, Νοέμβριος 2019

Δρ. Χρ. Καβαλάρης

Πρόεδρος Οργανωτικής Επιτροπής.

## ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Χ. Καβαλάρης – Δρ. Ε.ΔΙ.Π., Π.Θ.  
Β. Αντωνιάδης – Επ. Καθηγητής, Π.Θ.  
Ν. Κατσούλας – Αν. Καθηγητής, Π.Θ.  
Θ. Μπαρτζάνας – Αν. Καθηγητής, Γ.Π.Α.  
Χ. Καραμούτης – Ε.ΤΕ.Π., Π.Θ.  
Ε. Γκόλια – Δρ. Ε.ΔΙ.Π., Π.Θ.  
Α. Αγγελάκη – Δρ. Ε.ΔΙ.Π., Π.Θ.  
Α. Γιάκα – Τεχν. Γεωπόνος  
Δ. Κατέρης – Ερευνητής ΕΚΕΤΑ  
Α. Ταγαράκης – Ερευνητής ΕΚΕΤΑ  
Γ. Θαλασσινός – Υπ. Διδάκτορας Π.Θ.

## ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αγγελάκη Αναστασία, Δρ. Ε.ΔΙ.Π., Π.Θ.  
Αντωνιάδης Βασίλειος, Επ. Καθηγητής Π.Θ.  
Αντωνόπουλος Βασίλειος, Καθηγητής Α.Π.Θ.  
Αρβανίτης Κωνσταντίνος, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.  
Βλόντζος Γεώργιος, Α. Καθηγητής Π.Θ.  
Βύρλας Παναγιώτης, Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας  
Γέμτος Θεοφάνης, Ομ. Καθηγητής Π.Θ.  
Γεωργίου Πανταζής, Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.  
Γιαλαμάς Θεόδωρος, Επ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας  
Γκόλια Ευαγγελία, Δρ. Ε.ΔΙ.Π. Π.Θ.  
Γράβαλος Ιωάννης, Αν. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας  
Δημήρκου Ανθούλα, Καθηγήτρια Π.Θ.  
Ζήσης Θωμάς, Καθηγητής Α.Π.Θ.  
Καβαλάρης Χρήστος, Δρ. Ε.ΔΙ.Π. Π.Θ.  
Καλφούντζος Δημήτριος, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλίας  
Κάργας Γεώργιος, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.  
Κατέρης Δημήτριος, Δρ. Γεωπόνος  
Κατσούλας Νικόλαος, Αν. Καθηγητής Π.Θ.  
Καυγά Αγγελική, Επ. Καθηγήτρια Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας  
Κίττας Κωνσταντίνος, Καθηγητής Π.Θ.  
Κυπαρρίσης Άρης, Αναπ. Καθηγητής Π.Θ.  
Κωστοπούλου Σοφία, Αν. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.  
Λεβίζου Ευθυμία, Λέκτορας Π.Θ.  
Μπαλαφούτης Αθανάσιος, Ερευνητής ΕΚΕΤΑ  
Μπαρμπαγιάννης Νικόλαος, Καθηγητής Α.Π.Θ.  
Μπαρτζάνας Θωμάς, Αν. Καθηγητής Γ.Π.Α.  
Μπόχτης Διονύσιος, Διευθυντής ΙΒΟ ΕΚΕΤΑ  
Μπριασούλης Δημήτριος, Ομοτ. Καθηγητής Γ.Π.Α.  
Ξανθόπουλος Γεώργιος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.  
Παπαδάκης Γεώργιος, Καθηγητής Γ.Π.Α.  
Παπαϊωάννου Χρυσούλα, Αν. Καθηγήτρια Π.Θ.  
Παυλάτου Βε Αθηνά, Καθηγήτρια Α.Π.Θ.  
Σακελλαρίου –Μακραντωνάκη Μαρία, Καθηγήτρια Π.Θ.  
Ταγαράκης Αριστοτέλης – Ερευνητής ΕΚΕΤΑ  
Φουντάς Σπύρος, Επ. Καθηγητής Γ.Π.Α.

## Ευχαριστίες

Η Εταιρεία Γεωργικών Μηχανικών Ελλάδος εκφράζει τις θερμές ευχαριστίες προς όλους τους συγγραφείς των εργασιών, τους κριτές, τα μέλη της Οργανωτικής και της Επιστημονικής Επιτροπής που αφιέρωσαν τον πολύτιμο χρόνο τους για να συμμετάσχουν και να βοηθήσουν στο συνέδριο και στους χορηγούς που με την οικονομική τους συνδρομή συνέβαλαν στην άρτια διοργάνωση και την επιτυχία του συνεδρίου. Τέλος, ευχαριστούμε ιδιαίτερα το Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που ανέλαβε την συνδιοργάνωση του 11<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της ΕΓΜΕ ενισχύοντας σημαντικά την όλη προσπάθεια

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΣΗΓΗΤΩΝ

GaschkA.	Δόλιας Γ.
Kitić G.	Δουγκά Γ.
Kostić M.	Δουλγέρης Χ
Ljubičić N.	Ελβανίδη Α.
SihagP.	Ευθυμίου Ε.
ΑγγελάκηΑ.	Ζαλίδης Γ.
Αγγελοπούλου Θ.	Ζαχαρόπουλος Ι.
Αλεξόπουλος Δ.	Ζιάκας Ν.
Αληφραγκή Μ.	Ζούντα Δ.
Αναγνώστης Α.	Καβαλάρης Χ.
Αναγνωστόπουλος Δ.	Καλαμαράς Σ.
Αναστασίου Ε.	Καλορίζος Β.
Ανέστης Β.	Καλφούντζος Δ.
Αντωνιάδης Β.	Καμίτσος Ε.
Αντωνόπουλος Β.	Κάντζου Ο.Δ.
Αντωνόπουλος Β.Α.	Καράλη Ι.
Αντωνόπουλος Β.Ζ.	Καραμανώλη Κ.Ι.
Αντωνόπουλος Ζ.Β.	Καραμούζης Δ.
Αποστολίδου Η.Γ.	Καραμούτης Χ.
Αρβανίτης Κ.	Καραμπατζάκης Η.
Αρβανίτης Χ.	Καραπαναγιωτίδης Ι.
Ασημινάρη Γ.	Καρατσιβου Ε.
Ασλανίδου Μ.	Καργάς Γ.
Ασχονίτης Β.	Καρπούζος Δ.
Βαξεβάνου Σ.	Κατέρης Δ.
Βαρλάγκας Τ.	Κατικαρίδης Δ.
Βασιλειάδης Γ.	Κατσούλας Ν.
Βατσανιδου Α.	Καυγά Α.
Βλόντζος Γ.	Καυσοσιδέρης Φ.
Βύρλας Π.	Κίττα Ε.
Γέμτος Θ.	Κίττας Κ.
Γεωργακάκης Κ.	Κόκκορα Μ.
Γεωργίου Π.	Κολοβός Δ.
Γεωργίου Π.Ε.	Κοτσιφάκη Β.
Γιακουμάκης Σ.	Κουϊμτζή Μ.
Γιαλαμάς Θ.	Κούκουζας Ν.
Γιαννούλης Α.	Κουκούλη Π.
Γιοβά Ε.	Κωνσταντάκος Σ.
Γκόλια Ε.	Κωστάκος Ε.
Γκούση Ν.	Κωστοπούλου Σ.
Γράβαλος Ι.	Κωτσόπουλος Θ.
Γριβάκης Κ.	Λακιώτης Κ.
Δάρρα Ν.	Λαμπρίδη Μ.
Δεμερτζή Κ.	Λεβίζου Ε.
Δημήρκου Α.	Λιούπης Μ.



Λόντρα Π.  
Λυκοσκούφης Ι.  
Μαμαλούδης Χρ.  
Μαρκούση Μ.  
Μαρτζοπούλου Α.  
Μενεξές Ι.  
Μετσοβίτη Ν.Μ.  
Μητρογιάννης Δ.  
Μπαζιώτης Ι.  
Μπαλαφούτης Α.  
Μπαμπάκος Κ.  
Μπανιάς Γ.  
Μπαρτζάνας Θ.  
Μπόλης Ι.  
Μπόχτης Δ.  
Μπριασούλης Δ.  
Μυρεσιώτης Χ.  
Μυστριώτης Α.  
Μωυσιάδης Β.  
Ντότα Δ.Α.  
Ντυκέν Μ.Ν.  
Ξανθόπουλος Γ.  
Οικονομίδης Α.  
Ορφανουδάκης Μ.  
Παλλές Δ.  
Παναγάκης Π.  
Πανγκά Δ.  
Παπαγεωργίου Ε.  
Παπαδόπουλος Α.  
Παπαιωάνου Ι.  
Παπαμιχαήλ Δ.  
Παπαναστασίου Δ.Κ.  
Παπαπολυμέρου Γ.

Πικάση Α.  
Παυλάτου-Βε Α.  
Ραχμανίδης Κ.  
Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ.  
Σιμιτζής Π.  
Σιούρας Α.  
Σκούφος Ι.  
Σούλης Κ.  
Σπαθάρας Σ.  
Σπύρου Χρ.  
Σταμούλης Δ.  
Σταφύλη Ε.  
Στεφανίδης Ρουσέτος Μ.  
Στεφανοπούλου Μ.  
Ταγαράκης Α.  
Ταγαράκης Α.Χ.  
Τζανιδάκης Χ.  
Τζιάκας Σ.  
Τζιόλας Ν.  
Τζόρα Α.  
Τσικνίδης Μ.  
Τσούλιας Ν.  
Τσουμαλάκου Ε.  
Φιδάρος Δ.  
Φιρφιρής Β.  
Φουντάς Σπ.  
Χαλκίδης Η.  
Χαρτοδιπλωμένου Μ.Α.  
Χατζηνικολάου Μ.  
Χισκάκης Μ.  
Χρήστου Μ.  
Ψηρούκης Β.  
Ψυχογιού Μ.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

## ΕΝΟΤΗΤΑ 3<sup>η</sup>

### ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΕΝΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΓΟΤΘΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΠΕΡΑΤΟ ΑΝΕΜΟΦΡΑΚΤΗ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

**Γιαννούλης Α., Α. Μυστριώτης & Δ. Μπριασούλης .....200**

ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΛΥΨΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΥΠΟ ΤΗΝ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

**ΔούγκαΓ. & Μπριασούλης Δ.....211**

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (IR) ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΥΤΩΝ ΜΕΛΙΤΖΑΝΑΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

**Καυγά Α. & Λυκοσκούφης Ι. ....229**

ΜΕΛΕΤΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

**Φιρφιρήs Β., Καλαμαράς Σ., Χρήστου Μ., Μαρτζοπούλου Α. & Κωτσόπουλος Θ. ....236**

EVALUATION OF BASIL CROP AS A SECONDARY CROP IN A CASCADE HYDROPONIC SYSTEM: PRELIMINARY RESULTS

**Karatsivou, E., A. Elvanidi, M. Xatzinikolaou, A, Gaschk & N. Katsoulas .....248**

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΦΥΚΟΥΣ *Euglena gracilis* ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ ΣΕ ΠΡΩΤΕΪΝΕΣ ΚΑΙ ΛΙΠΗ

**Μετσοβίτη Μ.Ν., Ν. Κατσούλας, Γ. Παπαπολυμέρου & Ι. Καραπαναγιωτίδης.....255**

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΝΑΤΡΙΟΥ ΣΕ ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

**Ασλανίδου Μ., Ν. Κατσούλας, Α. Ελβανίδη, Ε. Τσουμαλάκου, Ε. Λεβίζου .....262**

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΓΓΟΥΡΙΚΟΥ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

**Κίττα Ε.& Ν. Κατσούλας .....273**

## **ΕΝΟΤΗΤΑ 3<sup>η</sup>**

# **ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ**

## ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗΝ ΟΡΟΦΗ ΕΝΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΓΟΤΘΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΠΕΡΑΤΟ ΑΝΕΜΟΦΡΑΚΤΗ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

**A. Γιαννούλης, A. Μυστριώτης, Δ. Μπριασούλης**

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, e-mail: briassou@aua.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σύστημα περατού ανεμοφράκτη (38% περατότητα) και γοθτικού τύπου θερμοκηπίου μοντελοποιήθηκε αριθμητικά (CFD) για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης του συστήματος υπό την δράση του ανέμου. Μελετήθηκαν ανεμοφράκτες σε δεδομένη απόσταση από το θερμοκήπιο διαφορετικού ύψους. Υπολογίστηκαν οι συντελεστές πίεσης στην οροφή και τον προσήνεμο τοίχο του θερμοκηπίου όπως και στον ανεμοφράκτη, ώστε να καθοριστεί το βέλτιστο ύψος του. Οι πιέσεις στην οροφή του θερμοκηπίου διαφοροποιούνται κυρίως στα δύο πρώτα ανοίγματα (έξι συνολικά) με τη μεταβολή του ύψους του ανεμοφράκτη. Ο ανεμοφράκτης με ύψος ίσο με το μισό του ύψους της οροφής βρέθηκε να είναι ο πιο αποδοτικός αποτελώντας ένα καλό μέσο προστασίας ενώ οι χαμηλές ανεμοπιέσεις πάνω στον ίδιο επιτρέπουν τον σχεδιασμό μιας ελαφράς και χαμηλού κόστους κατασκευής.

*Λέξεις κλειδιά:* θερμοκήπιο, περατός ανεμοφράκτης, αριθμητική προσομοίωση, συντελεστής πίεσης

## WIND LOADS ON THE ROOF OF A MULTISPAN GREENHOUSE PROTECTED BY A POROUS WINDBREAK THROUGH NUMERICAL SIMULATIONS

**A. Giannoulis, A. Mistriotis, D. Briassoulis**

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag.Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, e-mail: briassou@aua.gr

### ABSTRACT

A gothic-type six-span greenhouse protected by a 38% porous windbreak located at a given distance from the greenhouse has been numerically modelled (CFD) in order to study the interaction of the windbreak-greenhouse system with the wind. Three different windbreak heights were tested, namely at gutter height, at mid-roof height and at ridge height. The pressure coefficients were calculated on the roof and the windward wall of the greenhouse and at the windbreak itself for the optimum windbreak height to be determined. Results showed that pressure differences on the greenhouse roof appear mostly on the first two spans as the windbreak height changes. The case of a windbreak with height equal to the mid-roof height was found to be the most efficient one, in terms of offered protection and combined to low wind pressures on the windbreak itself, allowing for a light, low-cost structure.

*Keywords:* greenhouse, porous windbreak, numerical simulation, pressure coefficients

## 1. INTRODUCTION

Windbreaks made of agricultural plastic nets are a common practice nowadays against dominant winds for the protection of greenhouses by reducing wind loads and minimizing heat losses. However, erecting a structure close to another often leads to complicated airflow patterns causing a strong aerodynamic interaction between them.

Many studies can be found concerning wind pressures developing on free standing walls or vertical panels at ground level. Most of these studies concern solid vertical panels, while research on porous panels has also been carried out. A detailed review of the aerodynamic characteristics of such permeable or impermeable structures can be found in (Giannoulis et al, 2012). Standards and design codes (EN 1991-1-4, 2005) also provide guidelines for calculating design wind loads on free standing walls and panels (Giannoulis et al, 2012).

Modern greenhouses are light low-rise steel structures (as compared to conventional civil buildings) and their classification is based on their geometric characteristics. Their cladding material is usually low-density polyethylene (LDPE) multilayer plastic film (e.g. in the Mediterranean region). Lately, permeable materials like agricultural nets became popular as covering materials for net-houses (Teitel and Tanny, 1999). Two greenhouse types widely used in Greece and in the Mediterranean region in general, are the arched roof and the gothic type greenhouses.

The interaction of the wind with greenhouses has been studied in the case of duo-pitch structures, such as the Venlo type (Mistriotis et al., 1997). There are only few published research works concerning wind loads on the arched roof greenhouses (Kwon et al., 2016; Kim et al., 2017). On the other hand, research on gothic-type greenhouses is very limited (Giannoulis et al. 2018).

Research works aimed to minimize the wind pressures on a greenhouse protected by a windbreak are also limited in literature (Mistriotis et al, 2012). Critical parameters for the interaction between the wind and porous windbreak-greenhouse structural systems were investigated through both full-scale and wind tunnel experiments, including the distance between the two structures (Richardson, 1986), the porosity ratio of the protective porous windbreak (Tahouri et al, 1991) and the windbreak height (Richardson, 1987).

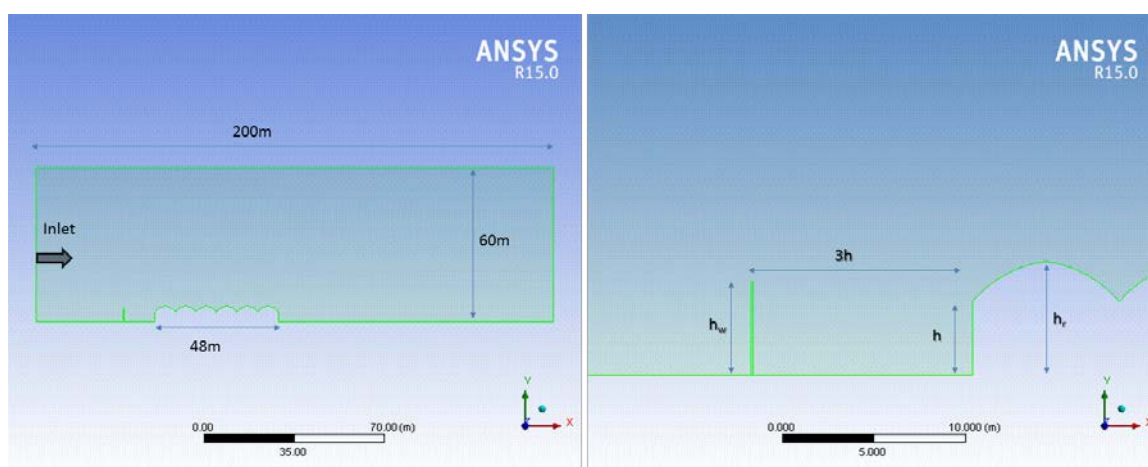
A detailed experimental analysis of the airflow patterns around an integrated windbreak-greenhouse system requires full-scale or wind tunnel experiments which can be time consuming and expensive. A more flexible to use, low-cost alternative is numerical simulations (CFD). Although CFD analysis encounters difficulties in simulating airflow around solid greenhouses (Mistriotis & Briassoulis, 2002), it was proven to be an efficient tool for simulating airflows through net covered structures (Giannoulis *et al*, 2010) and estimating the corresponding aerodynamic pressure coefficients (Briassoulis *et al*, 2010).

The aim of the present research work was the optimization of the height of a porous windbreak protecting a six-span gothic type greenhouse, for the reduction of the wind pressures developing on the greenhouse roof but also to avoid a heavy and expensive windbreak structure. To achieve this, the wind pressures on the roof and the windward wall of the greenhouse and on the windbreak itself were analyzed and the optimum windbreak height was defined. The wind pressures on the greenhouse roof were considered to be the most critical design parameter in order to optimise the structural design of the greenhouse. Comparisons with the case of an unprotected greenhouse were carried out.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Numerical Model

The combined system consisted of a porous windbreak and a plastic film covered six-span gothic-type greenhouse. The airflow around the windbreak-greenhouse system was numerically simulated in a two-dimensional wind tunnel of size 200m x 60m. The greenhouse was placed at 46 m from the wind tunnel inlet. The gutter height was  $h = 4\text{m}$ , the height at the ridge was  $h_r = 6.2\text{m}$  and the width of each span was  $s = 8\text{m}$  (a total of 48m). The distance of the windbreak from the greenhouse at  $3\text{-}4h$  and the aerodynamic characteristics of the porous cladding material (representative of an agricultural plastic net of 38% porosity) were selected based on the research work of Mistriotis et al (2012) to achieve the optimum reduction of the wind pressure on the windward greenhouse wall (Fig.1). Only transverse wind was considered.

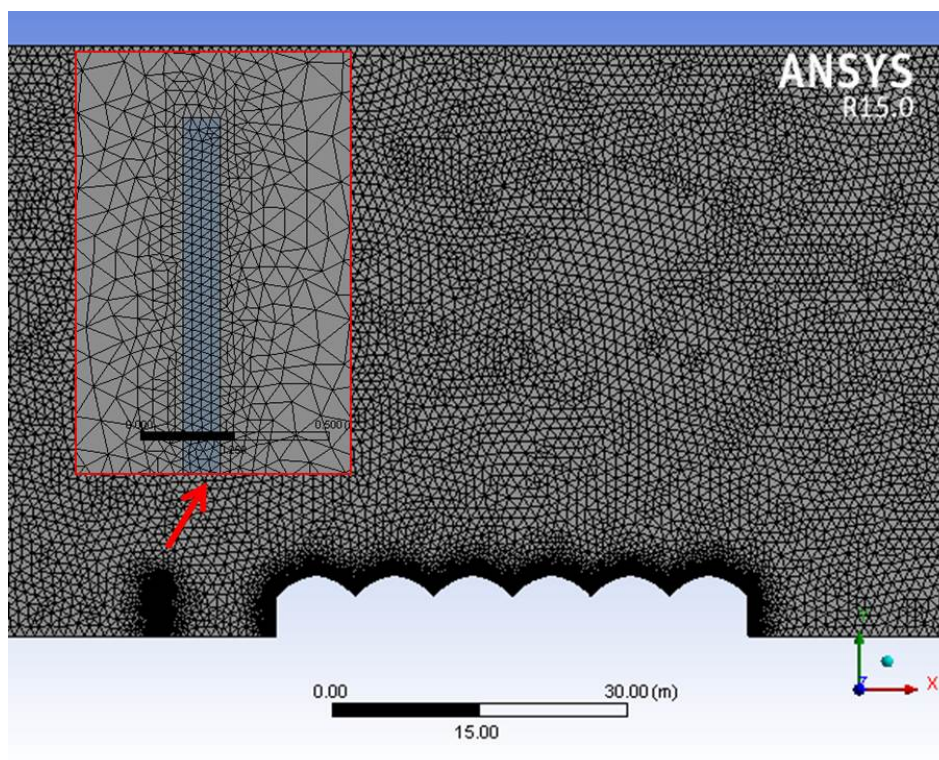


**Figure 1.** Geometry of the numerical model: a) entire domain, b) windbreak and greenhouse dimensions and distance

The effect of the windbreak height  $h_w$  was analyzed with respect to minimization of the wind pressures on the greenhouse roof. Three different windbreak heights  $h_w$  were tested equal to: the gutter height  $h_w = h = 4\text{m}$ , the mid-height of the roof  $h_w = 5.1\text{m}$  and the ridge height  $h_w = h_r = 6.2\text{m}$ . The windbreak was model as a porous material of 0.1 m thickness simulating the aerodynamic behavior of the net as explained in section 2.3. Modeling the actual thickness of the cladding material (plastic net, in the range of 0.3-0.5mm) would increase unreasonably the number of elements and the computational time without improving the results.

### 2.2 Mesh and simulation setup

The commercial software package ANSYS-CFX implementing FVM was used in order to simulate numerically the interaction of the wind with the combined system of the porous windbreak and the six-span gothic-type greenhouse. The mesh consisted of triangular elements. The mesh structure was finer close to the studied bodies, namely the windbreak and the greenhouse (Fig.2), in order to better simulate the turbulent airflow occurring at these locations. The grid consisted of 1.5 million elements. Further mesh refinement did not affect significantly the results. The area of the porous windbreak was also spanned by triangular elements. Five elements were used along the porous material thickness following the recommendation for more than three elements given by Briassoulis et al (2010).



**Figure 2.** The mesh of the entire domain and a detailed image of the windbreak mesh

The turbulent model applied for the numerical simulation was the  $k-\omega$  SST (Kim et al, 2017). The specific model was used due to its good performance in fluid structure interactions where flow separation occurs. The wind velocity profile was set to be logarithmic at the inlet of the wind tunnel with a friction length  $z_0$  equal to 0.05m. The inlet velocity at 10m high was set equal to  $2\text{ms}^{-1}$ . Inlet boundary conditions were also provided for the turbulent characteristics of the wind,  $k$  ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ) and  $\omega$  ( $\text{s}^{-1}$ ) according to Richards & Hoxey, 1993. At the ground surface, it was assumed that wall boundary conditions exist. This means that all components of the wind velocity at the wall were set to zero (no slip condition). At the outlet of the wind tunnel the pressure was set to zero to simulate the open wind tunnel end. Finally, the top of the model wind tunnel was assumed as a frictionless barrier and only the vertical wind velocity component was set equal to zero (free slip condition).

Wind loads on the windbreak and the greenhouse sidewall and roof were expressed by the dimensionless pressure coefficient,  $c_p$ , defined as the average wind pressure on an area of the structure, normalised by the dynamic wind pressure at a reference height  $z_{ref}$ :

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho v_{ref}^2 \quad (1)$$

where  $P$  (Pa) is the average pressure on the studied surface,  $v_{ref}$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) is the wind velocity at  $z_{ref}$  (m), and  $\rho$  is the air density ( $\text{kgm}^{-3}$ ). The reference height in the present work is taken equal to the height of the greenhouse ridge ( $h=6.2\text{ m}$ ) for all studied structures based on the specifications of the Eurocode EN1991-1-4.

### 2.3 Simulation of the Porous medium

The windbreak made of permeable plastic agricultural net was simulated as a porous medium by obeying the Forchheimer's equation (Lage, 1998). The pressure drop,  $\Delta p(N/m^2)$ , across a porous material of thickness  $\Delta x(m)$  is expressed by equation (2).

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\mu}{D} V + C \rho V^2 \quad (2)$$

where  $V(m/s)$  is the velocity of fluid,  $\mu(kgm^{-1}s^{-1})$  is the viscosity, and  $\rho(kg/m^3)$  is the density of the fluid.  $D(m^2)$  is the specific permeability of the material, and  $C(m^{-1})$  is the aerodynamic resistance coefficient.

Equation (1) can be simplified in the case of a thin permeable material into equation (3):

$$\Delta p = \beta V + a V^2 \quad (3)$$

where

$$\beta = \frac{\mu}{D} \Delta x \quad a = C \rho \Delta x \quad (4)$$

The factors  $a(N s^2/m^4)$  and  $\beta(N s/m^3)$  describe the aerodynamic characteristics of the porous material independently of its thickness and can be determined by wind tunnel measurements (Hemming et al, 2005). For the agricultural net used as coverage for the protective windbreak the measured aerodynamic coefficients were found equal to  $\alpha=3.0229$  and  $\beta=0.1179$ .

### 2.4 Validation of the numerical model

A numerical simulation was carried out in a previous research work (Giannoulis et al. 2018) for the validation of the numerical results when modelling the airflow around single or multi-span greenhouses covered with plastic film (impermeable structure). The results of the numerical simulation were compared to the results of the wind tunnel experiments by Kwon et al (2016) and an already validated numerical study by Kim et al (2017). A good qualitative and quantitative agreement with respect to the pressure distribution on the greenhouse roof was found in all cases.

## 3. RESULTS

Pressure coefficients were calculated both on the greenhouse (roof and windward wall) and the windbreak. The most significant design parameter considered for the optimization of the porous windbreak height was the protection provided on the greenhouse roof defined by the pressure coefficients reduction when compared to the unprotected greenhouse. In addition, all pressure coefficients results were compared in the parametric analysis.

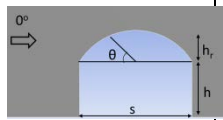


### 3.1 Greenhouse Roof

The greenhouse roof was divided into sections following the recommendations of the EN-13031-1-2001 standard and average  $c_p$  values were calculated. The roof divisions depend on the roof angle  $\theta(^{\circ})$ . There are four divisions for the first span (A1, B1, C1, D1, the number represents the corresponding span) since it interacts directly with the impinging wind and three area divisions for the rest of the spans, as shown in Table 1.

Table 1 presents average pressure coefficients in different sections of the greenhouse roof only for the first three spans. Changes in pressure coefficients for the remaining spans are insignificant between the protected and the unprotected greenhouse cases. This is also evident in Fig. 3 where the pressure coefficients distribution along the entire roof is given graphically. Small deviations that appear at the ridges of the last three spans are localized phenomena at an area close to each ridge and do not affect average values.

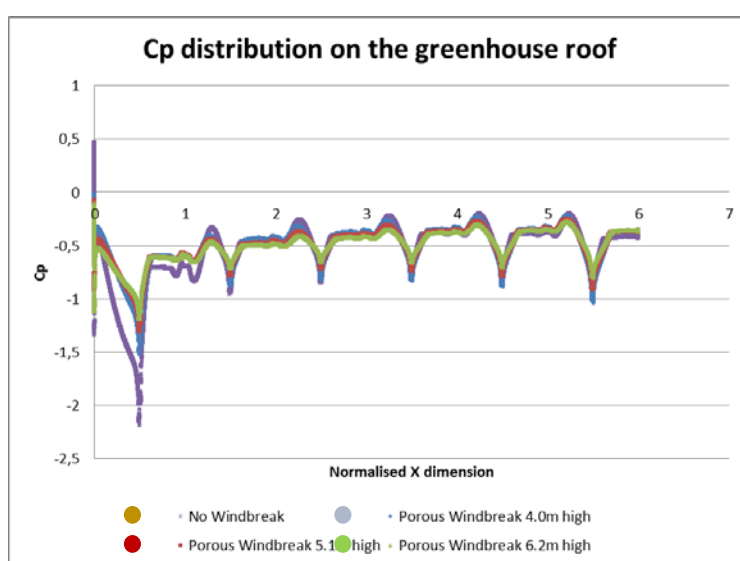
**Table 1.** Average Pressure Coefficients on different locations on the greenhouse roof

Span	Location based on the Roof angle $\theta(^{\circ})$ range 	Porous Windbreak Height (m)						Un-protected
		Gutter Height (4.0)		Mid-Roof Height (5.1)		Ridge Height (6.2)		
		$c_p$	% reduction	$c_p$	% reduction	$c_p$	% reduction	
1 <sup>st</sup>	A1 (0-55)	-0,57	32,14	-0,61	27,38	-0,66	21,43	-0,84
	B1 (55-70)	-1,00	31,97	-0,92	37,41	-0,88	40,14	-1,47
	C1 (70-115)	-1,09	22,70	-0,96	31,91	-0,89	36,88	-1,41
	D1 (115-180)	-0,61	15,28	-0,62	13,89	-0,62	13,89	-0,72
2 <sup>nd</sup>	A2 (0-80)	-0,54	8,47	-0,56	5,08	-0,57	3,39	-0,59
	B2 (80-110)	-0,74	2,63	-0,67	11,84	-0,64	15,79	-0,76
	C2 (110-180)	-0,46	0,00	-0,49	-6,52	-0,51	-10,87	-0,46
3 <sup>rd</sup>	A3 (0-80)	-0,41	-2,50	-0,45	-12,50	-0,47	-17,50	-0,40
	B3 (80-110)	-0,69	1,43	-0,63	10,00	-0,59	15,71	-0,70
	C3 (110-180)	-0,41	0,00	-0,43	-4,88	-0,54	-31,71	-0,41

For the windward location A1 the average pressure coefficient reduction decreases with the windbreak height. Reduction drops about 4.7% (from 32.14% to 27.38%) when the windbreak height increases from 4 to 5.1m and even more, about 6% (from 27.38% to 21.43%) when increasing from 5.1 to 6.2m. For the B1 and C1 locations the average pressure coefficient reduction is higher. The reduction is more significant when the windbreak height increases from 4 to 5.1m (B1: from 31.97% to 37.41%, higher reduction by 5.4%, C1: from 22.70% to 31.91%, higher reduction by 9.2%) than when increasing from 5.1 to 6.2m (B1: from 37.41% to 40.14%, higher reduction by 2.7%, C1: from 31.91% to 36.88%, higher reduction by 5.0%). For the D1 location changes in the windbreak height do not affect the average pressure coefficient.

For the second and third span the locations close to the ridge, that is B2 and B3, are better protected when the porous windbreak is higher. The protection provided when changing the windbreak height from 4 to 5.1m is again slightly more efficient than when the windbreak becomes as high as the greenhouse ridge (6.2m). For the B2 location the reduction moves from 2,63% to 11,84% to 15,79% for corresponding changes from 4.0m to 5.1m to 6.2m high windbreaks, representing differences of about 9.2% and 4.0% for the height changes. Similar results were found for the B3 location.

For the other locations % reduction can be misleading since average pressure coefficients values are quite small and so are the corresponding changes. As an example, for the A3 location the 4.0m high windbreak causes a reduction in the value of the average pressure coefficient of -2.50% (increase, actual  $c_p$  value -0.41) while the 5.1m high windbreak causes a reduction of -12.50% (increase, actual  $c_p$  values -0.45). Analogous are the results for the sections A2, C2, A3 and C3. Average pressure coefficients are not significantly affected in these locations.



**Figure 3.** The distribution of the pressure coefficients on the greenhouse roof for the three different windbreak configurations and for the unprotected greenhouse

This behavior may be explained in terms of the airflow pattern (refer to section 3.4). Part of the air mass approaching the windbreak becomes bleed flow passing through the net and a second part escapes above the windbreak tip and is redirected towards the windward side of the first span. The redirected airflow is significant since the simulated agricultural net used as the porous windbreak coverage has a small porosity (38%) and its aerodynamic behavior imposes increased resistance to air mass.

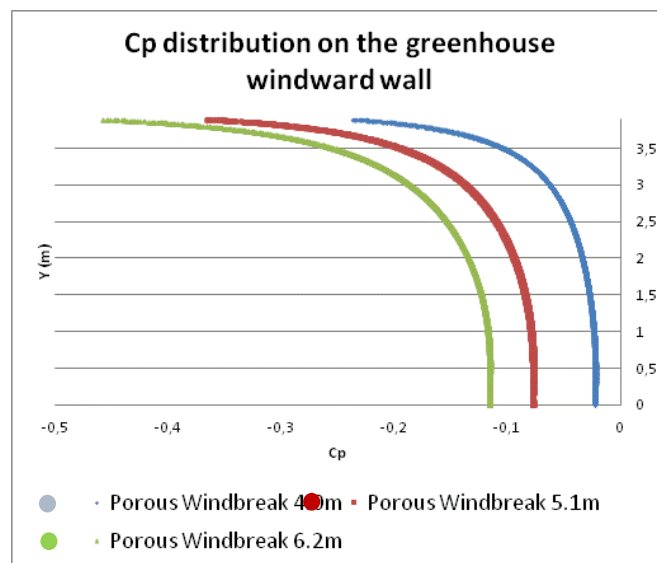
### 3.2 Greenhouse Windward Wall

Results for the average pressure coefficients of the greenhouse windward wall are shown in Table 2. Average pressure coefficients % reductions –also shown in Table 2– were calculated using absolute average pressure coefficient values. The negative values for the cases where the porous windbreak exists are discussed in section 3.4.

**Table 2.** Average pressure coefficients on the windward wall of the greenhouse

Windbreak Configuration	Gutter Height (4.0)	Mid-Roof Height (5.1)	Ridge Height (6.2)	Unprotected
Average Pressure Coefficient ( $c_p$ )	-0.06	-0.13	-0.18	0.40
Reduction (%)	85	68	55	N/A

The pressure coefficients distributed along the windward wall of the gothic-type greenhouse, presented in Fig. 4, are shown to be sufficiently decreased in all cases. Highest reduction occurs for the 4.0m high windbreak but in all cases the protection offered is good. For the case where the windbreak becomes 6.2m high the interaction between the two structures and the airflow becomes more important regarding the loading on the windward wall of the greenhouse. Differences of the average values are indicative of the differences of the wind pressures on the wall as Fig. 4 shows. Pressure coefficients remain almost constant up to a height of 3.5m ( $h = 4m$ ). Further increase of the  $c_p$  values afterwards occurs as the airflow tends to leave the windward wall and separate at the gutter as it moves to the roof.



**Figure 4.** The distribution of the pressure coefficients on the greenhouse windward wall for the three different windbreak configurations

### 3.3 Porous Windbreak

The average net pressure coefficients were calculated for the protective porous windbreak in each case. The average pressure coefficients and the % increase compared to the lowest windbreak configuration of 4.0m are presented in Table 3. The results show an almost 20% increase of the net pressure coefficient for the 5.1m high windbreak and more than 45% increase for the 6.2 m high windbreak. These values are rather high and should be taken into consideration when designing a porous windbreak-greenhouse system to avoid heavy and expensive structures.

**Table 3.** Average net pressure coefficient on the porous windbreak

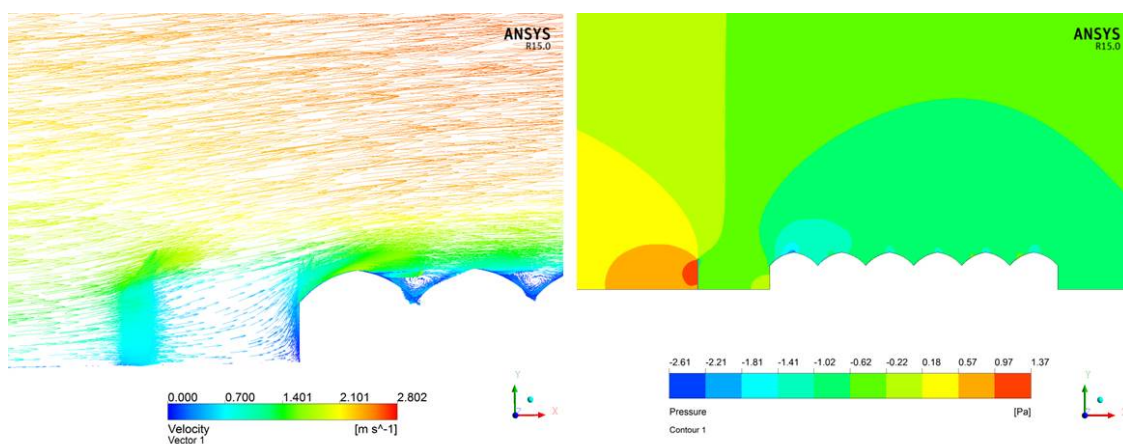
Windbreak Configuration	Gutter Height (4.0)	Mid-Roof Height (5.1)	Ridge Height (6.2)
Average Pressure Coefficient ( $c_p$ )	0.68	0.82	1.00
Increase (%)	N/A	19.57	45.34

### 3.4 Discussion

Predicting the airflow when the wind interacts with two neighboring structures can be complicated and unexpected results could occur. In the numerical model analyzed, the airflow impinges on a 38% porous windbreak. The airflow separates in two parts, the bleed flow that passes through the porous windbreak with its velocity reduced and another part that accelerates above the windbreak tip and is redirected against the windward area of the first span of the greenhouse roof (location A1 in Table 1)

The agricultural net simulated in this study represents a significant obstruction to the wind, since it has a low porosity equal to 38% but mostly because of its aerodynamic coefficients which correspond to a Raschel type plastic net of complex weave (Castellano et al., 2009). As a result, the bleed flow has a reduced velocity so that the wind loading on the windward wall of the greenhouse is highly reduced as well (Table 2).

On the other hand, as the accelerated redirected flow passes above the windward wall and the windward area of the first roof span causes suction to the existing air below. Therefore, the increased windbreak height leads to a more intense suction at this location. This subsequently causes the suction on the greenhouse windward wall corresponding to the negative pressure coefficient values observed in Table 2, Figure 4. This is the reason for the unexpected increase of the wind loading at the A1 location (windward area of the first span of the roof) when the windbreak height increases. This increase does not occur in the ridge area B1, C1 since the windbreak height does not exceed the greenhouse ridge height.



**Figure 5.** The porous windbreak-gothic type greenhouse system for the 5.1m windbreak case. Airflow velocity vectors and pressure contours

Figure 5 presents the velocity vectors of the airflow around the porous windbreak – gothic type six-span greenhouse and pressure distribution in the numerical domain via contours for the 5.1m high windbreak case.

#### 4. CONCLUSIONS

A 38% porous windbreak was analyzed as a protective means for a gothic-type six-span greenhouse covered by impermeable plastic film. Different windbreak heights were investigated for the optimal windbreak configuration to be defined. The distance of the windbreak from the greenhouse and the agricultural plastic net simulated as the porous cladding material of the windbreak were determined in a previous research work in order to maximize the reduction of the windward greenhouse wall wind loads. Average pressure coefficients calculated on the windward wall and the protective windbreak were also taken under consideration.

The results of the present analysis showed that the most efficient wind break was the one with height equal to the mid-roof height. Such a windbreak comprises a very good and efficient means of protection especially for the ridge areas in all spans (locations B1, C1, B2, C2, B3, C3 in Table 1), while avoiding increased wind loading on the windward wall, the windbreak itself and the windward area of the first span of the roof (location A1 in Table 1). The proposed configuration would allow for an optimized windbreak structure that offers significant protection against severe wind loads on the gothic-type greenhouse roof.

#### 5. REFERENCES

- Briassoulis D., Mistriotis A., Giannoulis A. 2010. [\*Wind forces on porous elevated panels\*](#). J Wind Eng Ind Aerodyn. 98: 919-928.
- Castellano S., Scarascia Mugnozza G., Russo G., Briassoulis D., Mistriotis A., Hemming S., Waaijenberg D., 2009. *Design and use criteria of netting systems for agricultural production in Italy*. Journal of Agricultural Engineering, 3, 31-42.
- EN 1991-1-4:2005 - Eurocode 1: *Basis of design and actions on structures-Part 1-1-4: General actions – Wind actions 1-1-4*. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN-13031-1-2001: *Greenhouses: Design and construction Part 1: Commercial production greenhouses*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Giannoulis A., Briassoulis D., Mistriotis, A., 2018. *Wind Pressures on Arched and Gothic Roof Greenhouses*. International Conference of Agricultural Engineering (AGENG 2018), Wageningen, Netherlands.
- Giannoulis A., Mistriotis A., Briassoulis D. 2010. *Experimental and numerical investigation of the airflow around a raised permeable panel*. J Wind Eng Ind Aerodyn. 98: 808-817.
- Giannoulis A., Stathopoulos T., Briassoulis D., Mistriotis, A., 2012 *Wind loading on vertical panels with different permeabilities*. J Wind Eng Ind Aerodyn. 107-108: 1-16.

- Hemming S., Campen J., Waaijenberg D., 2005. *Testing of air permeability performance of agricultural nets*. Internal report, Agrotechnology and Food Innovations B.V., Wageningen UR, Wageningen, The Netherlands.
- Kim R., Lee I.B., Kwon K., 2017. *Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model*. Biosystems Engineering. 164: 235-256.
- Kwon K., Kim D., Kim R., Ha T., & Lee I.B., 2016. *Evaluation of wind pressure coefficients of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land using a large-sized wind tunnel*. Biosystems Engineering, 141, 58-81.
- Lage J.L., 1998. *The Fundamental Theory of Flow through Permeable Media from Darcy to Turbulence*. p.1-31. In: D.B. Ingham and I. Pop (eds.), *Transport Phenomena in Porous Media*, Pergamon Press, Oxford.
- Mistriotis A., Briassoulis D., 2002. *Numerical estimation of the internal and external aerodynamic coefficients of tunnel greenhouse structure with openings*. Computers and Electronics in Agriculture. 34: 191-205.
- Mistriotis A., De Jong T., Wagemans M., Bot G., 1997. *The analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings by Computational Fluid Dynamics (CFD)*. IFAC Proceedings Volumes, 30 (5), 289-295.
- Mistriotis A., Giannoulis A., Briassoulis D., 2012. *Numerical estimation of wind loads on a greenhouse protected by a net-covered windbreak analyzed as an integrated system*. Acta Hortic. (ISHS) 952:169-176.
- Richards P.J., Hoxey R.P., 1993. *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-e turbulence model*. J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics, 46&47, 145-153.
- Richardson G.M., (1986). *Wind loads on a full-scale film-plastic clad greenhouse: With and without shelter from a windbreak*. JWEIA. 23: 321-331.
- Richardson G.M., 1987. *A permeable windbreak: Its micro-environment and its effects on structural loads*. J. Agric. Engng Res. 38, 65-76.
- Teitel M., Tanny J., 1999. *Natural ventilation on greenhouses: experiments and model*. Agricultural and Forest Meteorology, 96 (1-3), 59-70.

## ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΛΥΨΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΥΠΟ ΤΗΝ ΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

**Γ. Δούγκα, Δ. Μπριασούλης**

Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα ΑΦΠ-ΓΜ, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα, e-mail: gdougka@aua.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η φέρουσα ικανότητα φύλλων κάλυψης θερμοκηπίου υπό την δράση του ανέμου διερευνάται αναλυτικά για την περίπτωση τυπικού θερμοκηπίου γοθτικού τύπου. Το φύλλο προσομοιώνεται ως μεμβράνη με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και οι ανεμοπιέσεις υπολογίζονται με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι, καθώς αυξάνεται η πίεση του ανέμου, η κύρια εφελκυστική τάση στην μεμβράνη υπερβαίνει την τάση διαρροής του υλικού. Κατά συνέπεια, το φύλλο χάνει την αρχική του προένταση και την ελαστικότητά του ως υλικό κάλυψης. Ανάλογα με την ένταση της ανεμοπίεσης και τον βαθμό παλαιώσης του υλικού, μπορεί να επέλθει και η πλήρης αστοχία του φύλλου. Η ανάλυση υπέδειξε ότι η αστοχία της μεμβράνης οφείλεται σε ανεπαρκή στήριξη των φύλλων στον φέροντα οργανισμό. Η συμπεριφορά αυτή επαληθεύεται από πραγματική περίπτωση αστοχίας των φύλλων ίδιου τύπου θερμοκηπίου.

*Λέξεις κλειδιά:* Θερμοκήπιο γοθτικού τύπου, δράση ανέμου, λειτουργία μεμβράνης, αστοχία φύλλων κάλυψης θερμοκηπίου, σύστημα στήριξης φύλλων κάλυψης

## LOAD CARRYING CAPACITY OF GREENHOUSE COVERING FILMS UNDER WIND ACTION

**G. Dougka, D. Briassoulis**

Agricultural University of Athens, Department NRM & Ag. Eng., Iera Odos 75, 11855, Athens, e-mail: gdougka@aua.gr

### ABSTRACT

The load carrying capacity of greenhouse films under wind action is investigated numerically for the case of a typical gothic type greenhouse. The film is simulated as a membrane by the Finite Elements Method (FEM). The design wind pressures are calculated based on the provisions of Eurocode 1. The boundary conditions correspond to the real conditions of the structure. The numerical analysis results show that, as the wind pressure increases, the developed principal tensile stress in the film exceeds the material stress at yield. Consequently, the film loses its prestress state and its proper elastic behaviour as covering material. Depending on the final wind pressure intensity and the degradation condition of the film, failure may occur. The analysis reveals that the failure of the film is due to insufficient supporting system of the films on the steel structure. This behaviour is verified by a real greenhouse film failure case.

*Keywords:* Gothic type greenhouse, wind action, membrane behaviour, greenhouse film failure, covering supporting system

## 1. INTRODUCTION

Over the last decades, greenhouses have dominated the horticultural sector offering a variety of solutions for the massive intensive production of high-quality horticultural and ornamental products. It is notable that in January 2019, the estimated total protected agricultural area was 5,630,000 ha (including greenhouses, low tunnels, net-houses), whereas the world greenhouse area for vegetables production, including only the permanent greenhouse structures, was estimated at 500,000 ha<sup>1</sup>. In Europe, the greenhouse crop production covers an estimated area of 138.000 ha spread throughout Europe, of which the largest part 102.500 ha is concentrated in the South Europe countries: Spain 45,200 ha; Italy 38,910 ha; France 11,190 ha; Greece 4,700 ha; Portugal 2,490 ha (Data of 2013, source: Eurostat, 2019). According to RaboResearch Food & Agribusiness (2018), the corresponding estimated greenhouse area for Turkey in 2017 was 41,400 ha. Although, the advances in greenhouse technology and materials, plant sciences and biotechnology regarding the plant nutrition management, the use of high-yielding hybrids and cultivars, the integrated pest management, the climate control, the soil solarization and other technologies have boosted the greenhouse production in many countries (e.g. Spain, Israel, Turkey), the greenhouse crop production in Greece remains at relatively low levels, dominated by low-tech plastic-covered greenhouses. Recently a few cases of exceptional examples refer to the successful operation of high-tech large greenhouse installations.

The type of cultivation, the climatic conditions of the area, the duration of the growing season, the available investment funds and the cost of the proposed solutions, as well as the knowledge level of the producer are among the principal parameters for the selection of the appropriate greenhouse type and equipment and cultivation practices. Different types of greenhouses have been developed with various technical characteristics offering solutions at analogous cost. The basic distinction of the commercial standardised greenhouse structures is between a semi-circular (arched) roof and a roof consisting of two inclined planes forming a duopitch roof. A newly improved version of the arched greenhouses, that is very common in Mediterranean countries, is the gothic-type greenhouse offering the additional advantage of better drainage and larger space. The function of the main steel structural system of the standardised greenhouses is to transfer safely the calculated combinations of the design loads imposed on the covering material due to the external variable actions (snow, wind, hail etc), and the permanent design loads (e.g. installed equipment for cooling, irrigation etc) and the load due to hanging crops (e.g. tomatoes), to the foundation. The mechanical and physical properties of the covering materials are, therefore, very important not only regarding their effect on the microclimate of the cultivations, but also for offering protection to the cultivation, the equipment and the workers through their load carrying function or for the structural behaviour and the safety of the whole installation through their function as a part of the loading transfer mechanism to the structure.

In southern European countries, plastic covering materials and mainly Low-Density Polyethylene (LDPE) based multilayer films are predominately used due to their relatively low cost, large width (e.g. 12m) and flexibility for any roof shape, excellent mechanical and physical properties and easy installation and adjustment to the steel structure (Briassoulis et al.,1997a). However, the strong UV solar radiation in the Mediterranean region dramatically reduces the lifetime of the film, depending on the stabilisation schemes, use of agrochemicals etc. Exposure of the plastic film to UV radiation results in gradual degradation of its material mechanical properties (Briassoulis et al, 2004; Ojeda,

---

<sup>1</sup> Based on newly released official government statistics and revisions, recent peer-reviewed scientific research papers and updates to known growers with contact information found in <https://www.hortidaily.com/article/9057219/world-greenhouse-vegetable-statistics-updated-for-2019/>



2011). After a period of approximately 3 years a typical greenhouse film becomes brittle and failure occurs for stresses almost equal to the material yield stress (Greenfilm Project Deliverables, 2014). There has been an extended research carried out over the years on the determination of the appropriate test methods for thin plastic films (Briassoulis et al., 1997b) and on the improvement of their mechanical properties with the use of multilayer structures, additives and UV stabilizers (Dilara et al, 2000; Liu et al., 2005, López-Vilanova, 2013, Briassoulis et al., 2018). The relevant European Standard EN 13206 (CEN, 2017) provides data for the testing procedure on the degradation of the plastic film through artificial accelerated ageing test.

Apart from the photo-degradation, a premature failure of the film may be observed, even in cases of completely new greenhouse structures. In these cases, failure is usually attributed to extreme weather conditions or the combination of weather actions and the use of S or Cl based agrochemicals (Briassoulis, 2004; Briassoulis et al., 2018). However, the cause of failure in several cases may be related to the inadequate structural design of the greenhouse structure. Standardized greenhouses in the EU should be designed according to the Eurocodes and the European standard for greenhouses EN-13031-1 (CEN, 2001), which refers directly to Eurocode 1 (CEN, 2005) with complementary provisions regarding the actions and load combinations, while Eurocode 3 (CEN, 2005) is applied for the structural design of the main steel structures. In contrast to glass panels, there are no provisions in EN-13031-1 (CEN, 2001) concerning the design criteria for plastic film coverings of greenhouses.

In the present study, the load carrying capacity of greenhouse films installed in typical gothic type greenhouses under wind loading is investigated. FEM models were developed to simulate the film behaviour, acting as a pretensioned membrane. The results revealed the possible causes of premature failures of greenhouse films experienced under wind loading in real cases. A deficiency is detected in the normative framework and in literature in considering the film as an integral part of the greenhouse structural system design through the load transfer mechanism. As a result, the supporting systems of the covering films, designed empirically, are proven to be insufficient to ensure the safety of the crop and the reliable transfer of the loads to the structural system. The case of a real gothic type greenhouse, where a premature failure of the film due to severe wind action was reported, is briefly presented as a field verification case of the numerical analysis results.

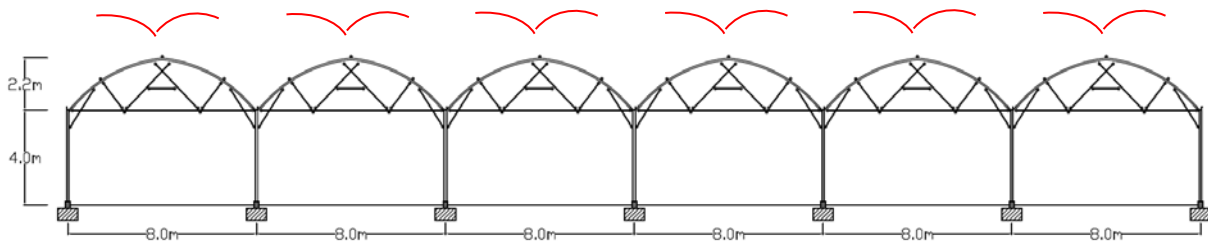
## **2. MATERIALS AND METHODS**

### **2.1 Greenhouse structural system and covering**

The study refers to a typical multi-span gothic type greenhouse commonly used in Greece and other countries. The supporting structural frame consists of galvanized steel profiles with hollow sections joined together with hinged connections. The frame analysed has 6, 8.00 m spans with height 4.0 m at the gutter and 6.2 m at the ridge (Figure 8). In the longitudinal direction the frames are 2.5 m apart connected through horizontal beams for a total length equal to 25 m. The beams include the gutters, made of galvanised steel U-type section beams and the purlins on the roof made of steel circular hollow sections. The girts on the side walls are secondary beams of smaller cross – sections, providing support to the side windows and the covering films. Windows are also installed on the ridge at each side of the roof symmetrically, with arc length 1.7 m.

The structure is covered with 200 µm thick LDPE-based multilayer film. The installation of the greenhouse film on the roof is a quite demanding procedure as it requires appropriate weather

conditions and technical knowledge of the staff. Due to their small thickness the films have high flexibility behaving as membranes, particularly susceptible to various actions (e.g. temperature, wind actions, etc). The common practice to increase their stiffness is pre-tensioning in the longitudinal direction during their installation. This limits the excessive deformation of the film and protects it from premature failure. The pre-tensioning is applied following an empirical process, by imposing a horizontal displacement, usually 2 cm/m.



**Figure 3** Gothic type greenhouse structure in transverse direction

The tightened films are then fixed on the roof at the two end arches and in the horizontal direction along the gutter and the purlin next to the window opening, with the use of plastic clamps or aluminium channels. In this way, the film is connected to the steel structure only around its perimeter and the rest of its surface is free to displace under the imposed actions. Pressures due to vertical actions (self-weight, snow load etc.) are transferred directly from the film to its supports and to the arches of the main steel structure resisting the film displacement. On the opposite, the film behaves as a balloon under a suction applied on the roof by negative wind pressures, as it deforms away from the arches of the roof. The load in this case is transferred to the supports around the film perimeter by membrane action.

This supporting system of greenhouse films represents a common practice widely used with standardized Gothic type greenhouses. Other supporting system of greenhouse films, applied by local manufactures in Greece, include also intermediate supports.

## 2.2 Numerical simulation of the greenhouse film

Two models of greenhouse films were developed to study their structural behaviour under suction due to negative wind pressure through numerical simulations. The two models simulate the film on the windward side of the roof of the described multi-span gothic greenhouse, where the highest external negative pressure coefficients  $c_{pe}$ , develop as shown by Giannoulis et al. (2019). The first model simulates the film covering the large constant part of roof, with arc length equal to 3.1m, and

the second one the film covering the roof window, with arc length equal to 1.7m, as shown in

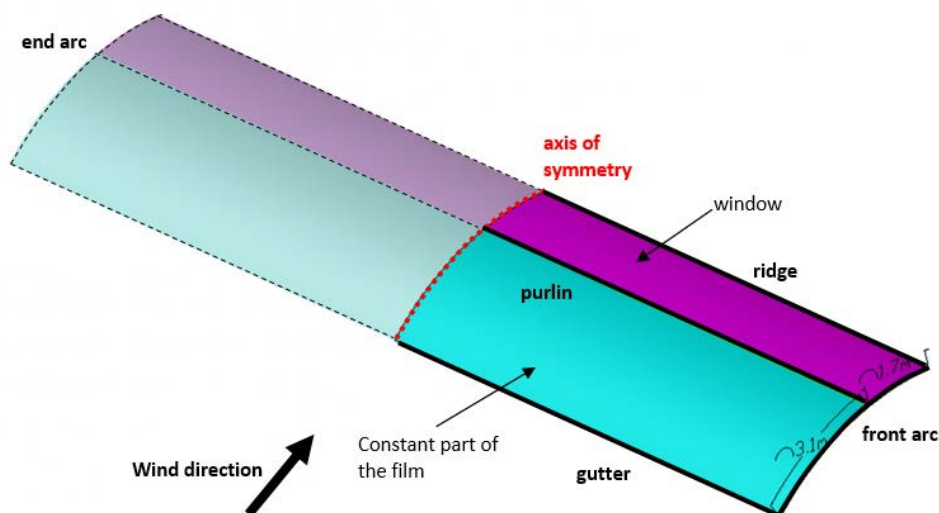
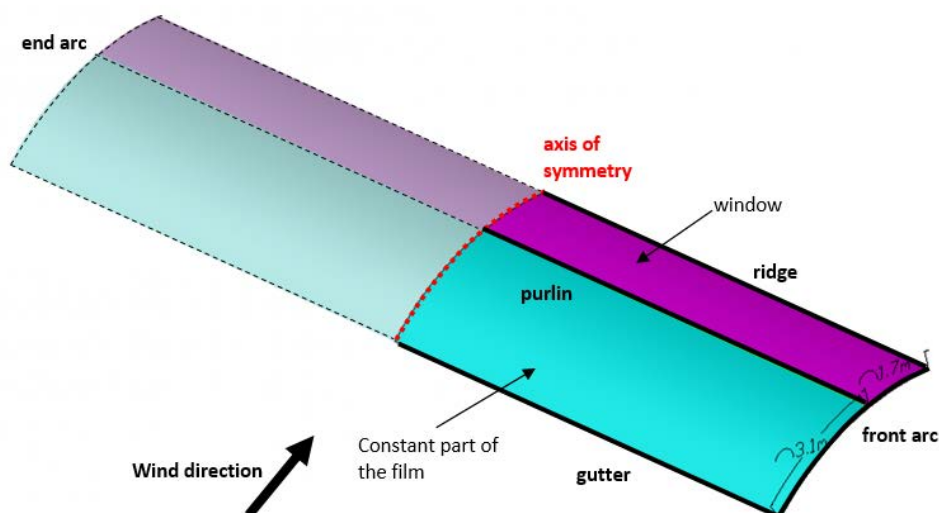


Figure 9.

FEM calculations were performed with the software code ANSYS Mechanical v.18. The numerical models were generated by appropriate triangular shell elements, allowing for a simple and efficient simulation of the thin film membrane behaviour. By imposing symmetry conditions, the half-length of each examined part was modelled (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**). Appropriate boundary conditions were imposed along the sides where the film is fixed on the steel structure: a continuous hinge support along the supporting steel members of the film perimeter to prevent the displacements and allow for the free rotation of the film, while the rest of the film was unsupported and free to deflect. Several analyses with different mesh sizes were carried out to define the optimal mesh size in terms of accuracy and computational time requirements. Nonlinear analysis for large displacements was performed to account for the geometric non-linear behaviour of the film (change in stiffness with film deflection).

The material was considered to remain elastic since the purpose of the performed analyses was to investigate whether the developed stresses in the film remain in the elastic region under the design wind action. Assuming average isotropic properties, the material properties were obtained from the experimental and analytical research of Briassoulis et al. (2003): modulus of elasticity  $E = 106 \text{ MPa}$ , stress at yield  $\sigma_y = 7.98 \text{ MPa}$ , Poisson ratio  $\nu = 0.4$ .



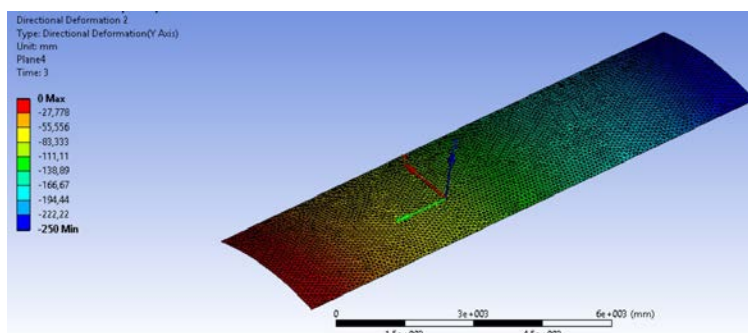
**Figure 4** Schematic 3D presentation of the modelled crucial windward side of the gothic roof

### 2.3 Loading conditions

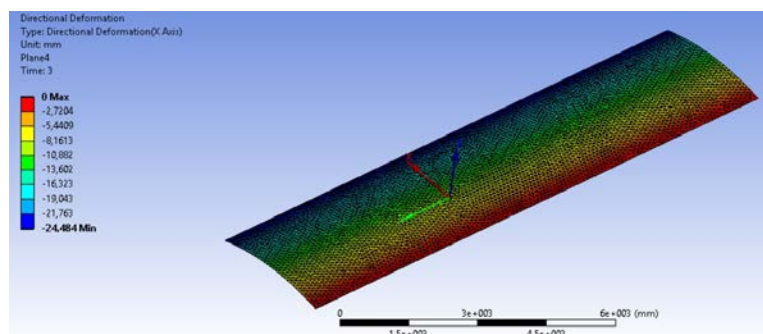
Aimed to investigate the behaviour of the film-membrane under the design wind action, no other load actions were considered in the analyses. The loading was applied in steps: first was imposed the pre-tension loading and in a second step the wind loading, calculated based on the analyses of Giannoulis et al. (2019) and the relevant clauses of Eurocode EN1994 – 1-1 (CEN, 2005). The self-weight of the film was neglected.

In order to obtain the pre-strained condition of the film and use it as an initial state of stress, a separate analysis was performed. In this calculation, the pre-tensioning of the film was applied exactly as it takes place in situ during the film installation, through a horizontal displacement imposed in the longitudinal direction by the installation technicians. The model used was slightly modified in the boundary conditions, since in this step, the film was only fixed at the front arc and not along the longitudinal sides. The deformed shape of the model in **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** shows that the film is stretched in the longitudinal direction while in the transverse there is a slight decrease along the arc's length due to Poisson's ratio. During the installation process, in the longitudinal direction the film was fixed at the end arc to retain it at this stretched state in order to achieve the pre-strained condition. In the transverse direction, to the contrary, the film was set back to the initial geometric position corresponding to the horizontal steel member supports without pretension.

The strains obtained through the pre-tensioning step were inserted as imposed loads to the model of the film, described in Section 2.2. The wind pressure was then applied incrementally as a uniform negative pressure acting on the total surface of the film. The peak wind velocity pressure was calculated based on the relevant provisions of EN 1991-1-4 (CEN, 2005a). Since the greenhouse was assumed to be in the coastal area of Greece, the fundamental value of the basic wind velocity used was  $v_{b,0} = 33$  m/s, while for the terrain category, the most common zone II with  $z_{min} = 2$  m and  $z_o = 0.05$  m, was chosen. Additionally, the probability factor for the minimum reference period of 15 years was calculated as  $c_{prob} = 0.93$  to account for the probability for an annual exceedance of  $p = 0.07$  according to EN13031 (CEN, 2001). The 10-minute mean wind velocity was then calculated as  $v_b = 30,69$  m/s by multiplying the basic wind velocity only by the probability factor (considering that the directional and season factors  $c_{dir} = c_{season} = 1$ ). Subsequently, the mean wind velocity was calculated as  $v_{m(z)} = 27$  m/s for a reference height equal to  $z_e = (4 + 6.2)/2 = 5.1 > 0.75 * 6.2 = 4.65$  m according to EN13031 (CEN, 2001) provisions and the terrain roughness and orography factors according to EN 1991-1-4 (CEN, 2005a), as  $c_{r(z)} = 0.88$  (terrain category II) and  $c_{o(z)} = 1.0$  respectively. The peak velocity pressure was calculated as a function of the mean wind velocity and the turbulence intensity  $I_{v(z)} = 1/\ln(z/z_o) = 0.216$  equal to  $q_{p(z)} = 1.14$  kN/m<sup>2</sup> (1140 Pa). Therefore, according to EN 1991-1-4 (CEN, 2005a) the net value of wind pressures is the peak pressure  $q_{p(z)}$ , multiplied by the difference between the corresponding external ( $c_{pe}$ ) and internal pressure ( $c_{pi}$ ) coefficients, whereas the design value is  $1.368$  kN/m<sup>2</sup> (1368 Pa) accounting for the partial factor  $\gamma_{Q1} = 1.2$  for Greece. EN13031 (CEN, 2001) provides tables with the values of the pressure coefficients based on the type of the greenhouse structure (flat, duopitch, arched), the number of spans (single or multi-span) and its dimensions (spans, height of the ridge – gutter etc.). However, it is notable that in the standard there is no provision for the values of the  $c_{pe} - c_{pi}$  pressure coefficients for gothic type greenhouses.



a) deformation in longitudinal direction



b) deformation in transverse direction

**Figure 5** FEM model of part 1 under initial pretention

For the purpose of the present analysis, the imposed wind pressures were calculated using the  $c_{pe}$  coefficients derived from the numerical (CFD) investigation of Giannoulis et al. (2019). According to this work, the windward side of the roof of the first span of the multi-span greenhouse structure was shown to be the most crucial one in terms of the calculated external wind pressure coefficients  $c_{pe}$ . By calculating the average of the  $c_{pe}$  values along the windward side of this area, the pressure coefficient  $c_{pe}$  on the constant part of the roof was assumed to be equal to 0.75, whereas the pressure coefficient  $c_{pe}$  on the window was calculated to be double, equal to 1.47, both causing suction of the film. The corresponding design values of the negative wind pressures that were considered in the analyses were therefore  $0.75 \cdot 1.368 = 1.026 \text{ kN/m}^2$  and  $1.47 \cdot 1.368 = 2.01 \text{ kN/m}^2$ . It should be noted that the above values were estimated for external pressures considering that the windows to be closed under strong wind action according to the relevant EN 1991-1-4 (CEN, 2005a).

### 2.3 A case under real field conditions

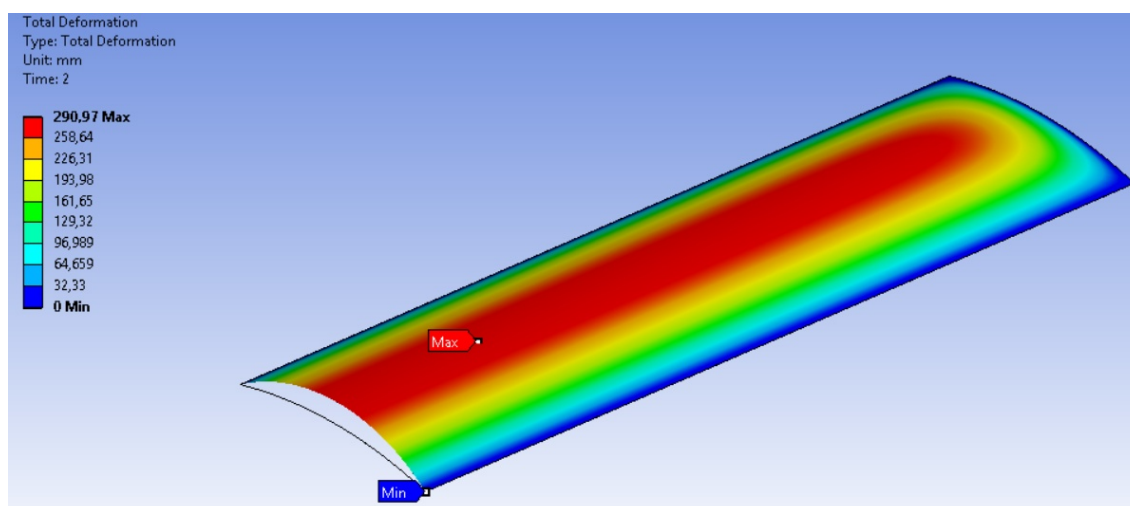
A real case of a gothic greenhouse with similar film covering installation, where a premature failure of the film occurred under wind action, is briefly presented and compared against the numerical results. The 2-span gothic greenhouse structure in the area of Central Greece, with a covered area of  $16 \times 62.5 \text{ m}^2$ , is used for hydroponics cultivation of lettuce. The structure has a similar geometry to the one analyzed numerically with a window at the one side of its roof.

## 4. RESULTS

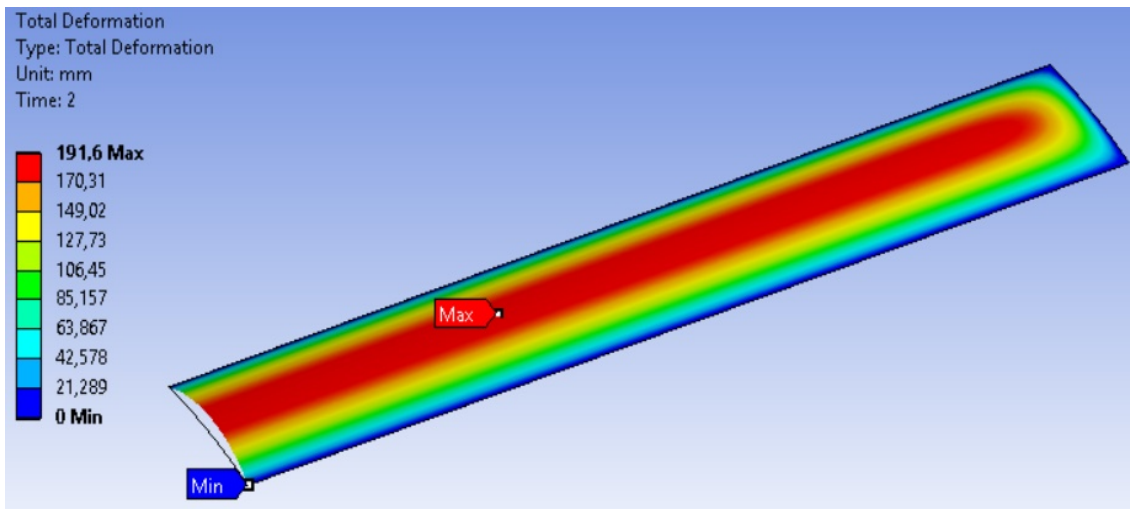
The numerical results of the two examined models of the film showed that, under the corresponding wind suction loading, the stresses that are developed in the film membrane reach yield stress (7.98 MPa) before the maximum wind pressures are reached. This means that yielding and plastic deformation of the material takes place for wind pressure values lower than the calculated

design wind pressures. Under the specific supporting and loading conditions, the film may lose its ability to protect the cultivation and transfer safely the load to the main frame. The film material is characterised by large ductility and strain hardening due to its capacity to deform plastically after yield with elongation at break values  $\varepsilon_{br}$  in the range of 600-700% (Briassoulis et al., 2003). This means that even after yielding, the material will continue to deform plastically for higher values of the imposed load until failure. However, this behavior does not account for possible photo-degradation of the material due to UV radiation which results in the decrease of the ultimate strength of the material, approaching asymptotically the yield stress value (Briassoulis, 2005). For these reasons the numerical analyses were performed assuming elastic material behaviour and setting the yield stress as the criterion of film failure.

**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** presents the FE analysis results at yield stress. The wind pressure that causes a uniform yield of the film at the constant part1 of the roof was estimated to be approximately equal to  $0.585 \text{ kN/m}^2$ , about 1,75 times lower than the design wind pressure of  $1.026 \text{ kN/m}^2$  calculated based on the CFD analyses of (Giannoulis et al., 2019) and EN 1991-1-4 (CEN, 2005a) and EN-13031-1 (CEN, 2001). The maximum deflection of the surface, occurs, as expected, in the middle of the surface and is about 291 mm (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.a**). This deflection is relatively low compared to the acting load and the total length of the examined part of the roof (25m), which is the result of the pretension that was imposed as the initial state of the film installation and the large displacement nonlinear effects considered in the analysis. The corresponding maximum wind pressure value resulting in yield of the film for the second model part2 on the window is  $1.01 \text{ kN/m}^2$ , that is two times lower than the design pressure of  $2.01 \text{ kN/m}^2$ , and in film deflection of 191.6 mm (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.b**).



a) Deformed film model of part1



b) Deformed film model of part2

**Figure 6** Maximum deformation of the film FE models at yield stress

The behavior of the films predicted by the numerical analysis, was verified with a relative experience witnessed by a producer in the area of Central Greece. Figure 12 gives representative photos of the structure, where it is observed that the covering film is fixed only around its perimeter at the ridge, the window horizontal beam-purlin and the gutter.

The greenhouse was constructed in August 2018 and after its continuous operation for about 5 months, a failure occurred at the film cover under a severe windstorm in January 2019. According to the producer, the wind caused suction at the film, which started to tear at the window area approximately at the middle length of the structure. For the replacement of the damaged part of the film, the producer encountered many difficulties and a long delay in the production, as the proper film pre-tensioning and installation required specific weather conditions: maximum wind force lower than 2 Beaufort and a sunny winter day. In the meantime, the crop was destroyed completely. The same incident with film failure was repeated three months later, in April 2019.





**Figure 7** Representative photos of the gothic greenhouse structure in Central Greece

## 5. CONCLUSIONS

Numerical FEM analyses were used to investigate the structural behavior and failure of greenhouse films under negative wind pressures in the case of a standardized gothic type greenhouse. The models of the films simulated a common practice of the greenhouse films installation that requires the films be pre-tensioned in the longitudinal direction and supported on the steel structure only along their perimeter.

The load carrying capacity of the films and the load transfer mechanism from the films to the supports of the main frame were examined thoroughly. It was shown that maximum tensile stress developing in the inflated film under negative wind pressures reaches the stress at yield value of the material under wind pressures much lower than the design wind pressures calculated according to EN 1991-1-4 (CEN, 2005a) and EN13031 (CEN, 2001). The film was shown to suffer plastic deformation that eventually, depending on the wind intensity, may lead to failure. The results obtained numerically were verified by a real case of a gothic type greenhouse in central Greece, where a premature failure of the film was observed due to severe windstorm. The numerical results indicated that the failure of the film in the real case occurred due to the lack of a properly designed supporting system, able to transfer safely the loads from the film to the structural system and thus protecting the crop.

Apart from supporting the films only along their perimeter, several other supporting systems of the films are also used by local manufactures. These solutions use additional intermediate supports in various locations of the roof of the greenhouse. The intermediate supports differ from one manufacturer to another as they are based on empirical considerations rather than on structural analysis and design considerations. Consequently, these structures are either under-designed experiencing premature failure of the films or overdesigned, complicated, and expensive structures.

The main cause of the failure of the film under negative wind pressures in the case analyzed, as well as in the real case, is attributed to the lack of relevant provisions in the normative framework and scientific methodologies in literature regarding the design of the films supporting systems. The optimal design of the films supporting systems through numerical methods taking into account the film material characteristics and the membrane load transfer mechanisms to the structural frame is the subject of on-going investigation.

## 6. REFERENCES



- Briassoulis D., Waaijenberg D., Gratraud J., von Eslner B., 1997a. *Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses : Part 1 , General Overview, REVIEW PAPER, J . agric . Engng Res.*, 67, 81–96.
- Briassoulis D., Waaijenberg D., Gratraud J., von Eslner B., 1997b. *Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses : Part 2 , Quality Assessment, REVIEW PAPER, J . agric . Engng Res.*, 67, 171–217.
- Briassoulis D. and Schettini E., 2003. *Analysis and Design of Low-density Polyethylene Greenhouse Films, Biosystems engineering Engineering*, 84 (3), 303-314.
- Briassoulis D., Aristopoulou A., Bonora M., Verlodt I., 2004. Degradation Characterization of Agricultural Low-density Polyethylene Films, *Biosystems Engineering*, 88 (2), 131–143
- Briassoulis D., 2005. 'The Effects of Tensile Stress and the Agrochemical Vapam on the Ageing of Low Density Polyethylene (LDPE) Agricultural Films; Part I. Mechanical Behaviour', *Polymer Degradation and Stability*, 88 (3), 489-503.
- Briassoulis D., Hiskakis M., Tserotas P., 2018. *Combined effect of UVA radiation and agrochemicals on the durability of agricultural multilayer films*, *Polymer Degradation and Stability*, 154, 261-275.
- CEN, 2001. EN-13031-1 Greenhouses: *Design and Construction, Part 1: Commercial Production Greenhouses*
- CEN, 2005a. EN 1991-1-4: 2005+A1:2010 – Eurocode 1: *Basis of design and actions on structures, Part 1-1-4: General actions–Wind actions 1-1-4*
- CEN, 2005b. EN 1993-1-1:2005+A1:2014 – Eurocode 3: *Design of Steel Structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*
- CEN, 2017. EN 13206:2017 - *Plastics - Thermoplastic covering films for use in agriculture and horticulture*
- Dilara P. A.; Briassoulis D., 2000. *Degradation and Stabilization of Low-density Polyethylene Films used as Greenhouse Covering Materials*, *Journal of Agricultural Engineering Research (continued as Biosystems Engineering)*, 76, 309-321
- Eurostat,2019. (Data of 2013, Retrieved from Eurostat database in 2019) <https://ec.europa.eu/eurostat/>
- Giannoulis A., Mistriotis A., Briassoulis D., 2019. *Wind loads on the roof of a multispans greenhouse protected by a porous windbreak through numerical simulations*, *Proceedings of 11<sup>th</sup> Conference of EGME, Volos, Greece.*
- GreenFilm Project, 2014. *Development of innovative greenhouse plastic films with enhanced durability and applicability, Research conducted from AUA on behalf of Plastika Kritis S.A.*
- Liu M., Horrocks A. R., Hall M. E., 1995. *Correlation of physicochemical changes in UV-exposed low density polyethylene films containing various UV stabilizers*, *Polymer Degradation and Stability*, 49, 151-161

- López-Vilanova L., Espí E., Martínez I., Fierro J.L.G, Corrales T., Catalina F., 2013. *Photostabilization study of ethylene-butyl acrylate copolymers functionalized in the molten state with hindered amine light stabilizers (HALS)*, *Polymer Degradation and Stability*, 98, 2146-2152.
- Ojeda T., Freitas A., Birck K., Dalmolin E., Jacques R., Bento F., Camargo F., 2011. *Degradability of linear polyolefins under natural weathering* *Polymer Degradation and Stability*, 96, 703-707.
- RaboResearch Food & Agribusiness, Utrecht 2018;  
[https://www.seedquest.com/News/pdf/2018/Rabobank\\_WVM2018.pdf](https://www.seedquest.com/News/pdf/2018/Rabobank_WVM2018.pdf)

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (IR) ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΥΤΩΝ ΜΕΛΙΤΖΑΝΑΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

**A. Καυγά<sup>1</sup> & I. Λυκοσκούφης<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωπονίας, ΤΚ 26504, Πάτρα, e-mail: [akavga@upatras.gr](mailto:akavga@upatras.gr)

<sup>2</sup>Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Τμήμα Γεωπονίας, ΤΚ 24100, Καλαμάτα

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει την επίδραση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR) στις παραμέτρους ανάπτυξης και παραγωγής φυτών μελιτζάνας (*Solanum melongena* L.) και την ενεργειακή αποδοτικότητα του θερμοκηπίου. Πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται από μια πλήρη καλλιεργητική περίοδο μέσα σε δύο πανομοιότυπα πειραματικά θερμοκήπια μικρής κλίμακας, με σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης και θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής αντίστοιχα. Παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η ενεργειακή απόδοση και η ανάπτυξη των φυτών στα δύο θερμοκήπια. Τα φυτά στο θερμοκήπιο με την υπέρυθρη θέρμανση έδωσαν σημαντικά υψηλότερη παραγωγή συγκριτικά με αυτά στο θερμοκήπιο με την συμβατική θέρμανση. Από τη διακύμανση των θερμοκρασιών των δύο θερμοκηπίων προέκυψε ότι το θερμοκήπιο με την υπέρυθρη θέρμανση παρουσίαζε ομαλή κατανομή θερμοκρασίας στον φυτικό θόλο, ενώ η θερμοκρασία στον εσωτερικό αέρα ήταν μικρότερη 2-3 °C σε σχέση με την θερμοκρασία των φυτών, με σημαντική μείωση των ενεργειακών απωλειών σύμφωνα με τις αρχές της θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία.

*Λέξεις κλειδιά:* θερμοκήπιο, θέρμανση θερμοκηπίου, υπέρυθρη ακτινοβολία, δείκτες ανάπτυξης

## EFFECT OF INFRARED RADIATION (IR) ON GROWTH PARAMETERS OF EGGPLANT CULTIVATION AND GREENHOUSE ENERGY EFFICIENCY

**A.Kavga<sup>1</sup> and I. Lycoskoufis<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>University of Patras, Department of Agricultural Science, 26504, Patra, e-mail: [akavga@upatras.gr](mailto:akavga@upatras.gr)

<sup>2</sup>University of the Peloponnese, Department of Agriculture, 24100, Kalamata

### ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the effect of infrared radiation (IR) on the growth and production parameters of eggplant (*Solanum melongena* L.) and the greenhouse energy efficiency. Extensive experimental results are presented from a full cultivation period inside two identical, small scale experimental greenhouses, with IR and forced air heating system, correspondingly. The design, energy performance and plant growth results from the two greenhouses are presented. Infrared-heated greenhouse plants yielded significantly higher yields than air-heated greenhouse. Comparison of the temperatures of the two greenhouses showed that the infrared heating greenhouse had a smooth temperature distribution in the plant canopy while the indoor air temperature was lower 2-3 °C than the temperature of the plant, with significant reduction of energy losses in accordance with infrared radiation operation principles.

*Keywords:* greenhouse, heating system, infrared heating, production parameters

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θερμοκήπια αποτελούν μονάδες εντατικής καλλιέργειας για αγροτικά προϊόντα, τα οποία χρειάζονται βέλτιστο συνδυασμό παραγόντων μικροκλίματος και διαδικασιών, όπως ο φωτισμός, η θέρμανση, η ψύξη και ο εξαερισμός, δημιουργώντας ένα ελεγχόμενο περιβάλλον το οποίο επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο καλλιέργειας, την ποιότητα και την ποσότητα των προϊόντων, με αποτέλεσμα τη συνολική υψηλότερη παραγωγικότητα των καλλιεργούμενων φυτών (Kaushik and Chel, 2011, Vox et al., 2010, Giacomelli et al., 2012, Vadiiee and Martin, 2014). Στις μεσογειακές χώρες, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι συνήθως αρκετή για να καλύψει τις φωτοσυνθετικές ανάγκες των περισσότερων θερμοκηπιακών καλλιεργειών και δεν απαιτείται τεχνητός φωτισμός, η θέρμανση του θερμοκηπίου αποτελεί από άποψη κόστους, την πιο απαιτητική λειτουργία κατά τη διάρκεια των χειμερινών περιόδων, επηρεάζοντας σημαντικά το κόστος παραγωγής (De Pascale and Maggio, 2004). Τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίου βασίζονται είτε στην κυκλοφορία του ζεστού νερού μέσω συστήματος σωληνώσεων είτε στην χρήση θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής (Teitel et al., 1999, Perdigones et al., 2006). Ο σχεδιασμός και ο λειτουργικός στόχος των συμβατικών συστημάτων είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στη θερμοκρασία που είναι η βέλτιστη για την ανάπτυξη των φυτών. Έτσι, οι παραπάνω μέθοδοι, προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία των φυτών, πρέπει να θερμαίνουν τον αέρα του θερμοκηπίου στην ίδια ή ακόμη και σε ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία από την τιμή που προορίζεται ως επιθυμητή για τα φυτά. Αυτή η πρακτική έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας του καλύμματος και λόγω των διαφυγών θερμού αέρα μέσω των ανοιγμάτων προς το εξωτερικό περιβάλλον, που προκαλούνται από τις αναπόφευκτες κατασκευαστικές ατέλειες της δομής του θερμοκηπίου.

Μια εναλλακτική μέθοδος θέρμανσης των φυτών στο θερμοκήπιο είναι η χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR) χαμηλής έντασης. Το κύριο πλεονέκτημα της θέρμανσης IR είναι η άμεση απόδοση θερμότητας από την πηγή ενέργειας στον φυτικό θόλο (δέκτης), εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη να αυξηθεί η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα για να αποδώσει την απαραίτητη θερμότητα μέσω συναγωγής. Ως αποτέλεσμα, το κάλυμμα του θερμοκηπίου και ο εσωτερικός αέρας μπορούν να παραμείνουν σε σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες από την ενδεικνυόμενη θερμοκρασία για τα φυτά, με ταυτόχρονη μείωση των ενεργειακών απωλειών έως και 50%. Τα συστήματα θέρμανσης IR μπορούν να διατηρούν αποτελεσματικά ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες στον φυτικό θόλο (μικροκλίμα), οι οποίες προάγουν την ομοιόμορφη, ποσοτική και ποιοτική ανάπτυξη των φυτών και καταστέλλουν τους εχθρούς και τις ασθένειες των φυτών. Επιπλέον, όταν ο φυτικός θόλος διατηρείται σε υψηλότερη θερμοκρασία από τον αέρα του θερμοκηπίου, η πιθανότητα συμπύκνωσης υγρασίας στην επιφάνεια των φυτών μειώνεται δραστικά (Teitel et al., 2000). Η εφαρμογή της θέρμανσης IR σε πειραματικό και παραγωγικό θερμοκήπιο έχει δείξει εξοικονόμηση ενέργειας κατά 40-50% και συνέβαλε στη βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος (Kavga et al, 2009, 2012, 2015, 2018, Brodie et al, 2012). Τα συστήματα θέρμανσης IR πρέπει να αντισταθμίζουν μόνο τις απώλειες θερμότητας του φυτικού θόλου, με ελάχιστες απαιτήσεις για υποστηρικτικά και βοηθητικά συστήματα (λέβητες, κυκλοφορητές, σωληνώσεις θέρμανσης, ανεμιστήρες κλπ.) και επομένως, μπορούν να ανταποκρίνονται πολύ γρήγορα στις αλλαγές της εξωτερικής θερμοκρασίας. Αν και η ενεργειακή απόδοση παρέχει το κύριο κίνητρο για την υιοθέτηση της θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία, τα συστήματα υπέρυθρης θέρμανσης μπορούν αποτελεσματικά να διατηρήσουν ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες στον φυτικό θόλο.

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι να επαληθεύσει και να αποδείξει τα οφέλη της θέρμανσης IR σε καλλιεργούμενα φυτά μελιτζάνας. Επιπλέον, την συγκριτική αξιολόγηση δύο θερμοκηπίων με συμβατική και υπέρυθρη θέρμανση υπό ταυτόσημες καιρικές συνθήκες και την επίδρασή τους στην παραγωγικότητα των καλλιεργούμενων φυτών.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Χρησιμοποιήθηκαν δύο πανομοιότυπα πειραματικά θερμοκήπια μικρής κλίμακας, ως πεδίο δοκιμής των δύο επιλογών θέρμανσης που εξετάστηκαν, η θέρμανση με θερμό αέρα (συμβατική θέρμανση) και η θέρμανση με υπέρυθρη ακτινοβολία. Δύο εναλλακτικά συστήματα θέρμανσης ήταν διαθέσιμα: (1) μια μονάδα θερμού αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής με δύο επίπεδα ισχύος (1 και 2 kW) με ένα μικρό ανεμιστήρα που προωθούσε την ανάμιξη αέρα και (2) ένα σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης IR που αποτελείται από τέσσερις λαμπτήρες με ανακλαστήρες βολβών (Συνολική ισχύς 1 kW, γωνία δέσμης 50 °) τοποθετημένη στις γωνίες του θερμοκηπίου και μία ανύψωση 1 m πάνω από τα φυτά (εικ. 1). Και τα δύο θερμοκήπια είναι κατασκευασμένα από πλαίσιο αλουμινίου, με υλικό κάλυψης υαλοπίνακες πάχους 3mm. Έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και βρίσκονταν στο ίδιο πεδίο με επαρκή απόσταση μεταξύ τους για να αποφεύγουν αμοιβαίες παρεμβολές. Οι διαστάσεις τους είναι πλάτος 2,13 μ., μήκος 2,00 μ., ύψος υδροροής 1,00 μ. και συνολικό ύψος κορυφής 1,50 μ. Η επιφάνεια βάσης κάθε θερμοκηπίου  $A_p$  είναι ίση με 4.26 m<sup>2</sup>, η επιφάνεια καλύμματος του θερμοκηπίου είναι  $A_c = 14.05$  m<sup>2</sup> και ο όγκος του θερμοκηπίου είναι  $V = 5.33$  m<sup>3</sup>.



Εικόνα 1. Τα πειραματικά θερμοκήπια, εξοπλισμένα με σύστημα υπέρυθρη θέρμανσης (αριστερά) και συμβατικής θέρμανσης (δεξιά) αντίστοιχα.

Οι παράμετροι του εσωτερικού μικροκλίματος που παρακολουθούνται και στα δύο θερμοκήπια είναι η θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος  $T_a$  και η θερμοκρασία καλύμματος  $T_c$ , οι θερμοκρασίες φυτών σε διάφορες θέσεις στον φυτικό θόλο, καθώς και η σχετική υγρασία και οι ροές ακτινοβολίας (εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και φωτοσυνθετική ενεργή ακτινοβολία).

Οι εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία του ουρανού και το επίπεδο βροχής, παρακολουθούνται σε ύψος 2,50m πάνω από το επίπεδο του εδάφους, σε αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό κοντά στα θερμοκήπια.

Για (3) μήνες περίοδο λειτουργίας (Μάρτιος-Μάιος) και για τα δύο θερμοκήπια καταγράφηκαν όλα τα δεδομένα σε Data logger (CR1000) με μία μονάδα πολυπλεξίας (relay analogue multiplexer). Επειδή οι τιμές αυτών των παραμέτρων αλλάζουν με τον χρόνο, τα δεδομένα σαρώνονται κάθε λεπτό, υπολογίζονται οι μέσοι όροι κάθε 10/λεπτο και καταγράφονται σε 24/h βάση στον Datalogger του σταθμού. Υπολογίζονται οι μέσες ολονύχτιες τιμές από τις αντίστοιχες χρονικές ακολουθίες βασισμένες στο διάστημα μεταξύ της απότομης αλλαγής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην ανατολή και στην δύση του ήλιου καθώς και την αποκατάσταση σταθερών συνθηκών εντός των θερμοκηπίων. Το λογισμικό Analyzer 4.5 Datalogger χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία και τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων.

Ως πειραματική καλλιέργεια χρησιμοποιήθηκε μελιτζάνα. Τα φυτά καλλιεργούνται στο έδαφος. Σε κάθε θερμοκήπιο φυτεύτηκαν 16 νεαρά μελιτζάνας, σχηματίζοντας τέσσερις σειρές τεσσάρων φυτών το καθένα και οι αποστάσεις φύτευσης ήταν 36 cm x 24 cm. (φυτό με φυτό x γραμμή κατά γραμμή).

Χρησιμοποιήθηκε σύστημα στάγδην άρδευσης. Η παροχή κάθε σταλλάκτη ήταν 2lit / h. Η δόση άρδευσης κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν 3,6 lit ανά φυτό. Η λίπανση των φυτών έγινε με υδατοδιαλυτά λιπάσματα. Κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, σε κάθε φυτό χορηγήθηκαν 120 gr N, 280 gr P, 160 gr K, 12 gr Mg και 18 g Ca. Για το πρόγραμμα λίπανσης, ελήφθησαν υπόψη τα αποτελέσματα της ανάλυσης του εδάφους πριν από την εγκατάσταση των φυτών. Το πλήρες βάρος και το ξηρό βάρος καθώς και η περιμετρος και το μήκος των καρπών μελιτζάνας μετρήθηκαν μετά την λήξη της καλλιέργειας.

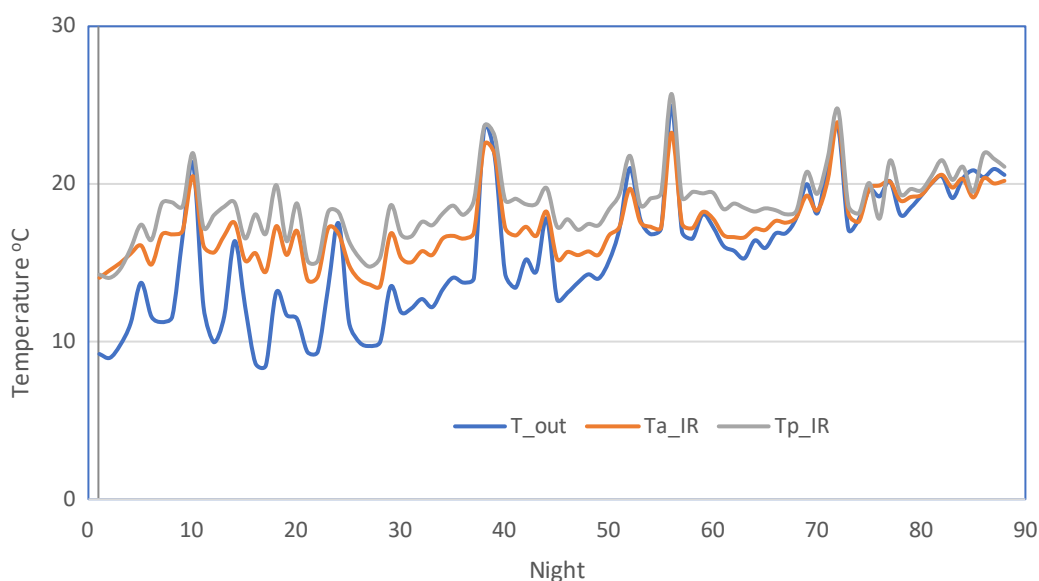
Η λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης ήταν αυτοματοποιημένη και ελέγχονταν με βάση την ενδεικνυόμενη θερμοκρασία νύχτας για την έγκαιρη ανάπτυξη της μελιτζάνας που είναι  $T_p = 16 \pm 1^\circ\text{C}$ . Το σύστημα θέρμανσης τίθεται σε λειτουργία όταν η θερμοκρασία αναφοράς πέσει κάτω από  $15^\circ\text{C}$  και κλείνει όταν ξεπεράσει τους  $17^\circ\text{C}$ .

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Παρακάτω παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα από την παράλληλη λειτουργία των δύο θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια των 90 ημερών της καλλιεργητικής περιόδου. Οι κλιματικές συνθήκες στην περιοχή όπου βρίσκονται τα θερμοκήπια σπάνια απαιτήσαν θέρμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επομένως, η εργασία επικεντρώθηκε στη νυχτερινή θέρμανση, για την οποία συλλέχθηκαν σημαντικές μετρήσεις και παρατηρήσεις.

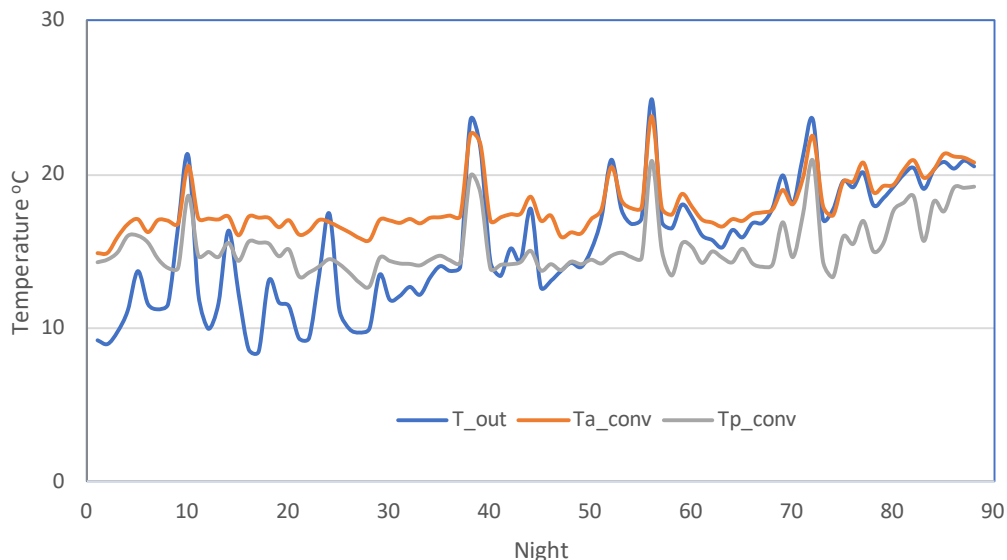
#### Αποτελέσματα θερμοκρασιών

Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της νυχτερινής θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο με την υπέρυθρη θέρμανση του εξωτερικού περιβάλλοντος ( $T_{out}$ ), του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου ( $T_{a\_IR}$ ) και της θερμοκρασίας του φυτικού θόλου ( $T_{p\_IR}$ ). Η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου ήταν χαμηλότερη από τη θερμοκρασία των φυτών, δημιουργώντας ένα τοπικό περιβάλλον στον φυτικό θόλο (τοπικό κλίμα) σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας της υπέρυθρης ακτινοβολίας.



**Διάγραμμα 1.** Η μεταβολή της νυχτερινής θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος, εσωτερικού αέρα θερμοκηπίου και των φυτών, στο θερμοκήπιο με την υπέρυθρη θέρμανση.

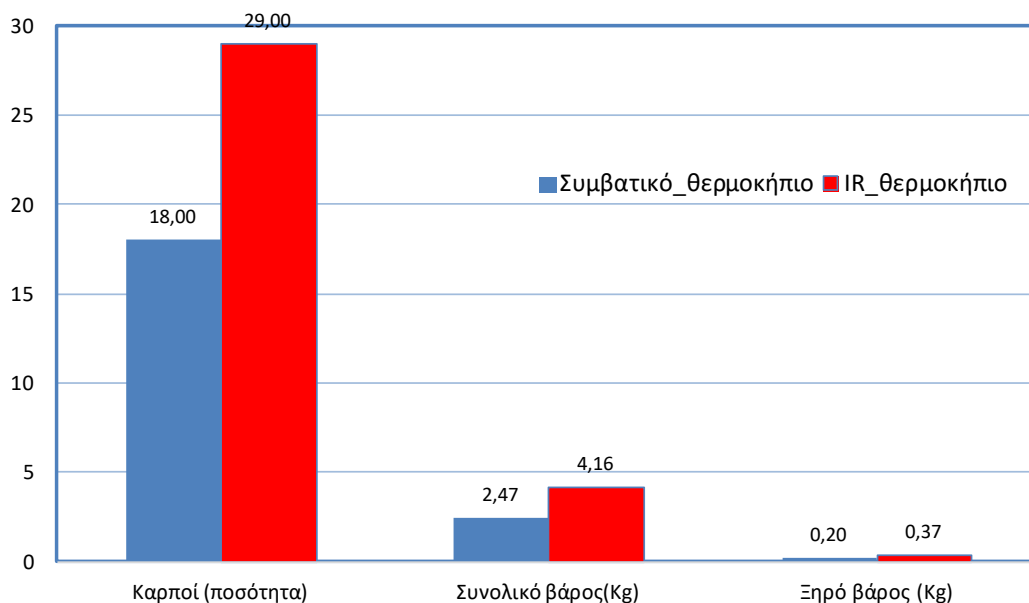
Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο με την συμβατική θέρμανση του εξωτερικού περιβάλλοντος ( $T_{out}$ ), του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου ( $Ta_{conv}$ ) καθώς και η θερμοκρασία του φυτικού θόλου ( $Tr_{conv}$ ). Το διάγραμμα δείχνει ότι η θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο με τον θερμό αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής ήταν ίδια ή λίγο υψηλότερη από τη θερμοκρασία των φυτών, δημιουργώντας ισοθερμοκρασικό περιβάλλον σε όλο το εσωτερικό του θερμοκηπίου (όλον κλίμα).



**Διάγραμμα 2.** Διακύμανση μέσω νυχτερινών θερμοκρασιών εξωτερικού περιβάλλοντος, εσωτερικού αέρα θερμοκηπίου και φυτών, στο θερμοκήπιο με την συμβατική θέρμανση.

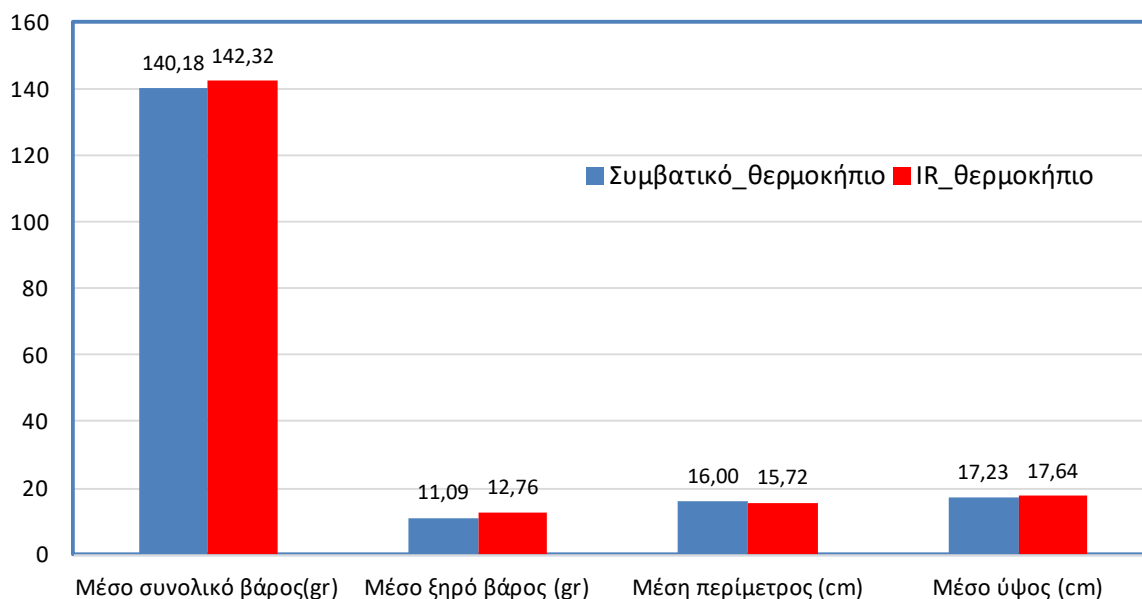
*Αποτελέσματα παραγωγής*

Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν τον αριθμό των παραγόμενων καρπών ανά θερμοκήπιο, το συνολικό βάρος και το ξηρό βάρος των παραγόμενων καρπών. Ειδικότερα, όπως παρατηρείται στο διάγραμμα, τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική αύξηση της συνολικής παραγωγής καρπών στο θερμοκήπιο με την υπέρυθρη ακτινοβολία (IR) έναντι του θερμοκηπίου με την συμβατική θέρμανση



**Διάγραμμα 3.** Απόδοση παραγωγής (καρποί μελιτζάνας).

Στο διάγραμμα 4, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των δεικτών ανάπτυξης (ποσοτικά χαρακτηριστικά) των παραγόμενων καρπών μελιτζάνας, ήτοι το μέσο νωπό και ξηρό βάρος ανά καρπό, η μέση περίμετρος και το μέσο ύψος των καρπών μελιτζάνας στα δύο θερμοκήπια με τις διαφορετικές μεταχειρίσεις θέρμανσης. Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα, το μέσο βάρος των παραγόμενων καρπών δεν επηρεάστηκε από το διαφορετικό σύστημα θέρμανσης των δύο θερμοκηπίων. Επίσης, το διαφορετικό σύστημα θέρμανσης δεν επηρέασε και τους υπόλοιπους δείκτες ανάπτυξης των παραγόμενων καρπών, δηλαδή, το μέσο ξηρό βάρος, τη μέση περίμετρο και το μέσο ύψος των καρπών και ομοιόμορφοι καρποί παρήχθησαν και στις δύο μεταχειρίσεις θέρμανσης.



**Διάγραμμα 4.** Μέσες τιμές των δεικτών ανάπτυξης των καρπών μελιτζάνας

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραγωγή της καλλιέργειας μελιτζάνας ελέγχθηκε σε δύο όμοια πειραματικά θερμοκήπια με διαφορετικό σύστημα θέρμανσης. Στο ένα θερμοκήπιο εφαρμόστηκε υπέρυθρη θέρμανση ενώ στο δεύτερο συμβατική θέρμανση με θερμό αέρα εξαναγκασμένης συναγωγής. Και τα δύο συστήματα θέρμανσης διατήρησαν την θερμοκρασία στον φυτικό θόλο στην ενδεικνυόμενη για την καλλιέργεια. Το σύστημα υπέρυθρης θέρμανσης είχε ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου να είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών 2-3 °C δημιουργώντας τοπικό κλίμα, ενώ στο συμβατικό σύστημα θέρμανσης ο αέρας του θερμοκηπίου ήταν στην ίδια ή ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή θερμοκρασία των φυτών δημιουργώντας ισοθερμοκρασιακό κλίμα στο θερμοκήπιο .

Συγκεκριμένα, η εφαρμογή του συστήματος της υπέρυθρης θέρμανσης στο θερμοκήπιο για την παραγωγή μελιτζάνας είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα, δημιουργώντας ομαλή κατανομή θερμοκρασίας στον φυτικό θόλο και ταυτόχρονα ο αέρας του θερμοκηπίου ψυχρότερος από αυτόν στο θερμοκήπιο με τη συμβατική θέρμανση, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική μείωση των ενεργειακών απωλειών. Οι ευνοϊκότερες συνθήκες που δημιούργησε το σύστημα της υπέρυθρης θέρμανσης στον φυτικό θόλο των συγκριτικά με τη συμβατική θέρμανση οδήγησαν σε καλύτερη ανάπτυξη και παραγωγή των καλλιεργούμενων φυτών μελιτζάνας.

Θα ήταν σκόπιμο να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα με εφαρμογή της υπέρυθρης θέρμανσης σε ένα παραγωγικό θερμοκήπιο. Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση της IR ακτινοβολίας στις παραμέτρους ανάπτυξης και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά της μελιτζάνας, οι συγγραφείς σχεδιάζουν πειράματα σε παραγωγικά θερμοκήπια και ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων.



## 5. Βιβλιογραφία

- Brodie, G., Ryan, C. and Lancaster, C. (2012). Microwave technologies as part of an integrated weed management strategy: A review. *Intl. J. Agron.*, 2012, 1-14  
<http://dx.doi.org/10.1155/2012/636905>.
- De Pascale, S., and Maggio, A. (2004). Sustainable protected cultivation at Mediterranean climate, perspectives and challenges. *Acta Horticulturae*, 691, 29-42  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.1>.
- Giacomelli, G., Sase, S., Cramer, R., Hoogeboom, J., MacKenzie, A., Parbst, K., Scarascia-Mugnozza, G., Selina, P., Sharp, D.A., Voogt, J.O., van Weel, P.A., Mears, D. (2012). Greenhouse production systems for people. *Acta Horticulturae* 927:23-38  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.1>.
- Kaushik, G. and Chel, A. (2011). Renewable energy for sustainable agriculture. *Agron. Sustainable Development*, 31(1), 91-118 doi:<http://dx.doi.org/10.1051/agro/2010029>.
- Kavga, A., Panidis, Th., Bontozoglou, V. and Pantelakis, S. (2009). Infra-Red Heating of Greenhouses Revisited: An Experimental and Modeling Study. *Transactions of the ASABE*, 52(6):2055-2065.
- Kavga, A., Alexopoulos, G., Bontozoglou, B., Pantelakis, S., Panidis, Th. (2012). Experimental Investigation of the Energy Needs for a Conventionally and an Infrared-Heated Greenhouse. *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 2012, Article ID 789515, 16 pages. doi:10.1155/2012/789515
- Kavga, A., and Panidis, Th. (2015). Implementation Results of Infrared Heating (IR) in a Production Greenhouse. *Applied Engineering in Agriculture*, 31(1), 143-151, doi: [10.13031/aea.31.10747](https://doi.org/10.13031/aea.31.10747).
- Kavga, A., Strati, I., Sinanoglou, V.J., Sotiroudis, G., Christodoulou, P. and Zoumpoulakis, P. (2019). Evaluating the experimental cultivation of peppers in low energy demand greenhouses. An interdisciplinary study. *Journal of Food Science and Technology*, 99 (2): 781–789 DOI10.1002/jsfa.9246.
- Perdigones, A., García, J.L., Pastor, M., Benavente, R.M., Luna, L., Chaya, C. and de la Plaza, S. (2006). Effect of heating control strategies on greenhouse energy efficiency: experimental results and modelling. *Transactions of the ASABE*, 49(1), 143-155. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.20232>.
- Teitel, M., Segal, L., Shklyar, A., & Barak, M. (1999). A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.*, 72(3), 259-273  
<https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0370>
- Teitel, M., Shklyar, A., Elad, Y., Dikhtyar, V. and Jerby, E. (2000). Development of a microwave system for greenhouse heating. *Acta Horticulturae*, 534, 189-195  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.534.21>.
- Vadiee A, and Martin, V. (2014). Energy management strategies for commercial greenhouses. *Applied Energy* 14, 880-888 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.089>
- Vox G, Teitel M, Pardossi A, Minuto A, Tinivella F, Schettini E (2010). Sustainable greenhouse systems. In: Salazar A, Rios I (Eds). *Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management*. Nova Science Publishers, Inc. pp 1-79.

ΜΕΛΕΤΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ  
ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

**Β. Φιρφίρης<sup>1</sup>, Σ.Καλαμάρας<sup>1</sup>, Μ. Χρήστου<sup>1</sup>, Α. Μαρτζοπούλου<sup>2</sup>, Θ.Κωτσόπουλος<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωπονίας, Εργ. Γεωργικών Κατασκευών & Εξοπλισμού, 54124, Θεσσαλονίκη, e-mail: firfiris@agro.auth.gr

<sup>2</sup>Τομέας Πολεοδομίας, Χωροταξίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Πολυτεχνική Σχολή Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ορισμένοι από τους βασικούς παράγοντες για την ανάπτυξη και ανταγωνιστικότητα του κτηνοτροφικού κλάδου στην Ελλάδα αποτελεί ο περιορισμός του κόστους της παραγωγής και η αύξηση της παραγωγικότητας. Η διαμόρφωση του κατάλληλου κλίματος στο εσωτερικό των κτιρίων για τους διαφορετικούς τύπους εκτροφής είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγικότητας των ζώων. Οι πρακτικές που εφαρμόζονται συνήθως συνοδεύονται από κατανάλωση ενέργειας και αύξηση της δαπάνης λειτουργίας. Στην εργασία αυτή γίνεται μία τεχνική και οικονομική αξιολόγηση του ενδεχόμενου εφαρμογής παθητικών τεχνικών σε υφιστάμενα κτηνοτροφικά και πτηνοτροφικά κτίρια για τον περιορισμό της ενεργειακής ανάγκης σε θέρμανση, δροσισμό και αερισμό. Στόχος της εργασίας είναι να αξιολογήσει κατά πόσο είναι ρεαλιστικό τεχνικά και οικονομικά βιώσιμο να εφαρμοστούν αυτές οι τεχνικές σε υφιστάμενα κτίρια στα οποία είναι αδύνατη η επίτευξη βέλτιστων συνθηκών διαβίωσης χωρίς αυξημένη κατανάλωση ενέργειας.

*Λέξεις κλειδιά:* Κτηνοτροφικό Κτίριο, Παθητικά συστήματα, Μελέτη βιωσιμότητας, Εξοικονόμηση ενέργειας

**ECONOMIC SUSTAINABILITY STUDY CONCERNING THE  
APPLICATION OF PASSIVE HEATING AND COOLING SYSTEMS  
ON LIVESTOCK AND POULTRY BUILDINGS**

**V. Firfiris, S.Kalamaras, M.Christou, A. Martzopoulou, T.Kotsopoulos**

<sup>1</sup>Aristotle University of Thessaloniki, Department of Agriculture, Laboratory of Agricultural Structures and Equipment, 54124, Thessaloniki, e-mail: firfiris@agro.auth.gr

<sup>2</sup>Aristotle Univ. Thessaloniki, School of Architecture, Fac. of Engineering, Dep. of Urban Planning

**ABSTRACT**

Some of the key factors for the competitiveness growth of the livestock sector in Greece are the reduction of the production cost and the productivity increase. Proper internal climatic conditions formation in all types of livestock buildings can lead to sufficient increase of the productivity. Practices that consuming energy are usually adopted for this purpose, leading to the increase of the production cost. In this study a technical and financial assessment concerning the possibility of applying passive techniques in existing livestock and poultry buildings for the reduction of the farm energy needs. The scope of this study is to evaluate whether it is technical and economical sustainable to adjust such techniques in buildings where optimum internal conditions are not possible to be achieved without sufficient energy consumption.

*Keywords:* Livestock building, passive systems, economic sustainability study, energy conservation

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κτηνοτροφία αποτέλεσε και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους άξονες ανάπτυξης της ελληνικής οικονομίας. Σύμφωνα με τα στοιχεία φαίνεται ότι περίπου το 30% της ακαθάριστης αξίας της συνολικής αγροτικής παραγωγής οφείλεται στη ζωική παραγωγή (Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας -Πλατφόρμα Αγροδιατροφής, 2018). Παρόλα αυτά ο κλάδος κλήθηκε να αντιμετωπίσει διαχρονικά ένα πλήθος προβλημάτων με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση των εκτροφών με την πάροδο του χρόνου. Ενδεικτικά, με βάση στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ, οι εκμεταλλεύσεις που σχετίζονται με τη βοοτροφία μειώθηκαν σε ποσοστό περίπου 30% τη δεκαετία 2008-2018. Αντίστοιχα στοιχεία για την προβατοτροφία δείχνουν ότι οι εκμεταλλεύσεις μειώθηκαν σε ποσοστό 27% περίπου (ΕΛΣΤΑΤ). Αυτό οφείλεται σε διαφορετικούς παράγοντες (οικονομικούς, κοινωνικούς κτλ), όπως και σε μία ακόμα παράμετρο που είναι η αδυναμία των εγχώριων προϊόντων να ανταγωνιστούν χαμηλής τιμής εισαγόμενα προϊόντα. Αυτό οδήγησε στο να είναι η Ελλάδα ελλειμματική πλέον σε κρέας και άλλα ζωικά προϊόντα, γεγονός ιδιαίτερα δυσμενές για την οικονομία. Δεδομένου ότι ορισμένοι παράμετροι διαμόρφωσης της τιμής δεν εξαρτώνται από τον παραγωγό (φορολογία, πλαφόν τιμών, ύψος επιδοτήσεων), θα πρέπει η έρευνα να επικεντρωθεί στους υπόλοιπους παράγοντες διαμόρφωσης του κόστους. Η μείωση του κόστους παραγωγής ή/ και η αύξηση της παραγωγικότητας των μονάδων θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη θέση των ελληνικών προϊόντων στην αγορά. Ένας από τους παράγοντες διαμόρφωσης του κόστους παραγωγής είναι και το κόστος ενέργειας για τη διαμόρφωση του κλίματος στο εσωτερικό των μονάδων. Αυτό το κόστος περιλαμβάνει το κόστος θέρμανσης, δροσισμού και αερισμού. Αν και θεωρούνται κρίσιμες λειτουργίες για τη σωστή ανάπτυξη των ζώων ορισμένοι παραγωγοί αποφεύγουν να λειτουργήσουν τα συστήματα διαμόρφωσης κλίματος με τον σωστό τρόπο εξαιτίας της αύξησης του κόστους. Επίσης υπάρχει πάντα το πρόβλημα απουσίας υποδομών σε απομακρυσμένες εκτροφές γεγονός που καθιστά αδύνατη την εγκατάσταση ορισμένων συστημάτων που απαιτούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Μία αξιόπιστη λύση που έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα στα αστικά κτίρια με σημαντική επιτυχία είναι η εφαρμογή παθητικών συστημάτων τόσο για τη θέρμανση όσο και για τον δροσισμό και τον αερισμό χώρων. Με τον όρο παθητικό σύστημα ορίζεται κάθε σύστημα το οποίο δεν απαιτεί κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία του και συν τοις άλλοις δεν περιλαμβάνει κινούμενα μέρη (Sustainable Sources, 2019). Τα παθητικά συστήματα αξιοποιούν φυσικούς πόρους και φυσικές διεργασίες για να επιτύχουν μία εκ' των προαναφερθέντων λειτουργιών (θέρμανση, δροσισμό και αερισμό). Αν και αποδεδειγμένα τα παθητικά συστήματα οδηγούν σε περιορισμό των καταναλώσεων ενέργειας (USDA, 2019), οι παραγωγοί παραμένουν δύσπιστοι σε τέτοιου τύπου πρακτικές καθώς δεν διαθέτουν στα χέρια τους στοιχεία που αποδεικνύουν τα οικονομικά οφέλη που θα καρπωθούν σε ενδεχόμενη εφαρμογή τέτοιων συστημάτων. Έτσι θεωρείται αναγκαίο να γίνει μία προσέγγιση για το κατά πόσο αυτά τα συστήματα αποτελούν μία βιώσιμη οικονομικά λύση σε ήδη υφιστάμενα κτίρια ή και σε κτίρια που βρίσκονται στο στάδιο της υλοποίησης. Έρευνα σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα ενεργειακών συστημάτων σε κτηνοτροφικά και πτηνοτροφικά κτίρια έχει πραγματοποιηθεί, (T.Nacer et al., 2016, Q.Wang et al., 2011, CP Bishop and C.R. Shumway, 2009, F.Dong and J.Lu, 2013) αλλά δεν έχει δοθεί έμφαση σε μία ολιστική προσέγγιση μέσω παθητικών συστημάτων που θα οδηγούσε σε συνδυαστική κατά περιπτώσεις εξοικονόμηση ενέργειας ανά λειτουργία. Στην παρούσα δουλειά θα παρουσιαστεί μία ενδεδειγμένη οικονομικοτεχνική μελέτη εφαρμογής παθητικών τεχνικών σε ήδη υφιστάμενο κτίριο και η μελέτη βιωσιμότητας για να ελεγχθεί κατά πόσο είναι οικονομικά συμφέρουσα η εφαρμογή τους από τους παραγωγούς.

## 2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ-ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

### 2.1 Περιγραφή κτιρίου υπό διερεύνηση

Σήμερα στην Ελλάδα, τα κτίρια των οργανωμένων πτηνοτροφικών και κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων κατασκευάζονται με οικοδομικές άδειες ή είναι εγκεκριμένες κατασκευές που έχουν κάποια δεδομένα χαρακτηριστικά ώστε να μπορούν να αδειοδοτηθούν από τους αρμόδιους φορείς (Κέντρο Ελέγχου Γεωργικών Κατασκευών). Τα κτίρια όταν πρόκειται να στεγάσουν εκτροφή πτηνών είναι κατά κανόνα κλειστά και είναι εξοπλισμένα με συστήματα θέρμανσης, δροσισμού και αερισμού γιατί η εκτροφή είναι ευαίσθητη σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και ασθένειες. Όσον αφορά στις κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις τα βουστάσια είναι εν' μέρει ανοιχτά καθώς το μεγάλο πρόβλημα σ' αυτές τις εκτροφές εντοπίζεται στην αύξηση της θερμοκρασίας κατά τους θερινούς μήνες, όπως και στον ανεπαρκή αερισμό. Αντίστοιχη είναι και η προσέγγιση στα προβατοστάσια όπου το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι οι αυξημένες θερμοκρασίες το καλοκαίρι. Για τις ανάγκες της μελέτης θα προταθούν λύσεις για ένα τυπικό πτηνοτροφικό κτίριο (πλήρως κλειστό) και σε ένα βουστάσιο, ημι ανοιχτό κτίριο. Η μελέτη των δύο περιπτώσεων κρίνεται απαραίτητη γιατί οι λειτουργίες που πρέπει να ενισχυθούν σε κάθε περίπτωση είναι διαφορετικές. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα χαρακτηριστικά του κάθε κτιρίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή τα κτίρια με οικοδομική άδεια διαφέρουν στην κατασκευαστική φιλοσοφία και διαστάσεις προτιμήθηκε η υπόθεση εργασίας να αφορά κτίρια αντίστοιχα με εκείνα που λαμβάνουν έγκριση τύπου. Στις Εικόνες 1 και 2 φαίνεται η μορφή των τύπων των κτιρίων που θα μελετηθούν.



**Εικόνα 1.** Κατασκευή Βουστασίου μεταλλικού σκελετού ([www.geothermiki.gr](http://www.geothermiki.gr))



**Εικόνα 2.** Πτηνοτροφικός θάλαμος μεταλλικού σκελετού και κάλυψης με πάνελ ([www.gaiasergon.gr](http://www.gaiasergon.gr))

**Πίνακας 1.** Χαρακτηριστικά κτιρίων υπό διερεύνηση

Χαρακτηριστικά	Πτηνοτροφείο πάχυνσης	Βουστάσιο πάχυνσης
Αριθμός ζώων	16380	250
Μήκος	65	85
Πλάτος	14	14
Μέγιστο ύψος	4,5	4,5
Ύψος υδρορροής	2,30	2,30
Κατασκευή μεταλλικού φέροντα οργανισμού	Γαλβανισμένος χάλυβας	Γαλβανισμένος χάλυβας
Υλικά κάλυψης	Πάνελ πολυουρεθάνης πάχους 30mm στις 4 πλευρές, τις προσόψεις και στην οροφή	Πάνελ πολυουρεθάνης πάχους 30mm στη μία πλευρά και στην οροφή, κινητή πλαγιοκάλυψη από μουσαμά
Τύπος και διαστάσεις ανοιγμάτων	50 παράθυρα για τον αερισμό κατά τον χειμώνα	Συνεχόμενο άνοιγμα οροφής και πλευρικά παράθυρα διαστάσεων 1,80x85 σε κάθε πλευρά
Σύστημα θέρμανσης	Αερόθερμα, για τη θέρμανση απαιτούνται	Κανένα
Σύστημα δροσισμού	Δροσισμός με σύστημα υδροπάνελ και ανεμιστήρα με τη μέθοδο της εξάτμισης. 4 ανεμιστήρες ισχύος 1,5HP και αντίστοιχα 50m <sup>2</sup> υδροπάνελ	Με σύστημα υδρονέφωσης και ανεμιστήρων (1 ανεμιστήρας ανά 7,5-8m) κατά μήκος του κτιρίου. Δροσισμός με τη μέθοδο της εξάτμισης
Σύστημα αερισμού	Μέσω των ανεμιστήρων του συστήματος δροσισμού και συμπληρωματικών μικρότερων πλευρικών ανεμιστήρων. Οι μικροί ανεμιστήρες θα είναι 3 με ισχύς 0,75HP	Μέσω ανεμιστήρων σε επιλεγμένες θέσεις

Ο αριθμός των ζώων επιλέχθηκε βάσει των προδιαγραφών του ΥΠΑΤ σχετικά με την εκτροφή πτηνών πάχυνσης (ΥΠΑΤ, 2016). Ο αερισμός υπολογίστηκε βάσει των προδιαγραφών που ζητούνται από το Κέντρο Ελέγχου Γεωργικών Κατασκευών και οδηγεί στον υπολογισμό των ανεμιστήρων, του πλήθους και των διαστάσεων των ανοιγμάτων. Τα όρια για την ανεκτή ταχύτητα αέρα στο εσωτερικό των μονάδων λαμβάνεται από τις προδιαγραφές που δίνονται από εγκεκριμένες πηγές (Σ.Κυρίτσης, 2002). Οι μονάδες θεωρείται ότι λειτουργούν στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης και από εκεί λαμβάνονται τα κλιματολογικά δεδομένα για τη μελέτη θέρμανσης, δροσισμού και αερισμού. Η εκλύομενη θερμότητα από τα πτηνά λαμβάνεται 0,17kW για πτηνό με ζωικό βάρος 2,2kg (Poultry Performance Plus, 2019).

## 2.2 Προτεινόμενες λύσεις παθητικών συστημάτων για τη βελτίωση του κλίματος στο εσωτερικό των κτιρίων

Για την περίπτωση του πτηνοτροφείου που μελετάται, στόχος είναι ο περιορισμός των αναγκών θέρμανσης και των αναγκών δροσισμού. Ο αερισμός εφόσον θεωρείται κρίσιμος ακόμα και για την επιβίωση των ζώων κρίνεται ότι δεν πρέπει να σταματήσει να υποστηρίζεται από μηχανικά μέσα. Στην περίπτωση του βουστασίου από την άλλη θα προταθούν λύσεις για τη βελτίωση του αερισμού και του δροσισμού. Στον Πίνακα 2 δίνονται επιγραμματικά οι λύσεις και τα τεχνικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις που φέρουν.

**Πίνακας 2.** Προτεινόμενες παρεμβάσεις και συνοπτική τεχνική και οικονομική περιγραφή

<b>Πτηνοτροφείο</b>		
<b>Παρέμβαση</b>	<b>Τεχνική εφαρμογή</b>	<b>Κόστος</b>
Αντικατάσταση πάνελ πολυθερεθάνης με μεγαλύτερου πάχους 40mm	Αφαίρεση των υπαρχόντων πάνελ και εγκατάσταση καινούριων	Κόστος 24.000 €
Τοποθέτηση σκίαστρου εξωτερικά του πτηνοτροφείου στη Νότια πλευρά	Απλή μεταλλική κατασκευή εξοπλισμένη με δίχτυ σκίασης	Κόστος 3.000 €
Κατασκευή τοίχου Trombe στην πρόσοψη (Αυτή η επιλογή είναι δυνατή σε κτίρια όπου οι μεγάλες πόρτες εισόδου εξόδου είναι στις πλαϊνές πλευρές	Αφαίρεση των πάνελ από την εν' λόγω πλευρά και εφαρμογή των στοιχείων που απαιτεί ο τοίχος	Κόστος 4.500 €
<b>Βουστάσιο</b>		
<b>Παρέμβαση</b>	<b>Τεχνική εφαρμογή</b>	<b>Κόστος</b>
Κατασκευή γεωεναλλακτών δροσισμού	Εκσκαφή στην περιοχή δίπλα στο βουστάσιο αυλακιών βάθους 1,5m και μήκους τουλάχιστον 100m και τοποθέτηση αεραγωγού στο εσωτερικό τους για τη διοχέτευση αέρα στη μονάδα	Κόστος 10.000 €
Τοποθέτηση σκίαστρου εξωτερικά του βουστασίου στη Νότια πλευρά	Απλή μεταλλική κατασκευή εξοπλισμένη με δίχτυ σκίασης	Κόστος 4.000 €
Αντικατάσταση πάνελ πολυθερεθάνης με μεγαλύτερου πάχους 40mm	Αφαίρεση των υπαρχόντων πάνελ και εγκατάσταση καινούριων	Κόστος 17.000 €
Εγκατάσταση καμινάδων αερισμού στο εσωτερικό του κτιρίου	Διάνοιξη οπών σε συγκεκριμένα σημεία της οροφής.	Κόστος 4.000 €

**Πίνακας 3.** Αναμενόμενα αποτελέσματα προτεινόμενων παρεμβάσεων και προϋποθέσεις υλοποίησης

<b>Πτηνοτροφείο</b>		
<b>Παρέμβαση</b>	<b>Αναμενόμενα αποτελέσματα</b>	<b>Προϋποθέσεις υλοποίησης</b>
Αντικατάσταση πάνελ πολυθρεθάνης	Βελτίωση της μόνωσης του κτιρίου με αποτέλεσμα περιορισμού των αναγκών θέρμανσης κατά 25% και δροσισμού κατά 10%	Καμία ιδιαίτερη προϋπόθεση, απλή αφαίρεση και αντικατάσταση των πάνελ με καινούρια
Τοποθέτηση σκιάστρου	Περιορισμός των αναγκών δροσισμού κατά 10 %	Διαθέσιμος χώρος στη νότια πλευρά του κτιρίου ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή του μεταλλικού σκελετού του σκιάστρου
Κατασκευή τοίχου Trombe	Περιορισμός των αναγκών θέρμανσης κατά 10%	Κατασκευή του τοίχου εξωτερικά του μεταλλικού σκελετού της κατασκευή ώστε να μην τίθενται θέματα στατικότητας
<b>Βουστάσιο</b>		
<b>Παρέμβαση</b>	<b>Τεχνική εφαρμογή</b>	<b>Κόστος</b>
Κατασκευή γεωεναλλακτών δροσισμού	Περιορισμός των αναγκών δροσισμού κατά 7% και βελτίωση του αερισμού κατά 9%	Διαθέσιμος χώρος για δυνατότητα διάνοιξης υπεδάφίων αγωγών στην περιοχή πέριξ του κτιρίου.
Τοποθέτηση σκιάστρου	Περιορισμός των αναγκών δροσισμού κατά 10%	Διαθέσιμος χώρος στη νότια πλευρά του κτιρίου ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή του μεταλλικού σκελετού του σκιάστρου
Αντικατάσταση πάνελ πολυθρεθάνης	Βελτίωση της μόνωσης του κτιρίου με αποτέλεσμα περιορισμού των αναγκών δροσισμού κατά 10%	Καμία ιδιαίτερη προϋπόθεση, απλή αφαίρεση και αντικατάσταση των πάνελ με καινούρια
Εγκατάσταση καμινάδων αερισμού	Περιορισμός των αναγκών δροσισμού κατά 5% και βελτίωση του αερισμού κατά 13%	Δυνατότητα διάνοιξης οπών σε συγκεκριμένα σημεία της οροφής

Σχετικά με τις προαναφερθείσες παρεμβάσεις θα πρέπει να γίνει αναφορά στο τι μπορεί να επιτευχθεί σε επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας αλλά και να καταταχθούν βάσει δυσκολίας εφαρμογής. Στον Πίνακα 3 δίνεται μία εικόνα για τους αναμενόμενους στόχους από τις εν' λόγω παρεμβάσεις καθώς και τις προϋποθέσεις ή δυσκολίες εφαρμογής τους. Να σημειωθεί ότι στην

παρούσα εργασία γίνεται μελέτη της παρέμβασης σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές και όχι σε νεόδμητες. Μία νεόδμητη κατασκευή που θα κατασκευαστεί εξ' αρχής υπό τις αρχές του πράσινου κτιρίου και του παθητικού σχεδιασμού είναι δυνατόν να παρουσιάσουν τη βέλτιστη ενεργειακή συμπεριφορά και λειτουργία. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι για να θεωρηθεί ρεαλιστική η μελέτη πρέπει για ορισμένες από τις παρεμβάσεις που απαιτούν εργασίες εντός του κτιρίου να υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς των ζώων για το χρονικό διάστημα που διαρκούν οι εργασίες. Για τη σωστή λειτουργία της μονάδας απαιτείται η λογική λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης, δροσισμού και αερισμού (Πίνακας 1) που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Για τις λειτουργίες που περιγράφονται στον Πίνακα 4 θεωρήθηκαν ώρες λειτουργίας βάσει της κοινής πρακτικής παραγωγών. Οι τιμή του προπανίου λήφθηκε 0,059 €/kWh βάσει των στοιχείων των Τιμών Δυλιστηρίου για το 2019 (Γενική Γραμματεία Εμπορίου & Προστασίας Καταναλωτή, 2019), (Physics Factbook). Για το ηλεκτρικό ρεύμα λήφθηκε η τιμή του αγροτικού ρεύματος όπως αυτό δίνεται από τη ΔΕΗ στα 0,069€/kWh (ΔΕΗ, 2019).

**Πίνακας 4.** Λογική λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων μονάδων

<b>Πτηνοτροφείο</b>						
<b>Λειτουργία</b>	<b>Μέσο</b>	<b>Ενεργειακή πηγή</b>	<b>Ανάγκες (kW)</b>	<b>Ώρες λειτουργίας (hr/έτος)</b>	<b>Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh)</b>	<b>Ετήσια δαπάνη (€)</b>
Θέρμανση	Αερόθερμα	Προπάνιο	17,6	2100	37149	2223
Δροσισμός	Σύστημα υδροπανελ και ανεμιστήρων	Ηλεκτρικό ρεύμα	6*	3600**	21600	1490
<b>Βουστάσιο</b>						
<b>Λειτουργία</b>	<b>Μέσο</b>	<b>Ενεργειακή πηγή</b>	<b>Ανάγκες (kW)</b>	<b>Ώρες λειτουργίας (hr/έτος)</b>	<b>Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh)</b>	<b>Ετήσια δαπάνη (€)</b>
Δροσισμός	Ανεμιστήρες και σύστημα υδρονέφωσης	Ηλεκτρικό ρεύμα	8,5	1800	15300	1056
Αερισμός	Αξονικοί Ανεμιστήρες	Ηλεκτρικό ρεύμα	7	2600	18200	1256

\*Τα ψυκτικά φορτία του κτιρίου είναι ενδεχόμενα μεγαλύτερα, εδώ η μελέτη γίνεται βάσει της λογικής αερισμού – δροσισμού που εφαρμόζεται και δε στοχεύει στην επίτευξη της βέλτιστης θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου στο εσωτερικό της κατασκευής αλλά στην επίτευξη του αισθήματος άνεσης των πτηνών μέσω της διεργασίας της εξάτμισης

\*\* Η λειτουργία δροσισμού πρακτικά περιλαμβάνει και τη λειτουργία των ανεμιστήρων για αερισμό οπότε οι ώρες λειτουργίας αφορούν όλο το έτος.

Με την εφαρμογή των παρεμβάσεων οδηγούμαστε στην αναθεωρημένη λογική λειτουργίας του Πίνακα 5. Οι δείκτες Θ (θέρμανση), Δ (δροσισμός) και Α (αερισμός) υποδηλώνουν τη λειτουργία που επηρεάζεται με κάθε παρέμβαση.



Πίνακας 5. Λογική λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων μονάδων

<b>Πτηνοτροφείο</b>			
<b>Παρέμβαση</b>	<b>Νέα κατανάλωση ενέργειας (kWh)</b>	<b>Νέα δαπάνη ενέργειας (€)</b>	<b>A/A</b>
Αντικατάσταση πάνελ (Θ+Δ)	27877kW <sub>th</sub> /20160kW <sub>e</sub>	1667(Θ)+ 1391 (Δ)	Π1
Τοποθέτηση σκίαστρου (Δ)	37152kW <sub>th</sub> /20160kW <sub>e</sub>	2223 (Θ)+1391 (Δ)	Π2
Κατασκευή τοίχου Trombe (Θέρμανση)	33437kW <sub>th</sub> /21600kW <sub>e</sub>	2000 (Θ)+1490 (Δ)	Π3
Αντικατάσταση πάνελ + Κατασκευή τοίχου Trombe (Θ+Δ)	24149kW <sub>th</sub> /20160kW <sub>e</sub>	1444 (Θ) +1391 (Δ)	Π4
Αντικατάσταση πάνελ + Τοποθέτηση σκίαστρου (Θ+Δ)	27877kW <sub>th</sub> /18720kW <sub>e</sub>	1667 (Θ)+1291 (Δ)	Π5
Αντικατάσταση πάνελ +Τοποθέτηση σκίαστρου+ Κατασκευή τοίχου Trombe (Θ +Δ)	24149kW <sub>th</sub> /18720kW <sub>e</sub>	1444 (Θ)+ 1291 (Δ)	Π6
<b>Βουστάσιο</b>			
<b>Παρέμβαση</b>	<b>Νέα κατανάλωση ενέργειας (kWh)</b>	<b>Νέα δαπάνη ενέργειας (€)</b>	<b>A/A</b>
Αντικατάσταση πάνελ (Δ)	13770kW <sub>e</sub> /18200kW <sub>e</sub>	950(Δ)+1255(A)	B1
Τοποθέτηση σκίαστρου (Δ)	13770kW <sub>e</sub> /18200kW <sub>e</sub>	950(Δ)+1255(A)	B2
Κατασκευή γεωεναλλακτών (Δ+A)	14229kW <sub>e</sub> /16562kW <sub>e</sub>	982(Δ)+1143(A)	B3
Εγκατάσταση καμινάδων (Δ+A)	14535kW <sub>e</sub> /15834kW <sub>e</sub>	1003(Δ)+1092(A)	B4
Αντικατάσταση πάνελ + Τοποθέτηση σκίαστρου (Δ)	12240kW <sub>e</sub> /18200kW <sub>e</sub>	845(Δ)+1255(A)	B5
Αντικατάσταση πάνελ + Κατασκευή γεωεναλλακτών (Δ+A)	12699kW <sub>e</sub> /16562kW <sub>e</sub>	876(Δ)+1143(A)	B6
Αντικατάσταση πάνελ + Εγκατάσταση καμινάδων (Δ+A)	13005kW <sub>e</sub> /15834kW <sub>e</sub>	897(Δ)+1092 (A)	B7
Τοποθέτηση σκίαστρου+ Κατασκευή γεωεναλλακτών (Δ+A)	12699kW <sub>e</sub> /16562kW <sub>e</sub>	876(Δ)+1143(A)	B8
Τοποθέτηση σκίαστρου+ Εγκατάσταση καμινάδων (Δ+A)	13005kW <sub>e</sub> /15834kW <sub>e</sub>	897(Δ)+1092(A)	B9
Κατασκευή γεωεναλλακτών + Εγκατάσταση καμινάδων (Δ+A)	13464kW <sub>e</sub> /14196kW <sub>e</sub>	929(Δ)+978(A)	B10

Συνέχεια Πίνακα 5			
Αντικατάσταση πάνελ + Τοποθέτηση σκίαστρου+ Κατασκευή γεωεναλλακτών (Δ+Α)	11169kW <sub>e</sub> /16562kW <sub>e</sub>	771(Δ)+1143(Α)	B11
Αντικατάσταση πάνελ + Τοποθέτηση σκίαστρου+ Εγκατάσταση καμινάδων (Δ+Α)	11475kW <sub>e</sub> /15834kW <sub>e</sub>	792(Δ)+1092(Α)	B12
Αντικατάσταση πάνελ + Κατασκευή γεωεναλλακτών+ εγκατάσταση καμινάδων (Δ+Α)	11934kW <sub>e</sub> /14196kW <sub>e</sub>	823(Δ)+978(Α)	B13
Τοποθέτηση σκίαστρου+ Κατασκευή γεωεναλλακτών + Εγκατάσταση καμινάδων Δ+Α)	11934kW <sub>e</sub> /14196kW <sub>e</sub>	823(Δ)+978(Α)	B14
Αντικατάσταση πάνελ +Τοποθέτηση σκίαστρου+ Κατασκευή γεωεναλλακτών δροσισμού+ Εγκατάσταση καμινάδων αερισμού (Δ+Α)	10404kW <sub>e</sub> /14196kW <sub>e</sub>	717(Δ)+978(Α)	B15

### 3. Μεθοδολογία μελέτης βιωσιμότητας

Η μελέτη βιωσιμότητας αφορά στο κατά πόσο οι προτεινόμενες λύσεις θα επιφέρουν επιπλέον οικονομικά οφέλη στους παραγωγούς και κατά πόσο θα αποσβεστεί η επένδυση σε εύλογο χρονικό διάστημα. Για τον σκοπό αυτό θα γίνουν κάποιες βασικές παραδοχές ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη η εκτίμηση. Θεωρείται ότι για κάθε εκτροφή τα έσοδα θα είναι τα ίδια, δηλαδή δεν θεωρείται ότι το προϊόν αποκτά κάποια υπεραξία από τον περιορισμό των ενεργειακών καταναλώσεων ή ότι παρατηρείται μείωση ή αύξηση της παραγωγής εξαιτίας των παρεμβάσεων. Στόχος είναι να παραμείνουν τα επίπεδα παραγωγικότητας τουλάχιστον στο ίδιο επίπεδο με τη χρήση των παθητικών συστημάτων και να μειωθεί το κόστος παραγωγής. Δεν θα υπάρχουν διακυμάνσεις στα έσοδα με την πάροδο των ετών. Το τραπεζικό επιτόκιο λαμβάνεται ίσο με 10% και ως ορίζοντας απόσβεσης τίθενται τα 5 έτη, σε περίπτωση μη απόσβεσης της επένδυσης σ' αυτό το χρονικό διάστημα, τότε αυτήν κρίνεται μη συμφέρουσα. Για την εκτίμηση βιωσιμότητας της επένδυσης θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Κ.Π.Α) ενώ για τον χρόνο απόσβεσης η μέθοδος της Περιόδου Απόσβεσης Επένδυσης (P.P). Η μέθοδος της ΚΠΑ λαμβάνει υπ' όψιν εισροές και εκροές χρήματος των επιχειρήσεων, την αρχική επένδυση, τη σημερινή αξία του χρήματος όπως και το επιτόκιο δανεισμού (Παπαδόπουλος,Α, 2003). Για τον υπολογισμό της ΚΠΑ χρησιμοποιείται η εξίσωση 1.

$$NPV = -CF_0 + \frac{CF_1}{(1+0,04)^1} + \frac{CF_2}{(1+0,04)^2} + \frac{CF_3}{(1+0,04)^3} + \frac{CF_4}{(1+0,04)^4} + \dots + \frac{CF_n}{(1+0,04)^n} \quad (1)$$

NPV: Καθαρά παρούσα αξία

CF<sub>0</sub>: Αρχικό κόστος επένδυσης

CF<sub>n</sub>: Χρηματοροή για το έτος n (Έσοδα-Έξοδα)

n: έτος

Στη μέθοδο της περιόδου αποπληρωμής της επένδυσης εξετάζεται ο ρυθμός με τον οποίο τα κέρδη της επένδυσης αφομοιώνουν την αρχική επένδυση.

$$P.P = \frac{I.I.C}{A.B} \quad (2)$$

I.I.C Αρχικό Κόστος Επένδυσης

A.B: Ετήσια καθαρά έσοδα

#### 4. Αποτελέσματα μελέτης βιωσιμότητας

Στον Πίνακα 6. Παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία κόστους και η εφαρμογή των (NPV) και (PP) για διαφορετικά σενάρια εφαρμογής των παρεμβάσεων. Ως βάση εσόδων υποτέθηκαν οι 25000 € ενώ ως δαπάνες εκτός της ενέργειας 10000€. Για τους σκοπούς της έρευνας θεωρήθηκε σταθερή χρηματοροπή καθ' όλη την πενταετία.

**Πίνακας 6.** Καθαρά παρούσα αξία και περίοδος αποπληρωμής επένδυσης για κάθε παρέμβαση

Κωδικός σεναρίου παρέμβασης	NPV σε ορίζοντα 5ετίας (€)	P.P (Μήνες)	Κωδικός σεναρίου παρέμβασης	NPV σε ορίζοντα 5ετίας	P.P (Μήνες)
Π1	21270	26	B6	22208	25
Π2	39221	5	B7	28322	20
Π3	39132	5	B8	34931	13
Π4	17615	29	B9	41322	8
Π5	18649	28	B10	35633	13
Π6	14944	30	B11	18606	29
B1	30446	16	B12	24728	23
B2	44503	4	B13	19035	29
B3	38806	10	B14	32035	17
B4	44920	4	B15	15443	32
B5	27901	20			

#### 5. Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των υπολογισμών όλες οι παρεμβάσεις είναι συμφέρουσες σε ορίζοντα 5ετίας. Επίσης η απόσβεση των επενδύσεων για τις παρεμβάσεις γίνεται εντός του ορίζοντα της 5ετίας. Η εφαρμογή των πιο δαπανηρών παρεμβάσεων, παρόλο που δίνουν μεγαλύτερο

ποσοστό εξοικονόμησης δεν καταφέρνουν να αποφέρουν εκείνη την αξία που να δικαιολογεί την επιλογή τους. Αντίθετα οι χαμηλότερες επενδύσεις φαίνεται να δίνουν την υψηλότερη καθαρά παρούσα αξία στο τέλος της περιόδου (Στο πτηνοτροφείο η εγκατάσταση μόνο της σκίασης και στο βουστάσιο η εγκατάσταση μόνο των καμινάδων αερισμού). Αυτό συμβαίνει γιατί οι εκμεταλλεύσεις είναι μικρές και η εξοικονόμηση ενέργειας δεν είναι τόσο εμφανής στις καταναλώσεις. Επίσης ο ορίζοντας αξιολόγησης που τέθηκε είναι σχετικά σύντομος. Έτσι για μεγαλύτερες μονάδες ενδεχόμενα να είναι συμφέρουσα η αντικατάσταση των πάνελ ή και η συνδυαστική εφαρμογή παρεμβάσεων. Επίσης σε μεγαλύτερο ορίζοντα απόσβεσης οι πιο δαπανηρές επενδύσεις έχουν καλύτερη συμπεριφορά καθώς η υψηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας αθροίζεται. Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι για μικρές εκμεταλλεύσεις είναι συμφέρουσα η υιοθέτηση των λιγότερο δαπανηρών παρεμβάσεων από αυτές που προτάθηκαν καθώς το αποτέλεσμα τους παραμένει ικανοποιητικό και αποβαίνει γρήγορα. Σε μεγαλύτερες παρεμβάσεις από την άλλη είναι συμφέρουσα και η εφαρμογή των ακριβότερων αλλά πιο αποδοτικών σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα παρεμβάσεων. Δε θα πρέπει να αμεληθεί επίσης το κλίμα της περιοχής στην οποία γίνεται η εφαρμογή καθώς αν οι ανάγκες θέρμανσης στο πτηνοτροφείο είναι για παράδειγμα πιο υψηλές ενδέχεται να αλλάξει η δαπάνη εξοικονόμησης. Επιπλέον το κατά πόσο είναι τεχνικά εφικτό να υλοποιηθεί η κάθε παρέμβαση είναι ένας παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

C.P. Bishop, C.R. Shumway, *The Economics of Dairy Anaerobic Digestion with Coproduct Marketing*, Applied Economic Perspectives and Policy, Volume 31, Issue 3, Fall 2009, Pages 394–410

F.Dong, J.Lu, *Using solar energy to enhance biogas production from livestock residue—A case study of the Tongren biogas engineering pig farm in South China*, Energy Volume 57, 1 August 2013, Pages 759-765

Farm Energy, *Introduction to Energy Efficiency and Conservation for Livestock Production*, United States Department of Agriculture- National Institute of Food and Agriculture, 2019 URL: <https://farm-energy.extension.org/introduction-to-energy-efficiency-and-conservation-for-livestock-production/>

T.Nacer, A.Hamidat, O.Nadjemia, *A comprehensive method to assess the feasibility of renewable energy on Algerian dairy farms*, Journal of Cleaner Production Volume 112, Part 5, 20 January 2016, Pages 3631-3642

The Physics Factbook official website, *Energy Density Of Propane*, 2019 URL: <https://hypertextbook.com/facts/2002/EricLeung.shtml>

Poultry Performance Plus official website, *Heat production of broilers*, 2019 URL: <https://poultryperformanceplus.com/information-database/broilers/125-heat-production-of-broilers>

Sustainable Sources official website, *Passive Solar Design*, 2019 URL: <http://passivesolar.sustainablesources.com/>

Q.Wang, E.Thompson, R.Parsons, G.Rogers†, D.Dunn‡, *Economic feasibility of converting cow manure to electricity: A case study of the CVPS Cow Power program in Vermont*, Journal of Dairy Science, Volume 94, Issue 10, October 2011, Pages 4937-4949

ΓΑΙΑΣ ΕΡΓΟΝ ΙΚΕ official website, URL: <https://www.gaiasergon.gr/>

Γενική Γραμματεία Εμπορίου και Προστασίας Καταναλωτή official website, *Τιμές διυλιστηρίου Αύγουστος 2019*, 2019

Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας- Πλατφόρμα Αγροδιατροφής, Τομέας Ζωικής Παραγωγής, Συντονιστής Γ.Ι. Αρσένος, *Περιγραφή Στρατηγικών Δράσεων ΕΤΑΚ στην Ζωική παραγωγή για τα έτη 2016-2017*

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ Α.Ε official website, URL: <http://www.geotherm.gr/>

ΔΕΗ official website, Τιμοκατάλογος Αγροτικού Τιμολογίου, 2019

Διεύθυνση Διαχείρισης Ζωικών Γενετικών Πόρων & Συστημάτων Εκτροφής Ζώων, ΤΜΗΜΑ: Παμφάγων & Φυτοφάγων Μονογαστρικών, Γουνοφόρων Ζώων και Λοιπών Χερσαίων Οργανισμών, *Εκτροφή Πουλερικών για την παραγωγή Κρέατος*, ΥΠΑΤ Αθήνα, Δεκέμβριος 2016

ΕΛΣΤΑΣΤ, *Έρευνες ζωικού κεφαλαίου 2008 & 2018*, 2019 URL: <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SPK13/2018>

Κυρίτσης,Σ, 2002, *Πτηνοτροφεία*, Εκδόσεις Σταμούλη Αθήνα, ISBN: 978-960-351-118-2

Παπαδόπουλος,Α, 2003, *Οικονομική ανάλυση ενεργειακών συστημάτων*, Σημειώσεις παραδόσεως στο μάθημα, Τμήμα εκδόσεων ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, σελ 227.

## EVALUATION OF BASIL CROP AS A SECONDARY CROP IN A CASCADE HYDROPONIC SYSTEM: PRELIMINARY RESULTS

**E. Karatsivou, A. Elvanidi, M. Xatzinikolaou, A. Gaschk, N. Katsoulas**  
University of Thessaly, Department of Agriculture Crop Production and Rural Env., Lab. of Agricultural Constructions and Environmental Control, Volos, e-mail: nkatsoul@uth.gr

### ABSTRACT

The free discharge of drainage water from open-loop hydroponic greenhouse production systems to the environment is a current environmental concern due to its capacity to contribute to environmental pollution. The establishment of closed hydroponic systems, on the other hand, is barely implemented mainly due to the salinity of the groundwater used for irrigation, the fear of disease and the risk of reduced yields caused by the continuous re-use of low-quality drainage solution. A sustainable system is to use the drainage solution to feed salt tolerance grown secondary and tertiary crops. In the current study, drainage solution of cucumbers were used to feed basil plants. Three different fertigation treatments were imposed in basil plants: under standard nutrient solution (NS3); drainage solution (NS1); and drainage mixed with standard solution (NS2). According to the findings, NS2 treatment may reveals saving of water by providing high yield production at the same time.

*Keywords:* salinity, drainage solution, sequential reuse

### ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΒΑΣΙΛΙΚΟΥ ΩΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ: ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

**E. Καρατσιβου, A. Ελβανίδη, M. Χατζηνικολάου, A. Gaschk, N. Κατσούλας**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμ. Γεωπονίας Φυτικής Παρ. & Αγροτικού Περιβ., Εργ. Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, Βόλος, e-mail: nkatsoul@uth.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχής και απερίσκεπτη απομάκρυνση των απορροών από την παραγωγή ανοιχτών υδροπονικών συστημάτων θερμοκηπίου στο περιβάλλον είναι μια σημερινή περιβαλλοντική ανησυχία λόγω της ικανότητάς της να συμβάλλει στη ρύπανση του περιβάλλοντος. Η δημιουργία κλειστών υδροπονικών συστημάτων, από την άλλη πλευρά, υλοποιείται ελάχιστα κυρίως λόγω της αλατότητας των υπόγειων υδάτων που χρησιμοποιούνται για άρδευση, του φόβου πρόκλησης ασθενειών και του κινδύνου μειωμένων αποδόσεων που προκαλείται από τη συνεχής επαναχρησιμοποίηση κακής ποιότητας απορροών. Ένα βιώσιμο σύστημα είναι η χρήση των απορροών για τη θρέψη δευτερεύουσας και τριτεύουσας καλλιέργειας με ανοχή σε υψηλή αλατότητα. Στην παρούσα μελέτη, οι απορροές από καλλιέργεια αγγουριών χρησιμοποιήθηκε για τη θρέψη φυτών βασιλικού. Τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις θρέψης εφαρμόστηκαν στα φυτά βασιλικού: με πρότυπο διάλυμα (NS3), απορροές (NS1); και απορροές σε συνδυασμό με πρότυπο διάλυμα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μεταχείριση NS2 μπορεί πραγματοποιήσει εξοικονόμηση νερού παρέχοντας ταυτόχρονα υψηλή παραγωγή.

*Λέξεις-κλειδιά:* αλατότητα, διάλυμα απορροής, διαδοχική επαναχρησιμοποίηση

## 1. INTRODUCTION

Leachates from soilless cultures can be collected to be reused for the fertigation of the crop (recirculation); this system has been widely studied (Molitor and Fischer, 1988; Van Os et al., 1991; Hardgrave, 1993; Gertsson et al., 1994), with satisfactory results in Mediterranean conditions with good quality waters ( $EC \leq 1 \text{ dS m}^{-1}$ ) (García and Urrestarazu, 1999; Lorenzo et al., 2000; Marfà, 2000). Nevertheless, the salinity of irrigation water represents the main difficulty for the management of closed systems. In fact, salt accumulation occurs in the root zone when irrigation water contains ions such as  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  at concentrations higher than the plant uptake concentration (Sonneveld, 2000; Carmassi et al., 2005; Savvas et al., 2005). For this reason, another option is to sequentially use and reuse the drainage water to grow increasingly more salt tolerant crops. Through this way the drainages are concentrated to manageable level. This practice is called “serial biological concentration” (SBC) system. The choice of reusing strategy to follow depends largely on the drainage water (quantity, quality and time of availability), crop tolerance to salinity and the availability of freshwater resources (for conjunctive use) (Paydar et al., 2007).

The ultimate aim of this trial was to establish an integrated drainage management strategy via a cascade cultivation system in order to avoid salinity stress occurred to the crop and reduce the pollution generated by intensive horticulture, in order to save water and fertilizers and to obtain a two-crop production (horticultural and ornamental). Therefore, the purpose of this assay was to assess the cationic nutritional responses of Basil (*Ocimum basilicum*) fertigated with leachates from Cucumbers (*Cucumis Sativus*) cultivated on rockwool, compared to conventional fertigation.

Selection of plants for secondary crops in soilless systems is critical. Basil (*Ocimum basilicum*) is an annual herb that is commercially important and both fresh and dried leaves are used for culinary purposes (Chalchat and Ozcan, 2008). Basil is considered a medicinal herb for its diuretic and stimulating properties and also used in perfume compositions. Basil is suitable for soilless production, and several studies have used basil as hydroponic crop (Rakocy et al., 2004; Roosta, 2014; Mangmang et al. 2016)

Thus in the frame of this trial, the number of plants needed in each water system through the use of a series of inputs was calculated according to the model proposed by (García-Caparrós et al., 2018). Therefore, the nutrients concentration used in the fertigation of a dual production system in horticultural crops was studied.

## 2. MATERIAL AND METHODS

The experiment was carried out at the experimental research station of the University of Thessaly located near Volos, (Velesino: Latitude  $39^\circ 22'$ , longitude  $22^\circ 44'$ , altitude 85 m) on the continental area of eastern Greece. It was conducted in a greenhouse, N-S oriented, with a ground area of  $160 \text{ m}^2$ , from September to October of 2018.

### 2.1 Plant material and growing conditions

The greenhouse is covered by a single polyethylene film. In the current experiment terms, the drainages of cucumber (*Cucumis sativus*) cultivation (primary crop) were used to cover the water and fertilize needs of the basil (*Ocimum basilicum*) crop (secondary crop). The plants were grown in closed-loop soilless systems on rockwool substrate (slab dimension:  $110 \times 20 \times 7.5 \text{ cm}$ ).

The nutrient solution was supplied via a drip system and was controlled by a time-program irrigation controller (12 irrigation events per day, per hour, starting at 07:00 until 19:00, local time). All nutrient solutions were prepared using locally available irrigation

water (Ca 1.40 mmol L<sup>-1</sup>, Mg 1.60 mmol L<sup>-1</sup>, Na 1.10 mmol L<sup>-1</sup>, SO<sub>4</sub> 0.15 mmol L<sup>-1</sup>, NO<sub>3</sub> 0.10 mmol L<sup>-1</sup>, HCO<sub>2</sub> 5.70 mmol L<sup>-1</sup>, Cl 1.00 mmol L<sup>-1</sup>, Mn 1.30 mmol L<sup>-1</sup> and Zn 1.20 mmol L<sup>-1</sup>).

The concentration of the macro and micro-nutrients supply to the cucumber plants was according to Savvas&Passam (2002) recipe (K 6.20mmol L<sup>-1</sup>, Ca 4.15mmol L<sup>-1</sup>, Mg 1.60mmol L<sup>-1</sup>, NO<sub>3</sub>14.75mmol L<sup>-1</sup>, NH<sub>4</sub> 1.40 mmol L<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1.25mmol L<sup>-1</sup>, Fe 15.00 mmol L<sup>-1</sup>, Mn10.00 mmol L<sup>-1</sup>, Zn 5.00 mmol L<sup>-1</sup> and Cu 0.80mmol L<sup>-1</sup>).The drainage of the cucumber nutrient solution was collected, disinfected by a simple filter, and mixed with a same quantity of fresh water in a mixing tank in order to replenish the evapotranspiration. Stock solutions and/or nitric acid were added in order to maintain EC and pH set-point (2.4mS/cm and 5.6, respectively).

## 2.2 Experimental Fertigation Treatments and design

Totally 72 cucumber plants were transplanted at 2.7plants density perm<sup>2</sup>in two crop lines (12slabs per line, 3 plants per slab).

In order to study the effect of the drainages of the main crop to the basil plants,three different fertigation treatments were applied: (i) basil plants fertigated with standard nutrient solution(Control treatment; NS3) and two sequential reuse treatments: (ii) basil plants irrigated with cucumber drainage solution correcting onlythe pH level at 5.5 (NS1) and (iii) basil plants irrigated with drainage mixed with standard nutrient solution in ratio 1:1 v/v (NS2). The standard nutrient solution supplied to the plants was: K 5.00 mmol L<sup>-1</sup>, Ca 4.00 mmol L<sup>-1</sup>, Mg 2.00mmol L<sup>-1</sup>, NO<sub>3</sub> 11.00mmol L<sup>-1</sup>, NH<sub>4</sub> 1.00 mmol L<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1.00 mmol L<sup>-1</sup>, Fe 5.00 mmol L<sup>-1</sup>, Mn 5.00 mmol L<sup>-1</sup>, Zn 5.00 mmol L<sup>-1</sup> and Cu 1.00mmol L<sup>-1</sup>. Each fertigation treatmentconsisted by two repetitions, twelve blocks and four plants per slabgiving a total of 136 plants of basil (3.6 plants per m<sup>2</sup>). The treatment started 14 DAT and the whole experimental period lasted 60 days.

## 2.3Measurements

During the experimental period two destructive sampling were performed 30and 60days after transplanting (DAT), in which six samples per treatment were obtained. Plant height (H) was measured twice a week from the top edge of the pot to the tip of the last open leaf of the plant with a calibratedruler. Three plants per replicate and treatment were sampled to measure leaf fresh (FW) and dry weight (DW) of basil plants. The stems and the leaves were dried separately to a constant weight at 70°C for 48 hours. The ratio FW/DW was also calculated. A series of elements concentration [nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), magnesium (Mg), calcium (Ca), copper (Cu), manganese (Mn), iron (Fe), and zinc (Zn)]in the plant tissue was also analysed in lab using the Kjeldahl extraction of dry samples and quantification by ICP-OES. The values of mineral nutrients were calculated by the average of both destructive processes. During the 2<sup>nd</sup> sampling period, the plant leaf chlorophyll content was measured in the samples using non-destructive sensing by means of an Opti-Science sensor performing measurements in contact with the leaf (CCM 200, Opti-Science, NH, USA) beforeobtained in the lab. Measurements were taken in5 leaves per treatment.

## 2.4 Statistical analysis

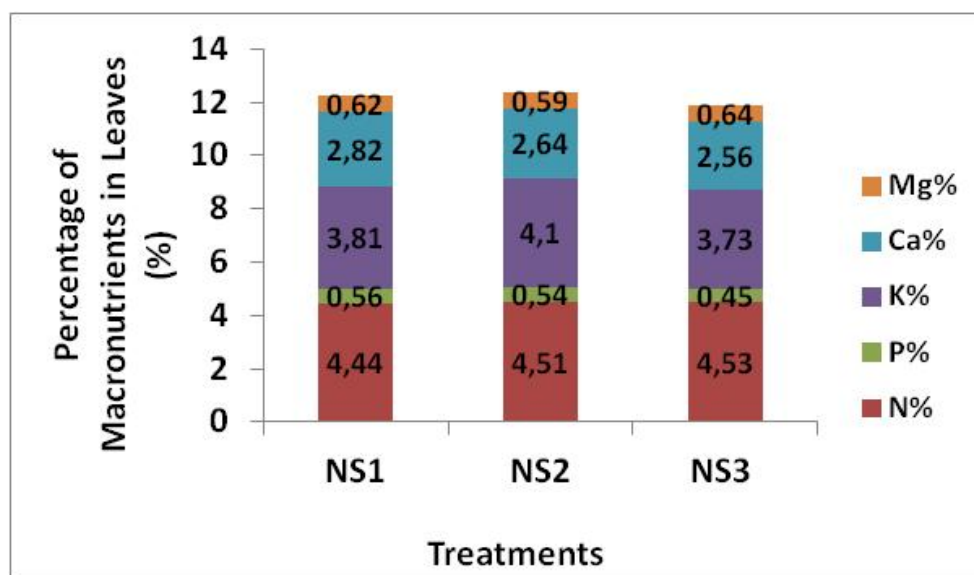
Comparison of means was performed by applying one-way ANOVA at a confidence level of 95% (p ≤ 0.05) using SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, IBM, USA).



### 3.RESULTS

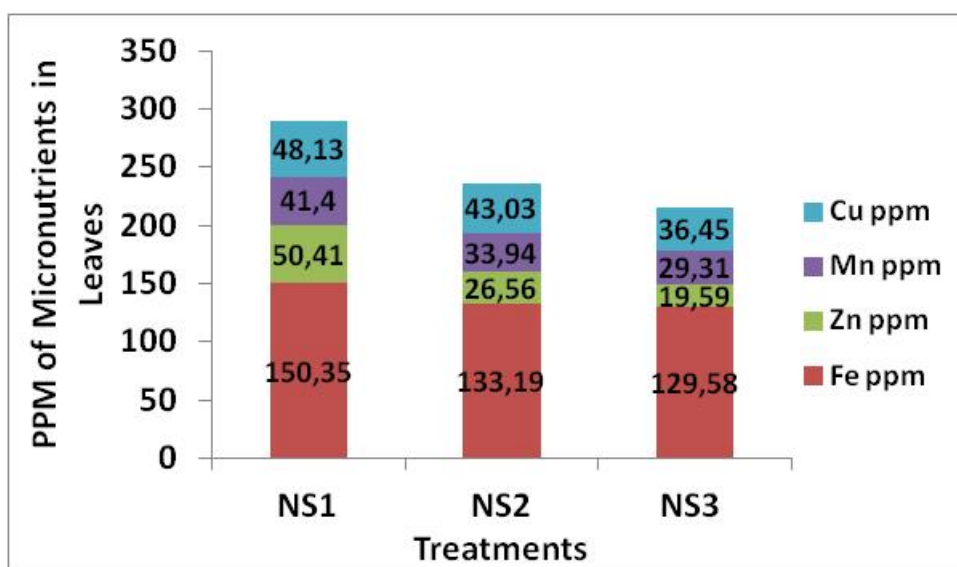
The uptake efficiency of N, P and K absorbed by the plants showed different trends under different fertigation treatments (Figure 1). According to the findings, the N concentration varied from 4.44 to 4.53%, the P concentration 0.45 - 0.56%, the K concentration 3.73 - 4.10%, the Ca concentration 2.56 - 2.82% and the Mg concentration 0.59 - 0.64%. The N content (%) seems to decline in plants fertigated with drainage solution (NS1) and drainage solution mixed with standard nutrient solution (NS2) almost 2% compared with the content observed in plants of control treatment (NS3). However, the difference wasn't significant and shouldn't take in consideration. P content follows similar trend to NS1 and NS2 treatment but in NS3 treatment the content value was significantly low ( $p < 0.05$ ). The resulted difference observed at 16%. In case of K content, the values showed the greatest trend in plants of NS2 treatment with almost 10% difference from those in NS1 and NS3 treatment. On the other hand, in case of Ca, the values showed the lowest trend in plants of NS2 treatment from those in NS1 and NS3 treatment with difference equal around at 7%.

In Figure 2 the concentration of the micronutrients expressed in ppm in the leaf area according to the treatments is presented. According to the findings, the Fe concentration varied from 129.58 to 150.35 ppm, the Zn concentration 19.59–50.41 ppm, the Mn concentration 29.31–50.41 ppm and the Cu concentration 36.45 – 48.13 ppm. At this point however, it is worth mentioning that the content of the micronutrients tends to increase from the NS3 treatment in which the plant was fertigated with standard solution to NS1 treatment in which the plants were fertigated only with drainages. For instance, Fe content increased 3% and 16% in NS2 and NS3 respectively from the content observed in NS3 treatment. Similar trend rate followed the rest micronutrient elements. Investigation of leaf macro- and micronutrient content for basil grown under soilless systems has not been done before, and thus the findings provided in this paper are novel and of value for future research.

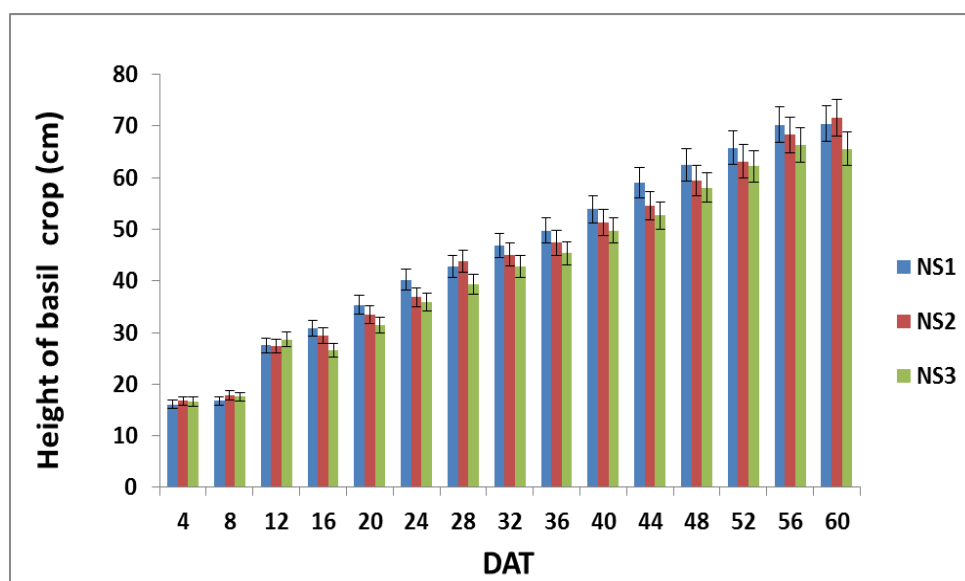


**Figure 1.** The concentration of macronutrients (%) in the leaf area for each treatment: NS1 treatment – drainage solution, NS2 treatment – drainage solution mixed with standard nutrient solution and NS3 treatment – standard nutrient solution (control), a: values without significant differences ( $p > 0.05$ )

The variation of basil height for each treatment is presented in Figure 3. No significant difference was observed ( $p>0.05$ ) until the 12<sup>th</sup> DAT, since no different fertigation treatments were imposed to the plants. Additionally, no significant difference was observed between NS2 and NS3 during the period of the measurements, except in some cases such as in the last recording (60 DAT) in which the mean height was more than 9% higher than the mean height of the NS3 plants. On the other hand, the plants irrigated with drainage solution (NS1) surprisingly performed 6% to 16% higher height from the control plants, from the first days of the fertigation treatment initiation.



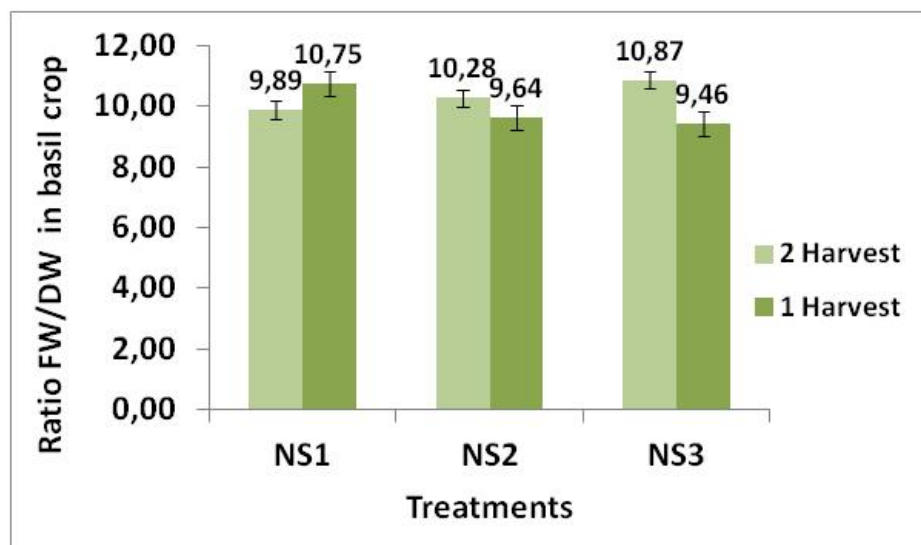
**Figure 2.** The concentration of micronutrients (ppm) in the leaf area for each treatment: NS1 treatment – drainage solution, NS2 treatment – drainage solution mixed with standard nutrient solution and NS3 treatment – standard nutrient solution (control)



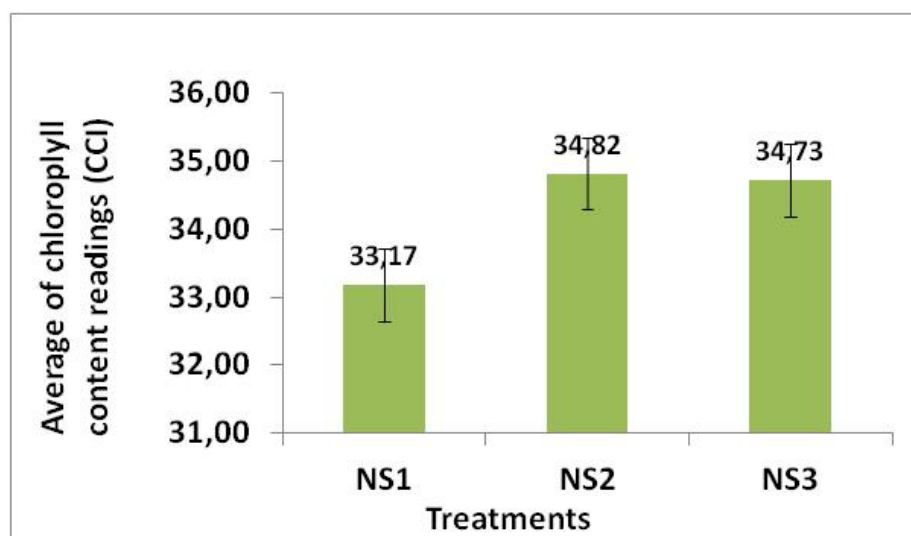
**Figure 3.** The height (cm) of basil measured every four days for all the cultivation period (60 days)

The FW/DW rate varied from 9.46 to 10.87 during both destructive sampling periods (Figures 4). Particularly, during the 1<sup>st</sup> sampling period the FW/DW rate for the control plants (NS3) was equal to 10.87. Meanwhile, no significant difference was observed between the plants of NS3 and NS2 treatment. On the other hand, the rate in plants of NS1 treatment (only drainage solution) slightly decreased. Thus, the plants of NS1 absorb less water in accordance to their dry matter production in comparison with the plants of NS2 and NS3 treatment. During the 2<sup>nd</sup> sampling period however, the plants of NS1 treatment increase their water content at around 8.5%, since their mean absolute value was equal to 10.75. At that period, this value was higher than the other two treatments in which their values seems to be improved reaching at 9.64 and 9.46 for NS2 and NS3 respectively.

Regarding the Chlorophyll Content Index (CCI) there were no differences in chlorophyll concentration between the control and the drainage mixed with standard solution treatment (Figure 5). There values were equal to around 34 CCI. Significantly low was however the mean value of NS1 treatment (around at 33 CCI).



**Figure 4.** The ratio FW/DW in two harvesting/destructive sampling periods. 1 Harvest: 30 DAT; 2 Harvest 60 DAT.



**Figure 5.** Chlorophyll content (CCI) valuation according to the treatments during the 2<sup>nd</sup> sampling period (60 DAT).

## 5. CONCLUSIONS

In the current study, the fertigation treatment with drainage solution although resulted in a reduction of leaf chlorophyll content, manage to perform height plants with sufficient amount of macronutrient concentration. Additionally, the plants of the current treatment achieve a sufficient FW/DW rate during the 1<sup>st</sup> sampling period. Therefore a brief overview of the overall analysis is given here, provide the strategy in which the plants irrigated with drainage solution mixed with standard nutrient solution. In this treatment the FW/DW rate remain quite stable and low until the end of the cultivation period, while high values of chlorophyll content were performed. Thus, in the comparison between fertigation systems, 50% drainage mixed with 50% standard solution against a standard nutrient solution treatment, may reveals saving of water and removal of nutrient. However, investigation of leaf macro- and micronutrient content for basil grown under soilless systems has not been done before, and further study should be carried out for future research on that direction.

## 6. REFERENCE

- Awad, M., 2009. *Evaluating sea water quality in the coastal zone of North Lebanon using Telemac-2D*. Lebanese science journal, 10(1), 35-43.
- Chalchat, J. and Ozcan, M., 2008. *Comparative essential oil composition of flowers, leaves and stems of basil (Ocimum basilicum L.) used as herb*. Food Chemistry, 110. 501-503. 10.1016/j.foodchem.2008.02.018.
- García-Caparrós, P., Llanderal, A., El-Tarawy, A., Maksimovic, I., and Lao, M.T., 2018. *Crop and irrigation management systems under greenhouse conditions*. Water, 10, 62.
- Jarecki, M.K., Chong, C., and Voroney, P., 2005. *Evaluation of compost leachates for plant growth in hydroponic culture*. Journal of Plant Nutrition, 28, 651-667.
- Paydar, Z., Khan, S., Jamnani, M.A.R. and Blackwell, J. 2007. *Regional land suitability guidelines for SBC "Serial Biological Concentration" application*. CSIRO Land and Water Science Report 46/07, July 2007.
- Savvas, D., and Passam, H., 2002. *Hydroponic production of vegetables and ornamentals*, Book, Embryo Publications, Athens, Greece.
- Sonneveld, C., 2000. *Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture*. Ph.D. Thesis. University of Wageningen, The Netherlands.
- Subhrajit, S., Monroe, A., and Martin, R.D., 2016. *Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (Ocimum basilicum L.) under soilless agricultural systems*. Annals of Agricultural Sciences, 61(2), 181-186.

# ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΦΥΚΟΥΣ *Euglena gracilis* ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ ΣΕ ΠΡΩΤΕΪΝΕΣ ΚΑΙ ΛΙΠΗ

**M. N. Μετσοβίτη<sup>1</sup>, N. Κατσούλας<sup>1</sup>, Γ. Παπαπολυμέρου<sup>2</sup> & I. Καραπαναγιωτίδης<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Εργ. Γεωργικών Κατασκευών και Ε. Περιβ., Τμ. Γεωπονίας Φ.Π.ΑΠ. – Π.Θ.

<sup>2</sup>Γενικό Τμήμα, 41110, Π.Θ.

<sup>3</sup>Εργ. Υδατοκαλλιεργειών, Τ.Γ.Ι.Υ.Π – Π.Θ.

οδός Φυτόκου, 38446, Βόλος, e-mail: nkatsoul@uth.gr

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών στο ρυθμό ανάπτυξης του είδους *Euglena gracilis*, καθώς και στην τελική περιεκτικότητα της βιομάζας που παράχθηκε σε πρωτεΐνες και λίπη. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε θερμοκήπιο και σε κλειστό θάλαμο ανάπτυξης φυτών, σε ανοιχτούς αντιδραστήρες χωρητικότητας 50 L σε 3 διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και έντασης ακτινοβολίας. Σε καθημερινή βάση προσδιορίζονταν η συγ-κέντρωση της βιομάζας ενώ στο τέλος του κάθε πειράματος έγινε μέτρηση της συνολικής παραγωγικότητας και υπολογίστηκε ο ειδικός ρυθμός στην εκθετική φάση ανάπτυξης ( $\mu_{exp}$ ). Τέλος, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις της περιεκτικότητας της βιομάζας σε λίπη και πρωτεΐνες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι καθώς αυξάνεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία, αυξάνεται η ταχύτητα ανάπτυξης της βιομάζας καθώς και η περιεκτικότητα σε λίπη.

*Λέξεις Κλειδιά:* μικροφύκη, *Euglena gracilis*, ρυθμός ανάπτυξης, θρεπτική σύσταση

## CULTIVATION OF MICROALGAE *Euglena gracilis* IN DIFFERENT ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND PROTEIN AND LIPID CONTENT

**M. N. Metsoviti<sup>1</sup>, N. Katsoulas<sup>1</sup>, G. Papapolymerou<sup>2</sup>, I. T. Karapanagiotidis<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Lab of Agricultural Constructions and Env. Cont., Dept. of Agr. Crop Pr. & R. Env.

<sup>2</sup>General Department University of Thessaly, 41110, Larissa, Greece

<sup>3</sup>Aquaculture Lab., Department of Ichthyology and Aquatic Environment, University of Thessaly, Fytokou Street, 38446, Volos, Greece, e-mail: [nkatsoul@uth.gr](mailto:nkatsoul@uth.gr)

## ABSTRACT

In this study, the effect of different environmental conditions on the growth rate and nutrient composition of the microalgal species *Euglena gracilis* were investigated. The experiments were conducted in open bioreactors of 50 L capacity, in a greenhouse and in a closed plant growth chamber, where the environmental conditions were controlled. The absorbance at 665 nm was measured daily. Total productivity of each culture was determined at the end of each experiment and the specific growth rates in exponential growth phase ( $\mu_{exp}$ ) were calculated. Additionally, the composition of *E. gracilis* in lipid and protein was determined. It was found that as the intensity of irradiance increases, the biomass production and the lipid content increase.

*Keywords:* microalgae, *Euglena gracilis*, growth rate, nutrient composition

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μικροφύκη είναι μονοκύτταροι οργανισμοί, οι οποίοι φωτοσυνθέτουν, με υψηλότερη απόδοση από ότι τα φυτά, για την παραγωγή βιομάζας (Brown *et al.* 1997). Σε αντίθεση με τα φυτά, δεν έχουν μίσχο, φύλλα ή ρίζα, περιέχουν ελάχιστη κυτταρίνη και ευδοκιμούν σε υγρές καλλιέργειες, όπου τα κύτταρα τους έχουν επαρκή πρόσβαση σε φως, διοξείδιο του άνθρακα και άλλα θρεπτικά συστατικά (Rosenberg *et al.* 2008). Η βιοποικιλότητα τους είναι τεράστια. Υπάρχουν είδη που αναπαράγονται σε γλυκό νερό και είδη που αναπαράγονται σε αλμυρό νερό.

Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι αναπτύσσονται έως και 30 φορές πιο γρήγορα από τα φυτά. Κατά την καλλιέργειά τους υπάρχει η δυνατότητα ανακύκλωσης των θρεπτικών συστατικών και του νερού (Kim *et al.* 2012). Επιπλέον, υπόκεινται σε παραγωγή σε βιομηχανική κλίμακα με τη χρήση των μεθόδων της Βιοχημικής Μηχανικής. Ωστόσο, υπάρχει ένα ανώτατο όριο στην παραγωγικότητα λόγω της δυσκολίας διείσδυσης του φωτός καθώς αυξάνεται η απορρόφηση. Για εμπορική αξιοποίηση χρειάζεται μία συγκέντρωση στην εκροή της τάξης των 15-20 g/L, η οποία προς το παρόν δεν επιτυγχάνεται. Όμως, ο συνδυασμός ή η χρήση της ετεροτροφικής καλλιέργειας μπορεί να το ανατρέψει (Perez-García *et al.* 2011).

Τα μικροφύκη μπορούν να καλλιεργηθούν είτε σε ανοιχτά είτε σε κλειστά συστήματα. Η καλλιέργεια σε ανοικτό σύστημα διεξάγεται συνήθως σε ανοικτή λίμνη ή ανοικτό δοχείο που είναι εκτεθειμένο στο περιβάλλον. Η καλλιέργεια σε κλειστό σύστημα μπορεί να διεξαχθεί σε φωτοβιοαντιδραστήρες. Στα κλειστά συστήματα καλλιέργειας, η παραγωγικότητα της βιομάζας είναι υψηλότερη από ότι στα ανοιχτά και ο κίνδυνος επιμόλυνσης της καλλιέργειας είναι χαμηλότερος. Ωστόσο, οι επενδυτικές και λειτουργικές δαπάνες, καθώς και οι απαιτήσεις σε ενέργεια είναι υψηλότερες από ότι στα ανοιχτά συστήματα (Rösch & Posten, 2012).

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την καλλιέργεια των μικροφυκών είναι η θερμοκρασία, το διοξείδιο του άνθρακα, το pH, ο φωτισμός και τα διάφορα θρεπτικά στοιχεία του μέσου καλλιέργειας, όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο (Yeessang & Cheirsilp 2011). Από τους παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη και τη σύνθεση τους, η συγκέντρωση του αζώτου και η ένταση του φωτός είναι οι πιο σημαντικοί (Dean *et al.* 2010). Συνθήκες στρες για τα μικροφύκη αποτελούν η έλλειψη θρεπτικών συστατικών, οι πολύ υψηλές ή χαμηλές εντάσεις φωτός και το χαμηλό pH (López *et al.* 2010). Αυτές οι συνθήκες οδηγούν στη μείωση του ρυθμού ανάπτυξης και επομένως στη μείωση της παραγωγικότητας (Wijffels *et al.* 2010).

Ανάλογα με το είδος του καλλιεργούμενου μικροφύκου, το στάδιο ανάπτυξης κατά τη συγκομιδή και τις παραμέτρους καλλιέργειάς του, ήτοι θερμοκρασία, ένταση φωτός, συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών στο μέσο καλλιέργειας, μεταβάλλεται η θρεπτική σύσταση της παραγόμενης βιομάζας (σε λίπη, πρωτεΐνες, υδατάνθρακες) (Gouveia & Oliveira 2009). Για παράδειγμα, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του αζώτου στο θρεπτικό μέσο καλλιέργειας, αυξάνεται η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και μειώνεται η περιεκτικότητα σε λίπη και αντίστροφα (Huang *et al.* 2013).

Οι τομείς στους οποίους χρησιμοποιούνται τα μικροφύκη είναι πολλοί, όπως στον τομέα της φαρμακευτικής, καθώς παράγουν ουσίες, οι οποίες έχει αποδειχθεί ότι έχουν

αξιόλογες θεραπευτικές ιδιότητες, στην παραγωγή βιοντίζελ, στην βιοαποικοδόμηση, ως συμπληρώματα διατροφής και ως ζωοτροφές (Pulz & Gross 2004). Συγκεκριμένα, στις ιχθυοκαλλιέργειες, διάφορα είδη μικροφυκών χρησιμοποιούνται στη διατροφή των νυμφικών σταδίων είτε ως άμεση τροφή, στην περίπτωση των μαλακίων και των γαρίδων, είτε ως τροφή για ζωοπλαγκτονικά είδη, τα οποία αποτελούν με τη σειρά τους τροφή των ατελών ιχθυδίων (Muller-Feuga 2000).

Η παρούσα μελέτη διεξήχθη προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών στην ανάπτυξη και τη θρεπτική σύσταση του είδους *Euglena gracilis*, το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα είδη μικροφύκους.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το είδος μικροφύκους *E. gracilis*, το οποίο προήλθε από το Ερευνητικό Εργαστήριο του Πανεπιστημίου του Goettingen της Γερμανίας (EPSAG), καλλιεργήθηκε στο ίδιο θρεπτικό μέσο καλλιέργειας, σε ανοιχτούς αντιδραστήρες χωρητικότητας 50 L, σε 3 διαφορετικά περιβάλλοντα, ήτοι σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας (έντασης φωτός) προκειμένου να ερευνηθούν ποιες είναι οι βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας για το συγκεκριμένο είδος μικροφύκους. Επιπροσθέτως, μελετήθηκε η περιεκτικότητα της βιομάζας σε λίπη και πρωτεΐνες στις διαφορετικές αυτές συνθήκες.

Στο πρώτο πείραμα, η *E. gracilis* καλλιεργήθηκε σε θερμοκήπιο από το μήνα Μάρτιο έως το μήνα Απρίλιο. Στο δεύτερο πείραμα, η *E. gracilis* καλλιεργήθηκε σε θερμοκήπιο από το μήνα Ιούνιο έως το μήνα Ιούλιο. Και τα δύο αυτά πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκήπιο σε φυσικές συνθήκες θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Στο τρίτο πείραμα, η *E. gracilis* καλλιεργήθηκε σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και έντασης του φωτός σε κλειστό θάλαμο ανάπτυξης φυτών. Κάθε ένα από τα πειράματα αυτά είχε διάρκεια 50 ημέρες.

Το θρεπτικό μέσο καλλιέργειας σύμφωνα με τους (Andersen *et al.*, 1991) περιείχε: Για κάθε λίτρο θρεπτικού μέσου για την *E. gracilis*: 0.2g KNO<sub>3</sub> /L, 0.02 g K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>/L, 0.02 g MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O/L, 30 ml εκχύλισμα χόματος/L και 5 ml/L, από ένα διάλυμα που περιείχε τα ακόλουθα μικροθρεπτικά: (1 mg ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 2 mg MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O, 10 mg H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 1 mg Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 1 mg MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, 0.005 mg CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, 700 mg FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O και 800 mg EDTA)/L.

Η συγκέντρωση της βιομάζας προσδιορίστηκε σε καθημερινή βάση με μετρήσεις της απορρόφησης στα 655 nm με τη χρήση ενός φασματοφωτόμετρου UV/Vis. Τρία δείγματα συλλέχθηκαν καθημερινά από κάθε καλλιέργεια και όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τρεις φορές. Οι μετρήσεις της απορρόφησης χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο της κυτταρικής πυκνότητας. Ακόμη, μετρήθηκε η συνολική παραγωγικότητα κάθε καλλιέργειας στο τέλος κάθε πειράματος, και υπολογίστηκε ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης στην εκθετική φάση ( $\mu_{exp}$ ):

$$\mu_{exp} = \ln(a_2/a_1) / (t_2 - t_1)$$

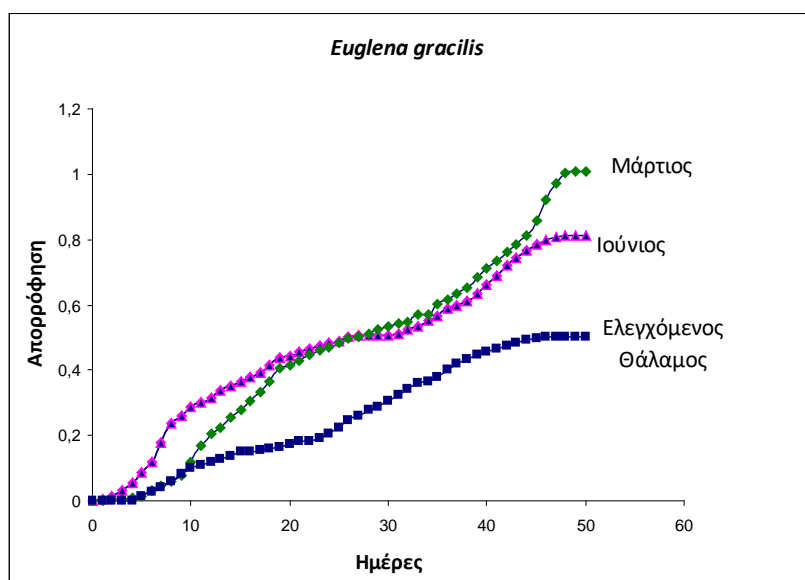
όπου  $a_1$  και  $a_2$  ορίζονται ως η απορρόφηση στο χρόνο 1 ( $t_1$ ) και χρόνο 2 ( $t_2$ ), αντίστοιχα.

Η συνολική παραγωγικότητα μετρήθηκε ύστερα από συλλογή της βιομάζας με μία διαδικασία συμπύκνωσης, η οποία βασίστηκε σε κροκίδωση, φυσική κατακάθιση, απομάκρυνση του υπερκείμενου διαλύματος, συλλογή των συμπυκνωμάτων και αφαίρεσης της υγρασίας με αποξήρανση σε φούρνο στους 105 °C μέχρι αποκτήσεως σταθερού βάρους. Επιπλέον, υπολογίστηκε η μέση προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά τη διάρκεια των δύο πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο θερμοκήπιο, η οποία προέκυψε με μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας με πυρανόμετρο εγκατεστημένο στο θερμοκήπιο. Στον κλειστό θάλαμο ανάπτυξης, η ημερήσια ένταση της ακτινοβολίας ήταν ελεγχόμενη.

Οι αναλύσεις της θρεπτικής σύστασης της βιομάζας έγιναν σύμφωνα με τις μεθόδους ΑΟΑC (1997). Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε ολικές πρωτεΐνες έγινε με τη μέθοδο Kjeldahl και ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε ολικά λίπη έγινε με τη μέθοδο της υγρής εκχύλισης με χλωροφόρμιο-μεθανόλη (1:1), καθώς, σύμφωνα με τους Ruckebusch *et al.* 2012 το μείγμα αυτών των διαλυτών σε αναλογία 1:1 βρέθηκε ότι είναι το καλύτερο για την εκχύλιση των λιπών στα μικροφύκη.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η μεταβολή της απορρόφησης κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας της *E. gracilis* στις 3 διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, ήτοι Μάρτιο, Ιούνιο και στον ελεγχόμενο θάλαμο ανάπτυξης. Ο ειδικός ρυθμός στην εκθετική φάση ανάπτυξης ( $\mu_{exp}$ ) η μέγιστη απορρόφηση ( $\alpha_{max}$ ), η μέση θερμοκρασία ( $T_{μέση}$  σε °C), η μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία ( $I_{μέση}$  σε MJ/m<sup>2</sup>) και η συνολική παραγωγικότητα (σε g/50L) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η σύσταση της *E. gracilis* σε πρωτεΐνες και λίπη καλλιεργούμενη στις 3 διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.



**Σχήμα 1.** Καμπύλες ανάπτυξης της *E. gracilis*, κατά την καλλιέργεια της στις 3 διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Μάρτιος, Ιούνιος, ελεγχόμενος θάλαμος ανάπτυξης).



**Πίνακας 1.** Ειδικός ρυθμός στην εκθετική φάση ανάπτυξης ( $\mu_{\text{exp}}$ ), Μέγιστη απορρόφηση ( $\alpha_{\text{max}}$ ), Μέση θερμοκρασία (σε °C), Μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία (σε MJ/m<sup>2</sup>) και Συνολική Παραγωγικότητα (σε g/50L) της *E. gracilis* στις 3 διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

<i>E. gracilis</i>	Ελεγχόμενος Θάλαμος	Μάρτιος	Ιούνιος
$\mu_{\text{exp}}$	0.12 ± 0.03	0.17 ± 0.04	0.20 ± 0.05
$\alpha_{\text{max}}$	0.50 ± 0.04	1.01 ± 0.08	0.81 ± 0.06
T <sub>μέση</sub> (°C)	24	28	36
I <sub>μέση</sub> (MJ/m <sup>2</sup> )	8.3	15.9	25.7
Productivity (g/50L)	27.6 ± 1.4	39.4 ± 2.0	40.8 ± 2.1

**Πίνακας 2.** Σύσταση (%) της *E. gracilis* σε πρωτεΐνες και λίπη κατά την καλλιέργεια της στις διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι τιμές αντιπροσωπεύουν μέσους όρους ± τυπ. απόκλιση (n=3). Τιμές στην ίδια γραμμή που φέρουν διαφορετικό εκθέτη υποδηλώνουν στατιστικά σημαντική διαφορά (P<0,05).

<i>E. gracilis</i>	Ελεγχόμενος Θάλαμος	Μάρτιος	Ιούνιος
ΠΡΩΤΕΪΝΕΣ (%)	23.2 ± 0.2 <sup>a</sup>	25.6 ± 0.5 <sup>b</sup>	23.3 ± 0.1 <sup>a</sup>
ΛΙΠΗ (%)	8.3 ± 0.3 <sup>a</sup>	13.1 ± 0.4 <sup>b</sup>	17.8 ± 0.8 <sup>c</sup>

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 1, οι περιβαλλοντικές συνθήκες καλλιέργειας επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό ανάπτυξης της καλλιέργειας στη *E. gracilis*. Αυξανόμενης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, αυξάνεται σημαντικά η ταχύτητα ανάπτυξης της βιομάζας. Αυτό πιστοποιείται και από την κλίση των καμπυλών στο Σχήμα 1, από τις οποίες υπολογίζεται ο ειδικός ρυθμός ανάπτυξης ( $\mu_{\text{exp}}$ ), αλλά και από την παραγωγικότητα στο τέλος της καλλιέργειας όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Στον ελεγχόμενο θάλαμο ανάπτυξης, η ένταση του φωτός ήταν χαμηλή (Πίνακας 1) και αυτό αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα για την ανάπτυξη του είδους. Συνεπώς, για τα πειράματα στον κλειστό θάλαμο η ένταση της ακτινοβολίας είναι ο ρυθμιστικός-περιοριστικός παράγων για την ανάπτυξη του μικροφύκου *E. gracilis*.

Τον Μάρτιο, και τον Ιούνιο η μέση ημερήσια ένταση της ακτινοβολίας κατά την περίοδο των αντίστοιχων καλλιεργειών ήταν 15.9 και 25.7 MJ/m<sup>2</sup> αντίστοιχα. Οι διαφορές μεταξύ των δύο αυτών καλλιεργειών (Μάρτιος και Ιούνιος) δεν είναι σημαντικές όσον αφορά στον ειδικό ρυθμό ανάπτυξης και στην παραγωγικότητα. Προφανώς ο συνδυασμός της έντασης της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας της καλλιέργειας προσδιορίζουν κατά κύριο λόγο την κινητική ανάπτυξης. Τον Μάρτιο η ένταση της ακτινοβολίας είναι 15.9 MJ/m<sup>2</sup> και η μέση θερμοκρασία είναι 28 °C ενώ τον Ιούνιο η μέση ημερήσια ένταση της

ακτινοβολίας είναι κατά πολύ μεγαλύτερη ( $25.7 \text{ MJ/m}^2$ ), όπως επίσης και η μέση θερμοκρασία ( $36 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Είναι γνωστό ότι οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες καταπονούν και επηρεάζουν αρνητικά την κινητική ανάπτυξης των μικροφυκών. Συνεπώς, ο αναμενόμενος μεγαλύτερος ρυθμός ανάπτυξης του μικροφύκου λόγω της μεγαλύτερης έντασης της ακτινοβολίας της καλλιέργειας του Ιουνίου σε σχέση με τον Μάρτιο, περιορίζεται από την υψηλή θερμοκρασία της καλλιέργειας του Ιουνίου.

Από τα αποτελέσματα (Πίνακας 2) φαίνεται ακόμη ότι η μέση ημερήσια ένταση της ακτινοβολίας δεν επηρεάζει ουσιαστικά την περιεκτικότητα της βιομάζας σε πρωτεΐνες καθώς η μέγιστη διαφορά στη περιεκτικότητα της βιομάζας σε πρωτεΐνες είναι περίπου 8%. Επισημαίνεται ότι και στα τρία πειράματα, η σύσταση του θρεπτικού μέσου ήταν η ίδια. Όμως, διαφαίνεται ότι η μέση ημερήσια ένταση της ακτινοβολίας επηρεάζει σημαντικά την περιεκτικότητα σε λίπη (Πίνακας 2). Η περιεκτικότητα σε λίπη αυξάνεται από 8.3% σε 13.1% και σε 17.8 %, ήτοι σχεδόν διπλασιάζεται, καθώς η ακτινοβολία αυξάνεται από 8.3 σε 15.9 και σε  $25.7 \text{ MJ/m}^2$ . Η τυχόν ξεχωριστή επιρροή της θερμοκρασίας στην περιεκτικότητα της βιομάζας σε λίπη δεν μπορεί να προσδιοριστεί από τα παρόντα πειράματα και αποτελεί στόχο μελλοντικών πειραμάτων.

Πιθανολογείται ότι υπό ευνοϊκές συνθήκες καλλιέργειας (ένταση φωτός, θερμοκρασία, σύσταση του θρεπτικού μέσου της καλλιέργειας), η παραγωγή λιπών αυξάνεται με την ένταση της ακτινοβολίας, διότι τα λίπη χρησιμοποιούνται και ως αποθήκη ενέργειας για τα μικροφύκη σε μη ευνοϊκές περιόδους ανάπτυξης. Για την παραγωγή πρωτεϊνών η περιεκτικότητα σε άζωτο επηρεάζει την περιεκτικότητα της βιομάζας σε πρωτεΐνες. Αυξανόμενη της περιεκτικότητας σε άζωτο, αυξάνεται και η περιεκτικότητα της βιομάζας σε πρωτεΐνες (Huang *et al.* 2013).

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην καλλιέργεια της *E. gracilis*, αυξάνεται σημαντικά η ταχύτητα ανάπτυξης της βιομάζας. Η συνολική παραγωγικότητα στο τέλος κάθε καλλιέργειας (σε g/50L) ακολουθεί και αυτή την ίδια τάση. Η περιεκτικότητα σε λίπη της παραγόμενης βιομάζας διαφαίνεται να αυξάνεται καθώς αυξάνει η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ενώ η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες παραμένει σχεδόν η ίδια.

#### 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AOAC, 1997. *Official Methods of Analysis, 16th ed.* Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- Andersen R.A., Jacobson D.M. and Sexton J.P., 1991. *Provasoli-Guillard center for culture of marine phytoplankton catalogue of strains.* West Boothbay Harbor, Maine, USA, pp. 98.
- Brown M.R., Jeffrey S.W., Volkman J.K. and Dunstan G.A., 1997. *Nutritional properties of microalgae for mariculture.* *Aquaculture*, 151: 315-331.

- Dean A., Sigeo D., Estrada B. and Pittman J., 2010. *Using FTIR spectroscopy for rapid determination of lipid accumulation in response to nitrogen limitation in freshwater microalgae*. *Bioresour. Technol.* 101, 4499–4507.
- Gouveia L. and Oliveira A.C., 2009. *Microalgae as a raw material for biofuels production*. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 36(2), 269-274.
- Huang X., Huang Z., Wen W. and Yan J., 2013. *Effects of nitrogen supplementation of the culture medium on the growth, total lipid content and fatty acid profiles of three microalgae (Tetraselmis subcordiformis, Nannochloropsis oculata and Pavlova viridis)*. *J Appl. Phyco.* 25, 129–137.
- Kim W., Park J.M., Gim G.H., Jeong S-H., Kang C.M., Kim D-J. and Kim S.W., 2012. *Optimization of culture conditions and comparison of biomass productivity of three green algae*. *Bioprocess Biosyst Eng* (2012) 35:19–27.
- López C.V., Cerón M.C., Acién F.G., Segovia C., Chisti Y. and Fernández J.M., 2010. *Protein measurements of microalgal and cyanobacterial biomass*. *Bioresour. Technol.* 101, 7587–7591.
- Muller-Feuga A., 2000. *The role of microalgae in aquaculture: situation and trends*. *J. Appl. Phycol.* 12:527–534.
- Perez-Garcia O., Escalante F.M.E., de-Bashan L.E. and Bashan Y., 2011. *Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products*. *Water research* 45 (2011) II-36.
- Pulz O. and Gross W., 2004. *Valuable products from biotechnology of microalgae*. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 65 (6), 635–648.
- Ryckebosch E., Muylaert K. and Foubert I., 2012. *Optimization of an Analytical Procedure for Extraction of Lipids from Microalgae*. *J Am Oil Chem Soc* 89:189–198.
- Rösch C. and Posten C., 2012. *Challenges and Perspectives of Microalgae Production*, Karlsruhe, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 5.
- Rosenberg J.N., Oyler G.A., Wilkinson L., Betenbaugh M.J., 2008. *A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution*. *Curr. Opin. Biotechnol.* 19 (2008), pp. 430-436.
- Wijffels R.H., Barbosa M.J. and Eppink M.H.M., 2010. *Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels*. Wiley InterScience DOI: 10.1002/bbb/215; *Biofuels*, *Bioprod. Bioref.* 4:287–295.
- Yeesang C. and Cheirsilp B., 2011. *Effect of nitrogen, salt, and iron content in the growth medium and light intensity on lipid production by microalgae isolated from freshwater sources in Thailand*. *Bioresource Technology* 102 (3), 3034–3040.

## ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΝΑΤΡΙΟΥ ΣΕ ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

**Μ. Ασλανίδου, Ν. Κατσούλας, Α. Ελβανίδη, Ε. Τσουμαλάκου, Ε. Λεβίζου**

Γεωπονικό Παν/μιο Θεσσαλίας, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού  
Περιβάλλοντος, Οδός Φυτόκου, 38446, Βόλος

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η ροή του Νάτριο σε ενυδρειοπονικό σύστημα εργαστηριακής κλίμακας. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο εκτίμησης της συγκέντρωσης του στα κύρια τμήματα του συστήματος. Το σύστημα από το οποίο βαθμονομήθηκε το μοντέλο συνδυάζει καλλιέργεια μαρουλιού και εκτροφή τιλάπιας. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι τιμές pH ακολούθησαν τη φυσιολογική καθοδική πορεία που παρατηρείται σε ενυδρειοπονικά συστήματα ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα παρέμεινε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, έγινε σύγκριση μεταξύ των ενδείξεων και των αντίστοιχων μετρήσεων της συγκέντρωσης του νατρίου στο εργαστήριο. Το μοντέλο προέβλεψε με υψηλή σχετικά ακρίβεια τη συγκέντρωση του νατρίου τις πρώτες 20 ημέρες του πειράματος. Στη συνέχεια παρατηρήθηκε έντονη απόκλιση μεταξύ των προσομοιωμένων και πραγματικών τιμών λόγω της ανάπτυξης ανταγωνισμού μεταξύ των ιόντων νατρίου και καλίου.

*Λέξεις κλειδιά:* ενυδρειοπονικό σύστημα, μοντέλο, υδατικό διάλυμα, νάτριο

## DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR SODIUM CONCENTRATION IN AN AQUAPONIC SYSTEM

**M. Aslanidou, N. Katsoulas, A. Elvanidi, E. Tsoumalakou, E. Levizou**

Agricultural University of Thessaly, Department of Agriculture Crop Production and Rural  
Environment, Odos Fytokou, 38446, Volos75

### ABSTRACT

In this study, the flow of Sodium macronutrient into a laboratory-scale aquaponic system was studied. For this purpose a computational model was developed to assess its concentration in the main parts of the system. The system from which the model was calibrated was combining lettuce cultivation and tilapia breeding. It was concluded that, the pH values followed the normal downward trend observed in hydroponic systems. The electrical conductivity remained constant throughout the experiment. To calibrate the model, the simulation data were compared with corresponding experimental data. The model predicted with high relative accuracy, the sodium concentration during the first 20 days of the experimental period. Intense difference then was observed between the simulated and the measured values due to competition was performed between sodium and potassium ions.

*Keywords:* aquaponic system, model, aquaponic solution, sodium

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενυδραιοπονία αποτελεί μια σύγχρονη μορφή πολυκαλλιέργειας που συνδυάζει την υδροπονία με την ιχθυοκαλλιέργεια. Εμφανίζεται σαν ένα τεχνητό, κλειστό οικοσύστημα και αποτελεί μια ταχεία αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Τα οφέλη της είναι πολυσήμαντα και σχετίζονται κυρίως με την προστασία του περιβάλλοντος, την τόνωση της οικονομίας και την επίλυση κοινωνικών προβλημάτων όπως η μείωση της επάρκειας της τροφής (Love et al., 2014; Joly et al., 2015). Η πολυπλοκότητα λειτουργίας και διαχείρισης των συστημάτων, ωστόσο εξηγούν το γεγονός ότι δεν υπάρχει μια καθολική τεχνολογία ενυδραιοπονίας, αλλά συνεχώς αναπτύσσονται πολλές διαφορετικές τεχνολογίες με διαφορετικούς στόχους και όσον αφορά το σύστημα ολόκληρο αλλά και των επιμέρους τμημάτων που το αποτελούν. Οι τεχνολογίες της ενυδραιοπονίας μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με ορισμένους βασικούς παράγοντες όπως: (i) οι φορείς που απευθύνονται, (ii) το μέγεθος, (iii) ο τρόπος λειτουργίας της υδατοκαλλιέργειας, (iv) η διαχείριση της ανακύκλωσης του νερού (συζευγμένο σύστημα, μη συζευγμένο σύστημα), (v) ο τύπος του νερού, (vi) ο τύπος του υδροπονικού συστήματος, και (vii) ο σκοπός της χρήσης του συστήματος (παραγωγή τροφής, αισθητικούς σκοπούς, εκπαιδευτικούς σκοπούς) ή ακόμα και για κάθε βασικό υποσύστημα του συστήματος (τμήμα καλλιέργειας ιχθύων, φίλτρα, τμήμα υδροπονίας) (Maucier et al., 2018).

## 2. ΘΕΩΡΙΑ

### 2.1 Συσσώρευση νατρίου στα ενυδραιοπονικά συστήματα

Σε ένα κλειστό ενυδραιοπονικό σύστημα ακολουθώντας τις αρχές λειτουργίας του υδροπονικού συστήματος, αναμένεται συσσώρευση ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  λόγω συνεχόμενης ανακύκλωσης του νερού και μειωμένης απορρόφησης αλατούχων ιόντων από τα φυτά. Τα ιόντα  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  γενικά δε θεωρούνται απαραίτητα μακροθρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών και γι' αυτό δεν επιδρούν στην μεταβολή των ισοζυγίων μάζας. Η υψηλή συγκέντρωση αλατούχων ιόντων ωστόσο λόγω της συνεχούς προσθήκης νερού, οδηγεί σταδιακά σε μεγάλες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος προκαλώντας θρεπτική καταπόνηση στα φυτά. Η πρακτική που εφαρμόζεται για την αποφυγή του προβλήματος αυτού, είναι η απόρριψη του θρεπτικού διαλύματος μετά από μια συγκεκριμένη τιμή συγκέντρωσης των στοιχείων αυτών.

Σε μερικά ενυδραιοπονικά συστήματα ωστόσο, η συσσώρευση των αλατούχων ιόντων διαφοροποιείται από την πορεία που ακολουθείται σε ένα συμβατικό υδροπονικό σύστημα και η μεταβολές των τιμών τους στο χρόνο αξίζει να αναλυθεί περεταίρω (Goddek & Vermeulen, 2018). Για το λόγο αυτό, απαραίτητη κρίνεται η εκτίμηση συγκέντρωσης νατρίου (Na) στο σύστημα και η χρονική στιγμή που πρέπει να προστεθεί φρέσκο νερό μέσω υπολογιστικών μοντέλων. Η ροή "σκέψης" ενός τέτοιου μοντέλου πρέπει να 1) εκτιμά τη συγκέντρωση νατρίου που υπάρχει ήδη στο σύστημα, 2) εκτιμά τη συγκέντρωση μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης του νατρίου στο σύστημα ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας, 3) λαμβάνει απόφαση απόρριψης του διαλύματος και εκτίμηση της νέας συγκέντρωσης νατρίου στο σύστημα. Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται η προσπάθεια ανάπτυξης και βαθμονόμησης ενός υπολογιστικού μοντέλου με τις παραπάνω

προδιαγραφές, όπου θα εκτιμά τη συγκέντρωση νατρίου σε τρία σημεία του συστήματος: 1) στο νερό των ψαριών 2) στο νερό απορροής των φυτών και 3) στο νερό τροφοδοσίας.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που απαρτίζουν το υπολογιστικό μοντέλο με σκοπό την πρόβλεψη της οριακής συγκέντρωσης του που θα οδηγήσει σε αλλαγή ενός μέρους όγκου νερού του συστήματος.

## 2.2 Το προσομοίωμα

Θεωρείται ότι η μόνη πηγή εισόδου νατρίου στο σύστημα είναι το νερό ύδρευσης που προστίθεται καθημερινά λόγω απωλειών υδατικού διαλύματος που απορροφούν τα φυτά. Έχοντας ορίσει μια οριακή τιμή συγκέντρωσης νατρίου στο σύστημα  $C_{Na\text{limit}}$ , ο όγκος νερού που αν προστεθεί στο σύστημα η συγκέντρωση θα φτάσει σε αυτήν την τιμή  $V_L$  υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_d * C_{Na\text{limit}} = V_L * C_{NaW}(1)$$

όπου  $V_d(L)$  ο όγκος απορροής από τα φυτά και  $C_{NaW}(mg/L)$  η συγκέντρωση νατρίου στο νερό άρδευσης (Katsoulas, 2015).

Στο σύστημα λοιπόν καταχωρείται μια τιμή όριο πάνω από την οποία η συγκέντρωση νατρίου δεν πρέπει να είναι υπαρκτή ( $C_{NaLimit}$ ). Σε κάθε νέο κύκλο νερού, το σύστημα ελέγχει αν η συγκέντρωση νατρίου είναι μεγαλύτερη ή ίση της τιμής ορίου. Ουσιαστικά συγκρίνεται η συγκέντρωση εισόδου στο φυτοδοχείο με την οριακή συγκέντρωση.

Η συγκέντρωση εισόδου στο φυτοδοχείο υπολογίζεται από το άθροισμα της ποσότητας νατρίου στο νερό άρδευσης που προστίθεται στο σύστημα  $A_{imNa}(mg)$  και της ποσότητας από το διάλυμα απορροής  $A_{drNa}(mg)$ . Το άθροισμα αυτό ανάγεται στον όγκο δεξαμενής ψαριών μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$C_{input\ Na} = (A_{imNa} + A_{drNa}) / V_{fish}(2)$$

Η συγκέντρωση απορρόφησης του θρεπτικού στοιχείου από το φυτό σχετίζεται άμεσα με τον όγκο νερού που απορρόφησε το φυτό ( $V_w$ ) (L). Γίνεται δεκτό ότι σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα ο όγκος νερού που χάνεται από το σύστημα ισούται με το νερό που απορροφήθηκε από τα φυτά.

Μετρώντας λοιπόν τον όγκο νερού που καταναλώνεται από το σύστημα καθημερινά και θεωρώντας ότι ισούται με την ποσότητα νερού που απορρόφησε το φυτό ( $V_w$ ) (L), έχοντας εκτιμήσει την συγκέντρωση του στοιχείου στο εισερχόμενο διάλυμα του φυτοδοχείου ( $C_{NO3input}$ ) (mg/L) υπολογίζεται κατά προσέγγιση η ποσότητα του στοιχείου που απορροφήθηκε από το φυτό ( $A_{xu}$ ) (mg) μέσω της σχέσης (3):  $A_{xuNO3} = V_w * C_{inputNa}(3)$

Θεωρείται όμως ότι το φυτό θα απορροφήσει ένα ποσοστό της ποσότητας των θρεπτικών που περιέχονται στον όγκο νερού που απορρόφησε οπότε η σχέση (3) μπορεί να διαμορφωθεί ως εξής:

$$A_{xu\ NO3} = V_w * C_{input\ Na} * d(4)$$

όπου  $d$  ο συντελεστής απορρόφησης θρεπτικών από το φυτό.

Η συγκέντρωση απορρόφησης υπολογίζεται από την σχέση (5), (Sonneveld et al., 1999):

$$C_{xuNa} = a \cdot (C_{drNa})^b \quad (5)$$

Οι συντελεστές  $a$  και  $b$  αφορούν την καλλιέργεια και βαθμονομούνται από τρέχον πείραμα. Όταν βαθμονομηθεί το μοντέλο και γίνουν αναλύσεις νερού στα διαλύματα απορροής  $C_{drNa}$  (mg/L), θα βρεθούν οι τιμές των συγκεντρώσεων απορρόφησης κι έτσι θα διορθωθεί ο συντελεστής απορρόφησης θρεπτικών  $da$  από την σχέση (4).

Η συγκέντρωση νατρίου στο διάλυμα απορροής υπολογίζεται από την ποσότητα νατρίου στο φυτοδοχείο που δεν απορροφήθηκε από τα φυτά ( $A_{GBNa} - A_{xuNa}$ ), όπου  $A_{GBNa}$  (mg) η ποσότητα νατρίου στο φυτοδοχείο και  $A_{xuNa}$  (mg) η ποσότητα στοιχείου που απορρόφησε το φυτό, αναγόμενο στον όγκο απορροής του συστήματος ( $V_{dr}$ ) (L).

$$C_{drNa} = A_{GBNa} - A_{xuNa} / V_{dr} \quad (6)$$

Το σύστημα καθημερινά θα καταγράφει τον όγκο που προστίθεται στο σύστημα  $V_{inputsum}$  (L) με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό του υπολειπόμενου όγκου  $V_M$  (L) που μπορεί να προστεθεί μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$V_M = V_{inputsum} - V_L \quad (7)$$

όπου  $V_L$  (L) η οριακή τιμή όγκου που μπορεί να προστεθεί στο σύστημα. Οι τιμές των πρώτων ημερών θα είναι αρνητικές και όταν φτάσουν στη τιμή μηδέν ή πολύ κοντά στο μηδέν τότε το σύστημα θα ειδοποιεί για αλλαγή νερού.

Η οριακή ποσότητα νατρίου  $A_{limitNa}$  (mg) που μπορεί να προστεθεί στο σύστημα υπολογίζεται από την σχέση:

$$A_{limitNa} = C_{limitNa} \cdot V_s \quad (8)$$

Αντίστοιχα η ποσότητα νατρίου που αφαιρείται από το σύστημα με ανάλογη τιμή αφαιρούμενου όγκου  $V_T$  (L) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$A_{TNa} = C_{limitNa} \cdot V_{Ta} \quad (9)$$

Έτσι υπολογίζοντας την ποσότητα του στοιχείου που απομένει στο σύστημα  $A_{RNa}$  (mg) μπορεί να εκτιμηθεί η συγκέντρωση του νατρίου που θα έχει το σύστημα μέσω της αναγωγής της ποσότητας στον όγκο του συστήματος:

$$C_{NewNa} = A_{RNa} / V_s \quad (10)$$

Εκτιμώντας τον ρυθμό αύξησης της συγκέντρωσης του νατρίου,

$$(C_{inputNa\text{ τελικό}} - C_{inputNa\text{ αρχικό}}) / \text{ημέρες πειράματος} \quad (11)$$

μπορεί να γίνει πρόβλεψη με βάση τη νέα μας αρχική συγκέντρωση  $C_{newNa}$  (mg/L) πόσο θα φτάσει η τελική μας συγκέντρωση μέχρι το τέλος του πειράματος.

### 3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

#### 3.1. Εγκαταστάσεις και μεταχειρίσεις

Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε ενυδρειοπονικό πείραμα εργαστηριακής κλίμακας σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο της Γεωπονικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε Μάρτιο με Απρίλιο του 2019 και συνδύαζε καλλιέργεια 8 μαρουλιών (*Lactucasativanavar.Romana*) και εκτροφή 30 ιχθυδίων τιλάπιας (*Oreochromisniloticus, redtilapia*) ανά μεταχείριση. Το σύστημα αποτελούνταν από τη δεξαμενή των ψαριών (400L), το φυτοδοχείο με υπόστρωμα διογκωμένη άργιλο (200L), το μηχανικό (60L) και το βιολογικό φίλτρο (60L) και την καθαρή δεξαμενή νερού με την αντλία (60L). Το νερό από τη δεξαμενή του νερού φιλτράρονταν από το μηχανικό φίλτρο, εμπλουτίζονταν με νιτρικά από το νιτροποιητικά βακτήρια του βιολογικού φίλτρου και ύστερα από την αντλία στέλνονταν στο φυτοδοχείο από όπου επέστρεφε στη δεξαμενή με σύστημα ebb&flow. Η μεταφύτευση των φυτών έγινε 10 μέρες μετά την εισαγωγή των ψαριών στο σύστημα και η καλλιεργητική περίοδος διήρκησε 45 ημέρες. Οι μεταχειρίσεις ήταν τρεις και αφορούσαν την προσθήκη θρεπτικών στο σύστημα. Η πρώτη μεταχείριση αποτελούσε τον "Μάρτυρα", και λειτουργούσε χωρίς καμία προσθήκη θρεπτικών. Στη δεύτερη μεταχείριση, "K&Fe", εισάγονταν κάλιο μέσω θειικού καλίου (Honeywell Fluka™ Potassium sulfate KSO<sub>2</sub>, 99-101%)(338 g) και σίδηρος μέσω χηλικού σιδήρου (14 g FeDTPA 11%, ανά 10 μέρες έως τις 26/3) (ενώ στην τρίτη, "Fe" προστίθονταν μόνο σίδηρος μέσω χηλικού σιδήρου (14 g FeDTPA 11%, ανά 10 μέρες έως τις 26/3)(ΓΕΩ.ΛΙ.Χ.Ε.Π.Ε.). Ο διαχωρισμός των μεταχειρίσεων έγινε από την 5<sup>η</sup> μέρα μετά τη μεταφύτευση και οι προσθήκες λιπασμάτων γίνονταν μετά από ενδιάμεσες αναλύσεις για την εκτίμηση της έλλειψης του στοιχείου στο σύστημα.

#### 3.2. Μετρήσεις και υπολογισμοί

Εβδομαδιαία πραγματοποιούνταν δειγματοληψίες νερού από τη δεξαμενή των ψαριών και του φυτοδοχείου, που προορίζονταν για χημική ανάλυση στο εργαστήριο (όπως μετρήσεις νατρίου, καλίου και ασβεστίου), ενώ σε πραγματικό χρόνο πραγματοποιούνταν μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC; EC/TDS, COM-80) και pH (Digital, PH-80) στην επιφάνεια νερού των δεξαμενών.

Για την εκτίμηση της συγκέντρωσης νατρίου στα τρία διαφορετικά σημεία του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω εξισώσεις και ένα σύνολο σταθερών τιμών που αφορούσαν το σύστημα και το χρησιμοποιούμενο νερό ύδρευσης όπως: 1) όγκος νερού δεξαμενής ψαριών, 2) συγκέντρωση νατρίου στο νερό ύδρευσης, 3) οριακή συγκέντρωση νατρίου στο σύστημα κ.α.. Για την εισαγωγή των τιμών και την εφαρμογή των εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό φύλλο Excel (Microsoft Excel 2016).

Με το τέλος του πειραματικού κύκλου τα δείγματα από τα δύο σημεία του συστήματος (είσοδος και έξοδος από το φυτοδοχείο), που διατηρούνταν σε θερμοκρασία - 80°C μετρήθηκαν σε φλογοφωτόμετρο (Jenway Clinical PFP7 Flame Photometer), πεγάμετρο pH (HANNA instruments EC 215 Conductivity Meter) και όργανο μέτρησης EC (HANNA instruments pH 211 Microprocessor pH Meter).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και την αξιολόγηση του ως προς την ακρίβεια των εκτιμήσεων του.



Η στατιστική επεξεργασία έγινε σε SPSS Statistics 21 λογισμικό με τη μέθοδο της One-way Anova (95% βαθμό εμπιστοσύνης). Σύμφωνα με την ανάλυση οι μεταβολές θεωρούνται στατιστικά σημαντικές όταν  $p < 0.05$ .

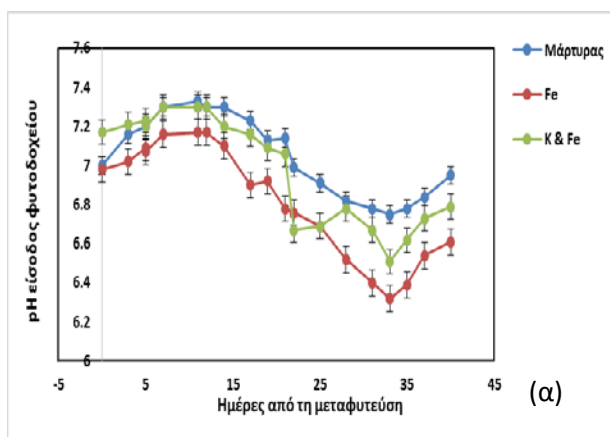
## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1. Αξιολόγηση pH και EC στο σύστημα

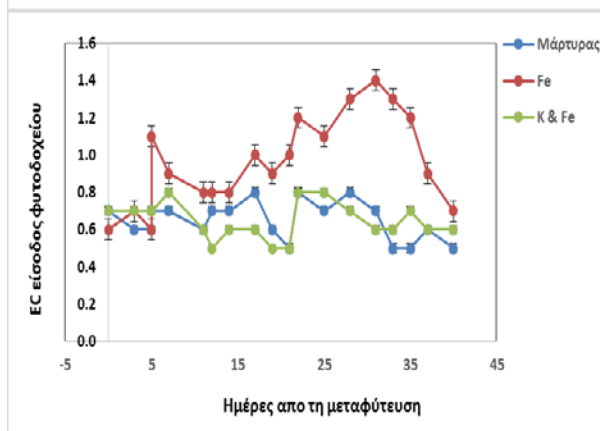
Στο Διάγραμμα 1α, παρουσιάζεται η εξέλιξη των τιμών του pH στην είσοδο του φυτοδοχείου για τα τρία διαφορετικά συστήματα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η τιμή του pH μειώνεται με την εξέλιξη του πειράματος και στα τρία συστήματα, αλλά με διαφορετικό ρυθμό. Συγκεκριμένα, οι τιμές pH του μάρτυρα κυμάνθηκαν από 7 έως 7.3 τις πρώτες ημέρες του πειράματος, ενώ παρατηρήθηκε μια σημαντική μείωση έως 8%, από την 20<sup>η</sup> ημέρα και μετά. Αντίστοιχη μείωση παρατηρήθηκε και στα υπόλοιπα δυο ενυδρειοπνικά συστήματα που μελετήθηκαν. Η μείωση είναι αναμενόμενη σύμφωνα με τον Tyson (2014), καθώς υποστηρίζει πως σε ενυδρειοπνικό σύστημα, η μείωση του pH σε μεσοδιάστημα 20 περίπου ημερών οφείλεται στην ενεργοποίηση της νιτροποιητικής διαδικασίας. Οι διαδικασίες αυτές αλλά και η αναπνοή των ψαριών μειώνουν τις τιμές pH, απελευθερώνοντας κατιόντα  $H^+$  και ανθρακικό οξύ ( $H_2CO_3$ ) αντίστοιχα, ενώ με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης αυξάνεται λόγω της πρόσληψης του  $CO_2$  και από τα φυτά και από φυτοπλαγκτόν (FAO, 2014). Αντίστοιχα ο Lennard (2012) υποστηρίζει ότι σε ένα σύστημα ενυδρειοπνίας, υπάρχουν δύο αντίθετες δυνάμεις που λειτουργούν και επηρεάζουν άμεσα το pH του νερού. Η διαδικασία της νιτροποίησης, η μετατροπή δηλαδή της αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα, μειώνει τη τιμή του pH, σε αντίθεση με την απορρόφηση νιτρικών ιόντων από τα φυτά όπου κατά τη διαδικασία, απελευθερώνονται διττανθρακικά ανιόντα με αποτέλεσμα η τιμή του να ανεβαίνει.

Η αύξηση του pH που παρατηρήθηκε, περίπου τις 10 τελευταίες ημέρες της καλλιεργητικής περιόδου, οφείλεται στο γεγονός ότι μέρος του υδατικού διαλύματος αναπληρώθηκε σκόπιμα με φρέσκο νερό ώστε να επέλθει η ισορροπία της τιμής pH στο υδατικό διάλυμα. Αντίστοιχη πορεία ακολούθησαν οι τιμές για το "Fe" σύστημα, τις πρώτες 20 ημέρες της καλλιεργητικής περιόδου. Στη συνέχεια οι τιμές διαφοροποιούνται από τις τιμές του μάρτυρα από 0.6 έως 4.6% μείωση ( $p < 0.05$ ). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην οξείδωση του σιδήρου και την παραγωγή υδρογονοκατιόντων στη ριζόσφαιρα παρουσία οξυγόνου (Ahmad and Nye, 1990, Beggetal. 1994). Επιπλέον σύμφωνα με τον Sonneveld (2001) η απορρόφηση σιδήρου από τα φυτά συνοδεύεται με μειωμένες τιμές pH στη ριζόσφαιρα. Πιο έντονη είναι η μείωση μετά και την τρίτη εφαρμογή χηλικού σιδήρου που πραγματοποιήθηκε την 22<sup>η</sup> μέρα του πειράματος. Από την άλλη πλευρά, οι τιμές pH του "K-Fe" συστήματος παρουσίασαν μια μείωση περίπου 2% από τις τιμές του μάρτυρα, τις πρώτες μόλις ημέρες της καλλιεργητικής περιόδου, ενώ η διαφορά τους μεγάλωνε σημαντικά με την εξέλιξη της διαδικασίας. Πρόσθετα με τη νιτροποιητική διαδικασία και την οξείδωση του σιδήρου που περιγράφηκαν για τις δύο άλλες μεταχειρίσεις στο σύστημα "K & Fe", η προσθήκη θεικού καλίου είχε ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη απορρόφηση κατιόντων καλίου συγκριτικά με τα ανιόντα θείου ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη εκβολή υδρογονοκατιόντων στη ριζόσφαιρα (Haynes, 1990 Marschner, 1995)

Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρέμειναν σχεδόν σταθερές με μικρές διακυμάνσεις στις μεταχειρίσεις "Control" και "Fe". Τα μικροστοιχεία σύμφωνα με τη βιβλιογραφία δεν επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα, οπότε η προσθήκη σιδήρου στο σύστημα "Fe" δεν επέφερε μεγάλες διακυμάνσεις (Savvas, 1999). Την 5<sup>η</sup> μέρα από τη μεταφύτευση έγινε προσθήκη θειικού καλίου στο σύστημα "K & Fe" για αυτό το λόγο η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας αυξάνεται τόσο απότομα την 6<sup>η</sup> ημέρα τη μεταφύτευση και διατηρείται υψηλή συγκριτικά με τα άλλα δυο συστήματα. Οι αποκλίσεις από το μάρτυρα κυμαίνονται από 12 έως 61% ενώ για το σύστημα "Fe" από 11 έως 57%. Ο μέσος όρος της τιμής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα συστήματα "Μάρτυρας" και "Fe" υπολογίστηκε στα  $0.6 \text{ dSm}^{-1}$ , ενώ στο σύστημα "K&Fe" στα  $0.9 \text{ dSm}^{-1}$ .



(β)



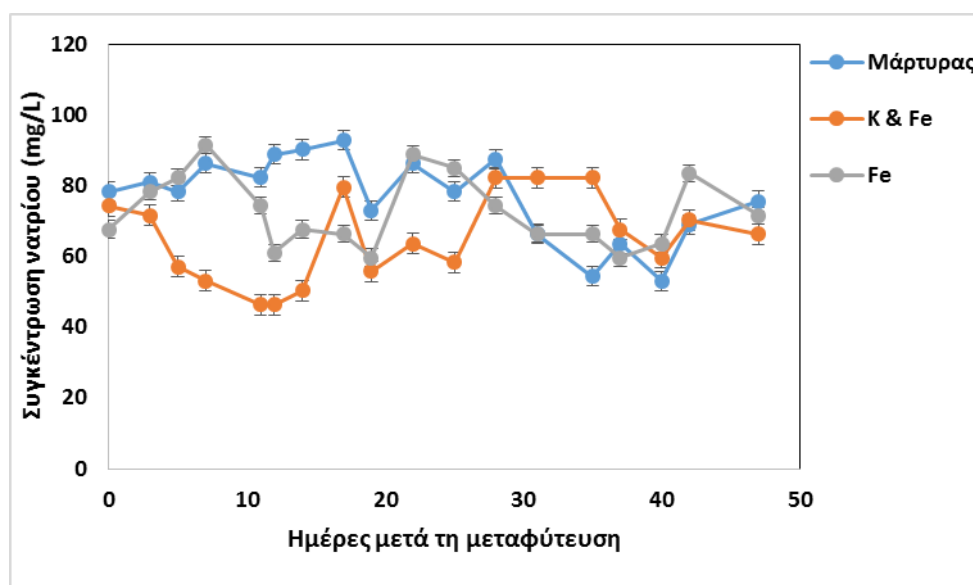
**Διάγραμμα 1:** Μεταβολή τιμών (α) pH και (β) EC στο υδατικό διάλυμα εισόδου του φυτοδοχείου των τριών συστημάτων κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

#### 4.2. Διακύμανση συγκέντρωσης νατρίου στο σύστημα και βαθμονόμηση μοντέλου

Οι διακυμάνσεις της συγκέντρωσης νατρίου στις τρεις μεταχειρίσεις των ενυδρειοπονικών συστημάτων παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2. Η συγκέντρωση νατρίου του μάρτυρα φαίνεται να παραμένει σταθερή τις 28 πρώτες ημέρες των μετρήσεων, με τη μέση τιμή να κυμαίνεται περίπου  $80 \text{ mgL}^{-1}$ . Στη συνέχεια, η συγκέντρωση μειώνεται συστηματικά με τη μέση τιμή να πλησιάζει περίπου  $53 \text{ mgL}^{-1}$  ( $p < 0.05$ ). Αντίστοιχη πορεία ακολούθησε η συγκέντρωση νατρίου στη μεταχείριση Fe, με μια μικρή ωστόσο απόκλιση μεταξύ της 12<sup>ης</sup> και 19<sup>ης</sup> μέτρησης. Στο σημείο αυτό, η συγκέντρωση νατρίου της

268

μεταχείρισης Φεμειώθηκε έως και 30%, ενώ από τη 19<sup>η</sup> μέτρηση και μετά φαίνεται να επανέρχεται στα επίπεδα του μάρτυρα. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή θεικού καλίου από την 6<sup>η</sup> μέρα του πειράματος στη μεταχείριση ‘‘K&Fe’’ οδήγησε σε αυξημένη απορρόφηση νατρίου λόγω ανταγωνισμού η οποία αποκαταστάθηκε από την 14<sup>η</sup> μέρα και μετά με μικρές διακυμάνσεις. Την 22<sup>η</sup> μέρα του πειράματος παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση νατρίου που συνοδεύεται με μεγάλη μείωση του pH και μπορεί να εξηγηθεί από τη μειωμένη απορρόφηση νατρίου λόγω της μεταβολής του pH. Η μείωση της συγκέντρωσης νατρίου και στις τρεις μεταχειρίσεις οφείλεται στις αλλαγές νερού από την 36<sup>η</sup> μέρα και μετά με απώτερο σκοπό την αύξηση της τιμής pH στο σύστημα (αλλαγή 100 L νερού συστήματος τη 34<sup>η</sup>, 36<sup>η</sup> και 42<sup>η</sup> μέρα του πειράματος).

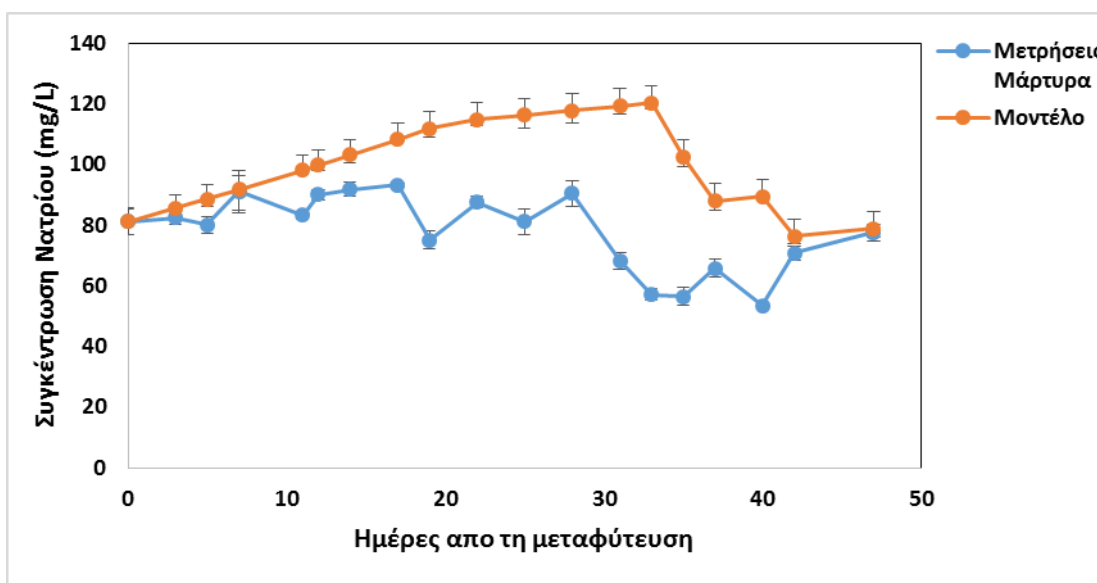


**Διάγραμμα2:** Διακύμανση συγκέντρωσης νατρίου κατά τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου για τις τρεις μεταχειρίσεις.

Το Διάγραμμα 3 παρουσιάζει τη διακύμανση του νατρίου στο υδατικό διάλυμα εισόδου του φυτοδοχείου όπως μετρήθηκε με εργαστηριακές αναλύσεις και όπως εκτιμήθηκε μέσω του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Σύμφωνα με το μοντέλο, ένα μόνο ποσοστό του νατρίου (0.4%) απορροφήθηκε από τα μαρούλια καθώς δε θεωρείται απαραίτητο μακροθρεπτικό στοιχείο για την ανάπτυξη των φυτών. Ως εκ τούτου παρατηρήθηκε η συγκέντρωση του νατρίου στο σύστημα να ανεβαίνει. Αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται στα κλειστά υδροπονικά συστήματα λόγω της συνεχούς ανακύκλωσης του νερού και συνεχής συμπλήρωσης του συστήματος με νερό ύδρευσης (Katsoulas, 2015). Οι τιμές ωστόσο που εκτιμήθηκαν από το μοντέλο ήταν αρκετά υψηλές καθώς ξεπέρασαν τα 120 mg/L. Η αύξηση της συγκέντρωσης του νατρίου σε αυτά τα επίπεδα, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα θρέψης στο σύστημα ειδικότερα στην πρόσληψη καλίου λόγω του ανταγωνισμού τους για την ίδια θέση απορρόφησης και μεταφορά στη μεμβράνη πλάσματος (Paulus et al., 2012).

Οι συγκεντρώσεις νατρίου που μετρήθηκαν εργαστηριακά, από την άλλη πλευρά, ενώ ακολουθούν τις τιμές του μοντέλου τις πρώτες 20 ημέρες μετά τη μεταφύτευση, στη

συνέχεια της εξέλιξης του πειράματος παρατηρείται μια ελαφρώς μείωση, με τη διαφορά τους από τις τιμές το μοντέλου να φτάνει μέχρι και 40%. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται μόνο στην αυξημένη πρόσληψη νατρίου από τα φυτά. Οι Goddek&Vermeulen (2018) θεωρούν πως η μειωμένη αύξηση της συγκέντρωσης του νατρίου στα ενυδρειοπονικά συστήματα οφείλεται στο γεγονός πως τα φυτά απορροφούν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις νατρίου απ' ό τι στα υδροπονικά συστήματα. Στα ενυδρειοπονικά συστήματα, η περιορισμένη συγκέντρωση θρεπτικών σε σχέση με τη συγκέντρωση που παρατηρείται στα υδροπονικά συστήματα (Willadino and Camara, 2010; Blidariou, 2013; Bittsanskzky et al., 2016) οδηγεί στη δημιουργία έντονου ανταγωνισμού μεταξύ των ιόντων νατρίου και των άλλων κατιόντων ως αποτέλεσμα να προκύπτει ανισορροπία της ιοντικής ομοιόστασης, με αποτέλεσμα η ταχύτητα διάχυσης να αυξάνεται. Ο Delaide (2017) εκτίμησε δεκαπλάσια συγκέντρωση νατρίου σε φυτικό ιστό μαρουλιού από ενυδρειοπονικό σύστημα τιλάπιας-μαρούλι συγκριτικά με υδροπονικό μαρούλι την ίδια καλλιεργητική περίοδο. Σύμφωνα με τους Goddek&Vermeulen (2018) αναμένεται αυξημένη πρόσληψη και των υπόλοιπων ιόντων όπως, K, Ca, Mg, και P σε σχέση με τις τιμές που παρατηρούνται στα υδροπονικά συστήματα. Οι Mayak et al. (2004) εξήγησαν πως η ιδιαίτερη αυτή αύξηση οφείλεται στην έντονη βακτηριακή δραστηριότητα που παρατηρείται στα ενυδρειοπονικά συστήματα.



**Διάγραμμα3:** Μεταβολή συγκέντρωσης νατρίου στο υδατικό διάλυμα εισόδου του φυτοδοχείου κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου στο σύστημα “Μάρτυρας” και σύγκριση με τις εκτιμώμενες τιμές του μοντέλου.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάπτυξη προσομοιώσεων μέσω μαθηματικών μοντέλων έχει άμεση εφαρμογή στις σύγχρονες καλλιέργειες καθώς συνεισφέρουν στην αυτοματοποίηση και τον έλεγχο των καλλιεργητικών φροντίδων και συνεπώς στην αύξηση της παραγωγής. Στη συγκεκριμένη έρευνα, έγινε μια προσπάθεια ανάπτυξης και βαθμονόμησης ενός μοντέλου που θα εκτιμά της συγκέντρωση νατρίου σε ενυδρειοπονικό σύστημα. Το μοντέλο στήθηκε σύμφωνα με

τις αρχές ενός συμβατικού υδροπονικού συστήματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, προέκυψε ωστόσο, το ενυδρειοπονικό σύστημα λειτουργεί ως ένα ξεχωριστό και ιδιαίτερο σύνολο με διαφορετικές παραμέτρους στις τιμές pH και στη συγκέντρωση νατρίου από αυτές του υδροπονικού, καθώς η παρουσία των βακτηρίων στο σύστημα καθώς και η ανισορροπία των μακροθρεπτικών οδηγούν σε καθοδική και όχι ανοδική πορεία των τιμών pH, όπως θα αναμενόταν. Επιπλέον, η αυξητική πορεία της συγκέντρωσης νατρίου που προβλέφθηκε από το μαθηματικό μοντέλο σύμφωνα με τα κλειστά υδροπονικά συστήματα αναιρείται στα ενυδρειοπονικά, καθώς κατά τη μέση κυρίως της καλλιεργητικής περιόδου οι συγκεντρώσεις ακολουθούν καθοδική πορεία και όχι αυξητική. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην έλλειψη μακροστοιχείων στο ενυδρειοπονικό διάλυμα ως αποτέλεσμα την υψηλότερη απορρόφηση νατρίου από τα φυτά. Περαιτέρω βαθμονομήσεις του μοντέλου με βάση τις αρχές του ενυδρειοπονικού συστήματος απαιτούνται ώστε να μειώσουν την απόκλιση υπολογισμού των συγκεντρώσεων νατρίου καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahmad A. R., Nye P. H., 1990. *Coupled diffusion and oxidation of ferrous iron in soils. I. Kinetics of oxygenation of ferrous iron in soil suspension*. Journal of Soil Science. Vol 41, pp 395–409.

Begg C B M., Kirk G J D., MacKenzie A F., Neue H U., 1994. *Root-induced iron oxidation and pH changes in the lowland rice rhizosphere*. New Phytologist. Vol 128, pp 469–477.

Bittsanszky A., Uzinger N., Gyulai G., Mathis A., Junge R., Villarroel M., Kotzen B., Komives T., 2016. *Nutrient supply of plants in aquaponic systems*. Ecocycles, Vol 2, pp 17-20.

Blidariu F., Radulov I., Lalescu D., Drasovean A., Grozea A., 2013. *Evaluation of Nitrate Level in Green Lettuce Conventional Grown under Natural Conditions and Aquaponic System*. Animal Science and Biotechnologies, Vol 46.

Delaide B., 2017. *A study on the mineral elements available in aquaponics, their impact on lettuce productivity and the potential improvement of their availability*. Ph.D. Université De Liège – Gembloux Agro-Bio Tech.

Goddek S., Vermeulen T., 2018. *Comparison of Lactuca sativa growth performance in conventional and RAS-based hydroponic systems*. Aquaculture International, Vol 26, pp 1377–1386.

Haynes R J., 1990. *Active ion uptake and maintenance of cation–anion balance: A critical examination of their role in regulating rhizosphere pH*. Plant and Soil, Vol 126, pp 247–264.

Joly A., Junge R., Bardocz T., 2015. *Aquaponics business in Europe: some legal obstacles and solutions*. Ecocycles, Vol 1.

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, Vol 113, pp 61–71.

Lennard W., 2012. *Aquaponic system design parameters: Fish to plant ratios (Feeding rate ratios)*. Aquaponic Fact Sheet Series, Vol 1,-pp 12.

Love D C., Fry J P., Genello L., Hill E S., Frederick J A., Li X., Semmens K., 2014. *An international survey of aquaponics practitioners*. PLOS One, Vol 9.

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, Vol 113, pp 61–71.

Marschner, H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd ed.* Academic Press, London. 889 pp.

Maucieri C., Forchino A.A., Nicoletto C., Junge R., Pastrees R., Sambo P., Borin, M., 2018. *Life cycle assessment of a micro aquaponics system for educational purposes built using recovered material*. Journal of. Cleaner. Production, Vol. 172, pp. 3119-3127.

Mayak S., Tirosh T., Glick BR., 2004. *Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress*. Plant Physiology Biochemistry, Vol 42, pp 565–572.

Pantanella E., Cardarelli M., Colla G., Rea E., Marcucci A., 2012. *Aquaponics vs. Hydroponics: Production and Quality of Lettuce Crop*. Acta Horticulturae, Vol 927.

Porcel R., Aroca R., Ruiz-Lozano J.M, 2012. *Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review*. Agronomy for Sustainable Development, Granada, Vol 32, pp. 181-200.

Savvas D., Adamidis K., 1999. *Automated Management of Nutrient Solutions Based on Target Electrical Conductivity, pH, and Nutrient Concentration*. Journal of Plant Nutrition, Vol 22, pp 1415-1432.

Somerville C., Cohen M., Pantanella E., Stankus A., Lovatelli A., 2014. *Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, Rome,

Sonneveld, C., Kreij C.D., 1999. *Response of cucumber (Cucumis sativus L.) to an unequal distribution of salts in the root environment*. Plant and Soil, Vol. 209, pp.47-56.

Willadino L., Camara T.R., 2010. *Tolerância das plantas à salinidade: aspectos fisiológicos e bioquímicos*. Revista Enciclopédia Biosfera, Goiânia, Vol. 6, pp. 2-23.

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΓΓΟΥΡΙΚΟΥ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

**Ε. Κίττα , Ν. Κατσούλας**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Οδός  
Φυτόκου, 38445, Βόλος, e-mail:nkatsoul@uth.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία επιχειρήθηκε η διερεύνηση της επίδρασης του βαθμού σκίασης στο ρυθμό φωτοσύνθεσης καλλιέργειας αγγουριάς σε θερμοκήπιο. Για τον σκοπό αυτό σε τρία ίδια μονά τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια με πλευρικά συνεχή ανοίγματα αερισμού του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο αγρόκτημα του Βελεστίνου εγκαταστάθηκε φθινοπωρινή υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς. Το ένα θερμοκήπιο δεν είχε άλλο σύστημα κλιματισμού πλην των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού. Τα άλλα δύο θερμοκήπια πέραν του συστήματος φυσικού αερισμού ήταν εξοπλισμένα με εξωτερικό δίχτυ σκίασης τοποθετημένο επί της οροφής ως ακολούθως: το ένα με δίχτυ βαθμού σκίασης (ΒΣ) 30% και το άλλο με δίχτυ βαθμού σκίασης 40%. Στην υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς έγινε ταυτόχρονα εφαρμογή και δύο επιπέδων αλατότητας προκειμένου να διερευνηθεί πιθανή αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη φωτοσύνθεση της αγγουριάς. Έτσι, εφαρμόστηκαν σε κάθε θερμοκήπιο δύο επίπεδα αλατότητας ένα με  $2.3 \text{ dS m}^{-1}$  και το άλλο με  $6.3 \text{ dS m}^{-1}$ . Έγιναν επί δύο μήνες σειρά μετρήσεων έντασης φωτοσύνθεσης σε φύλλα τυχαία επιλεγμένων φυτών/ μεταχείριση αλατότητας/ θερμοκήπιο σε συνθήκες φυσικού φωτισμού και σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού, έντασης  $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  με το όργανο LCpro+. Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων φάνηκε πως η σκίαση μείωσε σχεδόν γραμμικά την φωτοσύνθεση του φύλλου φυτών αγγουριάς. Δεν διαπιστώθηκε αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στην φωτοσύνθεση των φύλλων αγγουριάς. Έτσι, φαίνεται πως τα φυτά υπό σκίαση δεν εγκλιματίζονται στις συνθήκες σκίασης και ανταποκρίνονται άμεσα στις συνθήκες φωτισμού κάτι που πρακτικά ενισχύει την χρησιμότητα της περιοδικής σκίασης ως εργαλείο βελτίωσης του μικροκλίματος των θερμοκηπίων.

*Λέξεις κλειδιά:* Φωτοσύνθεση, θερμοκήπιο, σκίαση, αλατότητα, υδροπονική καλλιέργεια, αγγούρι

## EFFECT OF SHADING ON PHOTOSYNTHESIS ON GREENHOUSE HYDROPONIC CUCUMBER CROPS

**E. Kitta, N. Katsoulas**

University of Thessaly, Department of Vegetal Production and Rural Environment, Phytokou  
Street, 38444 Volos, Greece, e-mail:nkatsoul@uth.grr

### ABSTRACT

In this work an attempt was made to investigate the effect of shading on photosynthesis rate of a cucumber cultivation in a greenhouse. To this end, autumnal hydroponic cultivation of cucumbers was installed in three same arched greenhouses with lateral ventilation openings at the University of Thessaly experimental farm in Velestino. One greenhouse had no other air conditioning system than the natural ventilation openings. The other two greenhouses in addition to the natural ventilation system were equipped with an external shading net mounted on the roof as follows: one with a 30% shading intensity (SI) and the other with a 40% SI. In the hydroponic cucumber cultivation, two levels of salinity were applied simultaneously to investigate the possible interaction of shading and salinity in the photosynthesis of cucumber. Thus, two salinity levels were applied to each greenhouse, one with  $2.3 \text{ dS m}^{-1}$  and the other with  $6.3 \text{ dS m}^{-1}$ . For two months a series of photosynthesis intensity measurements were performed on leaves of randomly selected plants per each salinity and per greenhouse under natural illumination and using artificial illumination conditions of  $1000 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  with the LCpro + instrument. Statistical processing of the results showed that shading reduced the photosynthesis of the cucumber leaf almost linearly.

No interaction of shading and salinity was observed in the photosynthesis of cucumber leaves. Thus, it seems that shade plants do not acclimatize to shade conditions and respond directly to lighting conditions which practically enhances the usefulness of periodic shading as a tool for improving the microclimate in greenhouses.

*Keywords:* photosynthesis, greenhouse, shading, salinity, hydroponic crops, cucumber

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όσον αφορά τη σκίαση η βιβλιογραφία περιορίζεται ουσιαστικά στη μελέτη των χαρακτηριστικών του κλίματος. Οι εργασίες για την επίδραση της σκίασης στη διαπνοή είναι ελάχιστες ενώ υπάρχει σχεδόν παντελής έλλειψη εργασιών για την επίδραση της σκίασης στη φωτοσύνθεση. Έχουν γίνει διάφορες εργασίες που αφορούν την αλληλεπίδραση κινητής σκίασης και διαφορετικών επιπέδων αλατότητας στην παραγωγή και ποιότητα θερμοκηπιακών καλλιεργειών (Lorenzo et al., 2003; Lorenzo et al., 2006, Yahya and Atherton, 1995). Όλες οι εργασίες δείχνουν πως η αυξημένη αλατότητα μειώνει τα θετικά αποτελέσματα της σκίασης. Η βιβλιογραφία για την αλληλεπίδραση της σκίασης και της αλατότητας στη διαπνοή και φωτοσύνθεση καλλιεργειών σε θερμοκήπια είναι ελάχιστη. Οι Schwartz et al. (2002) μελετώντας την επίδραση δύο επιπέδων φωτός και δύο επιπέδων αλατότητας στη συμπεριφορά καλλιέργειας τομάτας δε βρήκαν αλληλεπίδραση της σκίασης και της αλατότητας στη φωτοσύνθεση της καλλιέργειας. Οι López-Hoffman *et al.* (2006) μελετώντας την αλληλεπίδραση της αλατότητας και των επιπέδων φωτός σε καλλιέργεια mangroves βρήκαν πως η μείωση της καθαρής φωτοσύνθεσης και της στοματικής αγωγιμότητας σε συνθήκες σκίασης είναι πιο έκδηλη σε συνθήκες υψηλής αλατότητας παρά χαμηλής. Έτσι, η βιβλιογραφία που αφορά τη μελέτη της αλληλεπίδρασης σκίασης και αλατότητας στη φυσιολογική συμπεριφορά καλλιεργειών υπό κάλυψη είναι ελάχιστη και σχεδόν ανύπαρκτη για μεσογειακές συνθήκες. Τεκμηριώνεται, συνεπώς, το ενδιαφέρον και η σκοπιμότητα της παρούσας εργασίας στην οποία θα διερευνηθεί η επίδραση της σκίασης και της αλατότητας στη φωτοσύνθεση μιας υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς, καλλιέργειας που είναι ευαίσθητη στην αλατότητα και έχει ταυτόχρονα μεγάλο οικονομικό ενδιαφέρον για τη χώρα μας.

## 1. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 1.1.Θερμοκήπια και Καλλιέργειες

Χρησιμοποιήθηκαν τρία (3) παρόμοια θερμοκήπια, τύπου απλού τροποποιημένου τοξωτού, καλυμμένα με απλό φύλλο πολυαιθυλενίου πάχους 180 μm, προσανατολισμένα Βορρά- Νότο (NS) και εγκατεστημένα στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο (Γεωγραφικό πλάτος 39° 44', Γεωγραφικό μήκος 22° 29', υψόμετρο 85 m) (εικ. 1). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κάθε θερμοκηπίου ήταν: ύψος στέγης 2,4 m, ύψος κορυφογραμμής 4,1 m, πλάτος 8 m, μήκος 20 m. Τα θερμοκήπια ήταν εξοπλισμένα με δύο συνεχόμενα πλευρικά παράθυρα αερισμού που βρίσκονται σε ύψος 0,6 μ. πάνω από το έδαφος με μέγιστο ύψος ανοίγματος 0,9 m. Το έδαφος του κάθε θερμοκηπίου καλύφθηκε πλήρως με πλαστική μεμβράνη διπλής πλευράς (μαύρη προς τα κάτω - λευκή προς τα πάνω) πάχους 200 μm. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου, καλλιεργήθηκε μία φθινοπωρινή υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού (*Cucumis sativus* cv. Stamina), που φυτεύτηκε την 1η Σεπτεμβρίου και έληξε στις 12 Νοεμβρίου. Τα φυτά αναπτύχθηκαν σε σάκους περλίτη (μήκος 1 m, πλάτος 0,3 m, ύψος 0,2 m) και η πυκνότητα φύτευσης ήταν 2,4 φυτά/ m<sup>2</sup>. Τα φυτά τοποθετήθηκαν σε τέσσερις διπλές σειρές, με απόσταση μεταξύ των γραμμών 0,33 m και απόσταση μεταξύ τους 0,80 m. Η θρέψη της καλλιέργειας αγγουριού ελεγχόταν αυτόματα από ηλεκτρονική κεφαλή υδροπονίας. Το κλάδεμα και η



διαμόρφωση της καλλιέργειας σύμφωνα με το σύστημα ομπρέλας (Kieber et al., 1993) και όλες οι άλλες καλλιεργητικές πρακτικές μέσα στο θερμοκήπιο (φυτοπροστασία, συγκομιδή κλπ.) ήταν παρόμοιες με εκείνες που εφαρμόζουν συνήθως οι τοπικοί παραγωγοί αγγουριού θερμοκηπίου.

Τρία επίπεδα σκίασης δοκιμάστηκαν στα θερμοκήπια, με κατάλληλα δίχτυα σκίασης που τοποθετήθηκαν εξωτερικά στα δύο θερμοκήπια από τα τρία θερμοκήπια. Παράλληλα, σε κάθε θερμοκήπιο εφαρμόστηκαν 2 επίπεδα αλατότητας-ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο θρεπτικό διάλυμα. Η διαφοροποίηση του θρεπτικού διαλύματος όσον αφορά τα επίπεδα αλατότητας έγινε στις 15 Σεπτεμβρίου. Έτσι, το πείραμα ήταν διπαραγοντικό (σκίαση × αλατότητα) με 3 επίπεδα σκίασης και δύο επίπεδα αλατότητας, ως ακολούθως:

#### Επίπεδα σκίασης:

1. 0 % (θερμοκήπιο  $G_{0\%}$ , σκίαση μόνο λόγω του σκελετού και του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου, διαπερατότητα θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία περίπου 75%)
2. 35 % (θερμοκήπιο  $G_{35\%}$ , σκίαση δικτύου 35%. Ολική διαπερατότητα θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία 50 %)
3. 50 % (θερμοκήπιο  $G_{50\%}$ , σκίαση δικτύου 50%. Ολική διαπερατότητα θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία 37,5 %)

#### Επίπεδα αλατότητας:

1. 2.3 dS m<sup>-1</sup>: Κανονικό θρεπτικό διάλυμα (τυπική σύνθεση για αγγούρι).
2. 6.3 dS m<sup>-1</sup>: Εναλατωμένο θρεπτικό διάλυμα./.

Σε κάθε θερμοκήπιο τα μισά κανάλια (4 από τα οχτώ) τροφοδοτούνταν με θρεπτικό διάλυμα χαμηλής αλατότητας ενώ τα υπόλοιπα τροφοδοτούνταν με εναλατωμένο θρεπτικό διάλυμα. Τα δύο επίπεδα αλατότητας θρεπτικού διαλύματος ήταν τα ίδια σε όλα τα θερμοκήπια

Οι παραπάνω διαπερατότητες ήταν ο λόγος των μέσων τιμών εσωτερική/ εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.

## **1.2.Μετρήσεις**

### **1.2.1. Μετρήσεις κλίματος**

Για τις ανάγκες του πειράματος μετρήθηκε:

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία ( $W/m^2$ ) πυρανόμετρα (μοντέλο Middleton EP08-E, Brunswick Victoria, Australia), τοποθετημένα 2 m πάνω από το έδαφος στο κέντρο καθενός από τα τρία θερμοκήπια ( $R_{s,i}$ ) και έξω ( $R_{s,o}$ ) σε απόσταση 1,5 m από το θερμοκήπιο σε ιστό 3,5 m πάνω από το έδαφος

### **1.2.2. Μετρήσεις Ρυθμού Φωτοσύνθεσης**

Για τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το σύστημα κλειστού τύπου LCpro+ της ADC, και μετρήθηκε (μεταξύ άλλων) ο Ρυθμός Φωτοσύνθεσης ( $\mu mol/m^2/s$ ). Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης έγιναν επί δύο μήνες, Οκτώβριο και Νοέμβριο. Για τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης επελέγησαν για κάθε επίπεδο αλατότητας τυχαία 8 φυτά/μεταχείριση/θερμοκήπιο, δηλαδή 16 φυτά συνολικά από κάθε θερμοκήπιο. Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης διεξάγονταν περίπου κάθε 10ήμερο, σε ένα τυχαίο υγιές, καλά αναπτυγμένο φύλλο που βρισκόταν στο μέσο περίπου του συνολικού ύψους του φυτού κάθε φορά. Γινόταν συνολικά 48 μετρήσεις φωτοσύνθεσης κάθε δεκαήμερο. Τις ημέρες με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία οι μετρήσεις διεξάγονταν

με σταθερή ακτινοβολία της συσκευής LCpro+ έντασης  $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Κατά τη διάρκεια του πειράματος έγιναν συνολικά έξι (6) πλήρη σετ μετρήσεων, τέσσερα (4) σε συνθήκες ηλιοφάνειας και δύο (2) σε συνθήκες με συννεφιά.

### 1.2.3. Συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία μετρήσεων

Οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας συλλέγονταν σε τέσσερα (4) συστήματα συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων (data logger, ZEN0@-3200, Coastal Environmental Systems, Inc., Seattle, Wash.) Οι μετρήσεις λάμβαναν χώρα κάθε 30 s και καταγράφονταν οι μέσες τιμές 10λέπτου.

Όσον αφορά τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης το σύστημα κλειστού τύπου LCpro+ μέτρησης φωτοσύνθεσης διαθέτει δικό του σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης)

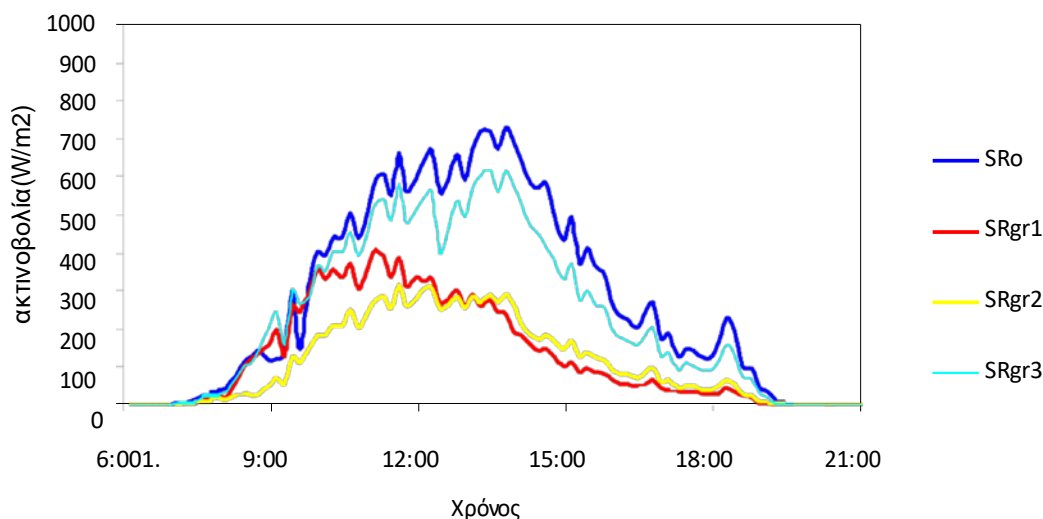
Η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με το στατιστικό πακέτο SPSS. Πραγματοποιήθηκε two-way Analysis of Variance (two –way ANOVA) για τις τρεις μεταχειρίσεις απ' όπου διερευνήθηκε η επίδραση των παραγόντων «κυλικό κάλυψης» και «αλατότητα» καθώς και οι αλληλεπίδρασή τους στο ρυθμό φωτοσύνθεσης για επίπεδο σημαντικότητας  $P=0,05$ . Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση LSD και Duncan για να διαπιστωθεί ποιες από τις μεταχειρίσεις διέφεραν για επίπεδο σημαντικότητας  $P=0,05$ .

## 2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 2.1. Μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας

Στο Σχήμα 1 φαίνεται η ημερήσια πορεία την 19<sup>η</sup> 9.2008 της προσπίπτουσας και της εισερχόμενης στα τρία θερμοκήπια ηλιακής ακτινοβολίας. Η μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι  $275 \text{ W m}^{-2}$ ,  $231 \text{ W m}^{-2}$ ,  $129 \text{ W m}^{-2}$  και  $111 \text{ W m}^{-2}$  για το εξωτερικό περιβάλλον, το θερμοκήπιο μάρτυρας, το θερμοκήπιο 35% και το θερμοκήπιο 50% αντίστοιχα.

Παρόμοια αποτελέσματα βρέθηκαν καθ' όλη την περίοδο του πειράματος



**Σχήμα 1.** Ημερήσια πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό των θερμοκηπίων, στο θερμοκήπιο μάρτυρας ( $G_{r0\%}$ ), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% ( $G_{r35\%}$ ) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% ( $G_{r50\%}$ ), κατά την 19<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου

## 2.2. Μετρήσεις φωτοσύνθεσης

Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης αφορούσαν μετρήσεις σε φύλλα από φυτά εκτεθειμένα αφενός σε συνθήκες διαφορετικής σκίασης και πιο συγκεκριμένα σε τρία (3) επίπεδα διαπερατότητας της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, και αφετέρου σε δύο (2) διαφορετικά επίπεδα αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος, ένα υψηλής και ένα χαμηλής. Έγιναν δύο σειρές μετρήσεων. Η πρώτη σειρά έγινε σε συνθήκες φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Η δεύτερη σειρά μετρήσεων φωτοσύνθεσης έγινε σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού, κατά τη διάρκεια ημερών με συνεφιά, με τη βοήθεια του ενσωματωμένου μηχανισμού ελέγχου και ρύθμισης της PAR με την χρήση διόδων LED, που διαθέτει η συσκευή μετρήσεων LCpro+ με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Η ένταση φωτισμού είχε ρυθμισθεί στο επίπεδο έντασης των 1000  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  ίδια και για το θερμοκήπιο μάρτυρας και για τα δύο σκιασμένα θερμοκήπια στην περιοχή PAR. Οι μετρήσεις με τεχνητό φωτισμό έγιναν με σκοπό να αξιολογηθεί αν οι καλλιέργειες που βρίσκονται σε διαφορετικές συνθήκες σκίασης (μάρτυρας, σκίαση 35% και σκίαση 50%) έχουν προσαρμοσθεί (εγκλιματισθεί) και αντιδρούν διαφορετικά ή όχι σε επίπεδο φύλλου στη φωτοσύνθεση. Τα δεδομένα από τις μετρήσεις με το φορητό σύστημα φωτοσύνθεσης σε φύλλα της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς επεξεργάστηκαν στατιστικά με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS με σκοπό να διερευνηθούν σε φυσικές συνθήκες και σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού: η επίδραση της σκίασης στη φωτοσύνθεση, η επίδραση της αλατότητας στη φωτοσύνθεση και η αλληλεπίδραση της σκίασης και της αλατότητας στη φωτοσύνθεση.

### 2.2.1. Μετρήσεις σε συνθήκες φυσικού φωτισμού

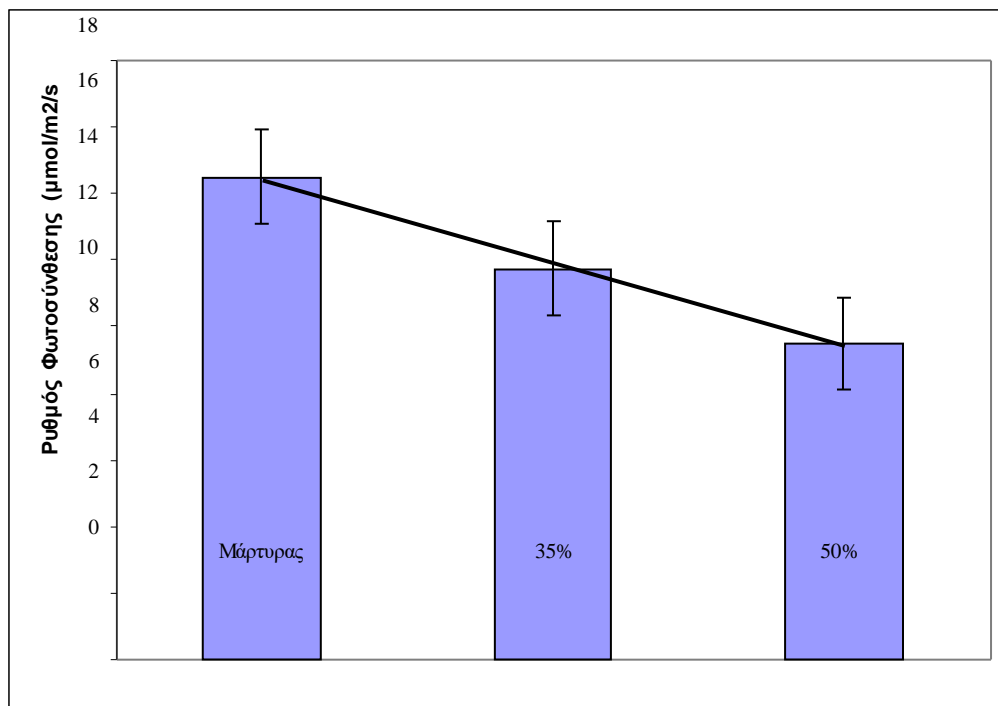
Η επεξεργασία των μετρήσεων που έγιναν κατά το διάστημα Σεπτεμβρίου-Νοεμβρίου σε φυσικές συνθήκες, έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

#### 2.2.1.1. Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη φωτοσύνθεση

Στον παρακάτω Πίνακα 1 και στο Σχήμα 2 φαίνονται τα περιγραφικά στατιστικά του ρυθμού φωτοσύνθεσης A, για τα τρία θερμοκήπια.

**Πίνακας 1.** Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% κατά τη περίοδο Σεπτέμβριος-Νοέμβριος

Θερμοκήπιο	Μέσος Όρος ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Απόκλ. ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Σφάλμα ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	
				Κάτω όριο ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Άνω όριο ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
Μάρτυρας	14.50	3.76	0.704	13.091	15.899
Σκίαση 35%	11.7431	4.065	0.704	10.339	13.147
Σκίαση 50%	9.515	2.86961	0.704	8.111	10.919



**Σχήμα 2.** Μέσοι όροι ρυθμού φωτοσύνθεσης φύλλου στα θερμοκήπια μάρτυρας,, με σκίαση 35% και με σκίαση 50%.

Από τον παραπάνω Πίνακα και το Σχήμα 2 φαίνεται πως η φωτοσύνθεση μειώνεται όσο αυξάνει η ένταση της σκίασης. Το μεγαλύτερο ρυθμό φωτοσύνθεσης παρουσιάζουν τα φύλλα του μάρτυρα και το μικρότερο του θερμοκηπίου με σκίαση 50%.

Στον παρακάτω Πίνακα 2 φαίνονται τα περιγραφικά στατιστικά του ρυθμού φωτοσύνθεσης για τις μεταχειρίσεις με υψηλή και χαμηλή αλατότητα.

**Πίνακας 2.** Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A σε φύλλα φυτών καλλιεργημένων σε συνθήκες θρεπτικού διαλύματος χαμηλής και υψηλής αλατότητας κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος.

Αλατότητα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Απόκλ. ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Σφάλμα ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	
				Κάτω όριο ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Άνω όριο ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
Χαμηλή	11.872	4.07234	0.575	10.725	13.018
Υψηλή	11.964	4.18834	0.575	10.817	13.110

Από τα στοιχεία του Πίνακα 2 προκύπτει πως οι μέσοι όροι είναι παραπλήσιοι.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά της αλληλεπίδρασης Θερμοκήπιο\* αλατότητα.

**Πίνακας 3.** Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A στα τρία θερμοκήπια για κάθε αλατότητα του θρεπτικού διαλύματος κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος.

Θερμοκήπιο	Αλατότητα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Απόκλ. ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Σφάλμα ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Διάσ/μα . Εμπιστ/νης.	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Μάρτυρας	Χαμηλή	15.177	3.06724	0.996	13.191	17.162
	Υψηλή	13.812	4.37267	0.996	11.827	15.798
Σκίαση 35%	Χαμηλή	10.654	3.90751	0.996	8.668	12.639
	Υψηλή	12.832	4.07262	0.996	10.847	14.818
Σκίαση 50%	Χαμηλή	9.784	3.11051	0.996	7.798	11.769
	Υψηλή	9.246	2.70623	0.996	7.261	11.232

Τέλος, στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Διπαραγοντικής ανάλυσης παραλλακτικότητας (ANOVA) για τους παράγοντες θερμοκήπιο και αλατότητα και της αλληλεπίδρασής τους.

Από τον Πίνακα 4 προκύπτει πως μόνον ο παράγοντας θερμοκήπιο ως πηγή παραλλακτικότητας είναι στατιστικά σημαντικός και επομένως οι μέσοι όροι του ρυθμού φωτοσύνθεσης διαφέρουν στατιστικώς μεταξύ των τριών θερμοκηπίων για επίπεδο σημαντικότητας 0.05. Από τον ίδιο Πίνακα και την τελευταία στήλη του φαίνεται οι παράγοντες αλατότητα και αλληλεπίδραση θερμοκήπιο\* αλατότητα δεν είναι σημαντικοί για το ρυθμό φωτοσύνθεσης της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς.

**Πίνακας 4.** Αποτελέσματα ανάλυσης παραλλακτικότητας της εξαρτημένης μεταβλητής ρυθμός φωτοσύνθεσης A, για τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο\*αλατότητα για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος

Πηγή Παραλλακτικότητας	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνο	F	Σημαντικότητα
Διορθωμένο Μοντέλο	368.373 <sup>a</sup>	5	73.675	5.713	0.000
Σταθερός Όρος	11078.210	1	11078.210	858.975	0.000
Θερμοκήπιο	323.543	2	161.771	12.543	0.000
Αλατότητα	0.165	1	0.165	0.013	0.910
Αλληλεπίδραση (Θερμοκήπιο*)	44.665	2	22.333	1.732	0.184
Σφάλμα	928.584	72	12.897		
Σύνολο	12375.168	78			
Διορθωμένο Σύνολο	1296.958	77			

<sup>a</sup>  $R^2 = 0.284$  (Προσαρμοσμένο  $R^2 = 0.234$ )

Εφόσον υπάρχουν διαφορές μεταξύ των τριών θερμοκηπίων, όσον αφορά τη φωτοσύνθεση, θα πρέπει να γίνουν περαιτέρω έλεγχοι (Post Hoc Tests) πολλαπλών συγκρίσεων μεταξύ των θερμοκηπίων για να δούμε σε ποια θερμοκήπια οι μέσοι όροι φωτοσύνθεσης διαφέρουν στατιστικά μεταξύ τους και να τους κατατάξουμε κατά φθίνουσα σειρά. Για το σκοπό αυτό έγιναν έλεγχοι: α) Ελάχιστης Σημαντικής Διαφοράς (LSD test) και β) Duncan μεταξύ των θερμοκηπίων μάρτυρας, με σκίαση 35% και με

σκίαση 50% για την εξαρτημένη μεταβλητή Α. Στον παρακάτω Πίνακα 5 φαίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τριών θερμοκηπίων με την Ελάχιστη Σημαντική Διαφορά (ΕΣΔ).

**Πίνακας 5.** Αποτελέσματα πολλαπλής σύγκρισης του ρυθμού φωτοσύνθεσης στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% σύμφωνα με το κριτήριο Ε.Σ.Δ. (Ελάχιστης Σημαντικής Διαφοράς, LSD test) για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος.

Ε.Σ.Δ.	Θερμοκήπιο (I)	Θερμοκήπιο (II)	Μέση Διαφορά (I-II)	Τυπικό Σφάλμα	Σημαντικότητα
	Μάρτυρας	Σκίαση 35%	2.7515	0.99603	0.007
		Σκίαση 50%	4.9796	0.99603	0.000
	Σκίαση 35%	Μάρτυρας	-2.7515	0.99603	0.007
		Σκίαση 50%	2.2281	0.99603	0.028
	Σκίαση 50%	Μάρτυρας	-4.9796	0.99603	0.000
		Σκίαση 35%	-2.2281	0.99603	0.028

Από τον παραπάνω Πίνακα φαίνεται πως τα τρία θερμοκήπια διαφέρουν, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05, στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους με την καλλιέργεια στο θερμοκήπιο μάρτυρας να έχει το μεγαλύτερο ρυθμό φωτοσύνθεσης και την καλλιέργεια στο θερμοκήπιο με τη μεγαλύτερη σκίαση 50% να έχει τη μικρότερη φωτοσύνθεση.

Οι τιμές του ρυθμού φωτοσύνθεσης στο θερμοκήπιο μάρτυρας είναι αντίστοιχες με τις τιμές που βρήκαν οι Manrogiannopoulos et al. (1999) για καλλιέργεια πεπονιού σε θερμοκήπιο στο Ηράκλειο Κρήτης και οι Lykoskoufis et al. (2005) για υδροπονική καλλιέργεια πιπεριάς σε θερμοκήπιο στην περιοχή της Αθήνας. Τα αποτελέσματα των ελέγχων για την επίδραση της σκίασης στο ρυθμό φωτοσύνθεσης έδειξαν πως η σκίαση επηρεάζει σχεδόν γραμμικά τη φωτοσύνθεση των φύλλων της καλλιέργειας αγγουριού (Σχήμα 1). Έτσι από  $A = 14.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στο θερμοκήπιο μάρτυρας έπεσε σε  $A = 11.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% και σε  $A = 9.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Φαίνεται, λοιπόν, πως η σκίαση 35% μειώνει το ρυθμό φωτοσύνθεσης κατά 20% και η σκίαση 50% τη μειώνει κατά 34%. Έτσι η σχέση ρυθμού φωτοσύνθεσης- σκίασης είναι σχεδόν γραμμική (Σχήμα 1) κάτι που επιτρέπει να συμπεράνουμε πως αύξηση της σκίασης κατά 10% οδηγεί σε μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης κατά  $0,80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Παραπλήσια αποτελέσματα βρήκαν και οι Schwartz et al. (2002) όταν έκαναν μετρήσεις φωτοσύνθεσης σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας σε θάλαμο ανάπτυξης στο Πανεπιστήμιο της Georgia των Η.Π.Α. και βρήκαν πως μείωση του επιπέδου ακτινοβολίας κατά 35% οδήγησε σε μείωση της φωτοσύνθεσης του φύλλου κατά  $0,84 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ .

Όσον αφορά την επίδραση της αλατότητας στη φωτοσύνθεση του φύλλου που σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω δεν είναι σημαντική, οι Manrogiannopoulos et al, (1999) διαπίστωσαν μια πολύ αδύναμη συσχέτιση μεταξύ φωτοσύνθεσης και αλατότητας σε υδροπονική καλλιέργεια πεπονιού. Επίσης, οι Schwartz et al. (2002) διαπίστωσαν σε φυτά τομάτας που αναπτύχθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα πως σε συνθήκες αλατότητας από  $1.25$  έως  $8.75 \text{ dS m}^{-1}$  η αυξημένη αλατότητα δεν επηρέασε το ρυθμό φωτοσύνθεσης του φύλλου. Μείωσε όμως την φωτοσύνθεση του φυτού κατά  $1.7\%$ -  $4.5\%$  ανά  $\text{dS m}^{-1}$  αύξησης της αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος, λόγω μείωσης της φυλλικής επιφάνειας σε αυξημένες EC. Τέλος, αν και ελάχιστες εργασίες υπάρχουν για την αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στο ρυθμό φωτοσύνθεσης του φύλλου οι Schwartz et al.

(2002) μελετώντας σε καλλιέργεια τομάτας διάφορα επίπεδα προσπίπτουσας φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας και διάφορες αλατότητες διαπίστωσαν πως δεν υπάρχει αλληλεπίδραση εισερχόμενης ακτινοβολίας και αλατότητας στο ρυθμό φωτοσύνθεσης του φύλλου συμφωνώντας με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω).

### 2.2.2. Μετρήσεις σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού

Οι μετρήσεις των παραμέτρων φωτοσύνθεσης έγιναν με ένταση φωτισμού 1000  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  σύμφωνα με κατάλληλη ρύθμιση της συσκευής μέτρησης φωτοσύνθεσης PCpro+ της ADC. Σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν να διερευνηθεί με ποιο τρόπο τα φυτά των τριών θερμοκηπίων που ήταν εκτεθειμένα σε διαφορετικές συνθήκες σκίασης αντιδρούσαν στην ίδια ένταση προσπίπτοντος φωτός των 1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , αν είχαν δηλαδή προσαρμοσθεί ή όχι στις συνθήκες σκίασης. Έγιναν συνολικά 84 μετρήσεις (28 σε κάθε θερμοκήπιο) φωτοσύνθεσης με σταθερό φωτισμό κατά τη διάρκεια συνεφιασμένων ημερών κατά Σεπτεμβρίου- Νοεμβρίου. Η επεξεργασία των μετρήσεων έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

2.2.2.1. *Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη φωτοσύνθεση*  
Στους παρακάτω Πίνακες 5, 7 και 8 φαίνονται τα περιγραφικά των μέσων όρων του ρυθμού φωτοσύνθεσης A με σταθερό φωτισμό, για τα τρία θερμοκήπια, τα δύο επίπεδα αλατότητας και την αλληλεπίδραση θερμοκήπιο\*αλατότητα αντίστοιχα.

**Πίνακας 7.** Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A με σταθερό τεχνητό φωτισμό στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% κατά τη περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος.

Θερμοκήπιο	Μέσος Όρος ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Απόκλ. ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Σφάλμα ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	
				Κάτω όριο ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Άνω όριο ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
Μάρτυρας	11.579	4.29414	0.639	10.307	12.852
Σκίαση 35%	12.089	2.80532	0.639	10.816	13.361
Σκίαση 50%	10.584	2.78850	0.639	9.311	11.857

**Πίνακας 8.** Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A με σταθερό τεχνητό φωτισμό σε φύλλα φυτών καλλιεργημένων σε συνθήκες θρεπτικού διαλύματος χαμηλής και υψηλής αλατότητας κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος.

Αλατότητα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Απόκλ. ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Σφάλμα ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	
				Κάτω όριο ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Άνω όριο ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
Χαμηλή	11.129	3.21604	0.522	10.090	12.168
Υψηλή	11.705	3.56837	0.522	10.666	12.745

**Πίνακας 9.** Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A με σταθερό τεχνητό φωτισμό στα τρία θερμοκήπια για κάθε αλατότητα του θρεπτικού διαλύματος κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος.

Θερμοκήπιο	Αλατότητα	Μέσος Όρος ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Απόκλ. ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Τυπ. Σφάλμα ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Διάσ/μα . Εμπιστ/νης.	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Μάρτυρας	Χαμηλή	10.996	3.75719	0.904	9.196	12.796
	Υψηλή	12.163	4.84228	0.904	10.363	13.963
Σκίαση 35%	Χαμηλή	12.499	2.64665	0.904	10.699	14.299
	Υψηλή	11.678	2.99616	0.904	9.878	13.478
Σκίαση 50%	Χαμηλή	9.892	2.79462	0.904	8.092	11.692
	Υψηλή	11.28	2.70351	0.904	9.476	13.076

Από τους παραπάνω Πίνακες φαίνεται πως οι μέσοι όροι του ρυθμού φωτοσύνθεσης με σταθερό τεχνητό φωτισμό για τα τρία θερμοκήπια, τις δύο αλατότητες και την αλληλεπίδραση τους είναι σχεδόν παρόμοιοι.

Αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης παραλλακτικότητας (ANOVA) της φωτοσύνθεσης σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού για το θερμοκήπιο, για τις πηγές παραλλακτικότητας θερμοκήπιο, αλατότητα και αλληλεπίδρασή τους, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Από τη στήλη της σημαντικότητας του Πίνακα 10 φαίνεται πως δεν υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές του ρυθμού φωτοσύνθεσης σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού ούτε μεταξύ των τριών θερμοκηπίων, ούτε μεταξύ των δύο επιπέδων αλατότητας συνολικά και σε κάθε θερμοκήπιο (αλληλεπίδραση). Έτσι, σε συνθήκες σταθερού φωτισμού  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  η φωτοσύνθεση των φύλλων αγγουριάς καλλιεργημένης σε υπόστρωμα περλίτη δεν επηρεάζεται από τη σκίαση, την αλατότητα και την αλληλεπίδραση σκίαση\*αλατότητα, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

**Πίνακας 10.** Αποτελέσματα ανάλυσης παραλλακτικότητας της εξαρτημένης μεταβλητής ρυθμός φωτοσύνθεσης A με σταθερό τεχνητό φωτισμό, για τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο\*αλατότητα για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος.

Πηγή Παραλλακτικότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνο	F	Σημαντικότητα
Διορθωμένο Μοντέλο	60.457a	5	12.091	1.057	0.391
Σταθερός Όρος	10949.725	1	10949.725	956.798	0.000
Θερμοκήπιο	32.798	2	16.399	1.433	0.245
Αλατότητα	6.978	1	6.978	0.610	0.437
Αλληλεπίδραση (Θερμοκήπιο* Αλατότητα)	20.681	2	10.340	0.904	0.409
Σφάλμα	892.642	78	11.444		
Σύνολο	11902.824	84			
Διορθωμένο Σύνολο	953.099	83			
α R2= 0.063 (Προσαρμοσμένο R2=0.003)					



### 3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, λοιπόν, από την ανάλυση των μετρήσεων φωτοσύνθεσης που έγιναν κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς προέκυψε πως η σκίαση και η αλατότητα δεν επηρέασε το ρυθμό φωτοσύνθεσης, όταν οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης έγιναν σε φυσικές συνθήκες αλλά και με σταθερό τεχνητό φωτισμό έντασης  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Φαίνεται, λοιπόν, πως τα φύλλα της καλλιέργειας στα σκιασμένα θερμοκήπια δεν παρουσίασαν καμία φυσιολογική προσαρμογή στις συνθήκες χαμηλής έντασης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα τα φύλλα σκιασμένου και μη θερμοκηπίου να έχουν τους ίδιους ρυθμούς φωτοσύνθεσης και διαπνοής όταν εκτέθηκαν σε συνθήκες φυσικού φωτισμού και στα ίδια επίπεδα φωτοσυνθετικής ροής φωτονίων  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Συνεπώς, τα φυτά που σκιάζονται για μία χρονική περίοδο και παρουσιάζουν μειωμένους ρυθμούς φωτοσύνθεσης θα συνεχίσουν να φωτοσυνθέτουν κανονικά όταν βρεθούν σε συνθήκες μη σκίασης. Αυτό αναδεικνύει τη σημασία της περιοδικής σκίασης με τοποθέτηση της σκίασης για περιόδους με υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (καλοκαίρι) και παύση της σκίασης όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μειωθεί (μέσα φθινόπωρου- χειμώνα) χωρίς φωτοσυνθετικό κόστος.

### 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- López-Hoffman, L, JL DeNoyer, IE Monroe, R Shaftel, NPR Anten, M Martínez- Ramos & DD Ackerly. 2006. Mangrove seedling net photosynthesis, growth, and survivorship are interactively affected by salinity and light. *Biotropica* 38: 606-616.
- Lorenzo M, Sánchez-Guerrero C.M, Medrano E., García L.M, Caparrós I., Giménez M., (2003). External greenhouse mobile shading: effect on microclimate, water use efficiency and yield of a tomato crop grown under different salinity levels of the nutrient solution. *Acta Horticulturae* 609:181-186.
- Lorenzo P, Garcia L.M, Sanchez-Guerro C.M, Medrano E, Caparros I., Giménez M., (2006). Influence of mobile shading on yield, crop transpiration and water use efficiency. *Acta Horticulturae* 719: 471-478
- Lycoskoufis I.H., Savvas D., Mavrogiannopoulos F. 2005. Growth gas exchange and nutrient status in pepper (*Capsicum annum* L.) grown in recirculating nutrient solution as affected by salinity imposed to half of the root system. *Scientia Hort.* 106: 147-161.
- Mavrogiannopoulos G.N., Spanaikis J., Tsikalas P. 1999. Effect of carbon dioxide enrichment and salinity on photosynthesis and yield in melon. *Scientia Horticulturae*, 79: 51-63.
- Yahya A., Atherton J. (1995). Growth and fruiting responses of strawberry plants grown on rockwool to shading and salinity. *Scientia Hort.* 62: 25-31.
- Schwartz D., Kläring H.-P., van Iersel M.W., Ingram K.T. 2002. Growth and photosynthetic response of tomato to nutrient solution concentration at two light levels. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 127(6): 984-990.

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ

11<sup>ο</sup> ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΒΟΛΟΣ, 2019

