ΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ

M.E. Θεοχάρης¹, **Χ. Τ. Μυριούνης**¹ και **Α. Δ. Σιάνου**¹ ¹TEI Ηπείρου, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, 471 00 Άρτα. theoxar@teiep.gr, cmyriounis@teemail.gr, natasa_sianou@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Ευρωκώδικες είναι μία σειρά από 10 Ευρωπαϊκά πρότυπα, EN1990 - EN1999, με τα οποία γίνεται εναρμονισμένη προσέγγιση για το σχεδιασμό έργων Πολιτικού Μηχανικού στην ΕΕ. Όλες οι δράσεις και οι συνδυασμοί τους, που ενδέχεται να επισυμβούν κατά την ελάχιστη διάρκεια ζωής των θερμοκηπίων, εξετάζονται σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στους EC0 και EC1 καθώς και στο πρότυπο prEN13031-1:2000. Επειδή τα παραπάνω πρότυπα αναφέρονται σε γενικές αρχές και κανόνες που ισχύουν σε όλη την ΕΕ, πρέπει να γίνει εξειδίκευσή τους σε κάθε Κράτος - Μέλος. Στην παρούσα μελέτη καθορίζονται το είδος, το μέγεθος, ο τρόπος επιβολής και οι συνδυασμοί των φορτίσεων των θερμοκηπιακών κατασκευών στην Ελλάδα. Επί πλέον δίνονται απλοποιημένες σχέσεις υπολογισμού ορισμένων μεγεθών και καθορίζονται οι συνδυασμοί των φορτίσεων που πρέπει να επιβάλλονται στα επί μέρους δομικά στοιχεία των θερμοκηπίων.

Λέξεις κλειδιά: Θερμοκήπιο, φόρτιση, Ευρωκώδικας, Ευρωπαϊκή Ένωση, Ελλάδα.

ACTIONS ON GREENHOUSES IN GREECE ACORDING TO THE EUROCODES

M. E. Theocharis¹, Ch. T. Myriounis¹ and A. D. Sianou¹

¹Technical Educational Institution of Epirus, Department of Crop Production, 47100 Arta. theoxar@teiep.gr, cmyriounis@teemail.gr, natasa_sianou@yahoo.gr

ABSTRACT

The Eurocodes are a series of 10 European Standards, EN1990 - EN1999, providing a common approach for the design of civil engineering works in the EU countries. All actions and their combinations, which are likely to occur during the greenhouses minimum design working life, are considered in accordance with the procedures which are described in the EC0 and EC1 as well as in the standard prEN13031-1:2000. Because the above considered standards refer to general principles and rules applicable in the whole of the EU, these should be identified in accordance with every EU country-member's special conditions. In this paper the type, the size and the enforcement methods of actions in greenhouses under Greek conditions are examined. In addition some simplified expressions of the various calculating relations are given and the specific action combinations, which may be applied in each greenhouse structural item, are designated.

Key words: greenhouse, action, Eurocode, European Union, Greece.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης, CEN, ανέλαβε το 1990 την ανάπτυξη ενός συνόλου εναρμονισμένων τεχνικών κανόνων για τον σχεδιασμό έργων Πολιτικού Μηγανικού οι οποίοι έγιναν γνωστοί ως "Δομητικοί Ευρωκώδικες". Η CEN δημιούργησε διάφορες Τεχνικές Επιτροπές οι οποίες διαμόρφωσαν καταρχήν, κατά τα έτη 1995 έως 1997, εννέα Ευρωπαϊκά Δοκιμαστικά Πρότυπα (ENV1 έως ENV9) από τα οποία προέκυψαν τα τελικά δέκα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, (ΕΝΟ έως ΕΝ9). Από το ΕΝV1991 προέκυψαν το ΕΝ 1990:2002 ή EC0 και το EN1991: (2002 έως 2006) ή EC1. Ο EC0 περιέχει τις βάσεις σχεδιασμού όλων των Ευρωκωδίκων και ο EC1 (δέκα μέρη) αναφέρεται σε κάθε είδους δράση που ενδέχεται ασκηθεί σε κάποια φέρουσα κατασκευή. Ο ΕC3, που προέκυψε από το ENV1993 αναφέρεται στο σχεδιασμό των μεταλλικών κατασκευών. Η CEN δημιούργησε επίσης την TC284 με αποστολή να διαμορφώσει ένα πρότυπο κανονισμών για τα θερμοκήπια. Η TC284 αρχικά συνέταξε το προσωρινό σχέδιο κανονισμών prEN 13031-1:1999 και στη συνέχεια το τελικό σχέδιο κανονισμών prEN13031-1:2000, βασισμένα στους ECO, EC1 και EC3 με ειδικές προσαρμογές για τις απαιτήσεις των θερμοκηπίων. Στην παρούσα μελέτη εξειδικεύονται για την Ελληνική πραγματικότητα το είδος, το μέγεθος, ο τρόπος επιβολής και οι συνδυασμοί των δράσεων στις θερμοκηπιακές κατασκευές, οι οποίες προκύπτουν από τους EC0 και EC1 και το prEN 13031-1: 2000.

2. ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΚΥΡΙΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ

Θερμοκήπιο είναι μία κατασκευή η οποία καλύπτεται από διαφανές υλικό ώστε να είναι δυνατή η είσοδος όσο το δυνατόν περισσότερου φυσικού φωτισμού ο οποίος είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη των φυτών.

Τα θερμοκήπια κατατάσσονται: i) ανάλογα με το εάν ή όχι η επένδυσή τους έχει ανεκτικότητα σε μετατοπίσεις του σκελετού, σε τύπου Α και τύπου Β. Τύπου Α είναι ένα γυάλινο θερμοκήπιο με επένδυση από ασυνεχή φύλλα που στηρίζονται σε επιτεγίδες και τύπου Β είναι ένα τοξωτό θερμοκήπιο με επένδυση από συνεχές πλαστικό φύλλο, που στηρίζεται σε αψίδες και ii) ανάλογα με την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής τους, που κυμαίνεται από 5 έως 15 χρόνια. Επομένως υπάρχουν θερμοκήπια A15, A10, A5 και B15, B10, B5.

Ως φόρτιση θεωρείται μία δύναμη (φορτίο) που ασκείται στο θερμοκήπιο (άμεση φόρτιση) ή μία επιβαλλόμενη παραμόρφωση (έμμεση φόρτιση) π.χ. θερμοκρασιακές μεταβολές ή υποχωρήσεις στηρίξεων. Οι διάφορες φορτίσεις μπορεί να έχουν χρονική ή χωρική μεταβολή. Ως προς τη μεταβολή τους στο χρόνο διακρίνονται σε (α) μόνιμες φορτίσεις, π.χ. ίδια βάρη του θερμοκηπίου, βοηθητικές εγκαταστάσεις και μόνιμος εξοπλισμός, (β) μεταβλητές φορτίσεις, π.χ. επιβαλλόμενα φορτία, φορτία ανέμου, ή φορτία χιονιού και (γ) σε τυχηματικές φορτίσεις, π.χ. εκρήξεις ή προσκρούσεις οχημάτων. Ως προς τη χωρική τους μεταβολή διακρίνονται σε (α) καθορισμένες φορτίσεις, π.χ. ίδιο βάρος και (β) ελεύθερες φορτίσεις, οι οποίες οδηγούν σε διάφορες διατάξεις των δράσεων, π.χ. κινητά επιβαλλόμενα φορτία, φορτία ανέμου, ή φορτία

3. ΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Κατά τη μελέτη των θερμοκηπιακών κατασκευών εξετάζονται οι φορτίσεις που οφείλονται σε: (α) μόνιμα φορτία, (β) μονίμως επιβαλλόμενα φορτία, (γ) φορτία ανέμου, (δ) φορτία χιονιού, (ε) φορτία παραγωγής, (στ) συγκεντρωμένα κατακόρυφα φορτία, (ζ) περιστασιακώς επιβαλλόμενα φορτία, (η) φορτία σεισμού, (θ) θερμικά φορτία και (ι) συμπτωματικά φορτία χιονιού.

3.1. TA MONIMA Φ OPTIA TH Σ KATA Σ KEYH Σ G_{k1}

Τα μόνιμα φορτία είναι τα φορτία λόγω του ιδίου βάρους της κατασκευής καθώς και τα φερόμενα στοιχεία με εξαίρεση τις εγκαταστάσεις ακόμη και αν αυτές είναι μόνιμες. Τα βάρη των μερών των κατασκευών και των μη δομικών στοιχείων προσδιορίζονται από τα βάρη των στοιχείων, από τα οποία αποτελούνται και από τη γεωμετρία. Αν δεν παρέχονται πιο αξιόπιστα δεδομένα από προδιαγραφές των προϊόντων, τα βάρη των ιδιαίτερων στοιχείων θα εκτιμώνται από τις ονομαστικές διαστάσεις και τις ονομαστικές πυκνότητες των συστατικών τους υλικών. Τιμές του ιδίου βάρους των υλικών των κατασκευαστικών στοιχείων των θερμοκηπίων σε kNm⁻³ είναι: Γυαλί: 25, Πολυαιθυλένιο: 13, Φύλλο ακρυλικού (plexiglass, perspex, vedril, mouch):12, Ενισχυμένος πολυεστέρας (fiberglass): 13-18, Πολυκαρβονικές πλάκες (thermoclear, molanex, qualex, polygal, makrolon, akyver, casalith): 2,45, Αλουμίνιο: 27, Χυτοσίδηρος: 71, Κατεργασμένος σίδηρος: 76, Χάλυβας: 77, Σκυρόδεμα ανάλογα με τα αδρανή υλικά: 20-28.

3.2. TA MONIM $\Omega\Sigma$ EIIIBAAAOMENA Φ OPTIA G_{k2}

Είναι φορτία λόγω του εγκατεστημένου μόνιμου εξοπλισμού θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού, σκίασης, άρδευσης, αερισμού και μόνωσης. Για τα θερμοκήπια κατηγορίας A15 τα φορτία λόγω του μόνιμου εξοπλισμού δεν πρέπει να είναι μικρότερα από 70 Nm⁻² καλυμμένης επιφάνειας. Τα φορτία των σωλήνων θέρμανσης πρέπει να παίρνονται ίσα με το ίδιο βάρος των σωλήνων όταν είναι γεμάτοι νερό. Οι ελάχιστες τιμές των οριζοντίων δυνάμεων από τα σύρματα και τα καλώδια του εξοπλισμού των συστημάτων σκίασης και άρδευσης είναι: (α) Συστήματα σκίασης: i) σύρματα ανάρτησης: 250 N ανά σύρμα και ii) καλώδια οδήγησης: 500 N ανά καλώδιο (β) Εξοπλισμός άρδευσης: 1250 N ανά σύρμα ανάρτησης.

3.3. TA Φ OPTIA ANEMOY Q_{k1}

Η συνολική απόκριση των κατασκευών και των επιμέρους στοιχείων τους στη δράση του ανέμου, μπορεί να θεωρηθεί ως επαλληλία μιας "βασικής" και μιάς "συντονιστικής" συνιστώσας, όπου η βασική συνιστώσα ενεργεί ως οιονεί στατική, ενώ η συντονιστική ως δυναμική. Σην περίπτωση των θερμοκηπίων, λόγω του μικρού ύψους τους, αυτή η δεύτερη είναι μικρή και μπορεί να αγνοηθεί οπότε ο υπολογισμός γίνεται μόνο βάσει της πρώτης μέσω της απλοποιημένης μεθόδου, που προτείνεται στο μέρος 1-4 του EC1.

3.3.1. Η πίεση του ανέμου στις επιφάνειες

Η πίεση λόγω του ανέμου, w , δρα κάθετα στις προσβαλλόμενες επιφάνειες μίας θερμοκηπιακής κατασκευής και προκύπτει από τη σχέση:

 $w = w_e + w_i + w_{fr} = q_b c_e(z_e) c_{pe} + q_b c_e(z_i) c_{pi} + q_b c_e(z_e) c_{fr}$ Nm⁻²

ópou: w_e , w_i kai w_{fr} eínai antístoica η píes η stic exaterikéc epikéc epikéc, stic esaterikéc epikéc epikéc kai η píes η lógw tribúc' q_b eínai η basik η píes η , $[Nm^{-2}]$ · $c_e(z_e)$ kai $c_e(z_i)$ eínai suntelestéc ékbes η s' $z_e = z_i = z$ eínai to úfoc anaporác two bermokhtún to opoio gia men ta amaiklin bermokhtu eínai η apóstas η apó to édaaroc méxici to úfoc the prokutic source sinai and to source dermokhtu einai η satistication opois to source sinai contraction opois to satisfies the sinai contraction opois (korai contraction opois to the sinai contraction opois (korai contraction) sinai contaction opois (korai contraction) to 75 % tou úfoc tou korai kai ii) to méso óro two umán kai udropois kai tribute sinai contraction contraction contaction opois (kai contraction) sinai contraction contraction opois (kai contraction) to 75 % tou úfoc tou korai kai ii) to méso óro two umán kai udropois kai tribute.

Η βασική πίεση, q_b , για την Ελλάδα και για συχνότητα επανεμφάνισης του ανέμου, p, υπολογίζεται από τη σχέση (Μ. Θεοχάρης , 2000α , β)):

$$q_{b(p)} = \frac{\rho}{2} V_{b(p)}^{2} = 0.351047 \quad V_{b(0)}^{2} \left[1 - 0.2 \ln \left[-\ln(1-p) \right] \right]$$
(1)

όπου: ρ =1,25 Kgm⁻³ είναι η πυκνότητα του ανέμου και V_b (0) είναι η βασική ταχύτητα του ανέμου η οποία σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα του μέρους 1-4 του EC1, για μεν τα νησιά και τις παράκτιες ζώνες, που απέχουν μέχρι 10 Km από τη θάλασσα είναι 33 ms⁻¹, για δε το εσωτερικό της χώρας είναι 27 ms⁻¹.

Ο συντελεστής εκθέσεως, $c_e(z)$, για την περίπτωση των θερμοκηπίων, (Μ. Θεοχάρης, 2000α, β), δίδεται από τη σχέση:

$$c_{e}(z) = (c_{r}(z))^{2} c_{t}^{2} \left[1 + 2gI_{v}(z) \right] = c_{r}(z) c_{t} \left[c_{r}(z) c_{t} + 1,33 \right]$$
(2)

όπου: $c_r(z) = 0,19 \ln z + 0,569$ είναι ο συντελεστής τραχύτητας και c_t είναι ο συντελεστής αναγλύφου ο οποίος λαμβάνεται υπόψη για θερμοκήπια που κατασκευάζονται σε επικλινείς περιοχές σε απόσταση από την κορυφή της πλαγιάς μικρότερη είτε από το μισό του μήκους της πλαγιάς είτε από 1,5 φορά το ύψος της πλαγιάς. Ορίζεται από τις σχέσεις (i) $c_t = 1$ για $\Phi < 0,05$ (ii) $c_t = 1+2s\Phi$ για $0,05 < \Phi < 0,30$ και (iii) $c_t = 1+0,6s$ για $\Phi>0,30$ όπου Φ είναι η προσήνεμη κλίση της πλαγιάς και s είναι συντελεστής τοπογραφικής θέσης (M. Θεοχάρης, 2000α, β). Για επίπεδα εδάφη και εδάφη με κλίσεις $\Phi < 5\%$ για τα οποία είναι $c_t = 1$, ο συντελεστής εκθέσεως δίνεται από τη σχέση:

$$c_{e}(z) = c_{r}(z) \left[c_{r}(z) + 1.33 \right] = 0.0361(\ln z)^{2} + 0.46892\ln z + 1.080531$$
(3)

Οι αεροδυναμικοί συντελεστές, c_{pe} και c_{pi} , προκύπτουν από το σχήμα και τη μορφή της προσβαλλόμενης επιφάνειας καθώς και από τη διεύθυνση του ανέμου. Αναλυτικές τιμές των c_{pe} και c_{pi} δίδονται από το παράρτημα B του prEN13031-1:2000. Ο αεροδυναμικός συντελεστής τριβής λαμβάνεται σταθερός, $c_{fr} = 0,01$.

3.3.2. Η ανεμοπίεση λόγω των ανεμιστήρων

Όταν εφαρμόζεται η πίεση λόγω λειτουργίας των ανεμιστήρων, δεν θα εφαρμόζεται άλλη ανεμοπίεση. Ο συντελεστής πίεσης για ανοιχτούς ανεμιστήρες σύμφωνα με το prEN13031-1:2000 είναι $c_{ven} = \pm 1,25$ και θα εφαρμόζεται σε όλες τις πλευρές του θερμοκηπίου. Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου που θα επικρατεί λόγω του δυναμικού αερισμού εντός του θερμοκηπίου $V_{b(v)} = 1,5 \text{ ms}^{-1}$. Επομένως:

$$w_{ven} = q_{b(v)} c_{ven} = \frac{\rho}{2} V_{b(v)}^2 c_{ven} = \pm 1,76 \text{ Nm}^{-2}$$
(4)

3.4. TA Φ OPTIA XIONIOY Q_{k2}

Τα φορτία χιονιού κατατάσσονται στις μεταβλητές ελεύθερες δράσεις, είναι δηλαδή δράσεις οι οποίες δεν δρουν μόνιμα κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, η διακύμανση του μεγέθους τους με το χρόνο δεν είναι αμελητέα και οι οποίες μπορεί να έχουν οποιαδήποτε χωρική κατανομή πάνω στο δόμημα. Το ειδικό βάρος του χιονιού αυξάνεται με τη χρονική διάρκεια που μεσολαβεί από τη διάστρωσή του. Τιμές του ειδικού βάρους του χιονιού στο έδαφος σύμφωνα με το παράρτημα D του μέρους 1-3 του EC1, είναι: (i) Φρέσκο χιόνι:1,00 kNm⁻³ (ii) Χιόνι στρωμένο (αρκετές ώρες ή μέρες μετά τη χιονόπτωση): 2,00 kNm⁻³ (iii) Χιόνι παλαιό 2,50 έως 3,50 kNm⁻³ και (iv) Βρεγμένο χιόνι 4,00 kNm⁻³

3.4.1. Καθορισμός του φορτίου χιονιού

Το φορτίο χιονιού θεωρείται ότι επενεργεί κατακόρυφα, αναφέρεται στην οριζόντια προβολή της επιφάνειας της οροφής και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\mu}_{i} \mathbf{C}_{e} \mathbf{C}_{t} \mathbf{S}_{k} \quad k \mathbf{N} \mathbf{m}^{-2} \tag{5}$$

όπου: μ_i είναι ο συντελεστής μορφής του φορτίου χιονιού· S_k είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού στο έδαφος [kNm⁻²]· C_e είναι ο συντελεστής έκθεσης στις καιρικές επιδράσεις που συνήθως παίρνει την τιμή 1,0. Ο C_e μπορεί να πάρει τιμές μικρότερες από 1,0 αν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των ποικιλόμορφων συνθηκών ανέμου· C_t είναι ο θερμικός συντελεστής. Για μη θερμαινόμενα θερμοκήπια είναι $C_t = 1,0$. Για θερμαινόμενα θερμοκήπια, σύμφωνα με το παράρτημα Ε του prEN13031-1:2000, ο C_e παίρνει τις τιμές: (i) Για επικάλυψη από απλά φύλλα γυαλιού ή πλαστικού: $C_t = 0,6$. (ii) Για επικάλυψη από

διπλά φύλλα γυαλιού ή από κυματοειδή πλαστικά φύλλα: $C_t = 0,7$ και (iii) Για επικάλυψη από διπλά πλαστικά φύλλα (φουσκωμένα): $C_t = 0,9$

3.4.2. Η χαρακτηριστική τιμή του φορτιού του χιονιού sk

Το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού στο έδαφος, s_k , για μία τοποθεσία που βρίσκεται σε υψόμετρο $A \le 1500$ m, σύμφωνα με το παράρτημα C του μέρους 1-3 του EC1 δίνεται από τη σχέση:

$$s_{k} = s_{k,0} \left(1 + \left(\frac{A}{917} \right)^{2} \right) KN m^{-2}$$
(6)

όπου $s_{k,0}$ είναι το φορτίο χιονιού για έδαφος που βρίσκεται στη στάθμη της θάλασσας και για πιθανότητα υπέρβασης p = 2 %. Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα του μέρους 1-3 του EC1 η Ελλάδα χωρίζεται σε τρεις εθνικές ζώνες στις οποίες ισχύουν αντίστοιχες τιμές του $s_{k,0}$, οι εξής: **Ζώνη I** ($s_{k,0} = 0,4$ kN m⁻²): Νομοί Αρκαδίας, Ηλείας, Λακωνίας και όλα τα νησιά πλην των Σποράδων και της Εύβοιας. **Ζώνη II** ($s_{k,0} = 1,7$ kN m⁻²): Νομοί Μαγνησίας, Φθιώτιδας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Λάρισας, Εύβοιας και Σποράδες. **Ζώνη III** ($s_{k,0} = 0,8$ kN m⁻²): Υπόλοιπη Χώρα. Για τοποθεσίες με A>1500 m πρέπει να γίνεται ειδική μελέτη και αξιολόγηση σύμφωνα με τις πληροφορίες που περιέχονται στο Εθνικό Προσάρτημα. Το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού, S_n, για πιθανότητα υπέρβασης διάφορη του 2 % προτείνεται

(Μ. Θεοχάρης , 2000, 2003) να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_n = S_k \left[0,3375 - 0,1698 \ln \left[-\ln(1-p) \right] \right]$$
 (7)

3.4.3. Ο συντελεστής μορφής του φορτιού χιονιού μ_i

Για τον προσδιορισμό συντελεστών μορφής, λαμβάνονται υπόψη τρεις μορφές κατανομής φορτίου: (α) Η πρώτη προκύπτει από μία ομοιόμορφη κατανομή του χιονιού πάνω σε ολόκληρη την οροφή, και ισχύει όταν το χιόνι πέφτει με μικρή πνοή ανέμου. (β) Η δεύτερη προκύπτει από μία αρχική ασύμμετρη κατανομή, ή από ανακατανομή του χιονιού που επηρεάζει την κατανομή του φορτίου στο σύνολο της οροφής. (π.χ. χιόνι που μεταφέρεται από την προσήνεμη στην υπήνεμη πλευρά της οροφής). (γ) Η τρίτη προκύπτει από ανακατανομή του χιονιού στα υψηλότερα τμήματα της οροφής, λόγω ολίσθησης. Αναλυτικές τιμές του μ_i, τους διαφόρους τύπους θερμοκηπιακών κατασκευών δίδονται από το παράρτημα C του prEN13031-1:2000.

3.5. TA $\Phi OPTIA$ TH Σ ΠΑΡΑΓΩΓΗ Σ Q_{k3}

Είναι φορτία λόγω του βάρους των φυτών και των καρπών που στηρίζονται στην κατασκευή. Τα φορτία αυτά θεωρούνται κατακόρυφα κατανεμημένα ομοιόμορφα και σύμφωνα με το prEN13031-1:2000 παίρνουν τις τιμές: (i) Παραγωγές σαν τις ντομάτες και τα αγγούρια $Q_{k3} = 0,15 \text{ kNm}^{-2}$ (ii) Παραγωγές σε ελαφρά δοχεία, όπως οι φράουλες $Q_{k3} = 0,30 \text{ kNm}^{-2}$ και (iii) Παραγωγές σε βαριά δοχεία, όπως οι γλάστρες $Q_{k3} = 1,00 \text{ kNm}^{-2}$. Όταν τα φορτία παραγωγής μεταφέρονται στην κατασκευή με τη βοήθεια οριζόντιων συρμάτων, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις από τα σύρματα στα σημεία που αυτά συνδέονται με την κατασκευή. Η οριζόντια δύναμη ανά σύρμα μπορεί να ληφθεί ως:

$$F_{w} = Q_{k3}.a.\frac{\ell_{ws}^{2}}{8.u_{w}} \qquad kN$$
(8)

όπου: a είναι η απόσταση μεταξύ των συρμάτων, ℓ_{ws} είναι η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων του σύρματος και u_w είναι το βέλος στο μέσο του σύρματος.

3.6. TA Σ YFKENTP Ω MENA KATAKOPY Φ A Φ OPTIA Q_{k4}

Είναι φορτία ανθρώπων που επιβάλλονται κατά την συντήρηση και επισκευή. Στις επικαλύψεις, είτε αυτές είναι γυάλινες είτε από πλαστικό, καθώς επίσης σε απλά θερμοκήπια χωρίς δοκό στο ύψος της υδρορροής, δεν επιβάλλονται συγκεντρωμένα κατακόρυφα φορτία. Τα Q_{k4} θεωρούνται ότι δρουν σε μία επιφάνεια διαστάσεων 10 x 10 cm, ή σε μήκος 10 cm και σε ολόκληρο το πλάτος αν ένα μέλος κατασκευής στενότερο από 10 cm και παίρνουν τις τιμές: (i) Φορτίο στο σκελετό και την υδρορροή: $Q_{k4} = 1,00$ kN και (ii) Φορτίο σε δευτερεύοντα δομικά στοιχεία όπως οι επιτεγίδες ή η κορυφαία οριζόντια δοκός οροφής (μόνο για τις κατηγορίες θερμοκηπίων A15, A10, B15 και B10): $Q_{k4} = 0,35$ kN.

3.7. ΤΑ ΠΕΡΙΣΤΑΣΙΑΚΩΣ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ Q_{k5}

Είναι φορτία λόγω κινητού εξοπλισμού όπως είναι γερανογέφυρες κινούμενες σε σιδηροτροχιές, που στηρίζονται στην κατασκευή και εξοπλισμός καθαρισμού, που κινείται κατά μήκος της οροφής και περιλαμβάνει και τον εργάτη καθαριστή. Τιμές των φορτίων παίρνονται από δεδομένα που προτείνονται από τον κατασκευαστή για το ίδιο βάρος του εξοπλισμού και για το μέγιστο ωφέλιμο μεταφερόμενο φορτίο σχεδιασμού.

3.8. ΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ Q_{k6}

Σύμφωνα με την ισχύουσα πρακτική για το σεισμικό σχεδιασμό, τα φορτία σεισμού αντικαθίστανται με την εφαρμογή στην κατασκευή ισοδυνάμων οριζοντίων πλευρικών δυνάμεων με μέγεθος που προκύπτει από το βάρος της κατασκευής επί ένα συντελεστή ε ο οποίος παίρνει τιμές κυμαινόμενες από 0,12 έως 0,32 ανάλογα με τη σεισμικότητα της περιοχής. Σύμφωνα με το prEN13031-1:2000 δεν προβλέπεται ταυτόχρονη δράση σεισμού και ανέμου στα θερμοκήπια. Επειδή τα θερμοκήπια είναι ελαφρές κατασκευές, το μέγεθος των ισοδυνάμων οριζοντίων δυνάμεων για τον υπολογισμό του σεισμού είναι πολύ μικρότερο από το μέγεθος των οριζόντιων πλευρικών δυνάμεων λόγω ανεμοφόρτισης. Επομένως δεν χρειάζεται να ληφθούν ιδιαίτερα υπόψη κατά τον υπολογισμό.

3.9. TA Θ EPMIKA Φ OPTIA Q_{k7}

Οφείλονται σε θερμοκρασιακές μεταβολές που μπορεί να συμβούν σε περίοδο 24 ωρών. Σύμφωνα με το παράρτημα Ε του prEN13031-1:2000 οι μεταβολές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι: α) αύξηση της θερμοκρασίας (i) από 20 0 C σε 60 0 C για σκούρα δομικά στοιχεία των εξωτερικών παρειών και (ii) από 20 0 C σε 40 0 C για λευκά δομικά στοιχεία των εξωτερικών παρειών καθώς και για όλα τα δομικά στοιχεία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και β) μείωση της θερμοκρασίας από 20 0 C σε -10 0 C για όλα τα δομικά στοιχεία του θερμοκηπίου. Για να αποτραπούν ζημιές στην επένδυση λόγω συστολοδιαστολής, κατασκευάζονται αρμοί διαστολής. Για θερμοκήπια τύπου Β δεν λαμβάνονται υπόψη θερμικά φορτία όταν το μήκος και το πλάτος του θερμοκηπίου είναι μικρότερα από 150 m.

3.10. TA Σ YMIIT Ω MATIKA Φ OPTIA XIONIOY A_k

Είναι φορτία που οφείλονται σε ακραίες τιμές χιονιού οι οποίες δεν είναι δυνατό να διαχειριστούν από τις συνήθεις στατιστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τιμής του φορτίου χιονιού. Αυτές οι ακραίες τιμές επιτρέπεται να θεωρούνται συμπτωματικά φορτία. Τα συμπωματικά φορτία χιονιού μπορεί να εφαρμόζονται για την περίοδο επαναφοράς που ισχύει για το φορτίο χιονιού.

4. ΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Προκειμένου να ελεγχθεί η επάρκεια μιας κατασκευής στις οριακές καταστάσεις αστοχίας (ULS) και λειτουργικότητας (SLS), μελετώνται συνδυασμένα οι δράσεις που δίνονται στον πίνακα 1 οι οποίες μπορεί να επισυμβούν ταυτόχρονα. Για την Ελλάδα εξετάζονται μόνο οι περιπτώσεις a₁, a₂, a₃, b₁, c₁, d₁, d₂ και e₁.

a. $G_{k1}+G_{k2}+Q_{k1}+Q_{k2}+Q_{k3}$	$\begin{array}{l} a_1) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \psi_{0Q2} \ \gamma_{Q2}Q_{k2} + \psi_{0Q3}\gamma_{Q3}Q_{k3} \\ a_2) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \psi_{0Q1}\gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}Q_{k2} + \psi_{0Q3} \ \gamma_{Q3}Q_{k3} \\ a_3) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \psi_{0Q1} \ \gamma_{Q1}Q_{k1} + \psi_{0Q2} \ \gamma_{Q2}Q_{k2} + \gamma_{Q3}Q_{k3} \end{array}$
b. $G_{k1}+Q_{k1}$	$b_1) \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{Q1}Q_{k1}$
c. $G_{k1}+G_{k2}+Q_{k3}+Q_{k4}+Q_{k5}$	$\begin{array}{l} c_1) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \psi_{0Q3}\gamma_{Q3}Q_{k3} + \gamma_{Q4}Q_{k4} + \psi_{0Q5}\gamma_{Q5}Q_{k5} \\ c_2) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \gamma_{Q5}Q_{k5} \end{array}$
d. $G_{k1}+G_{k2}+Q_{k2}+Q_{k3}+A_{Ek}$	$\begin{array}{l} d_1) \ \ G_{k1} + G_{k2} + \psi_{2Q3} Q_{k3} + \gamma_{AE} A_{Ek} \\ d_2) \ \ G_{k1} + G_{k2} + \psi_{2Q2} Q_{k2} + \psi_{2Q3} Q_{k3} + \gamma_{AE} A_{Ek} \end{array}$
e. $G_{k1} + G_{k2} + Q_{k6}$	$e_1) \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \gamma_{Q6}Q_{k6}$
f: $G_{k1} + G_{k2} + Q_{k3} + A_k$	$f_1) \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \psi_{1Q3}\gamma_{Q3}Q_{k3} + \gamma_AA_k$

Πίνακας 1. Συνδυασμοί των δράσεων

4.1. O SYNTEAESTHS SHOYAAIOTHTAS THE KATASKEYHS γ

Είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφάλειας, ο οποίος είναι ανάλογος με το επίπεδο ασφαλείας της κατασκευής. Σύμφωνα με το παράρτημα Ε του prEN 13031-1:2000 οι τιμές του γ παίρνονται από τον πίνακα 2 όπου η μεγαλύτερη τιμή χρησιμοποιείται για δυσμενή επιρροή του G_k .

Πίνακας 2. Συντελεστές σπουδαιότητας των θερμοκηπιακών κατασκευών στην Ελλάδα.

Είδος φόρτισης	γ	SLS	ULS	Είδος φόρτισης	γ	SLS	ULS
Μόνιμα φορτία	γ_{G1}	1,0	1,2/1,0	Συγκεντρωμένα			
Μονίμως επιβαλλό-				κατακόρυφα φορτία	γ _{Q4}	-	1,2
μενα φορτία	γ_{G2}	1,0	1,2/1,0	Περιστασιακώς			
Φορτία ανέμου	γ _{Q1}	1,0	1,2	επιβαλλόμενα φορτία	Yq5	1,0	1,2
Φορτία χιονιού	Yq2	1,0	1,2	Φορτία σεισμού	γ_{AE}	-	0,8
Φορτία παραγωγής	Yq3	1,0	1,2	Θερμικά φορτία	YQ6	1,0	1,0

4.2. Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ Ψ

Χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη η μειωμένη πιθανότητα ταυτόχρονης συνύπαρξης των πλέον δυσμενών τιμών των διαφόρων ανεξάρτητων μεταβλητών δράσεων. Σύμφωνα με το παράρτημα Ε του prEN 13031-1:2000 οι τιμές του Ψ παίρνονται από τον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Συντελεστές συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων.

Συνδυασ	μοί φορτίσεων	a ₁	a ₂	a ₃	c ₁	d_1	d_2
Άνεμος	Ψ _{0Q1}		0,6/0,0	0,6/0,0			
Χιόνι	$\Psi_{0Q2} \eta \Psi_{2Q2}$	0,6/0,0		0,6/0,0			0,3
Παραγωγή	$\Psi_{0Q3} \acute{\eta} \Psi_{1Q3} \acute{\eta} \Psi_{2Q3}$	1,0/0,0	1,0/0,0		1,0/0,0	1,0/0,0	1,0/0,0
Περστ. Φορτ.	Ψ_{0Q5}				0,0		

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι φορτίσεις των θερμοκηπιακών κατασκευών αντιμετωπίζονται συστηματικά σύμφωνα με τους EC0 και EC1 και το τελικό σχέδιο prEN13031-1: 2000 της CEN/TC284.

Οι δυνάμεις τριβής λόγω του ανέμου εφαρμόζονται στο τμήμα των παράλληλων με τον άνεμο εξωτερικών επιφανειών που βρίσκονται πέραν μιας απόστασης από το προσήνεμο άκρο ίσης με τη μικρότερη τιμή από 2h και 2L/5 για τις όψεις και 2h και 2S/5 για τις πλευρές (όπου h x L x S = ύψος υδρορροής x μήκος θερμοκηπίου x πλάτος

θερμοκηπίου). Επειδή ο c_{fr}, συγκρινόμενος με τους c_{pe} και c_{pi}, είναι πάρα πολύ μικρός η πίεση λόγω τριβής μπορεί να παραλείπεται από τους υπολογισμούς.

Επειδή η πίεση λόγω λειτουργίας των ανεμιστήρων, συγκρινόμενη με την ανεμοπίεση είναι πολύ μικρή, είναι $w_{ven} \cong 1,15$ % w, μπορεί να παραλείπεται από τους υπολογισμούς.

Σύμφωνα με το prEN13031-1:2000 δεν προβλέπεται ταυτόχρονα με τη δράση σεισμού και δράση ανέμου ή χιονιού στα θερμοκήπια. Επειδή τα θερμοκήπια είναι ελαφρές κατασκευές, το μέγεθος των ισοδυνάμων οριζοντίων δυνάμεων για τον υπολογισμό του σεισμού είναι πολύ μικρότερο από το μέγεθος των οριζόντιων πλευρικών δυνάμεων λόγω ανεμοφόρτισης. Επομένως δεν χρειάζεται να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό.

Σύμφωνα με το prEN13031-1:2000 τα συμπτωματικά φορτία χιονιού στην Ελλάδα δεν λαμβάνονται υπόψη και επομένως και ο συνδυασμός φορτίσεων f, δεν εξετάζεται. Επίσης δεν προβλέπεται, να εξετάζεται στην Ελλάδα ο συνδυασμός φορτίσεων c₂.

Οι συνδυασμοί των δράσεων για τα διάφορα δομικά στοιχεία των θερμοκηπίων στην Ελλάδα που προκύπτουν ύστερα από τις παραπάνω απλοποιήσεις δίνονται στον πίνακα 4.

Επικάλυψη	
	$a_{1}) \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \psi_{0Q2}\gamma_{Q2}Q_{k2}$
a. $G_{k1} + Q_{k1} + Q_{k2}$	$a_2) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \psi_{0Q1}\gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}Q_{k2}$
	$a_{3}) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \psi_{0Q1}\gamma_{Q1}Q_{k1} + \psi_{0Q2} \ \gamma_{Q2}Q_{k2}$
b. $G_{k1} + \gamma_{Q1}Q_{k1}$	$b_1) \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{Q1}Q_{k1}$
Επιτεγίδες και τεγίδες	
	a_1) $\gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \psi_{0Q2}\gamma_{Q2}Q_{k2}$
a. $G_{k1} + Q_{k1} + Q_{k2}$	$a_{2}) \gamma_{G1}G_{k1} + \psi_{0Q1}\gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}Q_{k2}$
	$a_{3}) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \psi_{0Q1}\gamma_{Q1}Q_{k1} + \psi_{0Q2} \ \gamma_{Q2}Q_{k2}$
b. $G_{k1} + \gamma_{Q1}Q_{k1}$	$b_1) \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{Q1}Q_{k1}$
c. $G_{k1} + Q_{k4}$	$c_1) \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{Q4}Q_{k4}$
e. $G_{k1} + Q_{k6}$	e_1) γ _{G1} G_{k1} + γ _{Q6} Q_{k6} (Μόνο για θερμοκήπια τύπου Α)
Πλαίσια	
	a ₁) $\gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \psi_{0Q2}\gamma_{Q2}Q_{k2} + \psi_{0Q3}\gamma_{Q3}Q_{k3}$
a. $G_{k1}+G_{k2}+Q_{k1}+Q_{k2}+Q_{k3}$	$a_2) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \psi_{0Q1}\gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}Q_{k2} + \psi_{Q3}\gamma_{Q3}Q_{k3}$
	$a_{3}) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \psi_{0Q1}\gamma_{Q1}Q_{k1} + \psi_{0Q2}\gamma_{Q2}Q_{k2} + \gamma_{Q3}Q_{k3}$
b. $G_{k1} + \gamma_{Q1}Q_{k1}$	b_1) $\gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{Q1}Q_{k1}$
c. $G_{k1}+G_{k2}+Q_{k3}+Q_{k4}+Q_{k5}$	$c_{1}) \ \gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \psi_{0Q3}\gamma_{Q3}Q_{k3} + \gamma_{Q4}Q_{k4} + \psi_{0Q5}\gamma_{Q5}Q_{k5}$
e. $G_{k1} + G_{k2} + O_{k6}$	e_1) $\gamma_{G1}G_{k1} + \gamma_{G2}G_{k2} + \gamma_{O6}Q_{k6}$ (Μόνο για θερμοκήπια τύπου A)

Πίνακας 4. Οι συνδυασμοί των δράσεων των θερμοκηπιακών κατασκευών στην Ελλάδα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

EN 1990. Eurocode 0 – Basis of structural design, CEN, April 2002.

EN 1991.Eurocode 1: Actions on structures, General actions. Part 1-1: Densities, self-weight, imposed loads for buildings, CEN, April 2002, Part 1-3: Snow loads, CEN, July 2003, Part 1-4: Wind actions, CEN, April 2005, Part 1-5: Thermal actions, CEN, Nov. 2003.

prEN 13031-1. Greenhouses-Design and construction - Part 1:Commercial production Greenhouses, CEN/TC284, November 2000.

Θεοχάρης, Μ., 2000. Η εφαρμογή των Ευρωκώδικων στη μελέτη των Ελληνικών θερμοκηπίων, Μεταπτ. Διατρ., Τμ. Γεωπ. Φυτ. και Ζωικ. Παρ/γής Παν/μίου Θεσσαλίας, Βόλος, Μάρτ. 2000, σελ. 215.

Θεοχάρης, Μ., 2000. Η ανεμοφόρτιση των θερμοκηπιακών κατασκευών σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες, Πρακτ. 20υ Πανελλ. Συν. Γεωργ. Μηχαν., σελ. 406-414, Βόλος, Σεπτ. 2000.

Θεοχάρης, Μ., 2003. Η Χιονοφ,ορτιση των θερμοκηπιακών κατασκευών σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες, Πρακτ. 3ου Πανελλ. Συν. Γεωργ. Μηχαν., σελ.337-344, Θεσ/νίκη, Μαΐος 2003.

ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΓΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Ι. Λυκοσκούφης και Γ. Μαυρογιαννόπουλος

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών - Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής – Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, Τ.Κ. 11855, Αθήνα, τηλ. 210-5294008 ilycoskoufis@aua.gr, may.g@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία μελετάται η δυνατότητα αφύγρανσης του αέρα του θερμοκηπίου με την χρήση υγροσκοπικού υλικού (CaCl₂). Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε στο θερμοκήπιο ένα σύστημα αφύγρανσης που λειτουργούσε με υγροσκοπικό διάλυμα CaCl₂. Από τη δοκιμή του συστήματος βρέθηκε ότι η ικανότητα του στην απομάκρυνση υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου καθορίζεται από τη θερμοκρασία και την ειδική υγρασία του αέρα, από το ρυθμό ροής του αέρα μέσα από το σύστημα και από την συγκέντρωση του υγροσκοπικού διαλύματος. Η αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου με το δοκιμαζόμενο σύστημα μείωσε σημαντικά την σχετική υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου όπου η θερμοκρασία των φύλλων των φυτών ήταν πάντα υψηλότερη από το σημείο δρόσου του αέρα.

Λέξεις Κλειδιά: θερμοκήπιο, υγρασία, αφύγρανση, CaCl₂

GREENHOUSE DEHUMIDIFICATION BY A DESICCANT ABSORPTION SYSTEM

I. Lycoskoufis and G. Mavrogianopoulos

Laboratory of Agricultural construction – Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering – Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855, Athens, Greece ilycoskoufis@aua.gr, may.g@aua.gr

ABSTRACT

Aim of the study was the investigation of greenhouse dehumidification by a desiccant $(CaCl_2)$. For this purpose a dehumidification system was designed, constructed and tested in a greenhouse. $CaCl_2$ aqueous solution was used as desiccant. The results show that greenhouse air temperature, specific humidity, greenhouse air flow rate through the system and desiccant concentration have an important influence on the moisture removal rate by the system. Greenhouse dehumidification by the tested system reduced significantly the relative humidity of greenhouse air and leaf temperature was always higher than dew-point of greenhouse air.

Keywords: greenhouse, humidity, dehumidification, CaCl₂

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υγρασία αποτελεί ένα από τους καθοριστικούς παράγοντες του εναέριου περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Συνήθως τείνει να είναι υψηλή εξαιτίας της διαπνοής της καλλιέργειας. Οι συνθήκες υψηλής υγρασίας αποτελούν μια κατάσταση, η οποία είναι χαρακτηριστική των κλειστών θερμοκηπίων σε μέσες νυκτερινές καιρικές συνθήκες (Seginer and Kantz, 1989). Οι καλλιέργειες που εκτίθενται σε υψηλά επίπεδα υγρασίας αντιμετωπίζουν υψηλό κίνδυνο ανάπτυξης μυκητολογικών ασθενειών και φυσιολογικών ανωμαλιών (Hand, 1988, Bakker, 1984). Όταν οι αναπτυσσόμενες καλλιέργειες στο θερμοκήπιο είναι ευαίσθητες σε μυκητολογικές ασθένειες, οι καλλιεργητές επιδιώκουν να διατηρήσουν στα θερμοκήπια τους όχι μόνο κατάλληλη θερμοκρασία αλλά και ένα όχι πολύ υψηλό επίπεδο υγρασίας. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, στα συμβατικά θερμοκήπια, χρησιμοποιούνται η θέρμανση του αέρα και ταυτόχρονος εξαερισμός. Μέσω του ανοίγματος των παραθύρων, ο υγρός αέρας του θερμοκηπίου αντικαθίσταται από σχετικά ξηρό εξωτερικό αέρα. Αυτή η μέθοδος δεν καταναλώνει ενέργεια, την ημέρα, όταν υπάρχει στο θερμοκήπιο πλεονάζουσα θερμότητα και απαιτείται εξαερισμός για τη μείωση της θερμοκρασίας του. Όταν όμως, η απαίτηση για για τη μείωση της θερμοκρασίας είναι μικρότερη από τον απαιτούμενο εξαερισμό για την απομάκρυνση της υγρασίας, είναι προφανές ότι ο εξαερισμός από ενεργειακής άποψης αποτελεί σπατάλη ενέργειας, αφού ο υψηλής ενθαλπίας εσωτερικός αέρας αντικαθίσταται συνεχώς από χαμηλής ενθαλπίας εξωτερικό αέρα.

Όμως, το πρόβλημα της υψηλής υγρασίας δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με την παραπάνω μέθοδο σε θερμοκήπια που δεν διαθέτουν κάποιο σύστημα θέρμανσης. Ένα μεγάλο ποσοστό των ελληνικών θερμοκηπίων δεν διαθέτει κάποιο σύστημα θέρμανσης και έτσι, οι καλλιεργητές για να αποφύγουν τις φυτασθένειες, χρησιμοποιούν χημικά (φυτοφάρμακα) για τον περιορισμό και την αντιμετώπιση τους. Επιπλέον, στα μη θερμαινόμενα θερμοκήπια η μείωση της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσω της συμπύκνωσης υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος των θερμοκηπίων είναι μικρότερη από τα θερμαινόμενα, εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας στο θερμοκήπια εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας στο θερμοκήπια εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας στο θερμοκήπια εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμοκήπια εξωτερικού αέρα. Άρα, είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας ενεργητικής μεθόδου μείωσης της υγρασίας του αέρα μέσα στα θερμοκήπια αυτά.

Μία εναλλακτική μέθοδος μείωσης της υγρασίας του αέρα αποτελεί η απορρόφηση/προσρόφηση της υγρασίας από ένα στερεό ή ένα υγρό υγροσκοπικό υλικό. Τα υγροσκοπικά είναι υλικά που έχουν υψηλή συνάφεια με τους υδρατμούς (Jain and Bansal, 2007).

Η έρευνα σχετικά με την εφαρμογή της υγροσκοπικής αφύγρανσης του θερμοκηπίου είναι ελάχιστη (Campen et al., 2003). Οι Seginer and Kantz (1989) υπολογίζοντας την ισορροπία των υδρατμών για θερμοκήπιο με απλό ή διπλό κάλυμμα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σε μέσες καιρικές συνθήκες πλεονεκτούν από ενεργειακής άποψης οι αφυγραντές με υγροσκοπική απορρόφηση έναντι της ταυτόχρονης θέρμανσης και του εξαερισμού σε καλά μονωμένα θερμοκήπια. Οι Campen et al. (2003) χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο προσομοίωσης συγκρίνοντας διαφορετικές μεθόδους αφύγρανσης του αέρα του θερμοκηπίου κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υδροσκοπική αφύγρανση έχει το πλεονέκτημα ότι η λανθάνουσα θερμότητα άμεσα μετατρέπεται σε αισθητή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση του θερμοκηπίου. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει πειραματικά τη δυνατότητα αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου με τη χρήση υγρού υγροσκοπικού υλικού, διαλύματος CaCl₂.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα διενεργήθηκε σε δύο ίδια τοξωτά θερμοκήπια, 63 m² το καθένα, με κάλυμμα πολυαιθυλενίου, του εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, στα οποία αναπτύχθηκε καλλιέργεια αγγουριάς από τον Οκτώβριο του 2007 έως τον Απρίλιο του 2008 (δηλαδή κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου του έτους). Τα δύο θερμοκήπια δεν ήταν πλήρως θερμαινόμενα αλλά, υπήρχε προστασία των φυτών από τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό τους δεν αφέθηκε να πέσει κάτω από στους 8 °C, με δύο όμοια συνδεδεμένα αερόθερμα που λειτουργούσαν ταυτόχρονα. Το ένα θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε για να εφαρμοστεί η αφύγρανση του χώρου με διάλυμα CaCl₂, ενώ το άλλο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας η υγρασία του οποίου ήταν ανεξέλεγκτη. Η αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου πραγματοποιούταν κατά τη διάρκεια της νύχτας (κλειστά παράθυρα) και όταν η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου περνούσε το

Για την αύξηση της επιφάνειας επαφής και αλληλεπίδρασης του υγροσκοπικού διαλύματος με τον αέρα του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε αυλακωτό, άκαμπτο τοίχωμα από συμπιεσμένη κυτταρίνη και με σταθερή δομή. Το ύψος (H), το πλάτος (L) και το πάχος (Z) του τοιχώματος ήταν 0,4m, 0,6m και 0,1m, αντίστοιχα, ενώ η ειδική του επιφάνεια (A_d) ήταν 396 m²/m³. Το διάλυμα του CaCl₂ ήταν τοποθετημένο σε ένα πλαστικό δοχείο συνολικής χωρητικότητας 501 στο οποίο προσαρμόστηκε αλφαδολάστιχο για τον έλεγχο της στάθμης. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της στάθμης ως προς τον περιεχόμενο όγκο διαλύματος. Με την βοήθεια μιας μικρής αντλίας (50W) το διάλυμα του CaCl₂ διοχετευόταν στο πάνω μέρος του τοιχώματος, έρεε προς τα κάτω λόγω της βαρύτητας και επέστρεφε στο δοχείο μαζί με τους υδρατμούς που είχε απορροφήσει, ενώ ο αέρας του θερμοκηπίου με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα (100W) αναγκαζόταν να περάσει μέσα από το τοίχωμα και να αφήσει ένα μέρος της υγρασίας του. Η παροχή του διαλύματος στο τοίχωμα ήταν 4,5 l/min.To σύστημα δοκιμάστηκε για 24 νύχτες. Το προηγούμενο απόγευμα πριν κάθε δοκιμή στο δοχείο του CaCl₂ παρασκευαζόταν διάλυμα με συγκέντρωση 53-54%, με το οποίο λειτουργούσε το σύστημα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το επόμενο πρωί μετρούταν η στάθμη του διαλύματος και προσδιοριζόταν ο τελικός του όγκος καθώς επίσης και η πυκνότητα του διαλύματος (ρ_{sol}). Από την πυκνότητα του διαλύματος (ρ_{sol}) προσδιοριζόταν η συγκέντρωση του (ζ) από τη σγέση:

$$\xi = 1,012 * \rho_{sol} - 0,998, \quad R^2 = 0,9952$$
 (1)

Έτσι ως συγκέντρωση λειτουργίας θεωρείτο ο μέσος όρος της αρχικής και τελικής τιμής της συγκέντρωσης. Από τη συγκέντρωση του διαλύματος προσδιοριζόταν το ισοδύναμο ειδικής υγρασίας του διαλύματος κατά Conde (2004).

Ο ανεμιστήρας τροφοδοτούταν μέσω ενός inverter, το οποίο μπορούσε να ρυθμίζει την συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος άρα τη ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα. Χρησιμοποιήθηκαν 4 διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής και για κάθε μία μετρήθηκε η ταχύτητα με την οποία περνούσε ο αέρας του θερμοκηπίου από το τοίχωμα του $CaCl_2$ με τη βοήθεια ενός ανεμομέτρου θερμαινόμενου νήματος (Lutron, AM-4202).

Η θερμοκρασία αέρα ξηρού και υγρού βολβού πριν και μετά από το τοίχωμα του CaCl₂ καθώς και η θερμοκρασία του διαλύματος μετρούνταν με θερμοζεύγη χαλκούκονσταντάνης (0,2 mm). Η θερμοκρασία στο χώρο των δύο θερμοκηπίων και εξωτερικού περιβάλλοντος μετρούνταν με θερμοζεύγη χαλκού-κονσταντάνης (0,2 mm), τα οποία είχαν τοποθετηθεί μέσα σε αεριζόμενο κιτίο στο κέντρο του κάθε θερμοκηπίου και σε ύψος 1,5 m από το έδαφος. Στο ίδιο κιτίο είχαν τοποθετηθεί και αισθητήρες μέτρησης της σχετικής υγρασίας (Thermometriks, NA 1015). Η θερμοκρασία των φύλλων των φυτών μετρούταν με θερμοζεύγη χαλκού-κονσταντάνης (0,1 mm), τοποθετημένα στη κάτω επιφάνεια τους. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων καταγράφονταν σε καταγραφικό σύστημα (DL 2e, Delta-T Devices, England) κάθε λεπτό.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σε αφυγραντήρες κάθετων ροών, τα ρεύματα του αέρα και του υγρού υγροσκοπικού διαλύματος συναντώνται και στη συνέχεια ένα μέρος της υγρασίας του αέρα μεταφέρεται στην υγρή φάση. Συνεπώς, αφήνουν τον αφυγραντήρα με ξηρότερο τον αέρα και αραιωμένο το υγροσκοπικό διάλυμα. Η παραδοχή που χρησιμοποίειται στην παρακάτω ανάλυση είναι ότι η παροχή του διαλύματος δεν επηρεάζεται από την απορροφούμενη ποσότητα υδρατμών.

Η απόδοση μεταφοράς μάζας του αφυγραντήρα αποτιμάται με όρους ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών και με την αποτελεσματικότητα του αφυγραντήρα (Liu et al., 2006). Ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών, dm, υπολογίζεται από την εξίσωση (2). Η αποτελεσματικότητα του αφυγραντήρα, η, ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής αλλαγής στην ειδική υγρασία του αέρα περνώντας μέσα από τον αφυγραντήρα προς τη μέγιστη δυνατή διαφορά στην ειδική υγρασία του αέρα κάτω από ιδανικές συνθήκες, όπως δείχνει η εξίσωση (3).

$$dm = m_a(x_{\alpha 1} - x_{\alpha 2}) \quad (2)$$

$$\eta = \frac{(x_{a1} - x_{a2})}{(x_{a1} - x_{int})} \qquad (3)$$

Για έναν μονωμένο απορροφητή υγρασίας, η μέγιστη δυνατή διαφορά στην ειδική υγρασία του αέρα επιτυγχάνεται όταν ο αέρας που εγκαταλείπει τον αφυγραντήρα βρίσκεται στο ισοδύναμο ειδικής υγρασίας με το διάλυμα του αφυγραντικού. Το ισοδύναμο ειδικής υγρασίας του διαλύματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία του και την συγκέντρωση του. Όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση του και όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία του, τόσο περισσότερη υγρασία απορροφά.

Στην υγροσκοπική απορρόφηση των υδρατμών του αέρα του θερμοκηπίου, ο αέρας διέρχεται μέσα από το υγρό τοίχωμα του διαλύματος του CaCl₂, χάνει ένα μέρος της υγρασίας τους. Η λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών που απελευθερώνεται αυξάνει την θερμοκρασία του διαλύματος του CaCl₂ και του αέρα.

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (h_m) συνδέεται με το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (h_c) με τη σχέση (Mohan et al., 2008):

$$h_m = \frac{h_c}{C_p * Le} \qquad g \ m^{-2} s^{-1} \qquad (4)$$

Όπου C_p η ειδική θερμότητα του αέρα (J g⁻¹ K⁻¹) και Le ο αριθμός Lewis, ο οποίος συνηθίζεται να θεωρείται ίσος με τη μονάδα, όμως οι Babakhani et al. (2010) έδειξαν ότι στα συστήματα αφυγραντήρων με χρήση υγροσκοπικών διαλυμάτων ο αριθμός Lewis παίρνει τη τιμή 1,08. Έτσι, στους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας για τον αριθμό Lewis χρησιμοποιήθηκε η τιμή 1,08. Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας (h_c) προσδιορίζεται από την ταχύτητα του αέρα και τις καταστάσεις ροής.

Ο ρυθμός απορρόφησης υδρατμών (dm) από υγροσκοπικό διάλυμα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον συντελεστή μεταφοράς μάζας (h_m) και τη διαφορά της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου(x_{al}) από την ειδική υγρασία κοντά στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης (x_{int}) με τη σχέση:

$$dm = h_m * A_p * (x_{int} - x_{\alpha 1}) \tag{5}$$

Όπου A_p η διαβρεχόμενη από το διάλυμα επιφάνεια του τοιχώματος, που ισούται με το γινόμενο ειδικής επιφάνειας του τοιχώματος του αφυγραντήρα επί τον όγκο του $(A_{sp}*A_d*Z)$.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ -ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο διάγραμμα 1α παρουσιάζεται η επίδραση της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό σύστημα αφύγρανσης, όταν αυτό δούλευε με παροχή αέρα 0,3703 m³ s⁻¹ και συγκέντρωση διαλύματος 53-54%. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1α, ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το σύστημα αφύγρανσης αυξάνεται με την ειδική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου. Με την αύξηση της ειδικής υγρασίας του αέρα, η διαφορά πίεσης υδρατμών ανάμεσα στον αέρα και το υγροσκοπικό διάλυμα αυξάνεται επομένως, αυξάνεται και η διαφορά της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου(x_{α}) από την ειδική υγρασία κοντά στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης (x_{int}) με υγροσκοπικό διάλυμα, και έτσι αυξάνεται ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών.



Διάγραμμα 1. (α) Η επίδραση της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου και (β) Η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου, στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης.

Στο διάγραμμα 1β παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό σύστημα αφύγρανσης, όταν αυτό δούλευε με παροχή αέρα 0,3703 m³ s⁻¹ και συγκέντρωση διαλύματος 53-54%. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1β, ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το σύστημα αφύγρανσης αυξάνεται σημαντικά με την θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου. Σε προηγούμενες έρευνες αναφέρεται ότι ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το σύστημα αφύγρανσης αυξάνεται σημαντικά με την θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου. Σε προηγούμενες έρευνες αναφέρεται ότι ο ρυθμός απομάκρυνσης αυδαση της θερμοκρασίας είτε μειώνεται (Moon et al., 2009) είτε αυξάνεται ελαφρώς (Babkhani et al., 2010) είτε παραμένει αμετάβλητος (Liu et al., 2006) με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Στις εργασίες αυτές μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας του υγροσκοπικού διαλύματος. Στην παρούσα εργασία φερασία η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα μελετήθηκε με σταθερή σχετική υγρασία αέρα,

άρα με αυξανόμενη ειδική υγρασία, και θερμοκρασία υγροσκοπικού διαλύματος ίση την θερμοκρασία του αέρα. Επομένως, η αύξηση στον ρυθμό απορρόφησης υδρατμών με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα οφείλεται εν μέρει στην αυξανόμενη ειδική υγρασία του αέρα και εν μέρει στην αύξηση της διαφοράς πίεσης υδρατμών μεταξύ του αέρα και του υγροσκοπικού διαλύματος.

Στο διάγραμμα 2α παρουσιάζεται, η επίδραση του ρυθμού ροής του αέρα του θερμοκηπίου μέσα από το τοίχωμα του υγροσκοπικού διαλύματος, στο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό σύστημα αφύγρανσης, όταν αυτό δούλευε σε θερμοκρασία αέρα 15 °C, σχετική υγρασία 80% και με σταθερή συγκέντρωση CaCl₂ στο διάλυμα 54%. Ο ρυθμός απομάκρυνσης αυξάνεται γραμμικά με τη αύξηση της ροής του αέρα (μέχρι τη μέγιστη ταχύτητα που χρησιμοποιήθηκε). Ο υψηλότερος ρυθμός ροής του αέρα αυξάνει το συντελεστή μεταφοράς μάζας μεταξύ υγροσκοπικού διαλύματος και αέρα.



Διάγραμμα 2. (α) Η επίδραση της ροής του αέρα του θερμοκηπίου μέσα από τον αφυγραντήρα και (β) Η επίδραση της συγκέντρωση του διαλύματος, στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης.

Στο διάγραμμα 2β παρουσιάζεται, η επίδραση της συγκέντρωσης του CaCl₂ στο υγροσκοπικό διάλυμα, στο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό σύστημα αφύγρανσης, όταν αυτό δούλευε σε θερμοκρασία αέρα 10,1-11,4 °C, ειδική υγρασία 8,6-9,3 g kg⁻¹ και με παροχή αέρα 0,3703 m³ s⁻¹. Η πίεση υδρατμών του υγροσκοπικού διαλύματος μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωση, και αυξάνεται το δυναμικό μεταφοράς μάζας ανάμεσα στο υγροσκοπικό διάλυμα και την υγρασία του αέρα. Έτσι, ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του υγροσκοπικού διαλύματος.

Η μοναδική εργασία που έχει χρησιμοποιήσει υγροσκοπικό διάλυμα CaCl₂ σε αφυγραντήρα κάθετων ροών είναι του Moon et al. (2009), οι οποίοι πέτυχαν υψηλότερο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών δουλεύοντας όμως με υψηλότερη ειδική υγρασία και ροή υγροσκοπικού διαλύματος.

Στο διάγραμμα 3α παρουσιάζονται οι ποσότητες των υδρατμών που συλλέγονταν στο δοχείο του διαλύματος του CaCl₂ συγκριτικά με τις υπολογισθείσες ποσότητες από την εξίσωση (2) συναρτήσει των μετρήσεων ειδικής υγρασίας πριν και μετά το τοίχωμα του CaCl₂, της παροχής του αέρα και του χρόνου λειτουργίας. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 3α υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο μεθόδων προσδιορισμού της συνολικής ποσότητας των υδρατμών που απομακρύνονται από των αέρα του θερμοκηπίου.



Διάγραμμα 3. (α) Σχέση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των υπολογισθέντων μέσω της διαφοράς ειδικής υγρασίας, (β)Σχέση μεταξύ πειραματικών τιμών του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών με τις υπολογισθείσες από το συντελεστή μεταφοράς μάζας.

Στο διάγραμμα 3β παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες τιμές του ρυθμού απομάκρυνσης των υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου που προσδιορίστηκαν μέσω του συντελεστή μεταφοράς μάζας (h_m) από την εξίσωση (5) συγκριτικά με τις μετρούμενες ποσότητες στο δοχείο του διαλύματος του CaCl₂ δια του χρόνου λειτουργίας. Όπως φαίνεται από διάγραμμα 3β υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και των πειραματικών τιμών του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών. Η ασυμφωνία δε ξεπερνάει το 13%. Σε αντίστοιχες προηγούμενες εργασίες, όπου ως υγροσκοπικό διάλυμα χρησιμοποιήθηκε το LiBr, η ασυμφωνία κυμαινόταν από 12% (Babakhani et al., 2010) έως 20% (Liu et al., 2006).

Στο διάγραμμα 4α παρουσιάζεται η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας μέσα στο 24ωρο τόσο στο θερμοκήπιο στο οποίο εφαρμόστηκε αφύγρανση κατά την διάρκεια της νύχτας όσο και στο θερμοκήπιο στο οποίο η υγρασία ήταν ανεξέλεγκτη.



Διάγραμμα 4. (α) Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας μέσα στο 24ωρο στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση και σε αυτό που έγινε αφύγρανση με το δοκιμαζόμενο σύστημα, (β) η θερμοκρασία του σημείου δρόσου και η θερμοκρασία των φύλλων των φυτών στα παραπάνω θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας.

Ενώ, στο διάγραμμα 4β παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου (T_d) στα δύο θερμοκήπια καθώς και η θερμοκρασία των φύλλων της καλλιέργειας (T_l), κατά την διάρκεια λειτουργίας της αφύγρανσης με το δοκιμαζόμενο

σύστημα. Από το διάγραμμα 4α φαίνεται καθαρά η σημαντική μείωση στη σχετική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου, που προκάλεσε η λειτουργία του δοκιμαζόμενου συστήματος αφύγρανσης. Ο περιορισμός της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο είχε ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία των φύλλων των φυτών να διατηρείται υψηλότερα από το σημείο δρόσου (Διάγραμμα 4β), γεγονός που αποκλείει την συμπύκνωση υδρατμών πάνω στα φυτά. Αντίθετα, στο θερμοκήπιο, όπου η υγρασία ήταν ανεξέλεγκτη, η θερμοκρασία των φύλλων ήταν μικρότερη από το σημείο δρόσου του αέρα (Διάγραμμα 4β), γεγονός που στημείο δρόσου του αέρα συμπύκνωση υδρατμών πάνω στην καλλιέργεια δυνατή.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σύστημα υγροσκοπικής απομάκρυνσης των υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου σε θερμοκρασία 15 °C και σχετική υγρασία 80% παρουσίασε ένα ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών της τάξεως 984 g h⁻¹ (ή 4100 g m⁻² h⁻¹). Οι υπολογισμοί πρόβλεψης του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών παρουσίασαν καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Η εφαρμογή της αφύγρανσης του αέρα του θερμοκηπίου με το δοκιμαζόμενο σύστημα μείωσε τη σχετική υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου σε βαθμό τέτοιο που να καθιστά τη συμπύκνωση υδρατμών πάνω στα φυτά αδύνατη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Babakhani, D, Soleymani, M. and Moheb, A. 2010. *Heat and mass transfer between air and liquid desiccant in cross-flow contact systems*. Chemical and Engineering Technology, 33(2): 281-291.
- Bakker, J.C. 1984. *Physiological disorders in cucumber under high humidity conditions* and low ventilation rates in greenhouses. Acta Hort. 156: 257-264.
- Campen, J.B., Bot, G.P.A. and de Zwart H. F. 2003. Dehumidification of greenhouses at Northern latitudes. *Biosystems Engineering* 86 (4): 487-493.
- Conde, M.R. 2004. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design. International Journal of Thermal Sciences, 43: 367-382.
- Hand, D.W. 1988. *Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops*. Acta Horticulturae, 229: 143-158.
- Jain, S. and Bansal P.K. 2007. *Performance analysis of liquid desiccant dehumidification systems*. International Journal of Refrigeration, 30: 861-872.
- Jolliet, O. 1994. *Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses.* Journal of Agricult. Engineering Research, 57: 23-37.
- Liu, X.H., Zhang, Y., Qu, K.Y. and Jiang Y. 2006. *Experimmental Study on mass transfer performances of cross flow dehumidifier using liquid desiccant*. Energy Conversion and Management, 47: 2682-2692.
- Mohan, B.S., Maiya, M.P. and Tiwari, S. 2008. *Performance of liquid desiccant columns for a hybrid air-condioner*. Applied Thermal Engineering, 28: 1342-1355.
- Moon, C.G., Bansal, P.K. and Jain, S. 2009. New mass transfer performance data of a cross-flow liquid desiccant dehumidification system. International Journal of Refrigeration, 32: 524-533.
- Seginer, I., Kantz, D., 1989. Night-time use of dehumidifiers in greenhouses: an analysis. Journal of Agricultural Engineering Research, 44: 141-158.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΤΗΣ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ, ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ, ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ b

Γ. Μάρκου¹, Μ. Δρούγα¹, Δ. Γεωργακάκης¹

¹Τομέας Αγροτικών Κατασκευών και Γεωργικής Μηχανολογίας, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γ. Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 11855 Αθήνα, <u>markoug@aua.gr</u>, <u>mardrouga@yahoo.gr</u>, <u>digeo@aua.gr</u>

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή αξιοποιήθηκε μεγάλος αριθμός τιμών του δείκτη b (b-value ή buffer index), που προέκυψε από στατιστική επεξεργασία δεδομένων τιτλοδότησης του περιεχομένου αναερόβιων χωνευτήρων με ισχυρό οξύ και βάση, κατά την τελευταία 10ετία, στη διάρκεια πειραμάτων παραγωγής βιοαερίου στο Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α. Αποτέλεσμα της μακρόχρονης αυτής ερευνητικής προσπάθειας υπήρξε η διαμόρφωση συγκεκριμένων προβλέψεων, βασισμένων στην παρατήρηση των μεταβολών των διαγραμμάτων του ως άνω δείκτη, σε σχέση με το pH, οι οποίες επιτρέπουν την έγκαιρη διαπίστωση της πορείας σταθερότητας της αναερόβιας χώνευσης. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο δείκτης b είναι πιο ευαίσθητη παράμετρος ελέγχου της αναερόβιας χώνευσης από το pH.

Λέξεις κλειδιά: δείκτης b, σταθερότητα αναερόβιας χώνευσης, βιοαέριο, μεθάνιο

ANAEROBIC PROCESS CONTROL, DURING BIOGAS PRODUCTION, WITH THE AID OF b-VALUE DIAGRAMS

G. Markou¹, M. Drouga¹ and D. Georgakakis¹

¹Department of Land Reclamation and Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, 11855 Athens, Greece <u>markoug@aua.gr</u>, <u>mardrouga@yahoo.gr</u>, <u>digeo@aua.gr</u>

ABSTRACT

In this work, numerous b-values (or buffer index), an output of statistical analysis of titration data of anaerobic digesters content with strong acid and base, have been used to express the anaerobic process status. These data were available in the Lab of Agricultural Structures of A.U.A. from experiments on biogas production during the last decade. The result of this prolonged research work was the standardization of specific forecasts for the anaerobic digestion stability status based on observations of b-value diagrams changes and pH. These forecasts allow for early indications about anaerobic digestion process evolution. According to the results obtained, b-values seem to be a more sensitive parameter than pH, in monitoring anaerobic digestion process.

Key words: b-value, anaerobic digestion stability, biogas, methane

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σταθερότητα της αναερόβιας χώνευσης κατά την παραγωγή βιοαερίου διατηρείται με την βοήθεια ασθενών βάσεων και οξέων, που δρουν ως ρυθμιστικές ουσίες αντιστεκόμενες στις απότομες και εκτός ορίων μεταβολές του pH. Κατά κανόνα, η τάση που αναπτύσσεται μέσα σε ένα αναερόβιο χωνευτήρα είναι η ελάττωση των τιμών του pH, λόγω της συνεχούς παραγωγής πτητικών λιπαρών οξέων, κυρίως οξικού (HAc) από τους οξεοπαραγωγούς μικροοργανισμούς.

Τα πτητικά λιπαρά οξέα μειώνουν το ρυθμιστικό δυναμικό του διττανθρακικού ιόντος (HCO₃⁻), ενώ η παρουσία αμμωνίας (NH₃) το ενισχύει αποδεσμεύοντας διττανθρακικά ιόντα αντιδρώντας με τα οξέα:

HAc + NH₄HCO₃ \leftrightarrow NH₄Ac + HCO₃⁻ + H⁺ $\kappa \alpha \iota$ NH₃ + H₂O \leftrightarrow NH₄⁺ + OH⁻

Οι φυσικές αυτές ρυθμιστικές ουσίες με κατάλληλη αυξομείωση του βαθμού διάστασής τους κατορθώνουν να διατηρούν την τιμή του pH σταθερή μέσα στο ανεκτό για τους μικροοργανισμούς εύρος τιμών 6,6 - 7,6 (McCarty, 1964). Αν ο ρυθμός παραγωγής πτητικών λιπαρών οξέων είναι μεγαλύτερος του ρυθμού διάσπασής τους από τα μεθανοβακτήρια και του ρυθμού δέσμευσής τους από τις προαναφερθείσες ρυθμιστικές ουσίες, τότε διασαλεύεται σοβαρά η χημική ισορροπία και αρχίζει η αποσταθεροποίηση, προσωρινή ή μόνιμη, της αναερόβιας χώνευσης η οποία χαρακτηρίζεται από πτωτική πορεία του pH. Η τελευταία μπορεί να φτάσει μέχρι και πλήρους διακοπής της παραγωγής βιοαερίου, αν δεν παρθούν έγκαιρα τα κατάλληλα μέτρα.

Με άλλα λόγια η αναερόβια χώνευση είναι μια πολύπλοκη και δυναμική διεργασία που καθιστά την παρακολούθησή της αναγκαία για την αποφυγή δυσάρεστων καταστάσεων. Για την παρακολούθησή της υπάρχουν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες καταγράφονται και παρακολουθούνται διάφορες παράμετροι όπως τα πτητικά λιπαρά οξέα (Boe et al. 2007), το διαλυμένο υδρογόνο (Björnsson et al. 2001), η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (Liu et al. 2004), η παραγωγή CH₄ και CO₂ (Ehlinger et al., 1994) και η διτττανθρακική αλκαλικότητα (Rozzi et al., 1994). Οι περισσότερες από τις παραπάνω μεθόδους είναι χρονοβόρες και προϋποθέτουν ακριβό και εξειδικευμένο εξοπλισμό. Η παρακολούθηση της λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής βιοαερίου, μέσω τιτλοδότησης, ιδιαίτερα όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα εξειδικευμένου προσωπικού και εξοπλισμού, είναι η πιο κατάλληλη γιατί είναι γρήγορη, φτινή και απλή (Lahav and Morgan, 2004).

Ο δείκτης b εκφράζει την ένταση της ρυθμιστικής ικανότητας ενός διαλύματος ή αλλιώς την 'αντίστασή' του τελευταίου στη μεταβολή του pH κατά μια μονάδα και παίρνει διαφορετικές τιμές στην κλίμακα του pH (0-14). Ο δείκτης b ορίζεται ως η ποσότητα ισχυρού οξέος ή βάσης, που απαιτείται για μεταβολή της τιμής του pH κατά μία μονάδα. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η ποσότητα, τόσο ισχυρότερο είναι το ρυθμιστικό διάλυμα και τόσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης b. Μαθηματικά, ο δείκτης b ορίζεται ως η πρώτη παράγωγος της καμπύλης τιτλοδότησης του ρυθμιστικού διαλύματος με ισχυρό οξύ και βάση (Buttler, 1964):

$$b = \frac{dC_b}{dpH} = -\frac{dC_a}{dpH} \tag{1}$$

Η προσθήκη dC_b γραμμομορίων (moles) μιας ισχυρής βάσης ή dC_a ενός ισχυρού οξέως σε ένα λίτρο ρυθμιστικού διαλύματος αυξάνει ή μειώνει το pH του αντίστοιχα. Επειδή η προσθήκη ενός ισχυρού οξέος παράγει ακριβώς το αντίθετο αποτέλεσμα με εκείνο της ισχυρής βάσης, δικαιολογεί τη χρήση του αρνητικού προσήμου στη σχέση (1). Οπωσδήποτε όμως ο δείκτης b είναι, σε κάθε περίπτωση, θετικός αριθμός, όπως πρωτοανέφερε ο Van Slyke (1922).

Σε πρακτικό επίπεδο, οι τιμές του δείκτη b δίνονται από την πρώτη παράγωγο της πολυωνυμικής σχέσης 4^{ου} βαθμού, ως προς το pH, που προκύπτει μετά από στατιστική επεξεργασία των δεδομένων τιτλοδότησης με ισχυρό οξύ και βάση δείγματος υγρού περιεχομένου ενός αναερόβιου χωνευτήρα (Georgacakis et al, 1982).

Οι Georgacakis et al. (1982) δημοσίευσαν διαγράμματα των τιμών του δείκτη b του υγρού περιεχομένου αναερόβιων χωνευτήρων παραγωγής βιοαερίου, σε σχέση με το pH, για το εύρος τιμών του τελευταίου (από 4,3 μέχρι 9,5). Οι τιμές του δείκτη b παρουσιάζονται με έντονες διακυμάνσεις κατά μήκος της ως άνω κλίμακας και συνεπώς αντίστοιχη είναι και η μεταβολή της 'αντίστασης' του διαλύματος των αποβλήτων στις διάφορες τιμές pH της ως άνω κλίμακας.

Οι μεταβολές των τιμών του δείκτη b οφείλονται στις μεταβολές της χημικής ισορροπίας μεταξύ των διαφόρων συστατικών του διαλύματος, η οποία διαμορφώνει την εκάστοτε τιμή του pH του. Οι ενώσεις που συνδιαμορφώνουν την αντίσταση ενός διαλύματος σε αλλαγές του pH και κατ' επέκταση τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη b είναι τα ασθενή οξέα και οι βάσεις που συνυπάρχουν σ' αυτό. Οι ενώσεις αυτές εμφανίζουν το μέγιστο της 'αντίστασής' τους (μέγιστο τιμής δείκτη b) στο pH = pK στο οποίο η κάθε μια διίσταται κατά 50%. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι τιμές pH = pK (35°C) για τις κύριες φυσικές ρυθμιστικές ουσίες, που βρίσκονται στα υγρά των αναερόβιων χωνευτήρων (Georgacakis, 1979).

αναεροριούς χωνευτήρες (van Siyke, 192	2° McCarty et al, 1967)
Ρυθμιστική Ουσία (buffer)	pH = pK
Ιόντα υδρογόνου (Η ⁺)	<2,0
Πτητικά λιπαρά οξέα (οξικό οξύ)	4,76-4,88 (4,76)
Διττανθρακικά ιόντα (HCO3)	6,4
Αμμωνία (NH3)	9,3
Ανθρακικά ιόντα (CO ₃ ²⁻)	10,3
Ιόντα υδροξυλίου (ΟΗ΄)	>11,0

Πίνακας 1. Τιμές pH = pK (35° C) για τις κύριες ρυθμιστικές ουσίες στους αναερόβιους γωγευτήρες (Van Slyke, 1922: McCarty et al. 1967)

Το μέγιστο της 'αντίστασής' του δείκτη b κάθε μεμονωμένου ασθενούς οξέως ή βάσης, εμφανίζεται στο διάγραμμα ως κορυφή στην τιμή αυτή του pH. Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται διαδοχικά οι μεμονωμένες καμπύλες του δείκτη b, με τα μέγιστά τους, σε όλο το εύρος των τιμών pH των κυριότερων ασθενών οξέων και βάσεων, που εμφανίζονται φυσιολογικά στο υγρό περιεχόμενο των αναερόβιων χωνευτήρων (Georgacakis, 1979[.] Moosburger et al., 1992).

Από το Σχήμα 1 προκύπτει πως το προαναφερθέν εύρος τιμών pH για την παραγωγή βιοαερίου μεταξύ 6,6 και 7,6 περικλείεται μεταξύ των κορυφών των διαγραμμάτων του δείκτη b των διττανθρακικών ιόντων (HCO₃⁻) στο pH = 6,4 και της αμμωνίας (NH₃), στο pH = 9,3. Το διττανθρακικά ιόντα και η αμμωνία φαίνεται λοιπόν να 'εγκλωβίζουν' το pH του διαλύματος σε μια περιοχή ελάχιστων τιμών δείκτη b άρα και ελάχιστης 'αντίστασης' στην μεταβολή του και να το 'προστατεύουν' με δύο συνεχώς αυξανόμενης αντίστασης καμπύλες εκατέρωθεν.

Αυτό μπορεί να εξομοιωθεί ωσάν το pH να ήταν μια μπίλια, που ασφαλώς θα ισορροπούσε, λόγω της βαρύτητας στο χαμηλότερο σημείο της καμπύλης του δείκτη b (Σχήμα 1).

Ως εκ τούτου, η παρουσία διττανθρακικών ιόντων και αμμωνίας στο υγρό περιεχόμενο ενός αναερόβιου χωνευτήρα αποδεικνύεται απαραίτητη για την σταθερότητα του pH και κατ' επέκταση της αναερόβιας χώνευσης. Η παρουσία όμως της αμμωνίας παρά την αδιαμφισβήτητη συμβολή της στην σταθερότητα της αναερόβιας χώνευσης επιβραδύνει ή αναστέλλει την δράση των μικροοργανισμών με αποτέλεσμα την σταθερή, αλλά μειωμένη παραγωγή βιοαερίου (Γεωργακάκης, 2011). Απόβλητα λοιπόν με μεγάλη περιεκτικότητα σε αμμωνία, όπως είναι κατ'εξοχήν τα πτηνο-κτηνοτροφικά, παράγουν πολύ σταθερά βιοαέριο, αλλά με σχετικά μικρούς ρυθμούς. Γι' αυτό τα απόβλητα αυτά χρησιμοποιούνται ως βάση για την παραγωγή βιοαερίου, σε ρόλο κυρίως σταθεροποιητικό της αναερόβιας χώνευσης, αναμιγνυόμενα με άλλα απόβλητα ή υποπροϊόντα πλούσια σε βιοαποικοδομήσιμο οργανικό άνθρακα, π.χ. τυρόγαλα.



Σχήμα 1. Τυπικές καμπύλες τιμών του δείκτη b σε όλη την κλίμακα του pH (Georgacakis, 1979)

Η ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της ογκομετρικής οργανικής φόρτισης με παράλληλη όμως μείωση του επιπέδου σταθερότητας της αναερόβιας χώνευσης, λόγω της βαθμιαίας εξουδετέρωσης της 'αντίστασης', που οφείλεται στα διττανθρακικά ιόντα. Το αποτέλεσμα είναι το pH να 'κυλάει' όλο και πιο εύκολα προς απαγορευτικά για την αναερόβια χώνευση επίπεδα (pH κάτω από 6,5).

Η βαθμιαία αυτή αποσταθεροποίηση της τιμής του pH σε ένα αναερόβιο χωνευτήρα, που μπορεί να εμφανιστεί στην πράξη, λόγω της αυξανόμενης παραγωγής πτητικών λιπαρών οξέων, κυρίως οξικού οξέως, εμφανίζεται σ' ένα διάγραμμα δείκτη b με μείωση ή πλήρη εξαφάνιση της 'κορυφής' της καμπύλης των διττανθρακικών ιόντων και εμφάνιση της επόμενης 'κορυφής' αντίστασης στην πτώση του pH, της 'κορυφής' του οξικού οξέως στο pH 4,7. Σε μια τέτοια περίπτωση, το διάγραμμα b διευρύνεται και 'διευκολύνει' έτσι την 'κύλιση' του pH προς χαμηλότερες τιμές, όπως θα έκανε μια κυλιόμενη σφαίρα, λόγω της βαρύτητας.

Η συστηματική λοιπόν συγκριτική αξιολόγηση διαγραμμάτων του δείκτη b του υγρού περιεχομένου ενός αναερόβιου χωνευτήρα, σε βάθος χρόνου, σε συνδυασμό με την τρέχουσα τιμή pH του τελευταίου, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο παρακολούθησης - πρόβλεψης της πορείας της αναερόβιας χώνευσης και λήψης έγκαιρα των απαραίτητων μέτρων προστασίας της πριν είναι πολύ αργά (έναρξη έντονης πτώσης του pH).

Στην παρούσα εργασία επιδιώκεται μετά από λεπτομερή παρατήρηση και μελέτη σημαντικού αριθμού διαγραμμάτων του δείκτη b, τα οποία προέκυψαν από τιτλοδοτήσεις του περιεχομένου πειραματικών εγκαταστάσεων παραγωγής βιοαερίου του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α., η διαμόρφωση ενός 'σεναρίου' για την πρόβλεψη της πορείας της αναερόβιας χώνευσης παραγωγής βιοαερίου, ανάλογα με τις διαμορφούμενες τιμές του ως άνω δείκτη.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν μεγάλος αριθμός (πάνω από 100) τιμών παλαιών και νέων τιτλοδοτήσεων του περιεχομένου αναερόβιων χωνευτήρων, που συγκεντρώθηκαν σταδιακά κατά τα διάφορα πειράματα παραγωγής βιοαερίου στις εργαστηριακές εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α. από το 1982 μέχρι σήμερα.

Οι εγκαταστάσεις αποτελούνταν από 4-6 θερμαινόμενους αναερόβιους χωνευτήρες, ωφέλιμης χωρητικότητας 21,0-25,6 λίτρων ο καθένας. Οι χωνευτήρες διατηρούνταν στους 32-38°C και τροφοδοτούνταν, ανά 24 ή 48 ώρες, με την ανάλογη ποσότητα υλικού για διατήρηση του επιθυμητού χρόνου παραμονής των υγρών.

Για τη συλλογή των δεδομένων διενεργούνταν διπλές τιτλοδοτήσεις του υγρού περιεχομένου των αναερόβιων χωνευτήρων, μια με θειϊκό οξύ (0,5N) και μια με υδροξείδιο του νατρίου (0,5N) σε δείγματα των 25 ml το καθένα. Η στατιστική επεξεργασία αφορούσε στη συσχέτιση των τιμών του δείκτη b με το pH (καμπύλη τιτλοδότησης) με εφαρμογή regression analysis πολυώνυμου 4^{ου} βαθμού και στη συνέχεια υπολογισμός και γραφική απεικόνιση των τιμών του δείκτη b, εκφρασμένων σε meq/L-pH, (πρώτη παράγωγος της πολυωνυμικής σχέσης της καμπύλης τιτλοδότησης) για το επιθυμητό εύρος τιμών pH (4,3-9,5).

Στην παρούσα εργασία, για εξοικονόμηση χώρου, παρατίθενται ορισμένα μόνο αντιπροσωπευτικά διαγράμματα του δείκτη b, μεταξύ των οποίων, ένα διάγραμμα με δύο καμπύλες από δύο τιτλοδοτήσεις σε βάθος χρόνου ενός αναερόβιου χωνευτήρα κανονικού μεγέθους, χωρητικότητας 3.000 m³, που λειτουργεί για πρώτη φορά στη χώρα μας σε χοιροστάσιο κοντά στη Βέροια, στο οποίο αναμιγνύονται τυρόγαλα και άλλα υποπροϊόντα με τα χοιροτροφικά απόβλητα. Τα υπόλοιπα διαγράμματα αφορούν πειραματικές εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου με χοιροτροφικά απόβλητα, μόνα ή μετά την ανάμιξή τους με τυρόγαλα.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μετά από συσχέτιση της κατάστασης λειτουργίας διαφόρων πειραματικών αναερόβιων χωνευτήρων και των αντίστοιχων διαγραμμάτων του δεικτη b προέκυψε πως εμφανίζονται τελικά δύο κυρίαρχες μορφές καμπύλων του δείκτη b.

Η πρώτη εμφανίζεται στο Σχήμα 2 και είναι μια καθαρά σιγμοειδής καμπύλη με τη ζώνη ελάχιστων τιμών του δείκτη b μεταξύ των τιμών pH 8 και 9 και μέγιστη τιμή

('κορυφή' της καμπύλης) στην τιμή pH κοντά στο 6, όπου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 και το Σχήμα 1, εμφανίζουν την μέγιστή τους αντίσταση τα διττανθρακικά ιόντα. Αυτή είναι η περίπτωση, όπου ο αναερόβιος χωνευτήρας λειτουργεί άψογα και εμφανίζει την μεγαλύτερη σταθερότητα στην παραγωγή βιοαερίου. Αφορά κατά κανόνα αναερόβιους χωνευτήρες υγρών πτηνο-κτηνοτροφικών αποβλήτων, όπου η αυξημένη παρουσία αμμωνιακού αζώτου αντιδρά με τα οργανικά οξέα και επιτρέπει την αποδέσμευση διττανθρακικών ιόντων που διατηρούν το pH σε ασφαλείς τιμές, πάνω από 6,5.

Στην κατηγορία αυτή των σταθερών αναερόβιων χωνευτήρων μπορούν να υπάρξουν και διαβαθμίσεις σταθερότητας, όπως π.χ. εξαιρετικά σταθερός μπορεί να θεωρηθεί ένας αναερόβιος χωνευτήρας με λόγο pH_{πραγμ}/pH_{min} >1 και μέγιστη τιμή δείκτη b ('κορυφή' καμπύλης) π.χ. πάνω από 200 meq/L-pH. Τιμές λόγου ίσες ή μικρότερες της μονάδος και χαμηλότερες μέγιστες τιμές δείκτη b υποδηλώνουν μικρότερο επίπεδο σταθερότητας, αλλά χωρίς άμεσο κίνδυνο για την ομαλή πορεία της αναερόβιας χώνευσης.

Αυτό γίνεται φανερό στο Σχήμα 2, όπου παρατίθενται οι καμπύλες του δείκτη b τριών τιτλοδοτήσεων, μέσα σε μια εβδομάδα, του υγρού περιεχομένου ενός πειραματικού αναερόβιου χωνευτήρα τροφοδοτούμενου μόνο με υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με μέσο $pH_{\pi\rho\alpha\gamma\mu} = 8,94$, έναντι μέσου $pH_{min} = 8,54$.



Σχήμα 2. Καμπύλες του δείκτη b αναερόβιου χωνευτήρα με απόβλητα χοιροστασίου εξαιρετικής σταθερότητας λειτουργίας (Βλαχοθανάσης, 2011)

Η δεύτερη κυρίαρχη μορφή καμπύλης τιμών του δείκτη b εμφανίζεται στο Σχήμα 3. Είναι ανοιχτές κοίλου τύπου καμπύλες, πλην της πρώτης που αναφέρεται μόνο σε απόβλητα χοιροστασίου (σιγμοειδής καμπύλη σταθερότητας του τύπου του Σχήματος 2). Σταδιακή προσθήκη τυρογάλακτος στον αναερόβιο χωνευτήρα μετέτρεψε την αρχική σιγμοειδή καμπύλη σταθερότητας σε καμπύλες κοίλης μορφής χωρίς μέγιστη ('κορυφή') τιμή δείκτη b και εμφανή 'διολίσθηση' της ζώνης ελάχιστων τιμών του δείκτη προς τιμές pH 6,5-8,0. Παράλληλα η καμπύλη του δείκτη b τείνει να κορυφωθεί αριστερότερα κοντά στην τιμή pH 4,7, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη αντίσταση του οξικού οξέως, αφού έχει εν τω μεταξύ 'εξουδετερωθεί' η αντίσταση των διττανθρακικών ιόντων (τιμή pH 6,4).

Στην περίπτωση αυτή μπορεί να λεχτεί πως ο αναερόβιος χωνευτήρας έχει μπει πλέον και λειτουργεί σε μια μεταβατική ζώνη ή ζώνη ασταθούς λειτουργίας γιατί εύκολα μπορεί να περάσει, είτε στη ζώνη σταθερής λειτουργίας, π.χ. μετά από διορθωτική επέμβαση στην τροφοδοσία του, είτε στην απαγορευτική ζώνη λειτουργίας (pH < 6,5) και να καταρρεύσει.

Από τη φάση αυτή περνάνε επίσης και όλοι οι αναερόβιοι χωνευτήρες στο ξεκίνημα της λειτουργίας τους και μάλιστα πολλοί από αυτούς ισορροπούν τελικά μέσα σε αυτήν, χωρίς πρόβλημα στην παραγωγή βιοαερίου. Απαιτούν όμως ιδιαίτερη προσοχή και εγρήγορση, κατά την λειτουργία τους.



Σχήμα 3. Καμπύλες του δείκτη b πειραματικού αναερόβιου χωνευτήρα μίγματος αποβλήτων χοιροστασίου και τυρογάλακτος στη μεταβατική ζώνη ή ζώνη ασταθούς λειτουργίας (Βλαχοθανάσης, 2011)



Σχήμα 4. Διαδοχικές καμπύλες δείκτη b σε αναερόβιο χωνευτήρα παραγωγής βιοαερίου, που λειτουργεί σε μεγάλο χοιροστάσιο της Βέροιας

Οι διαβαθμίσεις σταθερότητας της προηγούμενης φάσης ισχύουν και εδώ και μάλιστα έχουν μεγαλύτερο 'βάρος', λόγω του πιο 'ευαίσθητου' της φάσης αυτής, όπου το $pH_{\pi\rho\alpha\gamma\mu}$ κυμάνθηκε από 6,13-7,88 και το pH_{min} από 7,28-8,25.

Στο Σχήμα 4 φαίνεται το παράδειγμα του αναερόβιου χωνευτήρα των 3.000 m³ σε χοιροστάσιο της Βέροιας τροφοδοτούμενος με μίγματα αποβλήτων χοιροστασίου, τυρογάλακτος και άλλων υπολειμμάτων. Η χρονική αλληλουχία των διαγραμμάτων του δείκτη b εμφανίζει τάση αποσταθεροποίησης. Οι τιτλοδοτήσεις του Απριλίου

2011 και Σεπτεμβρίου 2011, συγκριτικά με την αρχική σιγμοειδή καμπύλη σταθερής λειτουργίας του Νοεμβρίου 2010 και pH_{πραγμ} = pH_{min}, δείχνουν μια βραδεία, αλλά σαφή μεταστροφή της προς τις ανοιχτού τύπου κοίλες καμπύλες μεταβατικής ή ασταθούς ζώνης λειτουργίας και σχέση pH_{πραγμ}/pH_{min} <1 και με τελική κατάληξη την κατάρρευση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης. Αυτό σημαίνει πως η τάση αυτή του χωνευτήρα θα έπρεπε να είχε ανακοπεί ήδη από τον Απρίλιο του 2011, όπου φάνηκε αυτή η τάση, με την λήψη άμεσων μέτρων.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή είναι πως οι διενέργεια τιτλοδοτήσεων ρουτίνας, συστηματικά και σε βάθος χρόνου, καθώς και η σύνταξη διαγραμμάτων του δείκτη b για ένα αναερόβιο χωνευτήρα, εκτός του ότι δείχνουν την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας του, επιτρέπουν επί πλέον και την εκτίμηση της πορείας της αναερόβιας χώνευσης, ώστε να ληφθούν έγκαιρα τα απαραίτητα διορθωτικά μέτρα, αν χρειαστεί.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές αναφορές στην χρήση τιτλοδότησης για την παρακολούθηση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης (Lahav and Morgan, 2004). Σε όλες, με τον έναν ή άλλον τρόπο, μετά την τιτλοδότηση, γίνεται υπολογισμός των συγκεντρώσεων των διαφόρων ασθενών βάσεων και οξέων. Ο υπολογισμός τους όμως γίνεται με τη βοήθεια πολύπλοκων αλγορίθμων σε συνδυασμό με αναλύσεις ή/και μετρήσεις διάφορων άλλων παραμέτρων, που προϋποθέτουν εξειδικευμένο επιπρόσθετο αναλυτικό εξοπλισμό και λογισμικά προγράμματα (Moosbrugger et al., 1993a[.] 1993b[.] Lahav et al., 2002[.] Lahav and Morgan, 2004). Αντίθετα, στην παρούσα εργασία γίνεται σαφές, πως ο δείκτης b μπορεί να αποδειχτεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για απλή και γρήγορη απεικόνιση και έλεγχο της κατάστασης των αναερόβιων χωνευτήρων παραγωγής βιοαερίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Björnsson, L., Hörnsten, E.G., Mattiasson, B., 2001. Utilization of a palladium-metal oxide semiconductor (Pd-MOS) sensor for on-line monitoring of dissolved hydrogen in anaerobic digestion. Biotechnology and Bioengineering 73(1):35-43.
- Boe, K., Batstone, D.J., Angelidaki, I., 2007. An innovative online VFA monitoring system for the anerobic process, based on headspace gas chromatography. Biotechnology and Bioengineering 96(4):712-721.
- Butler, J. N., 1964. *Ionic equilibrium, a mathematical approach*. Addison Wesley Publishing Company, Menlon Park, California, 547 pp.
- Ehlinger F., Escoffier Y., Couderc J. P., Leyris J. P. and Moletta, R., 1994, *Development of an automatic control system for monitoring an anaerobic fluidized-bed*, Water Science and Technology 29: 289-95.
- Georgacakis D., 1979. VFA NH₃ buffer relationships in anaerobic digesters. PhD dissertation. University of Missouri-Columbia, USA, 76 pp.
- Georgacakis, D. Sievers, D.M. and Iannotti, E., 1982. Buffer Stability in Manure Digesters. Agricultural Wastes, 4: 427-441.
- Lahav O. and Morgan B.E., 2004, *Titration methodologies for monitoring of anaerobic digestion in developing countries a review*, Journal of Chemical Technology and Biotechnology 79: 1331-1341.
- Lahav, O., Morgan, B., and Loewenthal, R.E., 2002. Rapid, simple, and accurate method for measurement of VFA and carbonate alkalinity in anaerobic reactors, Environmental Science and Technology 36: 2736-2741.
- Liu, J., Olsson, G., Mattiasson, B., 2004. On-line monitoring of a two-stage anaerobic digestion process using a BOD analyzer. Journal of Biotechnology 109(3): 263-275.

- McCarty, P. L., 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals, Part 3 : Toxic materials and their control. Public Works 95(11):91-94.
- McCarty, P. L., 1967. *Chemistry for sanitary engineers*. McGrow-Hill Book, New York, 518 pp.
- Moosbrugger, R.E., Wentzel, M.C., Ekama, G.A. and Marais, G.v.R., 1993a. *Alkalinity measurement: Part 1. A 4 pH point titration method to determine the carbonate weak acid/base in an aqueous carbonate solution.* Water SA, 19(1): 11-22.
- Moosbrugger, R.E., Wentzel, M.C., Ekama, G.A. and Marais, G.v.R., 1993b. Alkalinity measurement: Part 2. A 4 pH point titration method to determine the carbonate weak acid/base in aqueous solutions containing other weak acid/bases of known concentrations. Water SA, 19(1):23-28.
- Moosburger, R.E., Wentzel M.C., Ekama G.A. and Marais G.R., 1992, *Weak acid/base and pH control in anaerobic systems a review*, Water SA 19(1): 1-10.
- Rozzi, A., Di Pinto, A.C., Limoni, N. and Tomei, M.C., 1994, *Start-up and operation of anaerobic digesters with automatic bicarbonate control*, Bioresource Technology, 48(3): 215-219.
- Van Slyke D. D., 1922. Buffer values. Journal of Biological Chemistry, 52:525-590.
- Βλαχοθανάσης, Α., 2011. Πτυχιακή μελέτη σε εξέλιξη. Εργαστήριο Γ. Κατασκευών, Τμήμα Α.Φ.Π. & Γ.Μ., Γ.Π.Α., Αθήνα.
- Γεωργακάκης Δ., 2011. "Διαχείριση αποβλήτων Τεύχος 2°", Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, έκδοση Γ.Π.Α., Αθήνα.

ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ ΓΙΑ ΥΓΡΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΥΡΟΓΑΛΑ

Μ. Δρούγα¹, Γ. Μάρκου¹, Δ. Γεωργακάκης¹

¹Τομέας Αγροτικών Κατασκευών και Γεωργικής Μηχανολογίας, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γ. Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 11855 Αθήνα

mardrouga@yahoo.gr, markoug@aua.gr, digeo@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή ένα παλαιότερο μαθηματικό μοντέλο παραγωγής μεθανίου για υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου εμπλουτίστηκε με πρόσφατα πειραματικά δεδομένα αποβλήτων χοιροστασίου και βουστασίου. Αποτέλεσμα της προσπάθειας ήταν το γενικότερης εφαρμογής αναβαθμισμένο μοντέλο: Μεθάνιο = $1,03e^{-0.1443}(x-4.6)^2$, ($r^2 = 0.980$). Ανάλογη διαδικασία ακολουθήθηκε και με πειραματικά δεδομένα μιγμάτων των ως άνω υγρών μηχανικού διαχωρισμού με τυρόγαλα, η οποία κατέληξε σε μοντέλα της ίδιας ως άνω γενικής μορφής : $Y = ae^{-b(x-e)^2}$, αλλά με διαφορετικούς συντελεστές το καθένα, γεγονός που οδηγεί σε επί μέρους γενικεύσεις. Με τα μοντέλα αυτά εμπλουτίζεται η σχετική βιβλιογραφία και διευκολύνεται η οικονομική αξιολόγηση εγκαταστάσεων παραγωγής βιοαερίου από τα ως άνω υγρά Δ/Χ.

Λέζεις κλειδιά : μοντέλα παραγωγής μεθανίου, τυρόγαλα, βιοαέριο, αναερόβια χώνευση, υγρά μηχανικού διαχωρισμού, κτηνοτροφικά απόβλητα

METHANE PRODUCTION MODELS FOR MECHANICALLY SEPARATED EFFLUENTS OF LIVESTOCK WASTES AND THEIR MIXTURES WITH WHEY

M. Drouga¹, G. Markou¹, D. Georgakakis¹

¹Department of Land Reclamation and Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, 11855 Athens, Greece <u>mardrouga@yahoo.gr</u>, <u>markoug@aua.gr</u>, <u>digeo@aua.gr</u>

ABSTRACT

In this paper an older methane production mathematical model for mechanically separated effluents of pig wastes has been enriched with new experimental data of pig and dairy effluents and transformed into the following general one: Methane= $1,03e^{-0.1443}(x-4.6)^2$ ($r^2 = 0.980$). A similar process was also applied to available experimental data of mixtures of such effluents with whey. Models of the same as above general form $Y = ae^{-b(x-c)^2}$ have been resulted but with different coefficients each one, thus showing a difficulty to form a general model too for all cases of whey mixtures. The results enrich the literature and allow for more realistic economic evaluation of biogas production facilities fed with such effluents and their mixtures with whey.

Key words: methane production models, whey, biogas, anaerobic digestion, mechanically separated effluents, livestock wastes

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου από οργανικής προέλευσης υγρά απόβλητα συνιστά μια πολύ ελπιδοφόρα πρακτική σήμερα, στα πλαίσια της γενικότερης προσπάθειας, που έχει αναληφθεί παγκοσμίως για την προστασία του περιβάλλοντος και την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Μπουχέλος, 2006). Κάθε προσπάθεια διερεύνησης και αριστοποίησης της παραγωγής μεθανίου/βιοαερίου συμβάλλει ιδιαίτερα προς την κατεύθυνση αυτή και ως εκ τούτου, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή.

Με την εφαρμογή μηχανικού διαχωρισμού σε υγρά ή αραιωμένα πτηνοκτηνοτροφικά απόβλητα (χοιροστασίων, πτηνοτροφείων και βουστασίων γαλακτοπαραγωγής) επιτυγχάνεται η ομοιογένειά τους, μετά την απομάκρυνση των λιγνινο-κυτταρινούχων υπολειμμάτων ζωοτροφής, τα οποία αιωρούνται στην υγρή μάζα τους και δημιουργούν πληθώρα προβλημάτων στο χειρισμό των αποβλήτων αυτών. Υπό μια γενικότερη έννοια, ο μηχανικός διαχωρισμός αποτελεί μια μορφή διαχείρισης (πρωτοβάθμιας επεξεργασίας) των υγρών ή αραιωμένων πτηνοκτηνοτροφικών αποβλήτων (Hjorth et al., 2010).

Με το μηχανικό διαχωρισμό, το ανομοιογενές αρχικά ρεύμα των υγρών ή αραιωμένων ημι-στερεών αποβλήτων επιμερίζεται σε δύο ομοιογενή κλάσματα, τα στερεά διαχωρισμού (στερεά Δ/Χ) και τα υγρά διαχωρισμού (υγρά Δ/Χ). Τα πρώτα, με ολικά στερεά πάνω από 25% και όγκο 0,5-5% του αρχικού είναι αμιγώς στερεής μορφής και κατάλληλα για συστηματική αερόβια χώνευση (κομποστοποίηση) σε επιμήκεις κομποστοσωρούς ή σειράδια κομποστοποίησης. Τα δεύτερα, με ολικά στερεά 1,5-2,0% και όγκο 95-99,5% του αρχικού συνιστούν ένα αραιό ομοιογενές, χωρίς αιωρούμενα χοντρόκοκκα συστατικά υγρό κλάσμα.

Συνεπώς ο μηχανικός διαχωρισμός συμβάλλει τα μέγιστα στην μετατροπή των πτηνο-κτηνοτροφικών αποβλήτων από ένα έντονα ανομοιογενές μίγμα στερεών συστατικών και νερού, ιδιαίτερα προβληματικού στο χειρισμό και την επεξεργασία του, σε δύο διακριτά ομοιογενή και εύχρηστα επί μέρους κλάσματα.

Τα τελευταία χρόνια ο μηχανικός διαχωρισμός βρίσκει εφαρμογή με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό και στα βουστάσια γαλακτοπαραγωγής της χώρας μας, ενώ έχει δοκιμαστεί δειλά - δειλά ακόμα και σε αραιωμένα απόβλητα πτηνοτροφείων αυγοπαραγωγής, με την εμφάνιση στην αγορά νέων ισχυρών μηχανικών διαχωριστών (τρίτης γενιάς), τύπου κοχλία συμπίεσης, γνωστών στην αγορά ως FAN SEPARATORS, οι οποίοι δείχνουν ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στα δύσκολα, ημιστερεής μορφής, αυτά απόβλητα.

Μπαίνει λοιπόν σήμερα το δίλημμα κατά το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων παραγωγής μεθανίου/βιοαερίου, σε ποιες περιπτώσεις να επιλέγεται η τροφοδοσία τους με το αρχικό 'βαρύ' ανομοιογενές μίγμα των αποβλήτων πριν από τον μηχανικό διαχωρισμό και σε ποιες με το διαχωρισμένο ομοιογενές 'ελαφρύ' κλάσμα υγρών Δ/Χ;

Το Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών γνωρίζοντας το ως άνω δίλημμα καθώς επίσης και το πόσο θα μπορούσε να διευκολυνθεί η παραγωγή βιοαερίου με τη χρήση μιγμάτων υγρών Δ/Χ με άλλα απόβλητα, ιδιαίτερα στη χώρα μας, ασχολήθηκε με το θέμα εδώ και αρκετά χρόνια, αλλά πιο συστηματικά κατά την τελευταία δεκαετία στα πλαίσια του Π.Μ.Σ. του Τμήματος Α.Φ.Π. & Γ.Μ. Έτσι σήμερα διαθέτει αρκετά πειραματικά δεδομένα παραγωγής μεθανίου/βιοαερίου, αποτέλεσμα πολύμηνων πειραμάτων, που διενήργησαν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου στο Γ.Π.Α. ευάριθμοι μεταπτυχιακοί φοιτητές/τριες της εξειδίκευσης 'Διαχείριση Περιβάλλοντος'.

Η χρήση μαθηματικών μοντέλων, λιγότερο ή περισσότερο πολύπλοκων, για την περιγραφή και την πρόβλεψη της πορείας της αναερόβιας χώνευσης, κατά την παραγωγή βιοαερίου αναφέρεται συχνά στην βιβλιογραφία (Gavala et al., 2003; Husain, 1998). Παρόλα αυτά, μοντέλα που χρησιμοποιούν διαχωρισμένα υγρά, μετά από μηχανικό διαχωρισμό και ως κύρια παράμετρο το οργανικό φορτίο σπανίζουν σήμερα (Hill, 1991; Karim et al., 2007).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται σημαντικό μέρος από τα ως άνω πειραματικά δεδομένα για την αναβάθμιση ενός αρχικού μαθηματικού μοντέλου παραγωγής μεθανίου από υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου της μορφής:

 $Y = ae^{-b(x-c)^2}$ (Georgacakis et al, 1979).

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν μαζί με τα παλαιά και νεότερα πειραματικά δεδομένα παραγωγής μεθανίου/βιοαερίου από υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου, αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής, καθώς και κατάλληλων μιγμάτων τους με τυρόγαλα, που προέκυψαν στις πειραματικές εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α.

Ογκομετρικό οργανικό φορτίο (kg Π.Σ. ^(*) /m³ _{χων} -ημέρα)Είδος αποβλήτωνΟγκομετρική παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου (Nm³/m³ _{χων} -ημέρα) (20°C-1atm)ΜΕΣΟΦΙΛΗ ΠΕΡΙΟΧΗ (32-38°C) -ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ 16-21 ημέρες1,802,803,804,805,300,38/0,54/0,98/1,05/0,83/1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010)0,670,851,401,371,100,12/0,26/0,09/0,33/0,45/0,150,290,110,450,60Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής0,550,661,171,99γαρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού (Γεωργακάκης 1985)2,882,172,352,53Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού α	πειραματά του Εργαστηριου Ι εωργικ	ων κατ	ασκευω	ν στο ι	.11.A.			
Είδος αλόρλητων Ογκομετρική παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου (Nm ³ /m ³ _{χων} -ημέρα) (20°C-1atm) ΜΕΣΟΦΙΛΗ ΠΕΡΙΟΧΗ (32-38°C) - ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ 16-21 ημέρες Υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου (Γεωργακάκης 1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010) 1,80 2,80 3,80 4,80 5,30 0,67 0,85 1,40 1,37 1,10 1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010) 0,67 0,85 1,40 1,37 1,10 0,12/ 0,26/ 0,09/ 0,33/ 0,45/ 0,15 0,29 0,11 0,45 0,60 Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής 0,55 0,66 1,17 1,99 - Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού 2,86 3,08 3,29 3,60 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 2,08 2,17 2,35 2,53 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) 1,53 1,88	Είδος αποθλάτων	Ογκομετρικό οργανικό φορτίο (kg Π.Σ. ^(*) /m ³ χων-ημέρα)						
ΜΕΣΟΦΙΛΗ ΠΕΡΙΟΧΗ (32-38°C) - ΧΡΟΝΟΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ 16-21 ημέρεςΥγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου (Γεωργακάκης 1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010)1,802,803,804,805,300,38/0,54/0,98/1,05/0,83/0,670,851,401,371,101985, Κακούρος 2009, Καττή 2010)0,831,690,381,662,100,12/0,26/0,09/0,33/0,45/0,150,290,110,450,600,150,290,110,450,60Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής0,550,661,171,99-(Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011)0,090,130,190,39-Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60-Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού (Γεωργακάκης 1985)2,082,172,352,53-Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)1,531,882,112,483,12Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,120,72/0,97/0,98/1,15/1,40/0,72/0,97/0,98/1,15/1,40/	Είδος απορλητών		Ογκομετρική παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου (Nm ³ /m ³ _{χων} -ημέρα) (20°C-1atm)					
Υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου (Γεωργακάκης 1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010) 1,80 2,80 3,80 4,80 5,30 0,38/ 0,54/ 0,98/ 1,05/ 0,83/ 1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010) 0,67 0,85 1,40 1,37 1,10 0,83 1,69 0,38 1,66 2,10 0,12/ 0,26/ 0,09/ 0,33/ 0,45/ Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής 0,55 0,66 1,17 1,99 (Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011) 0,09 0,13 0,19 0,39 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985) 2,86 3,08 3,29 3,60 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 2,08 2,17 2,35 2,53 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 2,08 2,17 2,35 2,53 Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 0,72/ 0,97/	ΜΕΣΟΦΙΛΗ ΠΕΡΙΟΧΗ (32-38°C) -ΧΡΟΝΟ	ΟΣ ΠΑΡΑ	ΜΟΝΗΣ	Հ 16-21 ղ	μέρες			
Υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου (Γεωργακάκης 1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010) 0,38/ 0,67 0,85 1,40 1,37 1,10 0,83 1,69 0,38 1,66 2,10 0,12/ 0,26/ 0,09/ 0,33/ 0,45/ 0,15 0,29 0,11 0,45 0,60 Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής 0,08/ 0,11/ 0,15/ 0,32/ (Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011) 0,09 0,13 0,19 0,39 - Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985) 2,86 3,08 3,29 3,60 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 2,08 2,17 2,35 2,53 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 0,72/ 0,97/ 0,98/ 1,15/ 1,40/ 0,85 <		1,80	2,80	3,80	4,80	5,30		
Υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου (Γεωργακάκης 1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010) 0,67 0,85 1,40 1,37 1,10 1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010) 0,83 1,69 0,38 1,66 2,10 0,12/ 0,26/ 0,09/ 0,33/ 0,45/ 0,15 0,29 0,11 0,45 0,60 Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής 0,08/ 0,11/ 0,15/ 0,32/ - (Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011) 0,09 0,13 0,19 0,39 - Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985) 2,86 3,08 3,29 3,60 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 2,08 2,17 2,35 2,53 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)		0,38/	0,54/	0,98/	1,05/	0,83/		
1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010) 0,83 1,69 0,38 1,66 2,10 0,12/ 0,26/ 0,09/ 0,33/ 0,45/ 0,15 0,29 0,11 0,45 0,60 Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής 0,55 0,66 1,17 1,99 (Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011) 0,09 0,13 0,19 0,39 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985) 2,86 3,08 3,29 3,60 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 2,08 2,17 2,35 2,52 Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 2,08 2,17 2,35 2,53 Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 Νίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 Νίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού μου βλήτων <td>Υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου (Γεωργακάκης</td> <td>0,67</td> <td>0,85</td> <td>1,40</td> <td>1,37</td> <td>1,10</td>	Υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου (Γεωργακάκης	0,67	0,85	1,40	1,37	1,10		
0,12/0,26/0,09/0,33/0,45/0,150,290,110,450,60Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής0,550,661,171,99(Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011)0,090,130,190,39Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού (Γεωργακάκης 1985)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12	1985, Κακούρος 2009, Καττή 2010)	0,83	1,69	0,38	1,66	2,10		
0,150,290,110,450,60Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής0,550,661,171,99(Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011)0,090,130,190,39Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12Νίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12		0,12/	0,26/	0,09/	0,33/	0,45/		
Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής0,550,661,171,99(Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011)0,090,130,190,32/-Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων πτηνοτροφείου αυγοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12		0,15	0,29	0,11	0,45	0,60		
1γαλακτοπαραγωγής (Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011)0,08/ 0,090,11/ 0,130,15/ 0,190,32/ 0,39Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων πτηνοτροφείου αυγοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12	Υγρά Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου	0,55	0,66	1,17	1,99			
(Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011)0,090,130,190,39Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12	γαλακτοπαραγωγής	0,08/	0,11/	0,15/	0,32/	-		
Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων πτηνοτροφείου αυγοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού (Γεωργακάκης 1985)2,863,083,293,60Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,082,172,352,53Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,12 </td <td>(Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011)</td> <td>0,09</td> <td>0,13</td> <td>0,19</td> <td>0,39</td> <td></td>	(Χριστοπούλου 2004, Κωσταρά-Ζαχαριουδάκη 2011)	0,09	0,13	0,19	0,39			
πτηνοτροφείου αυγοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού (Γεωργακάκης 1985)0,98/1,38/1,46/1,57/ .57/-Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,08 0,39/2,17 0,42/2,35 0,74/2,53 0,74/2,53 0,73/ .74/-Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,53 0,72/1,88 0,72/2,11 0,97/2,48 0,98/3,12 1,15/	Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων νωπών αποβλήτων	2,86	3,08	3,29	3,60			
(Γεωργακάκης 1985)1,742,382,442,52Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,08 0,39/ 0,422,17 0,422,35 0,74/ 0,74/ 0,73/ 0,512,53 0,74/ 0,73/ 1,02-Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,53 0,72/ 0,97/ 0,98/ 0,97/ 0,98/ 1,15/1,40/ 1,87	πτηνοτροφείου αυγοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού	0,98/	1,38/	1,46/	1,57/	-		
Μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005)2,08 0,39/ 0,45/ 0,45/ 0,512,17 0,74/ 0,73/ 1,022,53 0,73/ 1,14-Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,53 0,72/ 0,97/ 0,98/ 0,97/ 0,98/ 1,15/ 1,1501,40/ 1,40/ 1,87	(Γεωργακάκης 1985)	1,74	2,38	2,44	2,52			
Μιγμα υγρών Δ/Χ αραιωμενών αλορλητών ρουστασίου 0,39/ 0,45/ 0,74/ 0,73/ - γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005) 0,42 0,51 1,02 1,14 Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 Μίγμα 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 0,72/ 0,97/ 0,98/ 1,15/ 1,40/ 0,85 1,17 1,29 1,50 1,87		2,08	2,17	2,35	2,53			
γαλακτολαραγωγής με τυρογαλα (Μαντατή 2003) 0,42 0,51 1,02 1,14 Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) 1,53 1,88 2,11 2,48 3,12 0,72/ 0,97/ 0,98/ 1,15/ 1,40/ 0,85 1,17 1,29 1,50 1,87	Μιγμα υγρων Δ/Α αραιωμένων απορλήτων ρουστασιου	0,39/	0,45/	0,74/	0,73/	-		
Μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009)1,531,882,112,483,120,72/0,97/0,98/1,15/1,40/0,851,171,291,501,87	γαλακτοπαραγωγης με τυρογαλά (Μανίατη 2005)	0,42	0,51	1,02	1,14			
χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος 2009) $0,72/0,97/0,98/1,15/1,40/0,85$ 1,17 1,29 1,50 1,87	Μάμα υνοάν μηγαμικού διαγκορισμού καρβράτου	1,53	1,88	2,11	2,48	3,12		
0,85 1,17 1,29 1,50 1,87	γηγμα υγρων μηχανικου σιαχωρισμου απορλητων	0,72/	0,97/	0,98/	1,15/	1,40/		
	χ_{0}	0,85	1,17	1,29	1,50	1,87		

Πίνακας 1. Ογκομετρική παραγωγή μεθανίου / βιοαερίου για διάφορες τιμές ογκομετρικού οργανικού φορτίου υγρών Δ/Χ και μιγμάτων τους με τυρόγαλα από πειράματα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών στο Γ.Π.Α.

^(*) Π.Σ. = Πτητικά στερεά, εκφράζουν το ρυπαντικό φορτίο των αποβλήτων οργανικής προέλευσης

Οι πειραματικές εγκαταστάσεις αποτελούνταν από μια σειρά θερμαινόμενων αναερόβιων χωνευτήρων, ωφέλιμης χωρητικότητας 21,0-25,6 λίτρων ο καθένας. Οι

χωνευτήρες διατηρούνταν στους 32-38 C και τροφοδοτούνταν, ανά 24 ή 48 ώρες, με την ανάλογη ποσότητα υγρών Δ/Χ για διατήρηση του επιθυμητού χρόνου παραμονής τους (16-21 ημέρες). Το pH των υγρών εκροής, καθώς και η ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου μετριόταν σταθερά σε 24ωρη ή 48ωρη βάση. Η ογκομετρική παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου διορθωνότανε και εκφραζότανε τελικά σε $Nm^3/m^3_{\omega\varphi,\chi\omega\nu}$ -ημέρα σε STP (20°C, 1 atm), ενώ του ογκομετρικού οργανικού φορτίου σε kg Π.Σ./m³χων-ημέρα. Τα αποτελέσματα παρατίθενται αναλυτικά στον Πίνακα 1.

Οι Georgakakis et al, 1979 επινόησαν ένα θεωρητικό μαθηματικό μοντέλο της μορφής: $Y = ae^{-b(x-c)^2}$, όπου Y = ογκομετρική παραγωγή μεθανίου (Nm³/m³_{χων}-ημέρα), a, b, c = σταθερές ανάλογα με το είδος των αποβλήτων και x = ογκομετρικό οργανικό φορτίο, kg ΠΣ/m³_{χων}-ημέρα.

Το μαθηματικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της τυπικής καμπανοειδούς καμπύλης των βιολογικών διεργασιών (McCarty, 1964), σύμφωνα με το οποίο η παραγωγή μεθανίου αυξάνει με την αύξηση της ογκομετρικής οργανικής φόρτισης μέχρις ενός μέγιστου για μια συγκεκριμένη τιμή της τελευταίας και στη συνέχεια μειώνεται συμμετρικά σχεδόν ως προς την προηγούμενη αυξητική της πορεία.

Εφαρμογή του ως άνω μοντέλου στην παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου, αποδίδει επαρκώς τη σχέση μεταξύ ογκομετρικής παραγωγής μεθανίου και ογκομετρικής οργανικής φόρτισης. Για τον προσδιορισμό των τιμών των σταθερών, η ως άνω σχέση, αφού πρώτα μετατραπεί σε γραμμικής μορφής ως προς $Z = (x - c)^2$: $\ln Y = \ln a - bZ$, στη συνέχεια υφίσταται την ανάλογη στατιστική επεξεργασία (linear regression analysis) και τέλος αντιλογαριθμείται η σχέση που προκύπτει.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Εφαρμογή του μοντέλου σε παλαιότερα πειραματικά δεδομένα υγρών Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου (στοιχεία του 1985 στο Πίνακα 1) έδωσε την παρακάτω αρχική σχέση: Μεθάνιο = $1,00e^{-0,1272(x-4,60)^2}$ (r² = 0,923), η γραφική απεικόνιση της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 1 (Γεωργακάκης κ.ά., 1985).



Με την ενσωμάτωση στο αρχικό μοντέλο νεώτερων δεδομένων παραγωγής μεθανίου από υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου του Πίνακα 1, το τελευταίο μετατρέπεται στο: Μεθάνιο = $1,08e^{-0.179(x-4.30)^2}$ (r² = 0,972) αποκλίνοντας ελαφρά

από την μέγιστη τιμή παραγωγής μεθανίου και της αντίστοιχης τιμής ογκομετρικού οργανικού φορτίου του παλαιότερου μοντέλου.

Περαιτέρω εμπλουτισμός του παλαιού μοντέλου με προσθήκη πειραματικών δεδομένων παραγωγής μεθανίου από υγρά Δ/Χ αραιωμένων ημι-στερεών αποβλήτων βουστασίου με νερά πλυσίματος καταλήγει στην εξής τελική γενικευμένη μορφή του:

Μεθάνιο = 1,03e^{-0,1442}(x-4,60)² (r^2 = 0,980) και απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Η αντίστοιχη σχέση που προσδιορίζει το παραγόμενο βιοαέριο

Η αντίστοιχη σχέση που προσδιορίζει το παραγόμενο βιοαέριο είναι: $B_{1,35e^{-0,1706(\chi-4,40)^2}}$ ($r^2 = 0.957$).



Σχήμα 2. Γραφική απεικόνιση του τελικού αναβαθμισμένου μοντέλου.

Από το Σχήμα 2 προκύπτει ότι οι τιμές παραγωγής μεθανίου, τόσο από υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου, όσο και υγρά Δ/Χ αραιωμένων ημι-στερεών αποβλήτων βουστασίου ενσωματώνονται ικανοποιητικά στο παλαιό μοντέλο αυξάνοντας τον συντελεστή στατιστικής προσαρμογής τους (r²) από 0,923 σε 0,980. Σύμφωνα με το ως άνω μοντέλο, η μέγιστη τιμή παραγωγής μεθανίου από την αναερόβια χώνευση υγρών Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου ή βουστασίου γαλακτοπαραγωγής είναι 1,03 $\text{Nm}^3/\text{m}^3_{\chi \omega v}$ -ημέρα, τιμή πολύ κοντά σε εκείνη του αρχικού μοντέλου (1,00 $\text{Nm}^3/\text{m}^3_{\chi \omega v}$ -ημέρα) και για την ίδια τιμή ογκομετρικού οργανικού φορτίου (4,60 kg Π.Σ./m³_{χωv}-ημέρα).

Το γεγονός αυτό επιτρέπει στη γενίκευση εφαρμογής του αναβαθμισμένου ως άνω μοντέλου, εκτός από απόβλητα χοιροστασίου και σε απόβλητα βουστασίου γαλακτοπαραγωγής, με ίδια ή παρόμοια χαρακτηριστικά παραγωγής και πρωτοβάθμιου χειρισμού των αποβλήτων τους (εφαρμογή κατάλληλου συστήματος μηχανικού διαχωρισμού και αραίωσης κατά περίπτωση).

Η μέγιστη παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου (1,03/1,347 Nm³/m³χων-ημέρα), με βάση το μοντέλο αυτό, μπορεί να προσεγγιστεί στην πράξη μόνο μετά από συμπύκνωση των υγρών Δ/Χ με φυσική καθίζηση και χρήση του προκύπτοντος ιζήματος για την τροφοδοσία του αναερόβιου χωνευτήρα. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται επί πλέον και ο όγκος της κατασκευής, συνεπώς και το κόστος παραγωγής μεθανίου/βιοαερίου. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2, λόγω του μικρού οργανικού φορτίου των υγρών Δ/Χ, συνήθως 1,0-1,5% πτητικά στερεά (Hill et al, 2000, Κακούρος κ.ά., 2009).

Για αύξηση λοιπόν της παραγωγής μεθανίου/βιοαερίου, τα υγρά Δ/Χ θα πρέπει, είτε να υφίστανται συμπύκνωση με βαρύτητα, είτε να αναμιγνύονται με άλλα υποπροϊόντα, πλούσια σε οργανικό άνθρακα, όπως είναι το τυρόγαλα, πριν να οδηγηθούν στις εγκαταστάσεις παραγωγής μεθανίου/βιοαερίου (Γεωργακάκης κ.ά., 1985). Στη δεύτερη περίπτωση, τα υγρά Δ/Χ παίζουν κυρίως ρόλο σταθεροποιητικό της αναερόβιας χώνευσης (διατήρηση του pH σταθερά πάνω από 7,0), επιτρέποντας έτσι στο τυρόγαλα ή σε οποιοδήποτε άλλο αντίστοιχο υποπροϊόν, να εξαντλήσει το πλούσιο δυναμικό παραγωγής μεθανίου/βιοαερίου που διαθέτει, λόγω του οργανικού του άνθρακα (Γεωργακάκης, 2010).

Με την ίδια ως άνω διαδικασία δοκιμάστηκε η εφαρμογή διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων αναερόβιας χώνευσης και σε μίγματα υγρών Δ/Χ με τυρόγαλα και σε μια παλαιά περίπτωση, με 'ορό γιαουρτιού' (Πίνακας 1). Προέκυψαν τα εξής μοντέλα :

(α) Μεθάνιο = $1,47e^{-0.14(x-3,75)^2}$, $r^2 = 0,970$ (Σχήμα 3)

για μίγμα υγρών Δ/Χ χοιροστασίου με τυρόγαλα (Κακούρος, 2009) και

(β) Μεθάνιο =
$$1,59e^{-0,2497(x-3,47)^2}$$
, $r^2 = 0,964$

για μίγμα υγρών Δ/Χ με αραιωμένα ημι-στερεά απόβλητα πτηνοτροφείου αυγοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού (Γεωργακάκης κ.ά, 1985).

Το τελευταίο μετά τον εμπλουτισμό του και με δεδομένα μίγματος υγρών Δ/Χ αραιωμένων ημι-στερεών αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Μανιάτη 2005), αναβαθμίστηκε τελικά στο :

Μεθάνιο = $1,58e^{-0,5186(x-3,70)^2}$, $r^2 = 0,970$ (Σχήμα 4)

Οι αντίστοιχες σχέσεις που προσδιορίζουν το παραγόμενο βιοαέριο και τον λόγο των πτητικών στερεών στα ως άνω μίγματα έχουν ως εξής :

 $Π.Σ._{TYP}/Π.Σ._{XOIP} = 8,64x^2 - 24,713x + 19,87$ ($r^2 = 1,00$) στην περίπτωση (α)

Βιοαέριο = 2,55e^{-0,5186 (x-3,70)²} (r² = 0,983) και

Π.Σ._{TYP}/Π.Σ._{BOYS ή ΠTHN =} 37,086x² - 145,01x + 141,81 ($r^2 = 0,986$) στην περίπτωση (β). Π.Σ. (%) υλικού εισόδου στο χωνευτήρα = τιμή ογκομετρικού οργανικού φορτίου x χρόνο παραμονής / 10



Σχήμα 3. Παραγωγή μεθανίου από μίγμα υγρών Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα στη μεσόφιλη περιοχή (Κακούρος 2009).



Σχήμα 4 Παραγωγή μεθανίου από μίγμα υγρών Δ/Χ αραιωμένων ημιστερεών αποβλήτων πτηνοτροφείου αυγοπαραγωγής με ορό γιαουρτιού και βουστασίου γαλακτοπαραγωγής με τυρόγαλα (Γεωργακάκης κ.ά, 1985, Μανιάτη, 2005).

Από τα Σχήματα 3 και 4 προκύπτει πως η προσθήκη τυρογάλακτος, ενός εξαιρετικά πλούσιου σε οργανικό άνθρακα υποπροϊόντος, σε υγρά Δ/Χ αποβλήτων χοιροστασίου ή ημι-στερεών αποβλήτων βουστασίου γαλακτοπαραγωγής ή πτηνοτροφείου αυγοπαραγωγής αυξάνει σημαντικά την παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου, λόγω βελτίωσης του λόγου C/N και του προαναφερθέντος σταθεροποιητικού ρόλου των υγρών Δ/Χ στην αναερόβια χώνευση.

Γενικά η λειτουργία των αναερόβιων χωνευτήρων κοντά στο μέγιστο των διαγραμμάτων παραγωγής μεθανίου θα πρέπει να αποφεύγεται, λόγω του κινδύνου υπέρβασης της 'αντίστασης' των υγρών στην πτώση του pH και 'μετακύλισής' του σε απαγορευτικά επίπεδα (κάτω από 6,5) (Georgacakis et al, 1982). Επιλογή μιας ογκομετρικής οργανικής φόρτισης γύρω στο 75% της μέγιστης στα μοντέλα μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ασφαλής. (Μανιάτη, 2005, Κακούρος, 2009).

Με τα ως άνω στατιστικά μοντέλα εμπλουτίζεται η σχετική βιβλιογραφία με νέα δεδομένα, που αφορούν στην αξιοποίηση των υγρών Δ/Χ των πτηνοκτηνοτροφικών αποβλήτων στην παραγωγή μεθανίου/βιοαερίου και διευκολύνεται σημαντικά η οικονομική διερεύνηση των εγκαταστάσεων παραγωγής του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Gavala, H.N., Angelidaki, I., Ahring, B.K., 2003. Kinetics and modeling of anaerobic digestion process. In: B.K. Ahring (Editor) Biomethanation I, Springer. Berlin, pp. 37.
- Georgacakis D., 1979. *Bacterial Response to Salts in an Anaerobic Dairy Lagoon* Transactions of the ASAE 22(1): 162-168.
- Georgacakis, D. Sievers & E. Iannotti, 1982. Buffer Stability in Manure Digesters. Agricultural Wastes 4: 427-441.
- Hill, D.T., 1991. *Steady-state mesophilic design equations for methane production from livestock wastes.* Transactions of the ASAE, 34(5): 2157-2163.
- Hjorth, M., Christensen, K.V., Christensen, M.L., Sommer, S.G., 2010. Solid–liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. Agron. Sustain. Dev., 30(1): 153-180.

- Husain, A., 1998. *Mathematical models of the kinetics of anaerobic digestion--a selected review*. Biomass and Bioenergy, 14(5-6): 561-571.
- Karim, K., Klasson, K., Drescher, S., Ridenour, W., Borole, A., Al-Dahhan, M., 2007. *Mesophilic Digestion Kinetics of Manure Slurry*. Applied Biochemistry and Biotechnology, 142(3): 231-242.
- McCarty, P. L., 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals, Part 3: Toxic materials and their control. Public Works 95(11):91-94.
- Γεωργακάκη Δ. Ξενικού Στ. και Κυρίτση Σπ., 1985. Βελτιστοποίηση της Απόδοσης των Εγκαταστάσεων Παραγωγής Ενέργειας σε Κτηνοτροφικές Μονάδες. Β' Εθνικό Συνέδριο' Ήπιων Μορφών Ενέργειας που διοργάνωσε το Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής στη Θεσσαλονίκη, Τόμος πρακτικών Β', σελ. 671-678.
- Γεωργακάκης Δ., 2010. "Διαχείριση αποβλήτων Τεύχος 2^ο", Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, έκδοση Γ.Π.Α., Αθήνα.
- Ζαχαριουδάκη Μ., Κωσταρά Ξ., 2011. Πτυχιακή μελέτη σε εξέλιξη. Εργαστήριο Γ. Κατασκευών, Τμήμα Α.Φ.Π. & Γ.Μ., Γ.Π.Α., Αθήνα.
- Κακούρος Αν., Γεωργακάκης Δ., Φούντα Β, 2009. Παραγωγή βιοαερίου από τυρόγαλα εμπλουτισμένο με υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου. Εισήγηση στο 6° Συνέδριο Ε.Γ.Μ.Ε., Θεσσαλονίκη 8-10 Οκτωβρίου, τόμος πρακτικών σελ. 721-727.
- Καττή Π., 2010. Πειραματική διερεύνηση παραγωγής βιοαερίου από μίγματα τυρογάλακτος με υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου διαφορετικής πυκνότητας στη μεσόφιλη περιοχή, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Μανιάτη Β., 2005. Βελτιστοποίηση παραγωγής βιοαερίου από μίγματα υγρών αποβλήτων βουστασίου μετά από μηχανικό διαχωρισμό και υγρών γεωργοβιομηχανικών εκροών. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Μπουχέλος Χρ., 2006. Οικονομική αζιολόγηση δημιουργίας τοπικού κεντρικού σταθμού αζιοποίησης αποβλήτων για παραγωγή βιοαερίου Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Χριστοπούλου Ν., 2004. Παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα βουστασίων γαλακτοπαραγωγής, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΚΕΡΑΣΙΩΝ. ΜΕΡΟΣ 1: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Ι.Γ. Αμπατζίδης¹, X. Du¹, D. Chen¹, P. Scharf¹, M. Whiting² και Q. Zhang¹
 ¹Center for Precision and Automated Agricultural Systems, Washington State University, 99350 Prosser, WA, USA, e-mail: yiannis.ampatzidis@wsu.edu
 ²Department of Horticulture and Landscape Architecture, Washington State University, 99350 Prosser, WA, USA, email: mdwhiting@wsu.edu

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υιοθέτηση τεχνολογιών για τη συγκομιδή των κερασιών μπορεί να οδηγήσει σε νέα άνθηση της παραγωγής και να την καταστήσει κερδοφόρα, μειώνοντας τις απαιτήσεις σε εργατικό δυναμικό χωρίς να επηρεάζει την ποιότητα και εμφάνιση των καρπών. Στόχος της εργασίας αυτής είναι ο επανασχεδιασμός ενός μηχανήματος συγκομιδής κερασιών βελτιώνοντας και συνδυάζοντας ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Στο πρώτο μέρος της εργασίας αξιολογούνται δύο τεχνολογίες μηχανικής συγκομιδής –ένα μηχάνημα συγκομιδής και ένας χειροκίνητος δονητής– κατά τη διάρκεια της συγκομιδής κερασιών (Skeena). Τα πρωταρχικά πειράματα έδειξαν ότι η συνεχόμενη δόνηση προκαλεί μεγαλύτερη αποκοπή των καρπών (89.5%) σε σχέση με την ακαριαία κρούση (81.8%), που παράγεται από το μηχάνημα συγκομιδής (η οποία είναι πιο ενεργοβόρα).

Λέζεις κλειδιά: μηχανήματα συγκομιδής, τεχνολογίες συγκομιδής, συγκομιδή κερασιών

DEVELOPMENT OF MECHANICAL HARVEST SYSTEMS FOR SWEET CHERRIES. PART 1: COMPARISON OF TWO POTENTIAL HARVEST TECHNOLOGIES

Y.G. Ampatzidis¹, X. Du¹, D. Chen¹, P. Scharf¹, M. Whiting² and Q. Zhang¹

¹Center for Precision and Automated Agricultural Systems, Washington State University, 99350 Prosser, WA, USA, e-mail: yiannis.ampatzidis@wsu.edu
²Department of Horticulture and Landscape Architecture, Washington State University, 99350 Prosser, WA, USA, email: mdwhiting@wsu.edu

ABSTRACT

The adoption of a mechanical and/or mechanical-assist harvest system for sweet cherries has the potential to revolutionize the sweet cherry industry because of labor savings without negative effects on fruit quality. The objective of this research was to improve and redevelop a mechanical harvesting system for stemless sweet cherries. In the first part of this research two harvest technologies - a mechanical harvester and a hand-held shaker – were evaluated during sweet cherries (Skeena) harvest. The detachment force of sample fruit, the fruit detachment percentage and the mechanical damages caused by the two technologies were calculated in an orchard. The preliminary results of mechanical harvest efficiency test shows that the fruit removal using the hand-held shaker was better (89.5%) than using the impact from the mechanical harvester (81.8%).

Key words: mechanical harvester, harvest technologies, cherries harvest

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καλλιέργεια των οπωροφόρων δέντρων στην Ελλάδα είχε μεγάλη οικονομική σημασία στο παρελθόν, ιδιαίτερα στις ορεινές και ημιορεινές περιοχές. Εξασφάλιζε ικανοποιητικό εισόδημα στους παραγωγούς και αποτελούσε βασικό λόγο συγκράτησης του πληθυσμού στην ύπαιθρο. Σήμερα, αντιμετωπίζει αρκετά προβλήματα κυρίως γιατί δεν κατόρθωσε να αντιμετωπίσει τις ανταγωνιστικές πιέσεις που συνέβησαν στο διεθνή χώρο μετά τη μερική φιλελευθεροποίηση των εισαγωγών του 1995, ως αποτέλεσμα της συμφωνίας της GATT για τη γεωργία. Η δημιουργία σύγχρονων οπωρώνων, η οποία είναι μία εντατική εκμετάλλευση που διαρκεί αρκετά χρόνια, απαιτεί υψηλές δαπάνες για εγκαταστάσεις και μηχανήματα, αποδίδει μετά από 3-6 χρόνια και επομένως απαιτεί ποο σχεδιασμό της εκμετάλλευσης είναι το στάδιο της συγκομιδής των καρπών και ο τρόπος με τον οποίο θα επιτευχτεί, έτσι ώστε να επιλεχτούν τα κατάλληλα μηχανήματα, ο απαραίτητος αριθμός ξένων εργατικών χεριών, η διαμόρφωση των δέντρων κτλ.

Η συγκομιδή των καρπών αποτελεί την κορυφή, στη πυραμίδα των εργασιών του παραγωγού. Στη διαδικασία αυτή ο παραγωγός πρέπει να συγκομίσει τους καρπούς στον κατάλληλο χρόνο (ανάλογα με την ποικιλία), με τον ανάλογο αριθμό εργατών και μηχανημάτων και φυσικά με το ελάχιστο πάντα δυνατό κόστος. Κατά την παραμονή των καρπών στο χωράφι, μπορεί να υπάρξουν μεγάλες απώλειες εξαιτίας πιθανών κινδύνων όπως ασθένειες, άνεμοι, καιρικές αντιξοότητες κ.α., οπότε ο παραγωγός πρέπει, μόλις οι καρποί είναι έτοιμοι, να καταβάλει όλες του τις δυνάμεις και το απαραίτητο ανθρώπινο δυναμικό, ώστε να καταλήξει σε μια γρήγορη και έγκαιρη συγκομιδή (Τσατσαρέλης, 2003). Επίσης, η οικονομική αξία των καρπών επηρεάζεται από την ημερομηνία συγκομιδής. Εάν ο καρπός πρόκειται να αποθηκευτεί σε ψυγεία (σε θερμοκρασία 4-8°C) και να μεταφερθεί σε μακρινές αποστάσεις, πρέπει να συγκομιστεί 3-4 μέρες πριν την πλήρη ωρίμανση.

Γενικά, οι καρποί για νωπή κατανάλωση συγκομίζονται, όπως όλοι οι ευαίσθητοι σε κρούσεις καρποί, με εργάτες. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κόστος συγκομιδής να είναι πολύ υψηλό. Ιδιαίτερα, το κόστος συγκομιδής των γλυκών κερασιών στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) αποτελεί περίπου το 60% του συνολικού κόστους της παραγωγής (Seavert et al., 2008), κυρίως γιατί ο αριθμός των καρπών ανά δένδρο είναι υψηλός (π.χ. 10000 καρποί/δένδρο αντί 50-100 καρποί/δένδρο μηλιάς) και επομένως απαιτεί μεγάλο αριθμό εργατών για τη συγκομιδή (Whiting and Smith, 2007). Δυνατότητες για μηχανική συγκομιδή είναι ελάγιστες γιατί, παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, έχει σοβαρά μειονεκτήματα όπως υποβάθμιση της ποιότητας, δυσκολία συγκομιδής όλων των καρπών (μεγάλες απώλειες), συγκομιδή ταυτόχρονα ώριμων και άγουρων καρπών κ.α. (Sarig et al., 1999; Holt, 1999; Τσατσαρέλης, 2003). Τα βοηθητικά μέσα (π.χ. σκάλες, σκαλάκια) και τα μηχανήματα με θέσεις εργατών μπορούν να γρησιμοποιηθούν με μεγάλη επιτυχία. Δονητές και υποδοχείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συγκομιδή καρπών που προορίζονται για κονσερβοποίηση και αποξήρανση, αν και στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται ελάχιστα (Αμπατζίδης κ.α., 2009). Η ορθολογική επιλογή των μηγανημάτων αποτελεί την πιο σημαντική απόφαση που πρέπει να πάρει ο υπεύθυνος κάθε εκμετάλλευσης, γιατί επηρεάζει σε βαθμό αποφασιστικό το κόστος και την καθαρή πρόσοδο (Τσατσαρέλης, 2006).

Παρόλα αυτά, η εκμηχάνιση της συγκομιδής των καρπών των οπωροφόρων δέντρων στις ΗΠΑ, αλλά και παγκοσμίως, αποτελεί πρωταρχικό στόχο εδώ και αρκετές δεκαετίες. Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για την ανάπτυξη βοηθητικών εργαλείων, για τον σχεδιασμό μηχανημάτων (Norton et al., 1962; Markwardt et al., 1964; Peterson and Wolford, 2001) και ρομποτικών συστημάτων συγκομιδής κερασιών (Peterson et al., 1999). Το βασικό μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι: i) μεγάλες απώλειες, ii) συγκομιδή κερασιών χωρίς κοτσάνι και iii) φθορές καρπών που προκαλούνται κατά την αποκοπή των καρπών, την πτώση και την επαφή τους με την επιφάνεια του μηχανισμού συλλογής.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η ανάπτυξη μηχανικών συστημάτων για τη συγκομιδή κερασιών, η οποία βασίζεται στην τροποποίηση και τον συνδυασμό ήδη υπάρχον μηχανημάτων και τεχνολογιών. Βασικό στόχο της εργασίας αποτελεί η βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων συγκομιδής, ελαχιστοποιώντας τις φθορές στην εμφάνιση των καρπών. Η εργασία αυτή αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος συγκρίνεται η απόδοση δύο τεχνολογιών συγκομιδής (ενός χειροκίνητου συστήματος συνεχόμενης κρούσης και ενός μηχανήματος συγκομιδής κερασιών που χρησιμοποιεί ακαριαία κρούση για την αποκοπή των καρπών) σε σχέση με την αποδοτικότητα και το ποσοστό φθοράς στους καρπούς. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται η αξιολόγηση ενός βασικού συστήματος παραγωγής συνεχόμενης κρούσης (για την αποκοπή των καρπών από τα δέντρα) καθώς και ο σχεδιασμός του ενός πρότυπου μηχανικού συστήματος συγκομιδής.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ

Η δύναμη συγκράτησης των καρπών στα δέντρα ή PFRF (pedicel-fruit retention force) είναι ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος πρέπει να μετρηθεί για τα δένδρα κερασιάς. Η δύναμη αυτή μετρήθηκε με τη χρήση ενός μηχανήματος μέτρησης της δύναμης (Imada DS2, Imada Co., Northbrook, IL). Με το μηχάνημα αυτό οι καρποί αποκόπτονται από το κοτσάνι χειροκίνητα και καταγράφεται η δύναμη αντίστασης (σχήμα 1).



Σχήμα 1. Μέτρηση της δύναμης αντίστασης (συγκράτησης, PFRF) των καρπών στον αγρό.

Στη συνέχεια, αξιολογήθηκαν δύο τεχνολογίες, οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικά συστήματα για την αποκοπή των καρπών από τα δένδρα (i-ακαριαία κρούση –impact-, ii-συνεχόμενη κρούση ή δόνηση), κατά τη συγκομιδή κερασιών στον αγρό.

Το πρώτο σύστημα, ένα πρωτότυπο μηχάνημα συγκομιδής κερασιών με το όνομα USDA-ARS, αποτελείται από δύο πανομοιότητες μονάδες, οι οποίες κινούνται σε δύο γειτονικές γραμμές δένδρων για τη συγκομιδή των καρπών ταυτόγρονα από τις δύο πλευρές του ίδιου δένδρου (Peterson and Wolford, 2001). Το σχήμα 2 παρουσιάζει τα κύρια μέρη του USDA-ARS, από τα οποία μπορούμε να ξεγωρίσουμε τρία βασικά εξαρτήματα: α) πλαίσιο στήριξης με τρεις τροχούς και βενζινοκινητήρα, β) μηχανικός βραγίονας («γέρι») οδηγούμενος από το υδραυλικό σύστημα (rapid displacement actuator, RDA) με χρήση μοχλών (joysticks) και γ) μηχανισμό συλλογής και μεταφοράς των καρπών (fruit catching and collecting conveyor). Δύο χειριστές οδηγούν τις πανομοιότητες μονάδες και τις τοποθετούν δίπλα στο ίδιο δένδρο (σε δύο γειτονικές γραμμές) έτσι ώστε οι επιφάνειες συλλογής να εφάπτονται με τον κορμό του δένδρου (σχήμα 3α). Στη συνέχεια μετακινούν το RDA (4 βαθμοί ελευθερίας) μέχρι να βρουν κατάλληλα σημεία στα κλαδιά του δένδρου και να ενεργοποιήσουν, με χρήση ηλεκτρικού διακόπτη, την ακαριαία και βίαιη κρούση (impact) ώστε να επιτευχτεί η αναγκαία επιτάχυνση και να αποκοπούν οι καρποί από τα κλαδιά του δένδρου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να συγκομιστεί ο απαιτούμενος αριθμός καρπών (θεωρητικά όλοι οι καρποί). Οι καρποί συλλέγονται, μεταφέρονται και τοποθετούνται σε ένα κιβώτιο χωρητικότητας περίπου 180 kg.



Σχήμα 2: Βασικά μέρη μηχανήματος συγκομιδή κερασιών (Peterson and Wolford, 2001).

Το δεύτερο εργαλείο συγκομιδής που αξιολογήθηκε είναι ένα χειροκίνητος δονητής (SP200, hand-held shaker) κατασκευασμένος από την εταιρία STIHL (http://www.stihlusa.com), ο οποίος τροφοδοτείται από έναν βενζινοκινητήρα (σχήμα 3β). Τα τρία βασικά μέρη του μηχανήματος αυτού είναι: α) βενζινοκινητήρας με χειρομοχλό, β) σωλήνας οδήγησης και γ) μηχανισμός με γάντζο για τη συνεχόμενη δόνηση των κλαδιών. Με την μεταβολή των στροφών (ταχύτητα) του κινητήρα μεταβάλλεται και η παλινδρομική

δύναμη (δόνηση) του άγκιστρου. Μειονεκτήματα του συστήματος αυτού είναι: i) απαιτούνται επιπλέον εργάτες, οι οποίοι πρέπει να κρατάνε μία επιφάνεια συλλογής (π.χ. πανί) σε κάποιο ύψος από το έδαφος, ώστε να μην τραυματιστούν οι καρποί από την πτώση και ii) η διαδικασία συγκομιδής είναι επίπονη και πολύωρη. Οι προδιαγραφές των δύο τεχνολογιών-συστημάτων αποκοπής των καρπών από τα δέντρα παρουσιάζονται στον πίνακα 1.



Σχήμα 3. α) Τοποθέτηση μηχανήματος συγκομιδής κερασιών δίπλα στον κορμό του δένδρου και β) βοηθητικό χειροκίνητο εργαλείο (δονητής) για τη συγκομιδή των καρπών.

	δέντρα.	
	Μηχάνημα Συγκομιδής	Χειροκίνητος Δονητής
	USDA με δύο όμοιες	
	μονάδες	
Τροφοδοσία	18.6 kW	1.6 kW
Μετατόπιση συστήματος κρούσης	0.047 m	0.036 m
Συχνότητα δόνησης	Ακαριαία κρούση	> 50 Hz
Βάρος		10.5 kg
Μήκος βραχίονα		2.47 m

Πίνακα 1. Προδιαγραφές δύο τεχνολογιών-συστημάτων αποκοπής των καρπών από τα

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Αρχικά, η δύναμη συγκράτησης των καρπών στα δέντρα, ή PFRF, μερτήθηκε σε 30 τυχαίους καρπούς ανά δένδρο, σε σύνολο έξι δένδρων (Skeena) ανά πείραμα (τεχνολογία). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ένα πειραματικό οπωρώνα του πολιτειακού πανεπιστημίου της Washington (WSU Roza Experimental Orchard) που βρίσκεται στο Prosser WA (46.3° N, 119.7° W).

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το μηχάνημα συγκομιδής USDA-ARS (με τις δύο όμοιες μονάδες) κινήθηκε μεταξύ δύο γραμμών δένδρων και επιλέχτηκαν έξι δένδρα για τη συγκομιδή των καρπών τους. Στη συνέχεια ο βραχίονας εφάρμοσε ακαριαίες κρούσεις σε δύο ή τρία σημεία ανά δένδρο, μέχρι να μην πέφτει κανένας από τους εναπομείναντες καρπούς. Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για το χειροκίνητο δονητή. Επιλέχτηκαν έξι δένδρα και ο χειριστής εφάρμοσε τη συνεχόμενη δόνηση σε αρκετά κλαδιά ανά δένδρο (και στις δύο πλευρές των δένδρων) μέχρι κανένας καρπός να μην πέφτει από το δένδρο. Γενικά, ο χειριστής έπρεπε να δονήσει σχεδόν όλα τα κλαδιά του δένδρου και για το λόγο αυτό ο χρόνος συγκομιδής ποικίλει μεταξύ των δέντρων και εξαρτάται από τη διαμόρφωση του δένδρου και την εμπειρία του χειριστή.

Οι δύο τεχνολογίες αξιολογήθηκαν βάσει του ποσοστού των καρπών (και το βάρος τους) τα οποία συγκομίστηκαν μετά την εφαρμογή της ακαριαίας κρούσης (για το USDA-ARS) και της συνεχόμενης κρούσης (χειροκίνητο βοηθητικό μηχάνημα) αντίστοιχα. Στη συνέχεια μετρήθηκε ο αριθμός των συγκομισμένων φρούτων τα οποία παρουσίασαν ρωγμές, βαθουλώματα και γενικά φθορές, ώστε να υπολογιστεί το ποσοστό τραυματισμού των καρπών μετά τη μηχανική συγκομιδή.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων αξιολόγησης των δύο τεχνολογιών συγκομιδής κερασιών. Παρατηρείται ότι οι αποδόσεις και των δύο τεχνολογιών, σε σχέση με το ποσοστό των καρπών που συγκομίστηκαν, είναι υψηλές σε όλες τις επαναλήψεις του πειράματος (και στα έξι δένδρα). Παρόλα αυτά, με τη συνεχόμενη δόνηση, που προκαλείται από τον χειροκίνητο δονητή, μεγαλύτερος αριθμός καρπών αποκόπηκε και συγκομίστηκε από τα δένδρα (89.5%), σε σχέση με την ακαριαία κρούση (81.8%), που προκαλείται από το μηχάνημα συγκομιδής USDA-ARS. Επίσης, από τον πίνακα 2 παρατηρείται ότι όσο μικρότερη είναι η δύναμη συγκράτησης PFRF, τόσο πιο εύκολα οι καρποί αποκόπτονται από τα κλαδιά των δένδρων.

	X	ειροκήνητος δονητήα	; (7/12/2010)		Μηχάνημα συγκομιδής USDA-ARS (7/14/2010)			
Αριθμός δένδρων	PFRF, Μέσος όρος (sd) /kgf	Ποσοστό % συγκομιζόμενων καρπών	Ποσοστό % τραυματισμ ένων καρπών	Χόνος συγκομι δής* /s	PFRF, Μέσος όρος (sd) /kgf	Ποσοστό % συγκομισμέν ων καρπών	Ποσοστό % τραυματισμέν ων καρπών	Χόνος συγκομι δής (s)
1	0.797 (0.253)	81.1	22.5	7'14''	0.474 (0.135)	96.0	22.8	59"
2	0.601 (0.183)	90.8	25.9	3'56''	0.658 (0.201)	87.5	29.9	1'04''
3	0.574 (0.137)	84.1	20.7	4'13''	0.666 (0.189)	78.3	24.9	1'53''
4	0.859 (0.188)	91.1	22.2	2'38''	0.462 (0.188)	88.3	26.1	2'52''
5	0.844 (0.198)	93.5	23.8	3'13''	0.531 (0.152)	77.8	23.5	2'06''
6	0.823 (0.218)	96.3	20.8	1'58''	0.444 (0.137)	63.1	24.0	3'20''
Μέσος όρος		89.5	22.7			81.8	25.2	
sd		5.8	2.0			11.4	2.6	

Πίνανακας 2. Αποτελέσματα πειράματος αξιολόγησης δύο τεχνολογιών συγκομιδής

* δεν περιλαμβάνεται ο χρόνος συλλογής και τοποθέτησης των καρπών σε τελάρα; sd, τυπική απόκλιση.

Επιπλέον, το μηχάνημα συγκομιδής USDA-ARS σχεδιάστηκε ώστε να προκαλεί μεγάλη και ακαριαία κρούση, καταναλώνοντας πολύ ενέργεια, χωρίς όμως να έχει και καλύτερα αποτελέσματα, ως προς το ποσοστό των συγκομισμένων καρπών, σε σχέση με τη

συνεχόμενη κρούση (μικρότερη παραγόμενη δύναμη κρούσης) του χειροκίνητου μηχανήματος. Οπότε, αυτή η επιπλέον ενέργεια που παράγεται έχει μικρή επίδραση στην αποδοτικότητα της συγκομιδής επειδή δεν μεταδίδεται ιδανικά στα πλευρικά κλαδιά του δένδρου. Ένα πλεονέκτημα του μηχανήματος συγκομιδής είναι ότι απαιτεί μικρό χρονικό διάστημα για τη συγκομιδή, συλλογή και τοποθέτηση των καρπών σε κιβώτια. Όσο αναφορά το χειροκίνητο μηχάνημα, προκαλεί συνεχόμενη δόνηση (κρούση) με αποτέλεσμα όλο το κλαδί να ταλαντώνεται με την ίδια συχνότητα (και πλάτος) και να αυξάνεται το ποσοστό των συγκομισμένων καρπών. Το μεγαλύτερο ποσοστό των καρπών που δεν συγκομίστηκαν παρουσιάστηκε στα λεπτά κλαδιά των δένδρων.

Το USDA-ARS είναι πιο αποδοτικό από άποψη χρόνου συγκομιδής, λόγω κυρίως της πλήρους μηχανοποίησης των συστημάτων αποκοπής, συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσης των καρπών. Ο συνολικός χρόνος συγκομιδής του ήταν πολύ μικρότερος από το χειροκίνητο μηχάνημα, για το οποίο δεν υπολογίστηκε ο χρόνος για τη μεταφορά των καρπών από το πανί συγκομιδής και τη τοποθέτησή τους σε κιβώτια (χωρητικότητας 180 kg). Επίσης, η χρήση του γάντζου, του χειροκίνητου μηχανήματος, αυξάνει το χρόνο συγκομιδής, επειδή ο χειριστής δυσκολεύεται να τοποθετήσει το γάντζο στα κλαδιά του δένδρου. Επομένως, απαιτείται η κατασκευή ενός πιο εξεζητημένου συστήματος για τη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευση των καρπών, για το χειροκίνητο μηχάνημα, και ενός πιο αξιόλογου συστήματος αποκοπής των καρπών, το οποίο θα καταναλώνει λιγότερη ενέργεια, για το USDA-ARS.

Τέλος, το ποσοστό τραυματισμού των καρπών είναι μεγαλύτερο με τη χρήση του μηχανήματος συγκομιδής USDA-ARS (πίνακας 2). Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλης έντασης ακαριαία κρούση που παράγεται από το μηχάνημα αυτό, με αποτέλεσμα πολλοί καρποί να αποκτούν μεγάλη επιτάχυνση και να προσκρούονται με άλλους καρπούς, κλαδιά και πολλές φορές να αναπηδούν στην επιφάνεια συλλογής.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των δύο τεχνολογιών συγκομιδής κερασιών παρατηρείται ότι η συνεχόμενη δόνηση, που παράγεται από το χειροκίνητο μηχάνημα, είναι πιο αποδοτική (89.5%), σε σχέση με το ποσοστό των καρπών που αποκόπτονται από το δένδρο, από ότι η έντονη και βίαιη κρούση (81,8%), που παράγεται από το μηχάνημα συγκομιδής USDA-ARS. Επίσης, το ποσοστό των τραυματισμένων καρπών είναι μεγαλύτερο όταν εφαρμόζεται βίαιη κρούση (25,2 έναντι 22.7% όταν εφαρμόζεται συνεχόμενη δόνηση). Παρόλα αυτά το πλήρης μηχανοποιημένο σύστημα του μηχανήματος συγκομιδής USDA-ARS ελαχιστοποιεί το χρόνο συλλογής και αποθήκευσης των καρπών. Στο επόμενο μέρος της εργασίας αυτής παρουσιάζεται η σχεδίαση ενός μηχανήματος συγκομιδής που χρησιμοποιεί συνεχόμενη δόνηση (αντί της βίαιης κρούσης) ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα αποκοπής των καρπών (συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνολογιών) και αξιολογείται η απόδοσή του κατά τη συγκομιδή των καρπών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αμπατζίδης, Ι.Γ., Σπανομήτρος, Ι.Α. και Χατζιμπεντέλης, Δ.Χ., 2009. Μηχανικός Εξοπλισμός των Ελληνικών Γεωργικών Εκμεταλλεύσεων. Πρακτικά 6^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, 8-10 Οκτωβρίου, σελ. 531-538.

- Holt, J. S., 1999. Implications of reduced availability of seasonal agricultural workers on the labor intensive sector of U.S. agriculture. ASAE Paper No. 99–1095. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Markwardt, E. D., Guest, R. W., Cain, J. C. and LaBelle, R. L., 1964. *Mechanical cherry harvesting*. Trans. ASAE 7(1): 70–74.
- Norton, R. A., Claypool, C. C., Leonard, S., Adrain, P., Fridley, R. and Charles, F., 1962. *Mechanical harvest of sweet cherries*. Calif. Agr. 16(5): 8–10.
- Peterson, D. L., Bennedsen, B. S., Anger, W. C. and Wolford, S. C., 1999. A systems approach to robotic bulk harvesting of apples. Trans. ASAE 42(4): 871–876.
- Peterson, D. L. and Wolford, S. D., 2001. *Mechanical harvester for fresh market quality stemless sweet cherries*. Trans. ASAE 44(3): 481-485.
- Sarig, Y., Thompson, J. F. and Brown, G. K., 1999. *The status of fruit and vegetable harvest mechanization in the U.S.* ASAE Paper No. 99–1098. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Seavert, C., Freeborn, J. and Long, L., 2008. Orchard Economics: Establishing and Producing High-Density Sweet Cherries in Wasco County. OSU Extension Service Publication, EM 8802-E.
- Τσατσαρέλης, Κ.Α., 2003. Μηχανική συγκομιδή γεωργικών προϊόντων. Εκδόσεις Διαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη.
- Τσατσαρέλης, Κ.Α., 2006. Διαχείριση γεωργικών μηχανημάτων. Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Γιαχούδη.
- Whiting, M.D. and Smith, E., 2007. *Mechanical harvest system has little impact on sweet cherry quality and storability*. Good Fruit Grower. 58:22-24.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΚΕΡΑΣΙΩΝ. ΜΕΡΟΣ 2: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΟΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ

X. Du¹, I.Γ. Αμπατζίδης¹, D. Chen¹, P. Scharf¹, M. Whiting² και Q. Zhang¹
 ¹Center for Precision and Automated Agricultural Systems, Washington State University, 99350 Prosser, WA, USA, e-mail: <u>xiaoqiang.du@wsu.edu</u>
 ²Department of Horticulture and Landscape Architecture, Washington State University, 99350 Prosser, WA, USA, email: mdwhiting@wsu.edu

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή αξιολογήθηκε ένα σύστημα μηχανικής συγκομιδής των δένδρων, το οποίο παράγει συνεχόμενη κρούση (δόνηση). Πρώτα, αξιολογήθηκε η μετάδοση της ενέργειας (δυναμικά) στα κλαδιά των δένδρων κερασιάς (σύστημα UFO), κάτω από διαφορετικό εύρος συχνοτήτων (8-30 Hz). Η συχνότητα συντονισμού καταγράφηκε με χρήση επιταχυνσιομέτρων. Στη συνέχεια, αξιολογήθηκε μία τεχνολογία συγκομιδής, η οποία παράγει συνεχόμενη ταλάντωση (δόνηση), με χρήση του παραπάνω εύρος συχνοτήτων. Ο χρόνος δόνησης ήταν τουλάχιστον 1 min ώστε να μην αποκόπτονται άλλοι καρποί από τα κλαδιά. Η μεγαλύτερη αποδοτικότητα συγκομιδής (77.64%) βρέθηκε στις εύρος συχνοτήτων12~16 Hz για τα 3-χρονών δένδρα κερασιάς (σύστημα UFO).

Λέζεις κλειδιά: μηχανήματα συγκομιδής, τεχνολογίες δόνησης, συγκομιδή κερασιών

DEVELOPMENT OF MECHANICAL HARVEST SYSTEMS FOR SWEET CHERRIES. PART 2: PRELIMINARY EVALUATION OF ACTUATION TECHNOLOGY

X. Du¹, Y.G. Ampatzidis¹, D. Chen¹, P. Scharf¹, M. Whiting² and Q. Zhang¹ ¹Center for Precision and Automated Agricultural Systems, Washington State University, 99350 Prosser, WA, USA, e-mail: <u>xiaoqiang.du@wsu.edu</u> ²Department of Horticulture and Landscape Architecture, Washington State University, 99350 Prosser, WA, USA, email: mdwhiting@wsu.edu

ABSTRACT

In this paper preliminary test for the evaluation of an actuation technology was presented. First, the vibratory energy transmission, excited by oscillation, among UFO cherry tree (Selah) was recorded under different excitation frequencies (8-30 Hz). The resonant excitation frequency was monitored using accelerometers. Then, a harvest technology, using an actuator, was used to shake the trees with the same force amplitude, and under different excitation frequencies. The oscillation time was nearly 1 min to ensure no more cherries would be shaken down. The excitation under 12~16 Hz can achieve the highest harvest efficiency (77.64%) for the tree-year old UFO cherry trees. Finally, a prototype mechanical harvest system was developed, based on the actuation technology.

Key words: mechanical harvester, actuation technology, cherries harvest

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη συστημάτων μηχανικής συγκομιδής για τα δένδρα κερασιάς μπορεί να ωθήσει τη βιομηχανία αυτή σε νέα άνθηση (Whiting and Smith, 2007). Μέχρι τώρα ελάχιστα συστήματα μηχανικής συγκομιδής χρησιμοποιούνται για φρούτα νωπής κατανάλωσης παγκοσμίως. Στην Ελλάδα τέτοια συστήματα δεν έχουν ακόμα υιοθετηθεί (Αμπατζίδης και άλλοι, 2009). Παρόλα αυτά οι προοπτικές χρησιμοποιήσεις των συστημάτων αυτών είναι ελπιδοφόρες, και μπορούν να μειώσουν το κόστος συγκομιδής σημαντικά.

Καθοριστικής σημασίας για τη χρησιμοποίηση συστημάτων μηχανικής συγκομιδής είναι η διαμόρφωση των κλαδιών των δένδρων. Ιδιαίτερα τα δένδρα κερασιάς με διαμόρφωση UFO (Upright Fruiting Offshoots) παρουσιάζουν παρόμοια μορφολογία σε σχέση με την κλίση του κορμού και των βασικών κάθετων κλαδιών, παρόλο της διαφορές στο πάχος τους, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν παρόμοια θεωρητική συμπεριφορά στη δόνηση (Sellier and Fourcaud, 2005). Το γεγονός αυτό, καθώς ακόμα και η διαμόρφωση των κλαδιών των δένδρων, που επιτρέπει τη εύκολη διέλευση οχημάτων μεταξύ των γραμμών, καθιστούν το σύστημα αυτό ως κατάλληλο υποψήφιο για μηχανική συγκομιδή.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας αυτής βρέθηκε ότι η συνεχόμενη δόνηση, που παράγεται από ένα χειροκίνητο μηχάνημα, είναι πιο αποδοτική και λιγότερο ενεργοβόρα από ότι η έντονη και βίαιη κρούση, που παράγεται από ένα μηχάνημα συγκομιδής. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας αυτής το χειροκίνητο σύστημα δόνησης των δένδρων τροποποιείται, ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί σε μία πλατφόρμα, και αξιολογείται με χρήση διαφορετικών συχνοτήτων παραγωγής της ταλάντωσης. Τέλος, επιλέχτηκε η κατάλληλη συχνότητα (πιο αποδοτική συγκομιδή καρπών) και αναπτύχθηκε ένα πρότυπο σύστημα μηχανικής συγκομιδής για τη πραγματοποίηση περισσότερων πειραμάτων αξιολόγησης. Τελικός στόχος είναι η πλήρης εκμηχάνιση της συγκομιδής κερασιών και η κατασκευή ενός αποδοτικού μηχανήματος συγκομιδής που να μην προκαλεί σημαντικές φθορές σε καρπούς και δένδρα.

1. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Πειράματα πραγματοποιήθηκαν για τη μέτρηση της συμπεριφοράς των κλαδιών των δένδρων ύστερα από τη εφαρμογή συνεχόμενης δόνησης κάτω από διαφορετικές συχνότητες. Τα πειράματα αυτά αξιολογούν τη μετάδοση της ενέργειας (δυναμικά) στα κλαδιά των δένδρων και την αποδοτικότητα συγκομιδής. Παρακάτω αναλύονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν και οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν.

2.1 ҮЛІКА

Πρώτα, μετρήθηκε η δύναμη συγκράτησης των καρπών στα δέντρα ή PFRF (pedicelfruit retention force) με τη χρήση ενός μηχανήματος καταγραφής της δύναμης (Imada DS2, Imada Co., Northbrook, IL). Με το μηχάνημα αυτό οι καρποί αποκόπτονται από το κοτσάνι χειροκίνητα και καταγράφεται η δύναμη αντίστασης.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε συνεχόμενη ταλάντωση στα δένδρα με τη χρήση ενός ηλεκτροδυναμικού μηχανήματος (ET-140, Labworks, Costa Mesa, CA), το οποίο παράγει ημιτονοειδή δύναμη με μέγιστο τα 489 Ν. Το μηχάνημα δόνησης τοποθετήθηκε σε μία πλατφόρμα και χρησιμοποιήθηκε μία ηλεκτρική γεννήτρια (33210A, Agilent Technologies, Santa Clara, CA) για την παραγωγή και τον έλεγχο του σήματος (σχήμα 1). Η ταλάντωση διέργεσης εφαρμόστηκε ως κάθετη δύναμη στα δένδρα. Η δύναμη αυτή μετρήθηκε

χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα τύπου ICP (208C03, PCB Piezotronics, Depew, NY), ο οποίος τοποθετήθηκε στο πλαίσιο στήριξης του δονητή.



Σχήμα 1. Τοποθέτηση του μηχανήματος δόνησης σε μία πλατφόρμα και σύστημα παραγωγής και ελέγχου του σήματος εισόδου.

Η επιτάχυνση των κλαδιών του δένδρου μετρήθηκε με τη χρήση επιταχυνσιομέτρων MEMS (Micro-Electric Mechanical Systems), τύπου ADXL345 (Analog Devices, Norwood, MA). Τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν στον κορμό και στα κλαδιά του δένδρου. Αν και οι αισθητήρες αυτοί μετρούν την επιτάχυνση σε τρεις άξονες, στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν καταγράφηκε η επιτάχυνση μόνο σε μία διεύθυνση, παράλληλα με την κατέθυνση διέργησης που παράγεται από το δονητή. Σε αυτή την κατεύθυνση η δυναμική αντίδραση των κλαδιών των δένδρων είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέσης με τις άλλες δύο κατευθύνσεις, κυρίως για τα δένδρα με μορφή UFO. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα καταγραφής σημάτων (δυναμικά), μοντέλο NI CompactDAQ 9234 (National Instruments, Austin, TX), για τη καταγραφή των επιταχύνσεων και των δυνάμεων που παράγονται. Το σχήμα 2 παρουσιάζει τις βασικές αρχές του συστήματος καταγραφής των σημάτων.



Σχήμα 2. Διάγραμμα πειραματικού συστήματος καταγραφής της επιτάχυνσης των κλαδιών του δένδρου και της παραγόμενης δύναμης του μηχανήματος δόνησης.

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ

Ο πειραματικός οπωρώνας, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, περιέχει δένδρα κερασιάς (Selah), τα οποία αναπτύσσονται βάσει του συστήματος UFO, και βρίσκεται 10 Km βόρεια του Prosser, Washington, USA (46.3°N, 119.7°W). Τα δένδρα που επιλέχτηκαν στα πειράματα είναι 3 χρονών (Gisela[®] 6, *P. cerasus* × *P. canescens*) και οι αποστάσεις φύτευσης είναι 1.83 m επί των γραμμών και 3.05 m μεταξύ των γραμμών.

Πραγματοποιήθηκαν δύο ειδών πειράματα. Πρώτα αξιολογήθηκε η μετάδοση της ενέργειας στα κλαδιά ύστερα από εφαρμογή της δόνησης (κάτω από διαφορετικές συχνότητες). Στη συνέχεια, αξιολογήθηκε η αποδοτικότητα της συνεχόμενης κρούσης (δόνηση), για τα συγκεκριμένα δένδρα κερασιάς, κατά τη μηχανική συγκομιδή, κάτω από το ίδιο εύρος συχνοτήτων με το προηγούμενο πείραμα.

2.2.1 Πειράματα αξιολόγησης μετάδοσης της ενέργειας στα κλαδιά

Επιλέχτηκε ένας τύπος δένδρου κερασιάς (διαμόρφωση UFO), ως αντιπροσωπευτικό δείγμα (σχήμα 3), για την καταγραφή της μετάδοσης της ταλάντωσης στα κλαδιά του. Η διαμόρφωση UFO έχει πέντε βασικά κλαδιά, τα οποία μπορούν να περιέχουν φρούτα, τα οποία αριθμήθηκαν από το B1 έως το B5 (σγήμα 3). Για την αξιολόγηση της αντίδρασης των κλαδιών και της μετάδοσης της ενέργειας (δυναμικά χαρακτηριστικά) σε αυτά γρησιμοποιήθηκαν ένα μοτίβο διέργεσης: ταλάντωση (δόνηση). Αυτό το μοτίβο είναι πιο αποδοτικό για τη μηχανική συγκομιδή των καρπών, σε σχέση με την ακαριαία κρούση (βλέπε μέρος 1). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις 26-27 Απριλίου 2010, όταν τα δένδρα βρίσκονταν στο στάδιο της πλήρους άνθισης. Η συνεχόμενη ταλάντωση παράχθηκε με τη χρήση του μηχανήματος δόνησης, που αναλύθηκε παραπάνω, και εφαρμόστηκε κάθετα κλαδί B3 (σχήμα 3), το οποίο αναφέρεται ως «κλαδί διέγερσης». Τα υπόλοιπα κλαδιά ανταποκρίνονται (αντιδρούν) στη διέργεση και αναφέρονται ως «κλαδιά ανταπόκρισης». Το μηγάνημα δόνησης εφάρμοσε παλινδρομική κίνηση στο «κλαδί διέγερσης», 20 cm πάνω από κορμό, με συχνότητα η οποία κυμάνθηκε από 8 έως 30 Hz. Κάτω από τα 20 Hz, η συχνότητα μεταβάλλονταν με βήμα 2 Hz, ενώ πάνω από τα 20 Hz με βήμα 5 Hz. Επιλέγτηκαν 31 δένδρα κερασιάς (UFO διαμόρφωση) για την ανίγνευση εάν όλα τα δένδρα παρουσιάζουν ίδια συχνότητα συντονισμού (υψηλή επιτάχυνση).



Σχήμα 3. Σημεία μέτρησης της επιτάχυνσης σε δένδρο κερασιάς (Selah, σύστημα UFO), ύστερα από την εφαρμογή δόνησης.

Για κάθε ομάδα μετρήσεων, η δύναμη διέγερσης είχε το ίδιο μέγιστο 44.5 N (10 lb_F), κάτω από το οποίο τα κλαδιά διεγείρονται αισθητά. Οκτώ επιταχυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν στον βασικό κορμό του δένδρου (θέσεις T1 έως T8, σχήμα 3) και 33 στα βασικά (κάθετα) κλαδιά του (σχήμα 3). Η επιτάχυνση σε κάθε σημείο του δένδρου καταγράφηκε και μετατράπηκε σε ταχύτητα και μετατόπιση. Στη συνέχεια, καταγράφηκαν οι συχνότητες κάτω από τις οποίες τα περισσότερα σημεία των κλαδιών παρουσίασαν υψηλό πλάτος ταλάντωσης (συντονισμό).

2.2.2 Πειράματα αξιολόγησης συγκομιδής με χρήση διαφορετικής συχνότητας διέγερσης

Οι παραπάνω τιμές των συχνοτήτων διέγερσης των δένδρων χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της επίδραση των συχνοτήτων αυτών κατά τη συγκομιδή των δένδρων κερασιάς. Στόχος ήταν ο εντοπισμός της κατάλληλης συχνότητας που παράγει μεγαλύτερη αποκοπή των καρπών από τα δένδρα (μεγαλύτερο ποσοστό συγκομιδής). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις 15-16 Ιουλίου 2010 και επαναλήφθηκαν τρεις φορές ανά συχνότητα.

Πρώτα η δύναμη συγκράτησης των καρπών στα δέντρα (PFRF) μετρήθηκε σε 100 τυχαίους καρπούς, από 6 δένδρα κερασιάς, αρχιτεκτονικής UFO, και υπολογίστηκε η μέση τιμή. Στη συνέχεια επιλέχτηκαν, τυχαία, 18 δένδρα (Selah, διαμόρφωση UFO) του οπωρώνα που βρίσκεται στη Roza WSU και αξιολογήθηκε το ποσοστό συγκομιδής με τη χρήση της πλατφόρμας δόνησης των δένδρων (αναλύθηκε παραπάνω) κάτω από διαφορετικές συχνότητες δόνησης. Το μηχάνημα δόνησης εφάρμοσε ταλάντωση στον κορμό του δένδρου, κοντά στη ρίζα (σχήμα 4), και ο χρόνος δόνησης, για κάθε δένδρο, ήταν το λιγότερο ένα λεπτό ώστε να μην αποκοπόπτονται άλλοι καρποί.



Σχήμα 4. Δένδρο κερασιάς (Selah, διαμόρφωση UFO) πριν (δεξιά) και μετά (αριστερά) την εφαρμογή της συνεχόμενης δόνησης.

Τέλος μετρήθηκε το βάρος των καρπών που αποκόπηκαν από το δένδρο (M_s), ύστερα από την εφαρμογή της δόνησης, καθώς και το βάρος των καρπών που παρέμειναν στο δένδρο (M_H). Η αποδοτικότητα συγκομιδής των καρπών με τη χρήση του συστήματος μηχανικής συγκομιδής υπολογίζεται από τη σχέση (1).

$$P = \frac{M_{\rm S}}{M_{\rm S} + M_{\rm H}} \% \tag{1}$$

2. ANOTEAE Σ MATA – Σ YZHTH Σ H

3.1 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΚΛΑΔΙΑ

Το εύρος συχνοτήτων που επιλέχτηκε ήταν από 8 έως 30 Hz, στο οποίο τα δένδρα ταλαντώνονται ικανοποιητικά (βίαια), βάση σε προηγούμενα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν (μη δημοσιευμένα δεδομένα). Η καλύτερη συχνότητα συντονισμού εμφανίστηκε μεταξύ 8~10 Hz και 18~20 Hz. Λόγω της διαμόρφωσης UFO το «κλαδί

διέγερσης» παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά κάτω από τις διαφορετικές συχνότητες. Αντίθετα, τα «κλαδιά ανταπόκρισης» και ο βασικός κορμός του δένδρου δονούνται διαφορετικά (σχήμα 5). Το σχήμα 5α παρουσιάζει τη μετάδοση της επιτάχυνση (ενέργειας) στο «κλαδί διέγερσης», το 5b στον βασικό κορμό και το 5c σε ένα «κλαδί ανταπόκρισης» (όλα τα «κλαδιά ανταπόκρισης» ταλαντώνονται με παρόμοιο τρόπο), το B2. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι τα κλαδιά και ο κορμός έχουν διαφορετική αντίδραση και μετάδοση της ενέργειας, από το ««κλαδί διέγερσης». Τα «κλαδιά ανταπόκρισης» παρουσιάζουν τοπική συχνότητα συντονισμού στα 10 και 18 Hz (σχήμα 5c, υψηλή επιτάχυνση), ο κορμός στα 9 και 16 Hz (σχήμα 5b, υψηλή επιτάχυνση) και το «κλαδί διέγερσης» στα 14 και 25 Hz (σχήμα 5a, υψηλή επιτάχυνση). Γενικά στις συχνότητες μεταξύ 10 έως 18 Hz παρουσιάστηκε η μικρότερη επιτάχυνση (1.0~2.0 g), επομένως, η μικρότερη μεταφορά ενέργειας. Οι συχνότητες όπου παρουσιάστηκαν υψηλές επιταχύνσεις θεωρούνται κατάλληλα για τη μηχανική αποκοπή των καρπών από τα δένδρα.



Σχήμα 5. Δυναμική αντίδραση των δένδρων κερασιάς (σύστημα UFO) κάτω από την εφαρμογή δόνησης με διαφορετικές (8~30 Hz). Μεταφορά της ενέργειας (επιτάχυνση): (a) στο «κλαδί διέγερσης» B3, (b) στον βασικό κορμό και (c) στο «κλαδί ανταπόκρισης» B2.

3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΝΗΣΗΣ

Η μέση δύναμη αποκοπής PFRF υπολογίστηκε ως 4.178 N (0.426 kgf) για τους καρπούς των δένδρων κερασιάς (διαμόρφωση UFO), από δείγμα 100 τυχαίων καρπών σε έξι δένδρα. Τα πειράματα της δυναμικής μετάδοσης της επιτάχυνσης στα δένδρα κερασιάς με διαμόρφωση UFO έδειξαν ότι η συγνότητα συντονισμού παράγεται κυρίως μεταξύ των 8~10 Hz και 18~20 Hz, η οποία επηρεάζεται από το μέγεθος των φρούτων και του φυλλώματος. Επομένως, επιλέχτηκε η διευρυμένη κλίμακα συχνοτήτων 6~20 Hz και εξετάστηκε το ποσοστό αποκοπής των καρπών από τα δένδρα, κατά τη μηχανική συγκομιδή. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει την αποδοτικότητα συγκομιδής Ρ κάτω από την επίδραση των διαφορετικών συγνοτήτων σε 18 δένδρα. Οι συγνότητες 9, 10, 18 και 20 Hz δεν παρουσίασαν μεγάλο ποσοστό αποκοπής των καρπών και δεν περιελήφθησαν στον πίνακα. Οι περισσότεροι καρποί αποκόπηκαν από τα δένδρα τα πρώτα 10 s και στη συνέχεια ελάχιστοι καρποί συγκομίστηκαν. Στις χαμηλές συχνότητες (6~8 Hz) μικρή επιτάγυνση παρουσιάστηκε και μικρό ποσοστό των καρπών αποκολλήθηκε από τα δένδρα. Κυρίως οι καρποί που βρίσκονται στα αδύνατα κλαδιά του δένδρου δύσκολα αποκόπτονται. Επιπλέον, οι βαρύτεροι καρποί αποκόπτονται πρώτοι και αρκετοί ελαφροί καρποί παραμένουν στα κλαδιά του δένδρου. Από τον πίνακα 1 παρατηρείται ότι οι συγνότητες 12~16 Hz δίνουν πάνω από 77.64% αποδοτικότητα συγκομιδής των καρπών. Παρόλα αυτά, οι πιο αποδοτικές συχνότητες για την ταλάντωση των καρπών δεν είναι ταυτόσημες με τις συγνότητες συντονισμού που υπολογίστηκαν στο παραπάνω πείραμα. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό στάδιο που βρίσκεται το δένδρο (οι συχνότητες συντονισμού υπολογίστηκαν κατά το στάδιο της ανάπτυξης των καρπών). Επομένως, δένδρα με ώριμα φρούτα παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά, ως προς τη μετάδοση της ενέργειας που παράγεται από δόνηση, από όταν βρίσκονται σε νωρίτερα στάδια. Συμπερασματικά, για τα τριών χρονών δένδρα κερασιάς (Selah, με διαμόρφωση UFO) η διέγερση μεταξύ των συχνοτήτων 12~16 Ηz παρουσιάζει την υψηλότερη αποδοτικότητα συγκομιδής των καρπών.

	002,001,100	12 10 112.	
Συχνότητα Διέγερσης (Hz)	Μέση Αποδοτικότητα Συγκομιδής (<i>P</i>)±sd (%)	Μέσος Βάρος Συγκομισμένου Καρπού±sd (g)	Μέσος Βάρος μη Συγκομισμένου Καρπού ±sd (g)
6	14.60±11.93	12.1±0.3	11.9±0.8
7	34.02±20.18	11.8±0.4	11.3±0.8
8	41.12±19.22	12.6±0.5	11.5±0.7
12	73.04±6.04	11.2±0.2	11.0±0.6
14	65.89±36.52	10.8±0.5	10.4±0.6
16	77.64±4.90	11.3±0.2	11.0±0.4

Πίνακας	1. Αποδοτικότητα	συγκομιδής των	καρπών μ	ιε εφαρμογή	δόνησης	μεταξύ τ	των
		συγνοτήτων	12~16 H	Z.			

Μέση PFRF±Sd: 4.178±1.383 N.

Σημείωση: 100 καρποί από 6 δένδρα.

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ

Ύστερα από τη μελέτη των προηγούμενων αποτελεσμάτων αναπτύχθηκε ένα πρότυπο σύστημα μηχανικής συγκομιδής κερασιών, το οποίο βασίστηκε στο σύστημα παραγωγής δόνησης STIHL SP200 (σχήμα 6). Το σύστημα δόνησης (περιλαμβάνει δύο μονάδες) τοποθετήθηκε σε μία πλατφόρμα, ώστε να μπορεί να κινείται σε δύο κατεύθυνσης (πάνωκάτω, δεξιά-αριστερά) και επομένως να εφάπτεται εύκολα στα κλαδιά δένδρων με διαφορετική διαμόρφωση (π.χ. κύπελλο, UFO). Το σύστημα αυτό τροφοδοτείται από το υδραυλικό σύστημα του ελκυστήρα (ροή ~69.6 L/min). Επίσης ένας υδραυλικός κινητήρας, που παράγει 3500 rpm, τροφοδοτεί το σύστημα δόνησης. Η συχνότητα ταλάντωσης που παράγεται από το μηχάνημα αυτό είναι ~16 Hz. Τέλος, το σύστημα επαφής του STIHL SP200 (γάντζος) με τα κλαδιά του δένδρου τροποποιήθηκε σε μία σιδερένια πλάκα, ώστε να μειωθεί ο χρόνος εφαρμογής του συστήματος αυτού στα κλαδιά του δένδρου (βλέπε μέρος 1). Οι Βασικές προδιαγραφές του πρότυπου συστήματος μηχανικής συγκομιδής κερασιών παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Το σύστημα αυτό θα αξιολογηθεί το καλοκαίρι του 2011, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως το βασικό μέρους ενός πλήρους συστήματος μηχανικής συγκομιδής κερασιών.



Σχήμα 6. Πρότυπο σύστημα μηχανικής συγκομιδής κερασιών.

Π'	D /	0	,	,	,	C /	,
Πινακας 2	Βασικες	ποοδιανε	າດເພຍບ	$\sigma n \sigma \tau n n \sigma \tau n c$	unvavikne	σ wkouldne k	$\sqrt{0}$
110000052.	Duotkog	npoorwip	νώψυς	obotiquatos	millow the state	o proprions i	copuoliuv.

	Πρότυπο Σύστημα Μηχανικής Συγκομιδής
Tractor	John Deere 5101EN
Hydraulic motor	CASAPPA model PLM20.14S0-03S1-LO
Actuator stroke	0.036 m
Actuator gearbox ratio	3:1
Actuator frequency	Up to 20 Hz
Tilt angle range	-65°~65°
Height range	Up to 1.2 m

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πειράματα της δυναμικής μετάδοσης της ενέργειας στα δένδρα κερασιάς (UFO σύστημα) έδειξαν ότι η συχνότητα συντονισμού (υψηλή τιμή επιτάχυνσης) παράγεται κυρίως μεταξύ των 8~10 Hz και 18~20 Hz. Κατά τη συγκομιδή των καρπών με χρήση του συστήματος παραγωγής ταλάντωσης (δόνηση) οι συχνότητες 12~16 Hz έδωσαν πάνω από 77.64% αποδοτικότητα συγκομιδής των καρπών. Παρατηρείται ότι οι πιο αποδοτικές συχνότητες για την αποκοπή των καρπών δεν είναι ταυτόσημες με τις συχνότητες συντονισμού. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τιμές αυτές επηρεάζονται από το μέγεθος των φρούτων και του φυλλώματος (στάδιο που βρίσκεται το δένδρο). Για τα τριών χρονών δένδρα κερασιάς (Selah, με διαμόρφωση UFO) η διέγερση μεταξύ των συχνοτήτων 12~16 Hz παρουσιάζει την υψηλότερη αποδοτικότητα συγκομιδής (77.64%) των καρπών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αμπατζίδης, Ι.Γ., Σπανομήτρος, Ι.Α. και Χατζιμπεντέλης, Δ.Χ., 2009. Μηχανικός Εξοπλισμός των Ελληνικών Γεωργικών Εκμεταλλεύσεων. Πρακτικά 6^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, 8-10 Οκτωβρίου, σελ. 531-538.
- Sellier, D. and Fourcaud, T., 2005. A mechanical analysis of the relationship between free oscillations of Pinus pinaster Ait. Saplings and their aerial architecture. Journal of Experimental Botany 56(416), 1563-1573.
- Whiting, M.D. and Smith, E., 2007. *Mechanical harvest system has little impact on sweet cherry quality and storability*. Good Fruit Grower. 58:22-24.