



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΖΙΖΑΝΙΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Φυσιολογικές αποκρίσεις αγγουριού που αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδρειοπονίας»

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ:

Σοφία Κολλύβα



ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:

Ευθυμία Λεβίζου, Επίκουρη Καθηγήτρια Φυσιολογίας Φυτών

Βόλος, 2021

«Φυσιολογικές αποκρίσεις αγγουριού που αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδρειοπονίας»

“Physiological responses of cucumber grown in an aquaponic system”

Σοφία Κολλύβα

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

- 1. Λεβίζου Ευθυμία**, Επίκουρη Καθηγήτρια Φυσιολογίας Φυτών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Επιβλέπουσα**
- 2. Κατσούλας Νικόλαος**, Καθηγητής Γεωργικών Κατασκευών με έμφαση στα Θερμοκήπια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**
- 3. Κυπαρίσσης Άρης**, Αναπληρωτής Καθηγητής Οικοφυσιολογίας Φυτών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**

Βεβαιώνω ότι είμαι η συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτριά μου κα. Λεβίζου Ευθυμία για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της, καθώς και την υποψήφια διδάκτορα Μουραντιάν Αναστασία με την οποία εκπονήσαμε μαζί το πείραμα. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου προς τον κ. Κατσούλα και τον κ. Κυπαρίση για την συμβολή τους ως μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2 Υδροπονία.....	2
1.3 Υδατοκαλλιέργεια.....	3
1.4 Ενυδραιοπονία	3
1.4.1 Συστήματα Ενυδραιοπονίας	5
1.4.2 Εφαρμογές Ενυδραιοπονίας.....	6
Οι εφαρμογές της ενυδραιοπονίας σύμφωνα με τον FAO είναι οι εξής:	6
1.4.3 Ψάρια και φυτά στα συστήματα ενυδραιοπονίας	6
1.4.4 Βακτήρια.....	7
1.4.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα ενυδραιοπονίας.....	8
1.4.6. Συστήματα αποζευγμένης ενυδραιοπονίας.....	9
1.5 Αγγουριά	10
1.6 Σκοπός της εργασίας.....	13
ΥΔΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	14
2.1 Καλλιέργεια Φυτών - Αγγούρι.....	14
2.2 Εκτροφή ιχθύων - Τιλάπια.....	14
2.3 Μεταχειρίσεις.....	15
2.4 Σύστημα Ενυδραιοπονίας	16
2.5 Μέτρηση Φθορισμού Χλωροφύλλης <i>a in vivo</i>	18
2.6 Μέτρηση Ανακλαστικότητας.....	20
2.7 Εκτίμηση περιεχόμενου φύλλου σε χλωροφύλλη με τον δείκτη SPAD.....	20
2.8 Ποσοτικός προσδιορισμός φωτοσυνθετικών χρωστικών	21
2.9 Μέτρηση Φαινολικών.....	23
Στατιστική Ανάλυση.....	25
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	26
3.1 Χλωροφύλλη - Μετρήσεις SPAD.....	26
3.1.1 SPAD ανά φυτό	26
3.1.2 SPAD σε νεαρά, ώριμα και γηρασμένα φύλλα	27
Βιοχημικές μετρήσεις	28
3.2 Προσδιορισμός χλωροφυλλών	28
3.2.1 Χλωροφύλλη <i>a</i>	28
3.2.2 Χλωροφύλλη <i>b</i>	29
3.2.3 Καροτενοειδή	30
3.2.4 Σχέσεις μεταξύ φωτοσυνθετικών χρωστικών.....	31

3.3	Προσδιορισμός φαινολικών	32
3.4	Φθορισμός Χλωροφύλλης	33
3.4.1	Fv/Fm	33
3.4.2	PI total.....	34
3.5	Ανακλαστικότητα.....	35
	ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	36
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	42
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	43
	I. Ξένη βιβλιογραφία.....	43
	II. Ελληνική βιβλιογραφία	48

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1:	Ο κύκλος του αζώτου μέσα στο σύστημα της ενυδραιοπονίας (Tyson et al., 2011)..	8
Εικόνα 2:	Οι τρεις δεξαμενές όπου αναπτύσσονται οι τιλάπιες.....	18
Εικόνα 3:	Το σύστημα των φίλτρων της ενυδραιοπονικής εγκατάστασης στο πιλοτικό θερμοκήπιο	19
Εικόνα 4:	Φθορισμόμετρο συνεχούς διέγερσης Handy-PEA.....	21
Εικόνα 5:	Κεφαλή Φθορισμόμετρου Handy-PEA με λαμπτήρες LED.....	21
Εικόνα 6:	Το όργανο μέτρησης PRI	22
Εικόνα 7:	Όργανο SPAD.....	23
Εικόνα 8:	Ο εργαστηριακός πάγκος κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας του διαλύματος για τον ποσοτικό προσδιορισμό των φωτοσυνθετικών χρωστικών.....	24
Εικόνα 9:	Φασματοφωτόμετρο και δείγμα με εκχύλισμα μέσα σε κυψελίδα.....	25
Εικόνα 10:	Υδατόλουτρο με δείγματα.....	26
Εικόνα 11:	Πλαστικοί δοκιμαστικοί σωλήνες όπου έγινε η εκχύλιση για τον προσδιορισμό των φαινολικών.....	26
Εικόνα 12:	Γυάλινοι δοκιμαστικοί σωλήνες όπου αναπτύχθηκε το χρώμα για την μέτρηση των φαινολικών.....	27

ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1:	Δείκτης Spad ανά φυτό της αγγουριάς	28
Γράφημα 2:	Ο δείκτης SPAD στα νεαρά, ώριμα και γηρασμένα φύλλα της καλλιέργειας της αγγουριάς	29

Γράφημα 3: Συγκέντρωση της χλωροφύλλης a	30
Γράφημα 4: Συγκέντρωση της χλωροφύλλης b	31
Γράφημα 5: Συγκέντρωση των καροτενοειδών	32
Γράφημα 6: Η συγκέντρωση των συνολικών χλωροφυλλών και οι λόγοι μεταξύ φωτοσυνθετικών χρωστικών, χλωροφύλλη/καροτενοειδή και χλωροφύλλες a/b.....	33
Γράφημα 7: Συγκέντρωση ολικών φαιολικών σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος (mgGA / gDW) των φύλλων.....	34
Γράφημα 8: Η παράμετρος φθορισμού Fv/Fm	35
Γράφημα 9: Η παράμετρος φθορισμού PI Total ...	36
Γράφημα 10: Ο δείκτης PRI	37

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενυδραιοπονία είναι η τεχνική καλλιέργειας που συνδυάζει την υδροπονία και την υδατοκαλλιέργεια με σκοπό την ταυτόχρονη παραγωγή φυτών και ψαριών. Αποτελεί βιώσιμο και οικολογικό σύστημα παραγωγής τροφής, διότι το νερό από τα ψάρια καταλήγει στα υδροπονικά κανάλια όπου χρησιμοποιείται ως θρεπτικό διάλυμα από τα φυτά, αφού παρέμβουν νιτροποιητικά βακτήρια για τη μετατροπή της τοξικής αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα. Στην παρούσα εργασία έγινε καλλιέργεια φυτών αγγουριάς (*Cucumis sativus L.*) με ταυτόχρονη εκτροφή τιλάπιας (*Oreochromis sp.*) σε ένα σύγχρονο θερμοκηπιακό πιλοτικό σύστημα ενυδραιοπονίας. Στόχος ήταν η συγκριτική μελέτη φυσιολογικών παραμέτρων και της λειτουργικής κατάστασης των φυτών που ποτίστηκαν με τρία διαφορετικά διαλύματα: α) τυπικό για την αγγουριά διάλυμα υδροπονίας (HP), β) ενυδραιοπονικό διάλυμα (συζευγμένη μέθοδος, AQ) και γ) ενυδραιοπονικό διάλυμα εμπλουτισμένο με θρεπτικά (αποζευγμένη μέθοδος, CAP). Στα φυτά που ποτίστηκαν με το διάλυμα της HP παρέχονταν θρεπτικό διάλυμα που παρασκευαζόταν κάθε βδομάδα από λιπάσματα σύμφωνα με τις ανάγκες των φυτών. Η AQ λάμβανε τα θρεπτικά στοιχεία για την σωστή ανάπτυξη των φυτών αποκλειστικά από το νερό που προέρχονταν από τα ψάρια, ενώ η CAP αποτέλεσε ένα συνδυασμό των άλλων δύο μεταχειρίσεων. Πιο συγκεκριμένα το θρεπτικό διάλυμα που προερχόταν από τα ψάρια ενισχύονταν με θρεπτικά στοιχεία, έτσι ώστε να παρέχει τα αναγκαία για τις ανάγκες των φυτών θρεπτικά και ιχνοστοιχεία σύμφωνα με την υδροπονική συνταγή.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος που διήρκησε 90 ημέρες, διεξάχθηκαν μετρήσεις του περιεχομένου των φύλλων σε χλωροφύλλη μέσω SPAD σε διάφορες ηλικιακές κλάσεις φύλλων, προσδιορισμός της συγκέντρωσης φωτοσυνθετικών χρωστικών και φαινολικών, μέτρηση του φθορισμού της χλωροφύλλης *a in vivo*, και ο δείκτης PRI που αφορά την ανακλαστικότητα των φύλλων. Οι μεταχειρίσεις HP και CAP εμφάνισαν μία παρόμοια επίδραση στις φυσιολογικές παραμέτρους που καταγράφηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου. Η AQ επέδρασε αρνητικά στη συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών στα φύλλα της αγγουριάς, αλλά αύξησε το λόγο χλωροφύλλης *a/b*. Επιπλέον, τα νεαρά φύλλα της μεταχείρισης AQ είχαν σημαντικά χαμηλότερο περιεχόμενο σε ολικές χλωροφύλλες σε σχέση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Η συγκέντρωση ολικών φαινολικών κατά την αρχική περίοδο της καλλιέργειας ήταν σημαντικά αυξημένη σε σχέση με τις υπόλοιπες φάσεις αυτής, υποδεικνύοντας την ανάγκη προστασίας των νεαρών φύλλων. Το αποτέλεσμα αυτό παρατηρήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις, χωρίς ουσιαστικές διαφορές

μεταξύ τους. Ο δείκτης λειτουργικότητας της φωτοσυνθετικής συσκευής Fv/Fm και PI total ήταν πιο υψηλοί στην ΑQ. Ο δείκτης PRI δεν εμφάνισε καθαρό πρότυπο σε ότι αφορά τις διαφορές μεταξύ των φυτών των τριών μεταχειρίσεων, επομένως η αποδοτικότητα χρήσης φωτός δεν φάνηκε να επηρεάζεται ισχυρά από την μεταχείριση. Συμπερασματικά, η αποξευγμένη ενυδρειοπονία ή CAP, αποδεικνύεται μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος καθώς οδηγεί σε μία καλή λειτουργική κατάσταση των φυτών, εκμεταλλευόμενη το νερό της ενυδρειοπονίας με μικρή προσθήκη λιπασμάτων, έχει συνεπώς βελτιωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με την υδροπονία.

Λέξεις κλειδιά: Ενυδρειοπονία, υδροπονία, αποξευγμένη μέθοδος, *Cucumis sativus L.*, *Oreochromis sp.*, καταπόνηση

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ταχύτατη αύξηση του πληθυσμού της γης οδηγεί στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος, εξαντλώντας τους φυσικούς πόρους. Οι ανθρώπινες ανάγκες για τροφή έχουν ως αποτέλεσμα παρεμβάσεις που μπορεί να αλλάξουν την ισορροπία στη λειτουργία των οικοσυστημάτων, χερσαίων και υδάτινων, επηρεάζοντας τους κύκλους των θρεπτικών, όπως ο κύκλος του αζώτου και του φωσφόρου, με απρόβλεπτες συνέπειες (Delaide et al., 2017). Παράλληλα η αύξηση του πληθυσμού συνεπάγεται την αυξημένη ζήτηση σε ζωική πρωτεΐνη. Η συμβατική γεωργία και η κτηνοτροφία θα κληθεί να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις ενώ παράλληλα θα πρέπει να αντιμετωπίσει διάφορα προβλήματα όπως το αυξημένο κόστος της ενέργειας και των καυσίμων, την κλιματική αλλαγή, την ρύπανση, τον περιορισμό του καλλιεργήσιμου εδάφους, τη μειωμένη διαθεσιμότητα καλής ποιότητας νερού και την υποβάθμιση του εδάφους (Goddek et al. 2015). Επομένως είναι επιτακτική ανάγκη να βρεθούν λύσεις για τα παραπάνω προβλήματα, έτσι ώστε να μην επιβαρύνεται το περιβάλλον και η γεωργία να γίνει όσο το δυνατόν πιο βιώσιμη. Η αειφόρος γεωργία στηρίζεται σε καλλιεργητικές επιλογές και πρακτικές που δεν υπονομεύουν την συνέχειά της, άρα την επιτυχία της μελλοντικής γεωργίας. Βασικό στοιχείο της αειφόρου γεωργίας είναι ότι δεν εξαντλεί κανέναν μη ανανεώσιμο πόρο που είναι κρίσιμος για την ανάπτυξη των φυτών, όπως για παράδειγμα ο φώσφορος (Lehman et al., 1993). Ένας διαφορετικός ορισμός της βιώσιμης γεωργίας από τους Francis et al. (2003) είναι ότι «η αειφόρος αγροτική παραγωγή μπορεί να επιτευχθεί μιμούμενη τα φυσικά οικοσυστήματα και να σχεδιάσει συστήματα παραγωγής με κλειστό κύκλο θρεπτικών στοιχείων».

Η ενυδραιοπονία συνδυάζει τα παραπάνω χαρακτηριστικά και αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη βιώσιμη μέθοδο παραγωγής. Η ενυδραιοπονία ορίζεται ως η από κοινού καλλιέργεια ψαριών και φυτών σε κλειστά επανακυκλοφορούμενα συστήματα εκτός εδάφους (Rakocy et al. 2004). Αποτελεί έναν συνδυασμό της υδροπονίας και της υδατοκαλλιέργειας, όπου το νερό των ψαριών, το οποίο περιέχει τα απόβλητά τους, περνάει μέσα από ειδικά φίλτρα που αφαιρούν τα στερεά σώματα και φιλοξενούν νιτροποιητικά βακτήρια. Αυτά μετατρέπουν την αμμωνία που παράγουν τα ψάρια σε νιτρικά, έτσι ώστε το θρεπτικό διάλυμα που έχει προκύψει από την καλλιέργεια των ψαριών να διατεθεί στα φυτά και τέλος να καταλήξει πίσω στις δεξαμενές των ψαριών, αφού έχει πρώτα καθαριστεί (FAO, 2014). Τα ψάρια, τα φυτά και τα βακτήρια συμβιώνουν αρμονικά στο σύστημα.

1.1 Ιστορικά Στοιχεία

Η ενυδραιοπονία αποτελεί μια αρχαία πρακτική, κατά την οποία τα απόβλητα των ψαριών χρησιμοποιούνταν ως λίπασμα για τις καλλιέργειες διάφορων φυτών. Οι αρχαίοι Αιγύπτιοι ξεκίνησαν την ταυτόχρονη εκτροφή τιλάπιας του Νείλου σε δοχεία με φυτά (Παπουτσόγλου, 2008). Έπειτα, σύμφωνα με τους Goddek et al. οι Αζτέκοι εκμεταλλεύτηκαν ρηχές λίμνες στην Κεντρική Αμερική το 1150-1350 π.Χ. και δημιούργησαν τα λεγόμενα Chinampas για την παραγωγή φυτών, ενώ αργότερα στην Νοτιοανατολική Ασία άρχισαν να τοποθετούνται ψάρια σε ορυζώνες. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο New Alchemy Institute North Carolina State University (USA) κατά τις δεκαετίες του '70 και '80 έθεσαν τα θεμέλια για την σύγχρονη ενυδραιοπονία (Goddek et al., 2015). Από το 1990 και μετά ο Dr. Rakocy διερεύνησε την δυνατότητα για εμπορική παραγωγή της ενυδραιοπονίας, αναπτύσσοντας ένα σύστημα υδροπονίας (deep-water hydroponics) στο Πανεπιστήμιο των Παρθένων Νήσων (UVI) στις ΗΠΑ και στοχεύοντας στη δημιουργία νέων τεχνολογιών (Love et al., 2014).

1.2 Υδροπονία

Ως καλλιέργεια εκτός εδάφους ορίζεται η μέθοδος παραγωγής φυτών των οποίων το ριζικό σύστημα δεν αναπτύσσεται μέσα σε φυσικό έδαφος. Τα φυτά λαμβάνουν νερό και θρεπτικά στοιχεία μέσω του θρεπτικού διαλύματος που παρασκευάζεται τεχνητά, ενώ παράλληλα οι ρίζες τους βρίσκονται είτε μέσα στο θρεπτικό διάλυμα είτε σε μέσο ανάπτυξης ή υπόστρωμα. (Σάββας, 2011). Η υδροπονία αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο καλλιέργειας εκτός εδάφους και περιλαμβάνει την ανάπτυξη φυτών πάνω σε χημικά αδρανές υπόστρωμα ή μέσα σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα (FAO, 2014). Αυτή η μέθοδος έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως: η μειωμένη εφαρμογή φυτοφαρμάκων για την καταπολέμηση των εδαφογενών ασθενειών και η αποτελεσματικότερη χρήση του νερού και του θρεπτικού διαλύματος ιδιαίτερα στα κλειστά υδροπονικά συστήματα. Επίσης δίνει λύση σε περιοχές με χαμηλής γονιμότητας εδάφη, καθώς αυξάνονται οι αποδόσεις και η ποιότητα των προϊόντων. Παρόλα αυτά το αρχικό κόστος της εγκατάστασης υδροπονικής μονάδας είναι αρκετά υψηλό, είναι απαραίτητη η απασχόληση εξειδικευμένου συμβούλου-γεωπόνου για τη σωστή λειτουργία της μονάδας, διότι υπάρχει κίνδυνος λανθασμένων χειρισμών με σοβαρές επιπτώσεις στην καλλιέργεια. Τέλος, οι μολύνσεις εξαπλώνονται εύκολα μέσω του θρεπτικού διαλύματος στα κλειστά συστήματα (Σάββας, 2011).

1.3 Υδατοκαλλιέργεια

Η υδατοκαλλιέργεια είναι η εκτροφή και παραγωγή υδρόβιων οργανισμών υπό αιχμαλωσία, σε πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες, για παράδειγμα ψάρια γλυκού ή αλμυρού νερού, μαλάκια και καρκινοειδή (FAO, 2014). Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία, μαζί του αυξάνεται και η ανάγκη για παραγωγή πρωτεΐνης. Οι υδατοκαλλιέργειες δίνουν λύση στο πρόβλημα αφού αποτελούν μια από τις σημαντικότερες πηγές παραγωγής πρωτεΐνης παγκοσμίως. Θεωρείται ότι είναι η πιο ραγδαία αναπτυσσόμενη βιομηχανία παραγωγής βρώσιμων οργανισμών και υπολογίζεται ότι μέχρι το 2030 θα παρέχει το 54% των ψαριών από τους 200 εκατομμύρια τόνους που θα απαιτούνται (Yer *et al.*, 2019). Οι τύποι υδατοκαλλιέργειας που χρησιμοποιούνται είναι τα ανοιχτά συστήματα ύδατος, η καλλιέργεια σε λιμνοδεξαμενές ή υδατοσυλλογές, τα συγκοινωνούντα συστήματα καλλιέργειας και τα συστήματα επανακυκλοφορίας του νερού (recirculating aquaculture systems, RAS). Η ενυδρειοπονία έχει προκύψει και εξελιχθεί από τα συστήματα επανακυκλοφορίας του νερού, διότι σε αυτά το νερό καθαρίζεται και φιλτράρεται για να επαναχρησιμοποιηθεί στις δεξαμενές των ψαριών, αντί να απορρίπτεται όπως στα συστήματα ανοικτής ροής. Τα πλεονεκτήματα των RAS είναι η αυξημένη παραγωγικότητα ανά μονάδα επιφάνειας γης και η αποδοτική χρήση του νερού, ενώ τα μειονεκτήματα του είναι το αυξημένο κόστος λόγω της μεγάλης επένδυσης και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (FAO, 2014).

Όσον αφορά τον αντίκτυπο των σύγχρονων υδατοκαλλιεργειών στο περιβάλλον, αυτό είναι αρκετά επιβαρυνμένο διότι για να μπορέσουν να εκτραφούν τόσο μεγάλες ποσότητες ψαριών σε δεξαμενές, χρησιμοποιούνται σε εκτεταμένο βαθμό επεξεργασμένες τροφές, ορμόνες και αντιβιοτικά τα οποία πιθανότατα καταλήγουν στη φύση (Turcios *et al.*, 2014). Επίσης, μεγάλες ποσότητες αζωτούχων απόβλητων που παράγονται από τις υδατοκαλλιέργειες ρυπαίνουν το περιβάλλον. Παράλληλα όμως το άζωτο και ο φώσφορος παίζουν σημαντικό ρόλο στους βιολογικούς κύκλους διάφορων οργανισμών (ζώων, φυτών και βακτηρίων) καθώς αποτελούν βασικά συστατικά για τη δομή των νουκλεοτιδίων, πρωτεϊνών κλπ (Montanhini *et al.*, 2013). Επομένως μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω των συστημάτων επανακυκλοφορίας του νερού και έτσι να αποφευχθεί το φαινόμενο του υπερτροφισμού και η τοξικότητα λόγω των νιτρικών (Brown *et al.*, 1999).

1.4 Ενυδρειοπονία

Η ενυδρειοπονία είναι μια μέθοδος παραγωγής φυτών και ψαριών που συνδυάζει την υδροπονία και την υδατοκαλλιέργεια. Ένα ενυδρειοπονικό σύστημα αποτελείται από τις

δεξαμενές όπου εκτρέφονται τα ψάρια, ένα μηχανικό φίλτρο (clarifier) για την αφαίρεση των στερεών σωματιδίων και αποβλήτων, το βιολογικό φίλτρο το οποίο φιλοξενεί τα βακτήρια του γένους *Nitrosomonas* sp. και *Nitrobacter* sp., ένα υδροπονικό σύστημα και τις σωληνώσεις παροχής νερού (Pantarella *et al.*, 2012).

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ένα σύστημα ενυδρειοπονίας είναι ο εξής: τα ψάρια εκτρέφονται μέσα στις δεξαμενές, οι οποίες επικοινωνούν με το μηχανικό και το βιολογικό φίλτρο. Το νερό των ψαριών που περιέχει τα απόβλητά τους, στερεά και υγρά, περνά αρχικά μέσα από το μηχανικό φίλτρο το οποίο αφαιρεί τα στερεά απόβλητα και τα υπολείμματα τροφής και στη συνέχεια από το βιολογικό φίλτρο. Αυτό φιλοξενεί τα νιτροποιητικά βακτήρια, τα οποία είναι υπεύθυνα για την μετατροπή της αμμωνίας που εκκρίνουν τα ψάρια σε νιτρώδη και νιτρικά. Έπειτα, το θρεπτικό διάλυμα που έχει προκύψει μετά την επεξεργασία του νερού από τα ειδικά φίλτρα είναι σε θέση να διατεθεί στα φυτά που καλλιεργούνται στην υδροπονική μονάδα. Το νερό της απορροής των καναλιών των φυτών μπορεί να συλλεχθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί επιστρέφοντας στην δεξαμενή των ψαριών, εφόσον δεν έχουν προστεθεί λιπάσματα στην καλλιέργεια.

Καλό είναι να χρησιμοποιούνται παραπάνω από μία δεξαμενή εκτροφής ψαριών, διότι με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται καλύτερη παροχή θρεπτικών στοιχείων στα φυτά. Επιπλέον κάποια είδη ψαριών έχουν την τάση προς τον κανιβαλισμό, γι' αυτόν τον λόγο πρέπει να κατανέμονται στις διάφορες δεξαμενές ανάλογα με το μέγεθός τους, διευκολύνοντας έτσι την εκτροφή και τη συλλογή τους ανάλογα με την ηλικία τους (Nicholas *et al.*, 2012).

Ένας πολύ βασικός κανόνας στο σχεδιασμό των συστημάτων ενυδρειοπονίας είναι η ισορροπία της κυκλοφορίας θρεπτικών στοιχείων, μεταξύ της παροχής τους και της απορρόφησής τους από τα φυτά. Η παροχή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως: η βιομάζα των υδρόβιων οργανισμών, ο ρυθμός σίτισης τους, ο μεταβολισμός τους και η συχνότητα παραγωγής απεκκριμάτων και την ποσότητα αυτών, όπως επίσης σημαντικό ρόλο παίζουν οι τροφές που δεν καταναλώνονται από τα ψάρια και παραμένουν εντός του συστήματος (Licamele, 2009). Η απορρόφηση των κυκλοφορούντων θρεπτικών εξαρτάται από το είδος του φυτού, άρα τις θρεπτικές του απαιτήσεις, και τις συνθήκες της καλλιέργειας. Για την επιτυχή εγκατάσταση ενός ενυδρειοπονικού συστήματος πρέπει να ληφθεί υπόψιν το είδος του φυτού και του ψαριού, διότι το καθένα από αυτά έχει διαφορετικές διατροφικές ανάγκες, οι οποίες αλλάζουν όσο προχωρά η καλλιεργητική περίοδος και εξαιτίας των περιβαλλοντικών συνθηκών και της επιλογής του συστήματος (Goddek *et al.*, 2016).

pH

Όσον αφορά τα επίπεδα του pH που επικρατούν σε ένα σύστημα ενυδρείοπονίας υπάρχουν προβληματισμοί διότι τα ψάρια απαιτούν pH μεγαλύτερο από 7. Σύμφωνα με τον Hochmuth (*et al.*, 2001a) οι προτεινόμενες τιμές του pH για την υδροπονική καλλιέργεια σε θερμοκήπιο είναι 5.5 έως 6.5 γενικά. Σε αυτές τις τιμές το pH βοηθάει στην πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά και σταματά την μετατροπή τους σε διαλυμένα άλατα, τα οποία θα έκαναν το pH πιο βασικό (Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) (Resh, 2004). Μελέτες προτείνουν την διατήρηση του pH στο 6.7-6.8, ως ένα συμβιβασμό ανάμεσα στις απαιτήσεις φυτών, ψαριών και βακτηρίων (Savidov *et al.*, 2007).

1.4.1 Συστήματα Ενυδρείοπονίας

Το κριτήριο διάκρισης των συστημάτων υδροπονίας που χρησιμοποιούνται στην ενυδρείοπονία είναι ο τρόπος με τον οποίο το θρεπτικό διάλυμα διατίθεται στα καλλιεργούμενα φυτά. Ένας δεύτερος τρόπος διάκρισης είναι εάν η τεχνική καλλιέργειας περιέχει υπόστρωμα για την ανάπτυξη των ριζών ή όχι (Maucieri *et al.*, 2018). Συγκεκριμένα στο Media bed technique ή Media Filled Bed Systems (MFBS) εφαρμόζεται ένα μέσο καλλιέργειας ή κλίνες που αποτελούνται από αδρανή υποστρώματα όπως ο περλίτης και η άργιλος. Τα υποστρώματα προσφέρουν στήριξη στο ριζικό σύστημα ενώ παράλληλα φιλτράρουν το νερό απορροής, λειτουργώντας σαν μηχανικό και βιολογικό φίλτρο (FAO, 2014). Η Nutrient Film Technique (NFT) εκμεταλλεύεται οριζόντια κανάλια που μοιάζουν με σωλήνες από όπου διέρχεται το θρεπτικό διάλυμα και διαβρέχει τις ρίζες, καθώς τα φυτά βρίσκονται στερεωμένα στις τρύπες που έχουν δημιουργηθεί στο πάνω μέρος των σωλήνων. Τέλος στην τεχνική Deep Water Culture (DWC) τα φυτά τοποθετούνται σε γλαστράκια με τρύπες έτσι ώστε οι ρίζες τους να κρέμονται ελεύθερες και στη συνέχεια τα γλαστράκια στερεώνονται σε ανοίγματα πάνω σε σανίδες ή σχεδίες πολυστυρενίου. Κάτω από τις σανίδες βρίσκεται το θρεπτικό διάλυμα για να τροφοδοτούνται τα φυτά με τα απαραίτητα στοιχεία (FAO, 2014).

1.4.2 Εφαρμογές Ενυδρειοπονίας

Οι εφαρμογές της ενυδρειοπονίας σύμφωνα με τον FAO είναι οι εξής:

α. Η οικιακή ή μικρής κλίμακας ενυδρειοπονική μονάδα. Εφαρμόζεται για να καλύψει κάποιες από τις διατροφικές ανάγκες μιας οικογένειας σε λαχανικά, βότανα ή αρωματικά φυτά που χρησιμοποιούνται στο μαγείρεμα. Συνήθως η δεξαμενή των ψαριών έχει χωρητικότητα περίπου 1000m³ και ο χώρος των φυτών είναι μέχρι 3m².

β. Η εμπορικής κλίμακας ενυδρειοπονική μονάδα. Συνήθως χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μαρουλιού και βασιλικού. Παρόλα αυτά λόγω του υψηλού αρχικού κόστους δεν προτιμάται από τους παραγωγούς.

γ. Η εκπαιδευτική μονάδα. Η ενυδρειοπονία διδάσκεται σε διάφορες βαθμίδες εκπαίδευσης και σε κοινωνικές οργανώσεις με σκοπό την προώθηση της αειφορίας. Επίσης μέσα από αυτή την ενασχόληση καλλιεργούνται πολλές δεξιότητες και γνώσεις πάνω στην καλλιέργεια φυτών και ψαριών.

δ. Μονάδες ενυδρειοπονίας που έχουν σκοπό την ανθρωπιστική παρέμβαση και την επισιτιστική ασφάλεια. Λαμβάνουν χώρα σε αναπτυσσόμενες χώρες και σε εμπόλεμες ζώνες, προωθώντας την αστική παραγωγή τροφής.

1.4.3 Ψάρια και φυτά στα συστήματα ενυδρειοπονίας

Τα είδη που εκτρέφονται πιο συχνά στις ενυδρειοπονικές παραγωγές είναι η τιλάπια, τα διακοσμητικά ψάρια ενυδρείων, το γατόψαρο, άλλα υδρόβια ζώα, η πέρκα, το γαλαζολιόψαρο (bluegill), η πέστροφα και το λαβράκι (Love *et al.*, 2015). Είναι εμφανές ότι πολλά διαφορετικά είδη ιχθύων είναι κατάλληλα για εκτροφή, παρόλα αυτά προτιμότερα είναι εκείνα που μεγαλώνουν σε γλυκό νερό και σε θερμοκρασίες σχετικά υψηλές, έτσι ώστε να μην παρεμποδίζεται η σωστή ανάπτυξη των φυτών (Nicholas *et al.*, 2012). Ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη ψαριών γλυκού νερού είναι η τιλάπια (*Oreochromis sp.*) που προέρχεται από τον Νείλο, της οποίας η παγκόσμια παραγωγή ξεπέρασε τους 2,2 εκατομμύρια τόνους το 2002, εκ των οποίων πάνω από τη μισή ποσότητα προήλθε από ιχθυοκαλλιέργειες (Lim *et al.*, 2006).

Σύμφωνα με την έρευνα που διεξήγαγαν οι Love *et al.*, (2015) οι εμπορικοί καλλιεργητές επιλέγουν κατά σειρά προτίμησης τα εξής φυτά για τις ενυδρειοπονικές καλλιέργειες: τον βασιλικό (*Ocimum basilicum*), το μαρούλι (*Lactuca sativa*), τα αρωματικά

βότανα, τις τομάτες (*Solanum lycopersicum*), τις πιπεριές (*Capsicum annuum*) και το αγγούρι (*Cucumis sativus*).

1.4.4 Βακτήρια

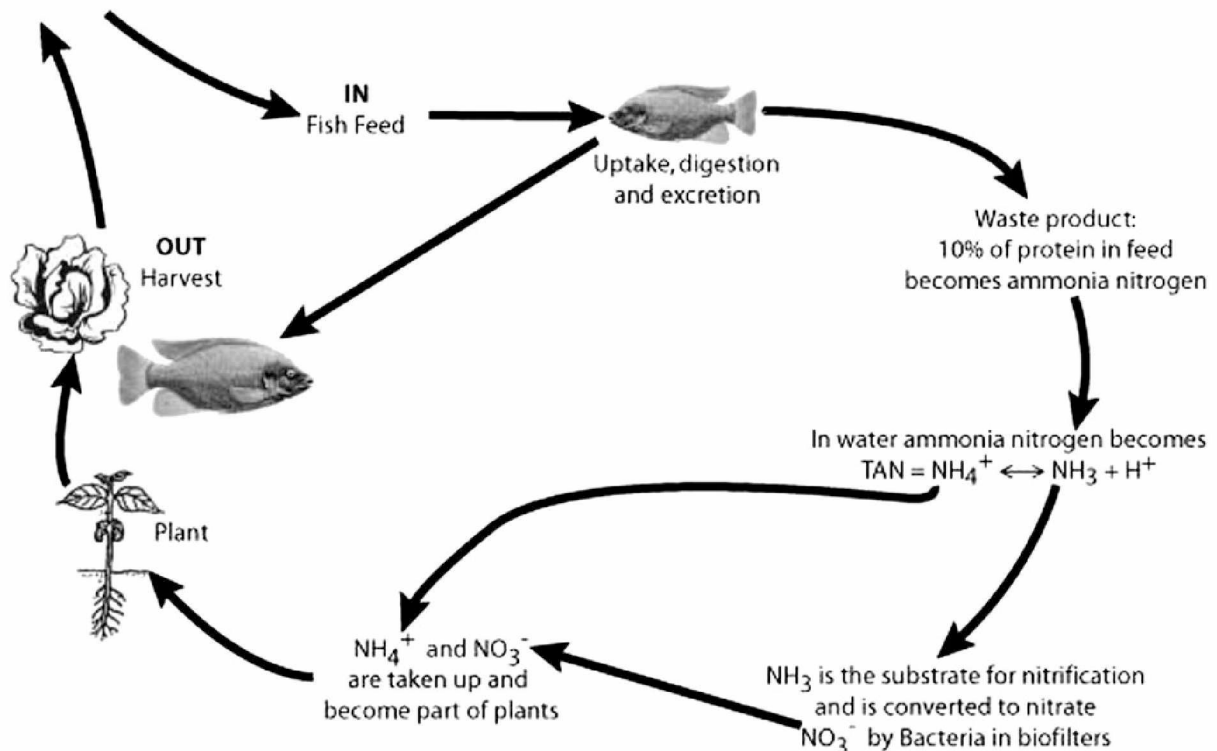
Η αρχή της ενυδρειοπονίας στηρίζεται στον κύκλο του αζώτου. Για την ομαλή και σωστή λειτουργία του ενυδρειοπονικού συστήματος είναι απαραίτητο να υπάρχουν σε αυτό νιτροποιητικά βακτήρια. Αυτά είναι υπεύθυνα για την μετατροπή της αμμωνίας (NH_3) που εκκρίνουν τα ψάρια μέσω των αποχωρημάτων τους σε νιτρώδη (NO_2^-) και στη συνέχεια σε νιτρικά (NO_3^-) (FAO, 2014). Τα αυτότροφα βακτήρια του γένους *Nitrosomonas* sp. μετατρέπουν την αμμωνία σε νιτρώδη, ενώ τα νιτροποιητικά βακτήρια του γένους *Nitrobacter* sp. και *Nitrospira* sp. μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά. Τα νιτρικά που προκύπτουν από τη βακτηριακή δραστηριότητα θεωρούνται μη τοξικά για τους υδρόβιους οργανισμούς και αποτελούν την βασική πηγή αζώτου για τους φυτικούς οργανισμούς του συστήματος (Goddek *et al.*, 2015).

Οι μορφές της αμμωνίας στο νερό είναι δύο και σχηματίζουν μαζί το TAN (total ammonium nitrogen): $\text{TAN} = \text{NH}_4^+ + \text{NH}_3\text{-N}$, ενώ $\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}^+$. Η μορφή του αζώτου που μπορούν να απορροφήσουν τα φυτά είναι το NH_4^+ ενώ το NH_3 συμμετέχει στην αντίδραση της νιτροποίησης. Επίσης οι αντιδράσεις της νιτροποίησης επηρεάζονται από την θερμοκρασία και το pH που επικρατούν μέσα στο νερό (Tyson *et al.*, 2008).

Οι καλύτερες συνθήκες για την μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρώδη και νιτρικά (Nitrification) γίνεται σε θερμοκρασία 25-30°C, pH 7-9 και οξυγόνο λιγότερο από 20 mg/L (Rakocy *et al.*, 2006, Yerp, B., & Zheng, Y., 2019). Προκειμένου να επιτευχθεί με επιτυχία ο κύκλος του αζώτου είναι απαραίτητη η παρουσία του οξυγόνου, επομένως πρέπει πάντα να φροντίζεται το σύστημα αερισμού για την αποφυγή της δημιουργίας αναερόβιων συνθηκών στα συστήματα ενυδρειοπονίας (Μουραντιάν, 2019). Παρόλα αυτά για τα συστήματα ενυδρειοπονίας στα οποία το νερό επανακυκλοφορεί στο σύστημα, το pH προτείνεται να κυμαίνεται στο 7-7,5 με σκοπό την βέλτιστη λειτουργία του βιολογικού φίλτρου και την πρόσληψη θρεπτικών από τα φυτά (Timmons *et al.*, 2002).

Υπάρχει μεγάλο εύρος στα βιολογικά φίλτρα που χρησιμοποιούνται όσον αφορά την λεπτομέρεια στο φιλτράρισμα. Κάποια απλά φίλτρα αφαιρούν τα υπολείμματα τροφών και τα περιττώματα ψαριών, τα οποία στη συνέχεια προστίθενται στο θρεπτικό διάλυμα που προορίζεται για τα φυτά αφού πρώτα αφομοιωθούν (Nicholas *et al.*, 2012). Η νιτροποίηση

που συμβαίνει στα βιολογικά φίλτρα μέσω των βακτηρίων είναι απαραίτητη για την διατήρηση της ποιότητας του νερού, διότι με αυτή τη διαδικασία η αμμωνία που παράγεται από τα ψάρια μετατρέπεται σε νιτρικά άλας (NO_3^- -N και παρέχεται στα φυτά ως θρεπτικό (Tyson *et al.*, 2008).



Εικόνα 1: Ο κύκλος του αζώτου μέσα στο σύστημα της ενυδρείοπονίας (Tyson *et al.*, 2011)

1.4.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα ενυδρείοπονίας

Τα ενυδρείοπονικά συστήματα θεωρούνται βιώσιμα και εντατικά συστήματα παραγωγής, όπου γίνεται χρήση μόνο μίας πηγής αζώτου, που προέρχεται από τα ψάρια για την παραγωγή των υδρόβιων οργανισμών και των φυτών. Παρέχουν υψηλή παραγωγικότητα, ενώ ταυτόχρονα έχουν χαμηλή κατανάλωση νερού και φυτοφαρμάκων και καθόλου χρήση λιπασμάτων. Η εμφάνιση φυτικών ασθενειών είναι σπάνια και η παραγωγή αποβλήτων που θα καταλήξουν στο περιβάλλον είναι περιορισμένη. Επίσης το σύστημα δίνει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε πολλές διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και μέρη πχ αστική γεωργία ή σε περιοχές με υποβαθμισμένη ποιότητα εδάφους (ερήμους, περιοχές με αλατούχα ή υπερβολικά αμμώδη εδάφη), διότι δεν είναι απαραίτητη η παρουσία εδάφους για την καλλιέργεια. Παράλληλα μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος που οφείλεται στις μεταφορές των προϊόντων. Ένα ακόμα θετικό της ενυδρείοπονίας είναι ότι μέσω της αυτοματοποίησης οι καθημερινές εργασίες, η φύτευση και η συγκομιδή μπορούν να παρέχουν απασχόληση σε μεγάλο εύρος ανθρώπων ανεξάρτητα από

το φύλο ή την ηλικία τους, όπως επίσης ότι η γνώση και οι πληροφορίες για να κατασκευάσει κανείς μια μονάδα είναι πλέον εύκολα προσβάσιμες.

Το κυριότερο μειονέκτημα της ενυδρειοπονίας είναι ότι απαιτείται μεγάλο αρχικό κόστος για την εγκατάσταση σε σύγκριση με μία συμβατική καλλιέργεια εδάφους και χρόνος για την έγκριση της άδειας λειτουργίας. Επιπλέον πρέπει να απασχολείται μεγάλος αριθμός προσωπικού με υψηλό επίπεδο εκπαίδευσης, έτσι ώστε να λαμβάνουν χώρα καθημερινοί έλεγχοι του ευαίσθητου συστήματος. Παράλληλα, ειδικοί χειρισμοί του συστήματος κρίνονται απαραίτητοι για την αποφυγή απώλειας ψαριών, όπως η σταθερή θερμοκρασία του νερού και ο έλεγχος των ασθενειών των ψαριών. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι πολλές φορές οι περιβαλλοντικές συνθήκες που χρειάζονται τα φυτά και τα ψάρια δεν συμβαδίζουν αρμονικά και γι' αυτό τον λόγο είναι καλό να αποφεύγονται χώροι στους οποίους δεν μπορούν να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες για την καλλιέργεια, ειδικά όσον αφορά τη θερμοκρασία. Χρειάζεται συνεχής απασχόληση και επιτήρηση, γιατί πρέπει να καταγράφεται σε σχεδόν καθημερινή βάση η ποιότητα του νερού μέσω του pH, της αμμωνίας, των νιτρωδών και των νιτρικών ιόντων (Σταθοπούλου, 2017). Τέλος, απαιτείται μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας και είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει μία σταθερή πηγή ηλεκτρισμού.

1.4.6. Συστήματα αποζευγμένης ενυδρειοπονίας

Τα συστήματα ενυδρειοπονίας που περιγράφηκαν παραπάνω αφορούν τη συζευγμένη ενυδρειοπονία (coupled aquaponics). Δηλαδή ένα κλειστό σύστημα συνεχώς επανακυκλοφορούμενου νερού μεταξύ υδατοκαλλιέργειας και υδροπονικής μονάδας, οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους. Μία εξέλιξη των συστημάτων αυτών είναι η αποζευγμένη ενυδρειοπονία.

Στο σύστημα αποζευγμένης ενυδρειοπονίας (decoupled aquaponics) χρησιμοποιείται το θρεπτικό διάλυμα που προκύπτει από το νερό των ψαριών μέσα στο οποίο προστίθενται τα θρεπτικά στοιχεία που είναι σε έλλειψη. Τα θρεπτικά στοιχεία στα συστήματα ενυδρειοπονίας που δεν ενισχύονται από λιπάσματα μπορεί να εμφανίσουν ελλείψεις σε φώσφορο, κάλιο, σίδηρο, μαγγάνιο και θείο (Adler et al. 1996, Seawright *et al.*, 1998). Γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται τα αποζευγμένα συστήματα στα οποία προστίθενται λιπάσματα για να καλύψουν τις ανάγκες των φυτών και να βελτιώσουν την παραγωγή. Παράλληλα αν διατηρηθεί το pH σε κατάλληλα επίπεδα για την βέλτιστη δραστηριότητα των νιτροποιητικών

βακτηρίων, υπάρχει η δυνατότητα να μειωθεί η ποσότητα λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά στα ενυδρειοπονικά συστήματα (Tyson *et al.*, 2008).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αποζευγμένων συστημάτων ενυδρειοπονίας είναι ότι μπορούν να ρυθμιστούν οι συνθήκες πιο αποτελεσματικά και στοχευμένα, διότι τα ψάρια και τα φυτά βρίσκονται σε ξεχωριστές δεξαμενές (Kloas *et al.*, 2015). Η κυκλοφορία του νερού συμβαίνει ανάμεσα στις δεξαμενές των ψαριών, τα μηχανικά και βιολογικά φίλτρα και τα υδροπονικά κανάλια, όμως συνήθως το νερό από την υδροπονική μονάδα δεν επιστρέφει στις δεξαμενές της υδατοκαλλιέργειας (Monsees *et al.*, 2019). Υπάρχουν βέβαια απώλειες νερού μέσω της εξατμισοδιαπνοής των φυτών, οι οποίες αντικαθίστανται. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν συστήματα κλιματισμού με ενσωματωμένες κρύες παγίδες (air conditioning system with an integrated cold trap) τα οποία συμπυκνώνουν το νερό που χάνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής των φυτών έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σύστημα RAS (recirculated aquaponic system) (Monsees *et al.*, 2017). Επιπλέον, έχει αποδειχθεί από πειράματα ότι η παραγωγικότητα των ψαριών και των φυτών στα μεμονωμένα αποζευγμένα συστήματα είναι ικανοποιητική ενώ παράλληλα διατηρούν τα οφέλη που παρέχει ένα σύστημα ενυδρειοπονίας (Kloas *et al.*, 2015).

Το πιο αξιοσημείωτο πλεονέκτημα των αποζευγμένων ενυδρειοπονικών συστημάτων αποτελεί το γεγονός ότι για κάθε συντελεστή του συστήματος μπορούν να ελεγχθούν κατάλληλα οι συνθήκες δηλαδή το pH, η θερμοκρασία και το θρεπτικό διάλυμα για τα φυτά και τα ψάρια (Monsees *et al.*, 2017). Από την άλλη μεριά, η προσθήκη των λιπασμάτων και των θρεπτικών στοιχείων για την καλύτερη ανάπτυξη των φυτών προκαλεί προβληματισμούς για την ευημερία των ιχθύων, διότι αναγκάζονται να επιβιώσουν σε μη ιδανικές συνθήκες. Επιπροσθέτως, λόγω της οικονομικής σκοπιμότητας μπορεί η φυτική καλλιέργεια να μην είναι συνεχής, με αποτέλεσμα να χρειάζεται να προσαρμοστεί δυναμικά η κάλυψη των αναγκών των φυτών μέσω του θρεπτικού διαλύματος που παράγεται από τα ψάρια (Monsees *et al.*, 2017).

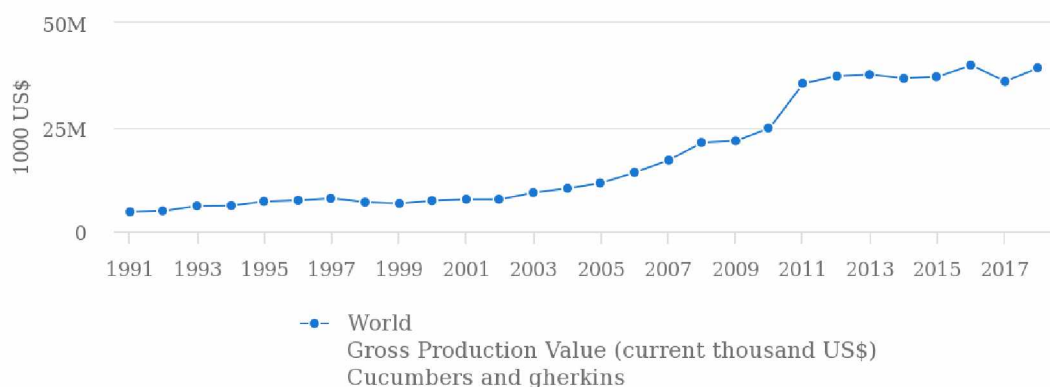
1.5 Αγγουριά

Η αγγουριά (*Cucumis sativus L.*) ανήκει στην οικογένεια Cucurbitaceae. Ανήκει στην κατηγορία των φυτών θερμής εποχής με άριστες θερμοκρασίες ανάπτυξης 18-30°C και είναι ουδέτερη φωτοπεριδικά (Ολύμπιος, 2001). Είναι ετήσιο φυτό, μόνοικο και δίκλινο. Επίσης είναι έρπον, επομένως χρειάζεται υποστύλωση. Καλλιεργείται κυρίως για τους καρπούς του οι

οποίοι τρώγονται νωποί σε σαλάτες, με ή χωρίς των φλοιό ή μετά από επεξεργασία ως τουρσί (Χα & Πετρόπουλος, 2014).

Το αγγούρι είναι ένα πολύ αγαπητό λαχανικό σε όλο τον κόσμο. Αποτελεί μια πολύ σημαντική θερμοκηπιακή καλλιέργεια (Tyson *et al.*, 2001). Το 2018 η παγκόσμια παραγωγή του ήταν 75.2 εκατομμύρια τόνοι που καλλιεργήθηκαν σε 19.840 εκατομμύρια στρέμματα γης (FAOSTAT, 2020). Επιπλέον η ακαθάριστη αξία της παραγωγής του εμφανίζει συνεχώς τάση αύξησης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1. Σύμφωνα με την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία για την Γεωπονία των ΗΠΑ (National Agricultural Statistics Service, USDA) για το έτος 2020 στην πολιτεία της Καλιφόρνιας η συνολική αξία της καλλιέργειας του αγγουριού ήταν 22,104,000 αμερικανικά δολάρια σε μία έκταση καλλιέργειας 24.800 στρεμμάτων.

Σχήμα 1: Η ακαθάριστη αξία της συνολικής παραγωγής του αγγουριού, νωπού και τουρσί, από το 1991 ως το 2017 παγκοσμίως. Πηγή: FAOSTAT, 2021.



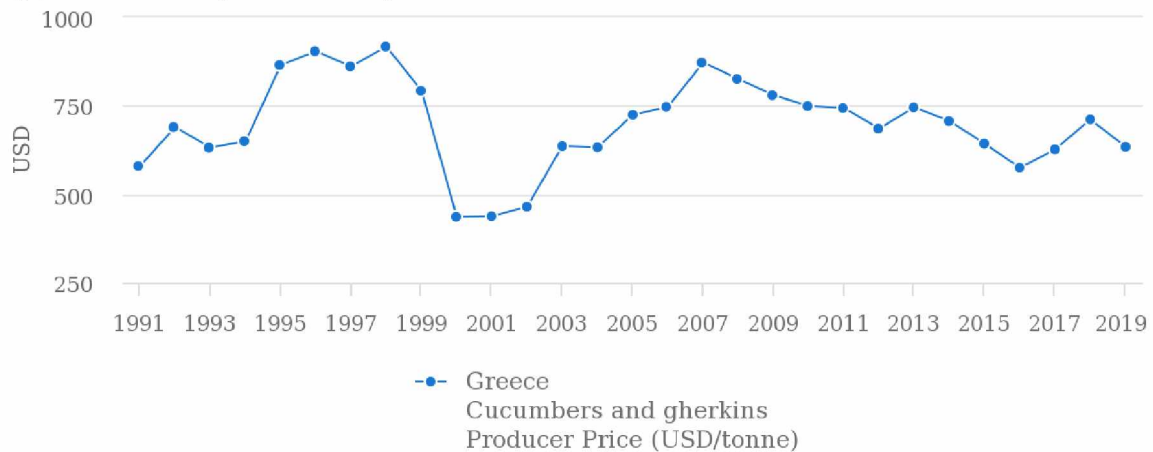
Source: FAOSTAT (Aug 31, 2021)

Στην Ελλάδα το 2019 η συνολική παραγωγή των θερμοκηπιακών καλλιεργειών αγγουριάς ήταν 128.048 τόνοι, ενώ σε υπαίθριες καλλιέργειες η παραγωγή ήταν 19.338 τόνοι σε έκταση 10.040 στρεμμάτων (ΕΛΣΤΑΤ). Επιπλέον το θερμοκηπιακό αγγούρι επιτυγχάνει προσοδοφόρες τιμές στην αγορά. Συγκεκριμένα στην Κρήτη το καλοκαίρι του 2021 λόγω της παρατεταμένης ζέστης και της αυξημένης ζήτησης η τιμή του παραγωγού πλησίασε τα 2 ευρώ, το μικρό αγγουράκι της Κνωσού κόστιζε 1,5 ευρώ το κιλό ενώ όσο αυξάνεται το μέγεθος τους το καθαρό κέρδος του παραγωγού κυμαίνεται από 1,3 ως 2 ευρώ το κιλό σε αντίθεση με την προηγούμενη χρονιά που η τιμή του παραγωγού ήταν 0,30 ευρώ (ΑγροΤύπος, 2021). Όσον αφορά τις τιμές παραγωγής για το αγγούρι γενικά, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα,

παρουσιάζουν άνοδο μετά το 2000. Το 2018 η τιμή παραγωγής ήταν 711,6 US\$ ανά τόνο προϊόντος (FAOSTAT, 2021)

Σχήμα 2: Η τιμή παραγωγής για το αγγούρι και το αγγουράκι τουρσί στην Ελλάδα από το 1991 έως το 2019 εκφρασμένες σε αμερικανικά δολάρια ανά τόνο προϊόντος.

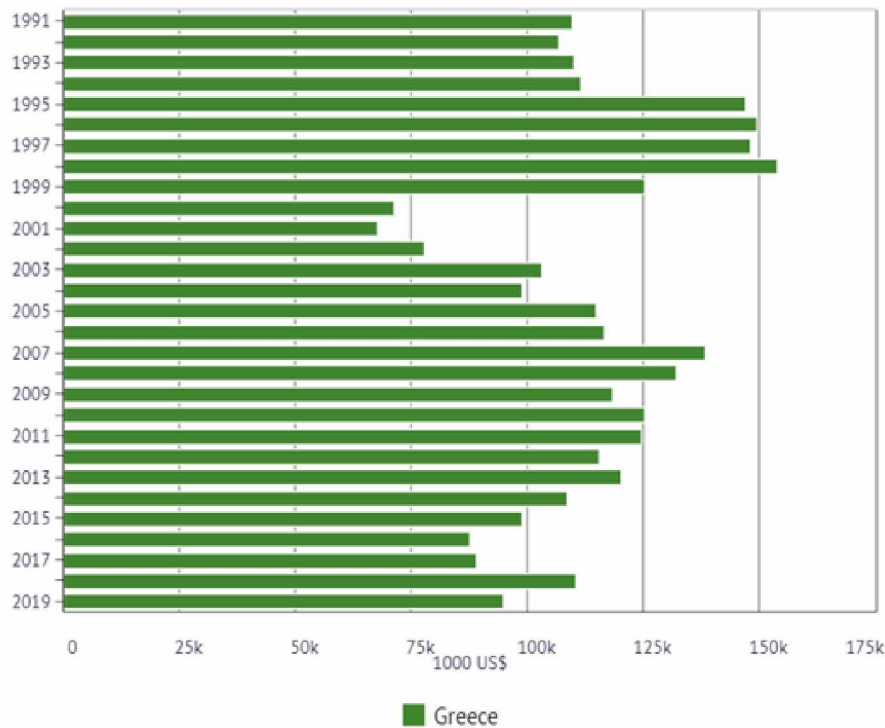
Πηγή: FAOSTAT, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/PP/visualize>



Source: FAOSTAT (Aug 31, 2021)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ακαθάριστη τιμή της παραγωγής του αγγουριού συνολικά για την Ελλάδα. Παρατηρήθηκε μια αύξηση από το 2000 ενώ το 2019 η ακαθάριστη αξία έφτασε τα 94,924,000 US\$.

Σχήμα 3: Η ακαθάριστη αξία της παραγωγής για το αγγούρι και το αγγουράκι τουρσί από το 1991 έως το 2019 στην Ελλάδα εκφρασμένη σε αμερικανικά δολάρια. Πηγή: <https://knoema.com/FAOVAP2018/fao-value-of-agricultural-production?element=1000040>



Greece gross production value (current thousand US\$)

1.6 Σκοπός της εργασίας

Η ενυδρειοπονία είναι ένας σύγχρονος τρόπος παραγωγής υδρόβιων και φυτικών οργανισμών που μπορεί να δώσει μελλοντικά λύση σε σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν την γεωργία. Γίνεται έτσι σαφές ότι υπάρχει χώρος για περαιτέρω μελέτη. Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι να συγκρίνει τρία διαφορετικά συστήματα παραγωγής, την υδροπονία, την συζευγμένη ενυδρειοπονία και την αποζευγμένη ενυδρειοπονία στο σύγχρονο θερμοκηπιακό πιλοτικό σύστημα στο Βελεστίνο. Γι' αυτό τον σκοπό επιλέχθηκε η ταυτόχρονη καλλιέργεια τιλάπιας και αγγουριού και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα φυτά τόσο σε ότι αφορά την λειτουργία τους όσο και την ανίχνευση πιθανής καταπόνησης που επιβάλλεται από τη λειτουργία των συστημάτων που αποτελούσαν τις διάφορες μεταχειρίσεις.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο σύγχρονο θερμοκηπιακό πιλοτικό σύστημα στο Βελεστίνο στο αγρόκτημα του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος για διάστημα 90 ημερών από τις 22 Αυγούστου μέχρι τις 19 Νοεμβρίου 2020. Η έκταση του θερμοκηπιακού χώρου είναι 440m² με ύψος 5m, το μεγαλύτερο μέρος της καταλαμβάνεται από την υδροπονική μονάδα με 360m² ενώ το σύστημα υδατοκαλλιέργειών έχει εγκατασταθεί σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο με ελεγχόμενες συνθήκες με εμβαδόν 80m² (11,5m*7m*3m).

2.1 Καλλιέργεια Φυτών - Αγγούρι

Τα φυτά που καλλιεργήθηκαν ήταν αγγουριές (*Cucumis sativus*) ποικιλία AISOPOS RZ F1. Τα νεαρά φυτάρια μεταφτεύθηκαν σε υπόστρωμα περλίτη, ενώ ήταν σε στάδιο με περίπου 3 με 4 πραγματικά φύλλα και ύψος 10cm.

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος οι καλλιεργητικές φροντίδες ήταν απαραίτητες για την σωστή ανάπτυξη των αγγουριών όπως το κόψιμο των πλάγιων φύλλων, η αφαίρεση γηρασμένων φύλλων, η στήριξη των φυτών με δέσιμο με σπάγκο και κρέμασμα σε σύρματα και η καταπολέμηση των εντόμων και των ασθενειών. Η καταπολέμηση πραγματοποιήθηκε με βιολογικά σκευάσματα και ωφέλιμα έντομα *Amblyseius swirskii* έναντι του θρίπα. Το συγκεκριμένο αρπακτικό άκαρι χρησιμοποιείται έναντι του θρίπα και του αλευρώδη αν και είναι πολυφάγο και συνίσταται η εφαρμογή του να γίνεται προληπτικά.

Όσον αφορά τις συνθήκες που επικρατούσαν μέσα στο χώρο της καλλιέργειας, το θερμοκήπιο διέθετε ειδικό αισθητήρα για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του χώρου, με αποτέλεσμα να ανοίγουν τα παράθυρα ή οι ανεμιστήρες παροχής αέρα ή το πάνελ υγρής παρειάς όταν αυτό ήταν αναγκαίο για τη ρύθμιση των συνθηκών εντός του χώρου των φυτών. Στόχος ήταν η θερμοκρασία να μην ξεπερνά του 26°C.

2.2 Εκτροφή ιχθύων - Τιλάπια

Οι τιλάπιες του είδους *Oreochromis niloticus* που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα προήλθαν από ιχθύδια που αναπαράχθηκαν στο Εργαστήριο Ενυδρείοπονίας της Γεωπονικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και μεταφέρθηκαν στο Βελεστίνο μέσα σε ειδικά βαρέλια που περιείχαν νερό και οξυγόνο. Κατά τη διάρκεια του πειράματος τα ψάρια ταΐζονταν έξι ημέρες

την εβδομάδα και τρεις φορές την ημέρα μέχρι κορεσμού. Το βάρος τους ζυγίστηκε στις 11 Αυγούστου 2020. Μία ημέρα πριν το ζύγισμα τους αυτά παρέμεναν σε ασιτία, διότι το αναισθητικό που εφαρμόζεται, η φαινοξυαιθανόλη τα επηρεάζει. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 430 ψάρια με βιομάζα 34,24kg που είχαν μέγεθος εύρους από 20g έως 150g και χωρίστηκαν σε τρεις δεξαμενές με βάση το μέγεθός τους. Στόχος του διαχωρισμού των ψαριών ήταν να υπάρχουν περίπου 10 kg βιομάζας ψαριών ανά δεξαμενή.

2.3 Μεταχειρίσεις

Οι μεταχειρίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν τρεις και σε κάθε μία εφαρμόστηκε άρδευση με διαφορετικά θρεπτικά διαλύματα: η υδροπονία (HP), η συζευγμένη ενυδραιοπονία (AQ) και η αποζευγμένη ενυδραιοπονία (CAP).

Συνολικά υπήρχαν 18 υδροπονικά κανάλια με σύστημα στάγδην άρδευσης σε σάκους με περλίτη, όπου σε κάθε σάκο τοποθετήθηκαν δύο φυτά και τουλάχιστον πέντε σταλάκτες άρδευσης. Για κάθε μεταχείριση αντιστοιχούσαν 6 κανάλια υδροπονίας όπου σε κάθε κανάλι για την επανάληψη 1 και 2 βρισκόνταν 17 φυτά, ενώ στην τρίτη επανάληψη υπήρχαν 15 φυτά. Σε κάθε μεγάλο κανάλι τοποθετήθηκαν 8 σάκοι με υπόστρωμα περλίτη (1η+2η επανάληψη) και σε κάθε μικρό κανάλι 7 σάκοι (3η επανάληψη). Επομένως κάθε μεταχείριση αποτελούνταν από 98 φυτά.

Για την μεταχείριση HP το θρεπτικό διάλυμα παρασκευάστηκε σύμφωνα με τον Σάββα (2011), η οποία παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα. Στο θρεπτικό διάλυμα γινόταν προσθήκη νιτρικού και θεικού οξέος για ρύθμιση του pH του υδροπονικού διαλύματος όταν αυτό κρινόταν απαραίτητο.

	Συνταγή Υδροπονίας	
	mg/L	mmol ⁻¹
NO ₃	914,5	14,75
PO ₄	118,63	1,25
NH ₄	25,2	1,4
K	242,36	6,2
Ca	166	4,15
SO ₄	124,88	1,3
Mg	38,88	1,6
Fe	0,84	0,02

Τα λιπάσματα παρασκευάζονταν από την κεφαλή υδρολίπανσης, η οποία ήταν συνδεδεμένη με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οποτε άδειαζε η δεξαμενή άρδευσης από το

υδροπονικό διάλυμα, τότε ξεκινούσε η παρασκευή καινούργιου θρεπτικού διαλύματος για κάθε μεταχείριση.

Για την μεταχείριση AQ, το καθαρό ενυδρειοπονικό διάλυμα προερχόταν από τις δεξαμενές των ψαριών, αφότου είχε φιλτραρισθεί από το μηχανικό και βιολογικό φίλτρο χωρίς προσθήκη θρεπτικού διαλύματος. Το σύστημα ήταν κλειστού τύπου σε αυτή τη μεταχείριση, διότι το νερό από την απορροή των φυτών επέστρεφε πίσω στις δεξαμενές των ψαριών (RAS).

Για την μεταχείριση CAP που είναι πρακτικά συνδυασμός της υδροπονίας και της ενυδρειοπονίας, το ενυδρειοπονικό διάλυμα εμπλουτιζόταν με θρεπτικά στοιχεία από λιπάσματα σε τέτοιες συγκεντρώσεις ώστε να φτάνει τους στόχους της υδροπονικής συνταγής του Σάββα (2011) για όλα τα θρεπτικά. Για την σωστή διαχείριση του συστήματος πραγματοποιούνταν εβδομαδιαίες αναλύσεις νερού παίρνοντας δείγμα από τις δεξαμενές των ψαριών με σκοπό την εκτίμηση των θρεπτικών στοιχείων. Επομένως, βάσει των ελλείψεων γινόταν προσθήκη των αντίστοιχων συγκεντρώσεων σε θρεπτικά μέσω λιπασμάτων για να συμβαδίζουν με την συνταγή της υδροπονίας.

Το νερό απορροής από τις μεταχειρίσεις HP και CAP δεν μπορούσε να επιστραφεί στα ψάρια, διότι περιείχε λιπάσματα εκ των οποίων κάποια είναι τοξικά για υδρόβιους οργανισμούς, επομένως το σύστημα ήταν ανοιχτό.

2.4 Σύστημα Ενυδρειοπονίας

Το σύστημα του κλειστού συστήματος ιχθυοκαλλιέργειας RAS αποτελείται από τρεις μεγάλες δεξαμενές ψαριών χωρητικότητας 1500L, μια δεξαμενή Buffer 600L, ένα Μηχανικό-Βιολογικό φίλτρο, ένα βιολογικό φίλτρο 600L (νιτροποίηση) με κεραμικό υλικό ceramic rings (15 mm) και μία δεξαμενή Sump Tank (2.500 L). Πιο αναλυτικά, η δεξαμενή Buffer χρησιμοποιείται ως ενδιάμεση δεξαμενή μεταξύ των δεξαμενών των ψαριών και των φίλτρων, όπου καταλήγει το νερό από τις τρεις μεγάλες δεξαμενές των ψαριών πριν φιλτραρισθεί. Στη δεξαμενή Sump Tank συγκεντρωνόταν το ενυδρειοπονικό διάλυμα που προέκυπτε από το νερό των ψαριών μετά το φιλτράρισμά του μέσω του μηχανικού και του βιολογικού φίλτρου.

Η θερμοκρασία του χώρου που στέγαζε την ενυδρειοπονία κυμάνθηκε γύρω στους 21°C. Όσον αφορά το νερό των δεξαμενών με τα ψάρια το pH ήταν συνήθως 7,8, η ηλεκτρική αγωγιμότητα ήταν 0,88, το οξυγόνο ήταν 7,18ppm και η θερμοκρασία ήταν 22,73°C.



Εικόνα 2: Οι τρεις δεξαμενές όπου αναπτύσσονται οι τιλάπιες

Το μηχανικό-βιολογικό φίλτρο ανήκει στην κατηγορία φίλτρων τυμπάνου (ProfiDrum Combi Bio 15), με βιολογικό υλικό πλήρωσης K1 (10mm) για την αποίκιση των νιτροποιητικών βακτηρίων.



Εικόνα 3: Το σύστημα των φίλτρων στην ενυδρείοπониική εγκατάσταση. Από δεξιά προς αριστερά, α) μηχανικό-βιολογικό φίλτρο β) βιολογικό φίλτρο γ) δεξαμενή Sump Tank

2.5 Μέτρηση Φθορισμού Χλωροφύλλης *a in vivo*

Η μέτρηση του φθορισμού της χλωροφύλλης είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος στη φυσιολογία των φυτών καθώς είναι εύκολη για τον χρήστη και δεν είναι επεμβατική στο φυτικό ιστό. Μετρά την δραστηριότητα του φωτοσυστήματος II (PSII), το οποίο αποτελεί δείκτη της κατάστασης των φυτών στην επίδραση των βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων (Murchie & Lawson, 2013).

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το φθορισμόμετρο συνεχούς διέγερσης Handy-PEA (Plant Efficiency Analyser, Hansatech Instruments, Ltd., King's Lynn, Norfolk, England). Το φθορισμόμετρο περιλαμβάνει την κεντρική μονάδα, μία κεφαλή με τρεις λαμπτήρες LED που έχουν σταθερή ένταση εκπομπής και ειδικά μανταλάκια (leaf clips) με κλείστρο. Για την σωστή λειτουργία του οργάνου ο φυτικός ιστός πρέπει να παραμείνει στο σκοτάδι για τουλάχιστον 30 λεπτά πριν την μέτρηση, επομένως τα ειδικά μανταλάκια τοποθετούνταν στα φύλλα με κλειστό το κλείστρο για μισή ώρα πριν ξεκινήσει η διαδικασία. Διεξήχθησαν συνολικά οκτώ μετρήσεις (με διαφορά 10 ημερών περίπου η μία από την άλλη σε τυχαία δείγματα από τα φυτά. Κάθε μέτρηση περιλάμβανε 38 επαναλήψεις/μεταχείριση. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν από τις 10:30 το πρωί ως τις 12:00 το μεσημέρι.

Οι παράμετροι που καταγράφηκαν ήταν το λόγος F_v/F_m δηλαδή η μέγιστη ανά φωτόνιο απόδοση της πρωτογενούς φωτοχημείας και το PI total που είναι ο δείκτης απόδοσης της μετατροπής ενέργειας από τα φωτόνια που απορροφούνται από τη φωτοσυλλεκτική κεραία του φωτοσυστήματος II έως την αναγωγή των τελικών αποδεκτών του φωτοσυστήματος I.



Εικόνα 4: Φθορισμόμετρο συνεχούς διέγερσης Handy-PEA



Εικόνα 5: Κεφαλή Φθορισμόμετρου Handy-PEA με λαμπτήρες LED

2.6 Μέτρηση Ανακλαστικότητας

Το όργανο που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη μέτρηση είναι το FluorPen FP 110/S (PSI, Photon Systems Instruments, Brno, Czech Republic), το οποίο παίρνει μετρήσεις στα 525nm και 592 nm. Η παράμετρος που μετρήθηκε ήταν το PRI: Photochemical Reflectance Index, που θεωρείται δείκτης φωτοσυνθετικής απόδοσης (Penuelas *et al.*, 1995).

$$PRI = (R531-R570) / (R531+R570)$$

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τις πρωινές ώρες μεταξύ 11:00 και 12:00 και κάθε μέτρηση περιλάμβανε 30 επαναλήψεις/μεταχείριση.

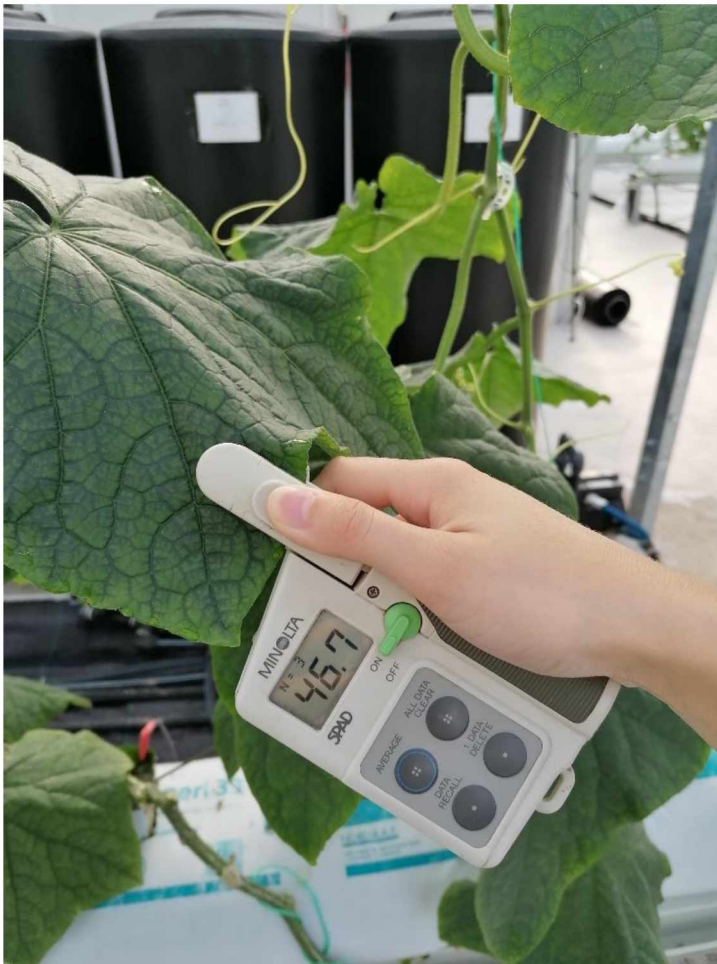


Εικόνα 6: Μέτρηση PRI με το FluorPen FP 110/S

2.7 Εκτίμηση περιεχόμενου φύλλου σε χλωροφύλλη με τον δείκτη SPAD

Το περιεχόμενο των φύλλων σε ολική χλωροφύλλη μετρήθηκε με το φορητό χλωροφυλλόμετρο SPAD (SPAD-502, Minolta Co Ltd). Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε δεν καταστρέφει τα φύλλα και πετυχαίνει γρήγορη και αποτελεσματική μέτρηση της χλωροφύλλης. Έγιναν 6 μετρήσεις κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας των αγγουριών από την ημέρα 30 μέχρι την ημέρα 80 και ανά 10 ημέρες, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν πρωινές ώρες.

Κάθε μέτρηση περιλάμβανε 18 επαναλήψεις/μεταχείριση. Τα δείγματα χωρίστηκαν σε νεαρά φύλλα, ώριμα φύλλα και γηρασμένα φύλλα σε κάθε φυτό και κάθε μεταχείριση. Από κάθε φυτό πάρθηκαν δείγματα από νεαρά, ώριμα και γηρασμένα φύλλα και στην συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών έτσι ώστε να μελετήσουμε το περιεχόμενο της χλωροφύλλης ανά φυτό.



Εικόνα 7: Όργανο SPAD

2.8 Ποσοτικός προσδιορισμός φωτοσυνθετικών χρωστικών

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των φωτοσυνθετικών χρωστικών κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών μαζεύτηκαν δείγματα από φύλλα, 6 δείγματα για κάθε μεταχείριση, από την ημέρα 10 ως την ημέρα 80 και ανά 10 ημέρες. Τα δείγματα διατηρήθηκαν στην κατάψυξη στους -80°C μέχρι να γίνουν οι διαδικασίες της μέτρησης.

Από τα φύλλα αγγουριάς κόπηκαν δίσκοι με επιφάνεια 1.28cm^2 με ένα φελλοτρυπητήρα από δύο τμήματα του φύλλου, από την αριστερή και μια από τη δεξιά πλευρά της κεντρικής νεύρωσης και τοποθετήθηκαν σε πορσελάνινο γουδί μαζί με ελάχιστη ποσότητα άμμου και ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3 , 0.1 g) και 6ml ακετόνης 80%, όπου και ομογενοποιήθηκαν και μετά φυγοκεντρήθηκαν για 10 λεπτά στα 2500 g (4000 στροφές ανά λεπτό). Έπειτα τοποθετήθηκε το υπερκείμενο διαυγές διάλυμα σε ογκομετρικό σωλήνα για να μετρηθεί ο όγκος του και στη συνέχεια τα δείγματα φωτομετρήθηκαν στα 470, 646, 663 και 720 nm στο φασματοφωτόμετρο UV900 (Shimatzu). Για την εκτίμηση των φωτοσυνθετικών χρωστικών χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις των Lichtenthaler and Wellburn (1983).



Εικόνα 8: Ο εργαστηριακός πάγκος κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας του διαλύματος για τον ποσοτικό προσδιορισμό των φωτοσυνθετικών χρωστικών.



Εικόνα 9: Φασματοφωτόμετρο UV900 και δείγμα με εκχύλισμα μέσα σε κυβελίδα.

2.9 Μέτρηση Φαινολικών

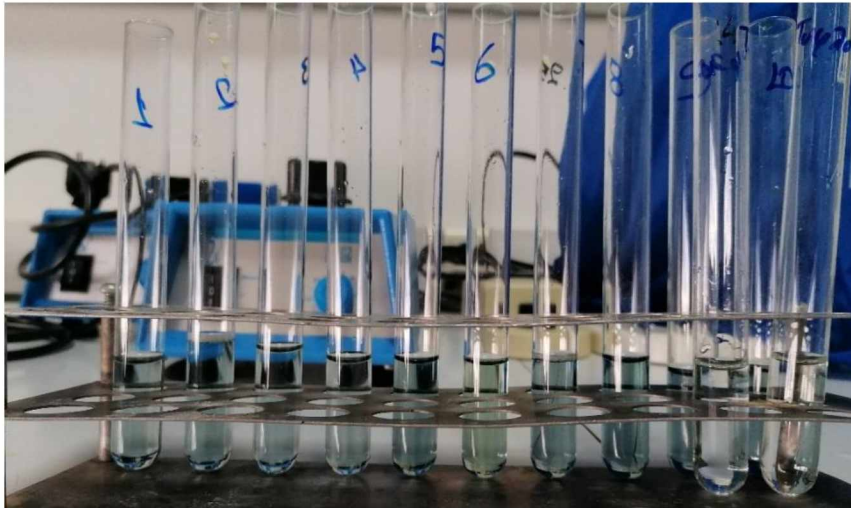
Η μέτρηση των φαινολικών των φύλλων έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο Folin-Ciocalteu (Waterman and Mole, 1994). Κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας έγιναν 7 μετρήσεις ανά 10 ημέρες περίπου, από την ημέρα 10 ως την ημέρα 70 του πειράματος. Για την πραγματοποίηση της ήταν αναγκαία: μεθανόλη 50% (6 mL / δείγμα), αντιδραστήριο Folin-Ciocalteu (0.25 mL / δείγμα) και διάλυμα Na_2CO_3 (20 g σε 100 mL νερού). Για την εκχύλιση ζυγίστηκαν 50mg κονιορτοποιημένου ξηρού δείγματος φύλλων τα οποία τοποθετήθηκαν σε δοκιμαστικούς σωλήνες από πλαστικό και προστέθηκαν 6ml υδατικού διαλύματος μεθανόλης 50%. Μετά παρέμειναν στο υδατόλουτρο στους 40°C για 60 λεπτά υπό ήπια ανάδευση για να επωαστούν. Στην συνέχεια αναδεύτηκαν με Vortex. Έπειτα για την ανάπτυξη του χρώματος προστέθηκαν 3.95mL απιονισμένου νερού, 0.05mL υπερκείμενου διαλύματος και 0.25mL αντιδραστηρίου Folin-Ciocalteu σε νέους μικρούς δοκιμαστικούς σωλήνες από γυαλί και παράλληλα παρασκευάστηκε το τυφλό διάλυμα το οποίο περιείχε τα παραπάνω αλλά αντί για το υπερκείμενο διάλυμα προστέθηκε 0.05ml μεθανόλη 50%. Στην συνέχεια έγινε Vortex και προστέθηκε 0.75mL ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3). Τα δείγματα αναδεύτηκαν ξανά και αφήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για 2 ώρες να επωαστούν. Καθ' όλη τη διάρκεια αναδεύονταν ανά 20 λεπτά με Vortex. Τέλος μετρήθηκε η απορρόφηση στα 760nm στο φασματοφωτόμετρο UV900 (Shimadzu).



Εικόνα 10: Υδατόλουτρο με δείγματα



Εικόνα 11: Πλαστικοί δοκιμαστικοί σωλήνες όπου έγινε η εκχύλιση για τον προσδιορισμό των φαινολικών.



Εικόνα 12: Γυάλινοι δοκιμαστικοί σωλήνες όπου αναπτύχθηκε το χρώμα για την μέτρηση των φαινολικών.

Στατιστική Ανάλυση

Ο στατιστικός έλεγχος των διαφορών μεταξύ των μεταχειρίσεων σε ότι αφορά τις φυσιολογικές παραμέτρους των φυτών της αγγουριάς πραγματοποιήθηκε με One-way ANOVA και επιπρόσθετα Post Hoc tests (Tukey). Για τις περιπτώσεις όπου δεν ικανοποιούνταν οι προϋποθέσεις για ANOVA χρησιμοποιήθηκε το μη παραμετρικό Kruskal-Wallis και παράλληλα το Dunn's post-hoc test. Σε όλες τις αναλύσεις το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε στο $p \leq 0.05$ και αυτές πραγματοποιήθηκαν στο ελεύθερο λογισμικό JASP (Version 0.14.1).

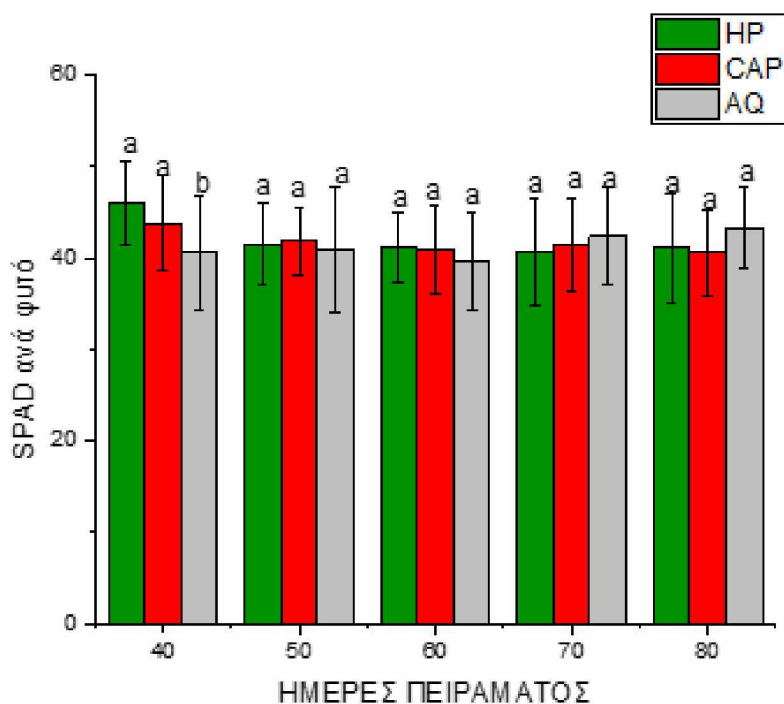
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των διάφορων μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο θερμοκήπιο και στο εργαστήριο, ύστερα από την στατιστική ανάλυση τους ως γραφήματα. Σκοπός είναι να μελετηθούν οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων, οι οποίες παρουσιάζονται στα υπομνήματα των διαγραμμάτων ως εξής:

- Υδροπονία: HP
- Αποζευγμένη μέθοδος: CAP
- Ενυδριοπονία/συζευγμένη μέθοδος: AQ

3.1 Χλωροφύλλη - Μετρήσεις SPAD

3.1.1 SPAD ανά φυτό

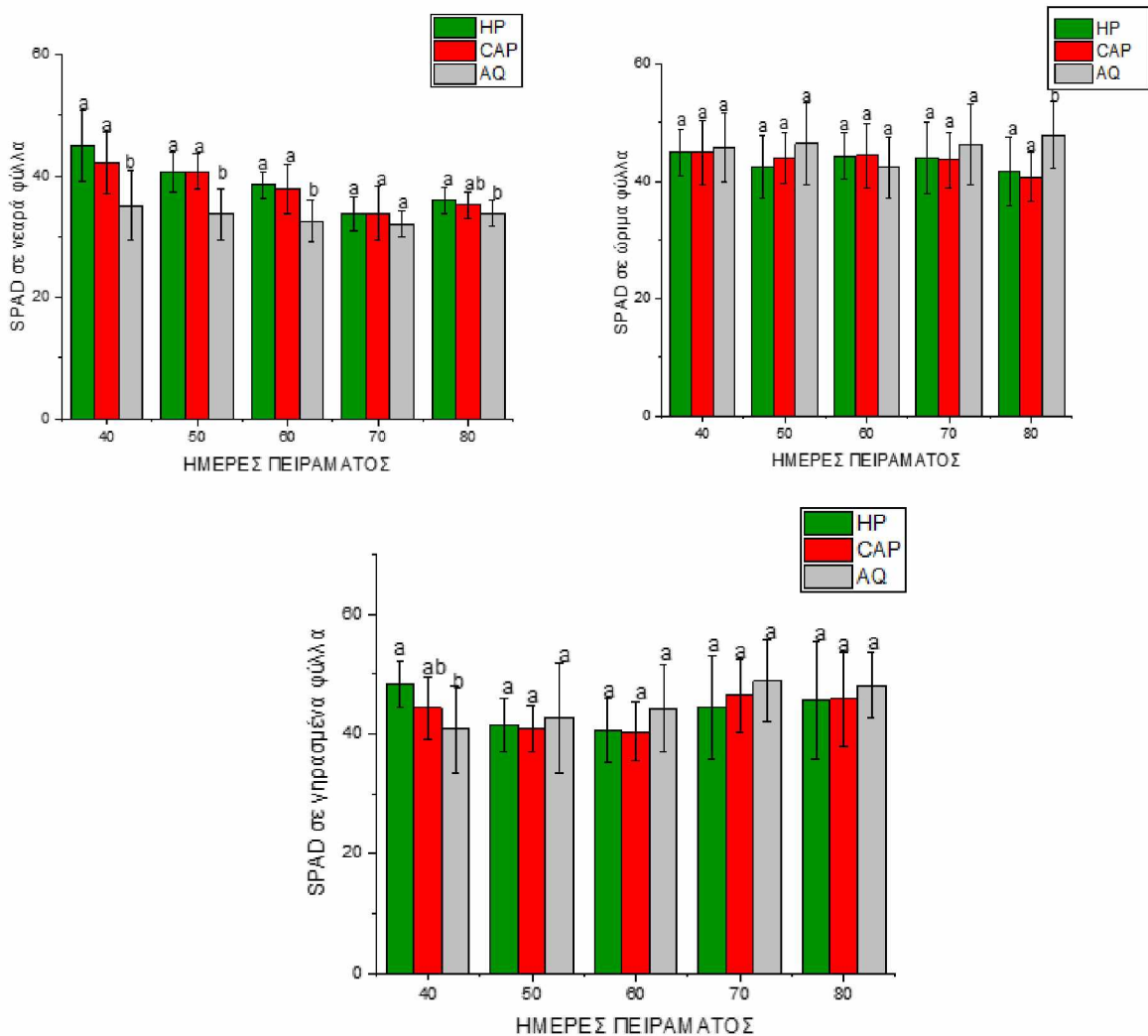


Γράφημα 1: Δείκτης SPAD ανά φυτό της αγγουριάς για τις τρεις μεταχειρίσεις με πέντε ξεχωριστές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0.05$.

Η τιμή του SPAD όσον αφορά τις ανά φυτό μετρήσεις δεν εμφάνισε στατιστικώς σημαντικές διαφορές καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος μεταξύ των μεταχειρίσεων (Γράφημα 1).

Επίσης οι τιμές του δείκτη δεν είχαν έντονες διακυμάνσεις. Εξαίρεση αποτελεί η στατιστικώς σημαντική διαφορά που παρουσίασε η AQ σε σύγκριση με την HP και την CAP την ημέρα 40.

3.1.2 SPAD σε νεαρά, ώριμα και γηρασμένα φύλλα



Γράφημα 2: Ο δείκτης SPAD στα νεαρά, ώριμα και γηρασμένα φύλλα της καλλιέργειας της αγγουριάς για τις τρεις μεταχειρίσεις με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες (Μ.Ο.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0.05$.

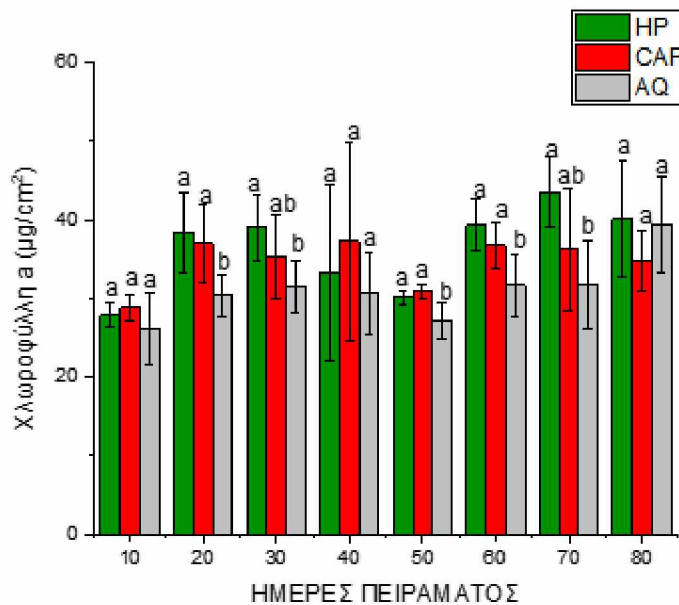
Ο δείκτης SPAD απεικονίζεται στο Γράφημα 2. Όπως φαίνεται η AQ παρουσίασε χαμηλότερες τιμές σε σχέση με την HP και την CAP στα νεαρά φύλλα, ενώ αντίθετα στα ώριμα και γηρασμένα φύλλα είχε ελαφρώς υψηλότερες τιμές συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Επομένως, στατιστικώς σημαντικές διαφορές εμφάνισε κυρίως η AQ και στις τρεις περιπτώσεις, ενώ η HP και CAP δεν διέφεραν σε καμία περίπτωση. Συγκεκριμένα η AQ διέφερε με τις HP και CAP από την πρώτη μέχρι την τρίτη μέτρηση και μόνο με την HP στην

πέμπτη μέτρηση στα δείγματα που πάρθηκαν από τα νεαρά φύλλα. Στα ώριμα φύλλα βρέθηκε μία μόνο στατιστικώς σημαντική διαφορά ανάμεσα στην AQ και τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις κατά την τελευταία μέτρηση. Τέλος, στις μετρήσεις των γηρασμένων φύλλων για τον δείκτη SPAD διαπιστώθηκε μία διαφορά ανάμεσα στην HP και την AQ την ημέρα 40.

Βιοχημικές μετρήσεις

3.2 Προσδιορισμός χλωροφυλλών

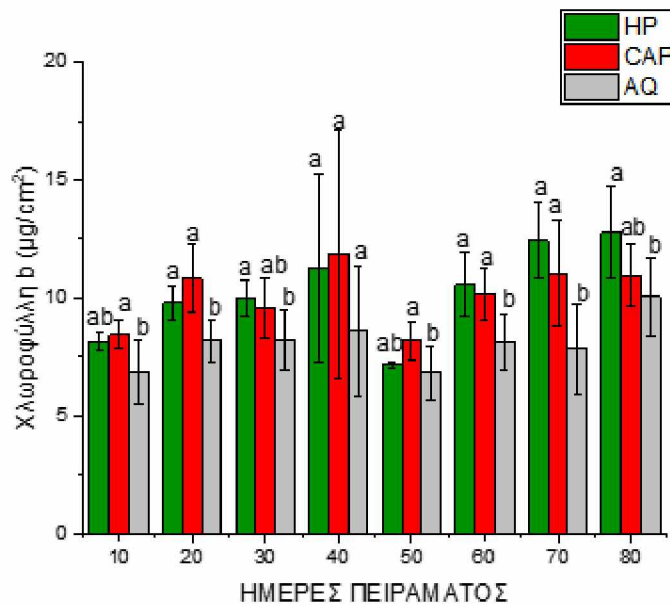
3.2.1 Χλωροφύλλη a



Γράφημα 3: Συγκέντρωση της χλωροφύλλης a στις τρεις μεταχειρίσεις σε οχτώ ξεχωριστές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0.05$.

Στο Γράφημα 3 απεικονίζεται η συγκέντρωση της χλωροφύλλης a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) και μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η AQ έχει χαμηλότερες τιμές σε όλη τη διάρκεια του πειράματος σε σχέση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, ενώ η HP έχει πιο υψηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης a. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές υπήρχαν ανάμεσα στην AQ και τις CAP και HP την ημέρα 20, 50 και 60. Παράλληλα την ημέρα 30 και την ημέρα 70 η HP διέφερε μόνο με την AQ.

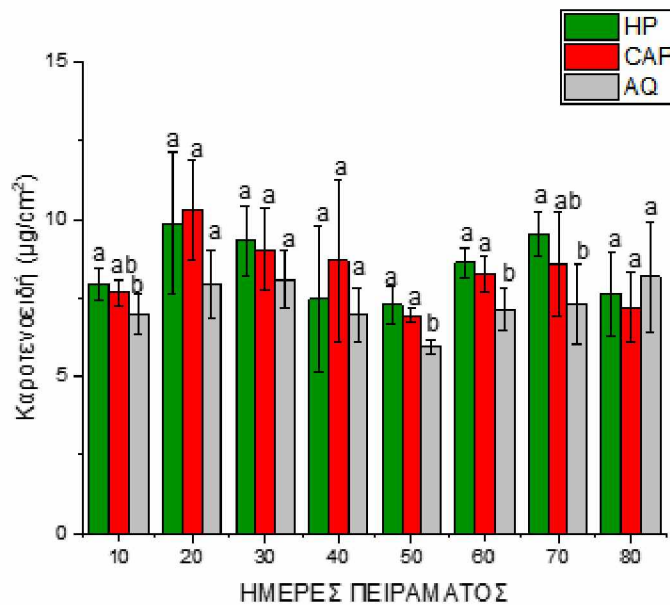
3.2.2 Χλωροφύλλη b



Γράφημα 4: Συγκέντρωση της χλωροφύλλης b στις τρεις μεταχειρίσεις σε οχτώ ξεχωριστές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0.05$.

Παρόμοια με τις τιμές της χλωροφύλλης a, στη συγκέντρωση της χλωροφύλλης b η AQ παρουσίασε χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις HP και CAP, όπως φαίνεται στο Γράφημα 4. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές υπήρχαν στις εξής ημέρες του πειράματος: την ημέρα 10 και την ημέρα 50 ανάμεσα στην AQ και την CAP, την ημέρα 20, 60 και 70 η AQ διέφερε με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, ενώ την ημέρα 30 και 80 διέφερε η HP με την AQ. Παρόλα αυτά μόνο την ημέρα 40 οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών δεν έδειξαν καμία στατιστικώς σημαντική διαφορά.

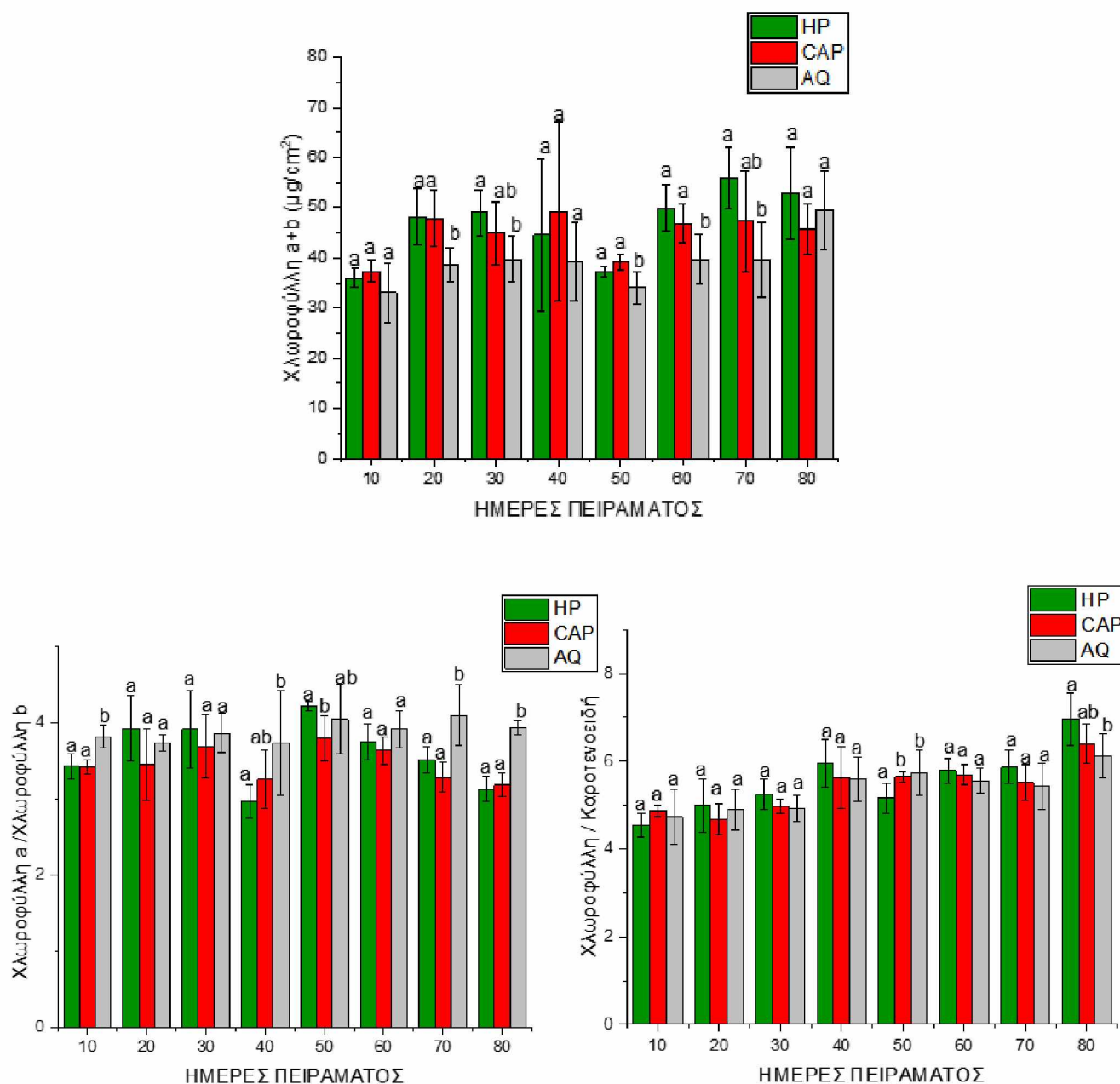
3.2.3 Καροτενοειδή



Γράφημα 5: Συγκέντρωση των καροτενοειδών στις τρεις μεταχειρίσεις σε οχτώ ξεχωριστές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0.05$.

Το Γράφημα 5 απεικονίζει τις συγκεντρώσεις των καροτενοειδών στις τρεις μεταχειρίσεις. Και σε αυτή την παράμετρο φαίνεται ότι η AQ έχει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με την HP και την CAP σε όλες σχεδόν τις ημέρες. Επίσης παρουσιάστηκαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές στην πρώτη και στην έβδομη μέτρηση ανάμεσα στην HP και την AQ, στην πέμπτη και την έκτη μέτρηση η AQ διέφερε και τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις ενώ τις ημέρες 20, 30, 40 και 80 δεν υπήρξαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

3.2.4 Σχέσεις μεταξύ φωτοσυνθετικών χρωστικών

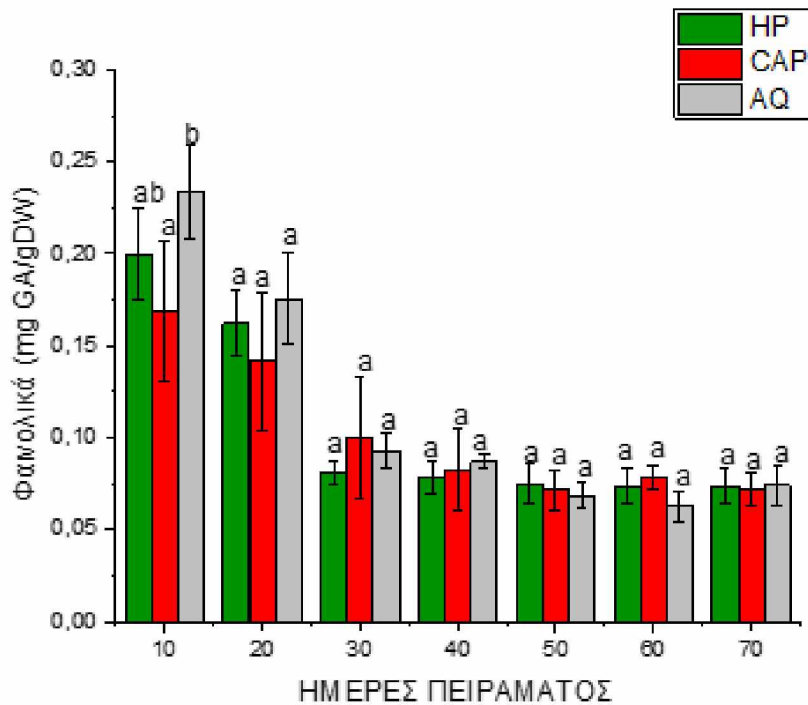


Γράφημα 6: Η συγκέντρωση των συνολικών χλωροφυλλών και οι λόγοι μεταξύ φωτοσυνθετικών χρωστικών, χλωροφύλλη a/χλωροφύλλη b και ολική χλωροφύλλη/καροτενοειδή σε οχτώ ξεχωριστές μετρήσεις (Μ.Ο.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0.05$.

Τα παραπάνω γραφήματα παρουσιάζουν την συγκέντρωση των συνολικών χλωροφυλλών και τους λόγους χλωροφύλλη a/χλωροφύλλη b και ολική χλωροφύλλη/καροτενοειδή. Οι τιμές της AQ για την συγκέντρωση των χλωροφυλλών a+b ήταν μικρότερες σε σύγκριση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, οι οποίες κυμάνθηκαν σε παρόμοιες τιμές αν και η HP εμφάνισε ελαφρώς μία τάση αύξησης σε σχέση με την CAP. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές εντοπίστηκαν τις ημέρες 20, 50 και 60 μεταξύ της AQ και των HP και CAP και επίσης την ημέρα 30 και 70

ανάμεσα στην HP και την AQ. Παράλληλα παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις των τιμών.

3.3 Προσδιορισμός φαινολικών

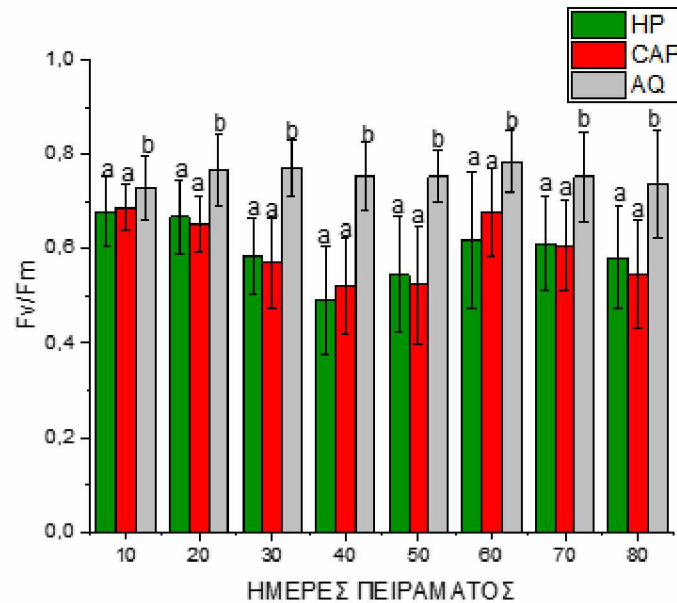


Γράφημα 7: Συγκέντρωση ολικών φαινολικών σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος (mgGA / gDW) των φυτών κατά τις αντίστοιχες μέρες του πειράματος (Μ.Ο±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0.05$.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ολικών φαινολικών απεικονίζονται στο Γράφημα 7. Αρχικά τις ημέρες 10 και 20 οι τιμές είναι αρκετά υψηλότερες σε σχέση με τις τιμές των υπόλοιπων ημερών. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές υπάρχουν στην πρώτη μέτρηση, συγκεκριμένα ανάμεσα στην CAP και την AQ, καθώς σε όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις οι τιμές των φαινολικών κυμάνθηκαν σε παρόμοια πλαίσια.

3.4 Φθορισμός Χλωροφύλλης

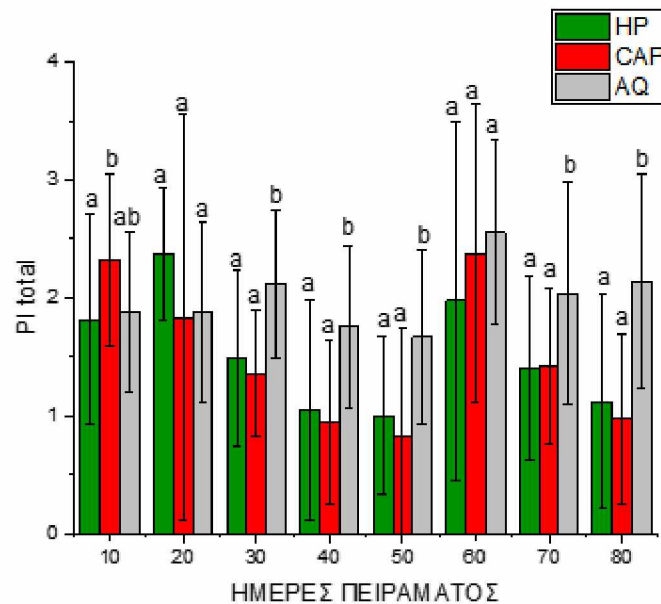
3.4.1 Fv/Fm



Γράφημα 8: Η παράμετρος φθορισμού Fv/Fm των συστημάτων σε οχτώ διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0,05$.

Τα φύλλα της αγγουριάς ελέγχθηκαν κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ως προς τις καταπονήσεις που ενδεχομένως αντιμετώπιζαν μέσω της μέτρησης του φθορισμού με τον δείκτη Fv/Fm. Στο Γράφημα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δείκτη Fv/Fm, ο οποίος μειώνεται τις ημέρες 30, 40 και 50 για την HP και την CAP και έπειτα έχει πάλι μια μικρή αύξηση. Παράλληλα στην AQ παραμένει σχεδόν σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Όπως γίνεται εμφανές στο γράφημα 8 οι μεταχειρίσεις της HP και της CAP δεν διαφέρουν σε καμία μέτρηση στατιστικώς σημαντικά, ενώ αντίθετα η μεταχείριση της AQ εμφανίζει σε όλες τις μετρήσεις στατιστικώς σημαντικές διαφορές.

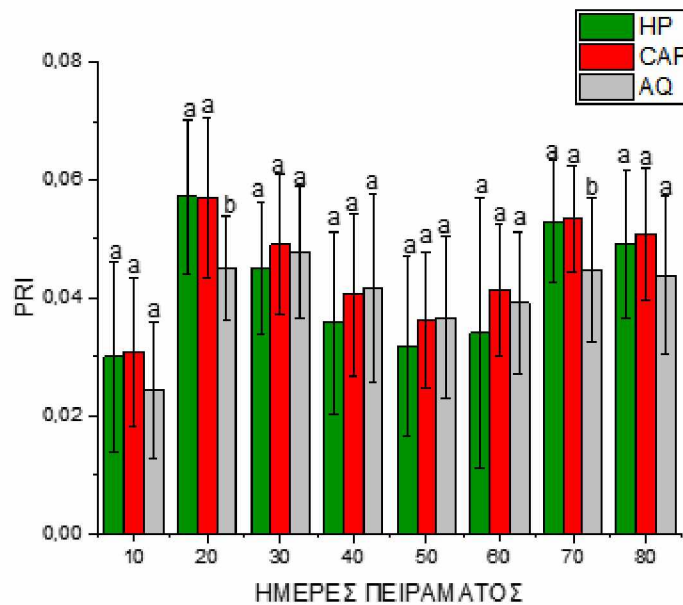
3.4.2 PI total



Γράφημα 9: Η παράμετρος φθορισμού PI total σε οχτώ διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0.05$.

Για τον παράγοντα PI total, που απεικονίζεται στο Γράφημα 9, στις περισσότερες μετρήσεις οι μεταχειρίσεις HP και CAP δεν είχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές, εκτός από την ημέρα 10. Επιπλέον η AQ διέφερε στατιστικώς σημαντικά με την HP και την CAP τις ημέρες 30, 40, 50, 70 και 80. Παρατηρείται ότι μετά την ημέρα 20 η AQ έχει σταθερά υψηλότερες τιμές από τις άλλες δύο μεταχειρίσεις σε αντίθεση με την υδροπονία και την CAP που στη μέση του πειράματος εμφάνισαν απότομη μείωση των τιμών του παράγοντα PI total.

3.5 Ανακλαστικότητα



Γράφημα 10: Ο δείκτης PRI σε οχτώ διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0.05$.

Στο γράφημα 10 απεικονίζεται ο δείκτης PRI, στις τιμές του οποίου καταγράφηκε απότομη αύξηση από την ημέρα 10 στην ημέρα 20, ενώ μετά υπήρξε μια σταδιακή μείωση μέχρι και την ημέρα 60. Η μόνη μεταχείριση που εμφάνισε στατιστικώς σημαντικές διαφορές με τις υπόλοιπες ήταν η AQ της ημέρες 20 και 70. Επίσης φαίνεται ότι η HP και η CAP είχαν μεγαλύτερες τιμές για τον δείκτη PRI από ότι η AQ.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα έρευνα καλλιεργήθηκαν φυτά αγγουριάς σε πιλοτικό θερμοκήπιο σε τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις με ταυτόχρονη εκτροφή τιλάπιας. Πρωταρχικός στόχος της πτυχιακής διατριβής ήταν η σύγκριση των φυσιολογικών αποκρίσεων των φυτών που καλλιεργήθηκαν στις τρεις μεταχειρίσεις, συγκεκριμένα την υδροπονία (HP), τη συζευγμένη ενυδραιοπονία (AQ) και την αποζευγμένη ενυδραιοπονία (CAP).

Ο δείκτης SPAD αποτυπώνει το πόσο πράσινα είναι τα φύλλα και σχετίζεται με ευθεία θετική συσχέτιση με το περιεχόμενο της ολικής χλωροφύλλης. Επιπλέον χρησιμοποιείται και για την ανίχνευση χλώρωσης λόγω έλλειψης σιδήρου (Álvarez-Fernández *et al.*, 2004). Το περιεχόμενο της χλωροφύλλης των φυτικών οργανισμών μπορεί να δώσει άμεσες ή έμμεσες πληροφορίες για την κατάσταση των φύλλων τους, όπως π.χ. για το αν υπάρχει αρκετό άζωτο στα φύλλα, την φωτοσυνθετική τους ικανότητα καθώς και το αν έχουν υποστεί κάποια καταπόνηση (Monje *et al.*, 1992). Οι τιμές SPAD ήταν σχετικά σταθερές για όλες τις μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος, εκτός από μία σημαντική αύξηση που καταγράφηκε την 40^η ημέρα στην HP αλλά και στην CAP σε σχέση τόσο με την AQ, όσο και με τις υπόλοιπες μετρήσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος. Σε ότι αφορά το περιεχόμενο σε ολικές χλωροφύλλες των διάφορων ηλικιακών κλάσεων των φύλλων φάνηκε ότι η AQ οδήγησε σε μειωμένη χλωροφύλλη στα νεαρά, αλλά στα ώριμα και γηρασμένα φύλλα σημειώθηκε αύξηση του δείκτη SPAD μέχρι το τέλος του πειράματος.

Ένα σχετικό πείραμα των Roosta *et al.*, (2011) σε φυτά ντομάτας σε υδροπονία και ενυδραιοπονία, έδειξε ότι τα φυτά φαίνονταν πιο πράσινα στην ενυδραιοπονία. Όμως οι τιμές του SPAD στα νεαρά φύλλα ήταν υψηλότερες στην ενυδραιοπονία από ότι στην υδροπονία. Και στις δύο μεταχειρίσεις τα γηρασμένα φύλλα του μάρτυρα είχαν χαμηλότερες τιμές SPAD σε σχέση με τα νεαρά φύλλα. Τα παραπάνω ευρήματα έρχονται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις της παρούσας μελέτης.

Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης a στα φωτοσυνθετικά όργανα που είναι η κύρια χρωστική της φωτοσύνθεσης είναι μεγαλύτερη από την συγκέντρωση της χλωροφύλλης b που λειτουργεί ως βοηθητική χρωστική. Τα καροτενοειδή είναι μία ομάδα βοηθητικών χρωστικών που συμβάλλουν στην σύλληψη της φωτεινής ενέργειας και την μεταβιβάζουν στην χλωροφύλλη a. Επιπλέον έχουν ρόλο ως αντιοξειδωτικά προκειμένου να ανατρέψουν τις οξειδωτικές βλάβες που δημιουργούνται λόγω της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας στα μέρη της χλωροφύλλης (Raven *et al.*, 2014). Η συγκέντρωση των χλωροφυλλών έχει την τάση να

μειώνεται με πιο ταχείς ρυθμούς από την συγκέντρωση των καροτενοειδών, όταν τα καλλιεργούμενα φυτά βιώνουν κάποια καταπόνηση ή όταν τα φύλλα είναι γηρασμένα (Gitelson *et al.*, 1994).

Τα φυτά που αναπτύχθηκαν στην HP είχαν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης a και ακολούθησε η CAP και τέλος η AQ. Επιπλέον και σε αυτήν την παράμετρο η μεταχείριση που εμφάνισε στατιστικώς σημαντικές μειώσεις σε σχέση με τις άλλες δύο ήταν η AQ. Κατά τη διάρκεια του πειράματος η συγκέντρωση της χλωροφύλλης a παρουσίασε μια τάση αύξησης σε όλες τις μεταχειρίσεις. Εντούτοις, σε ότι αφορά το περιεχόμενο των φύλλων σε χλωροφύλλη b, η AQ είχε τις χαμηλότερες τιμές, ενώ η HP και η CAP κυμάνθηκαν περίπου στα ίδια επίπεδα. Παρόμοια εικόνα με την χλωροφύλλη a εμφάνισαν και τα καροτενοειδή με την συγκέντρωσή τους να είναι παρόμοια σε HP και CAP αλλά σχετικά μειωμένη στην AQ. Διάφορες έρευνες έχουν συσχετίσει τη μείωση των χλωροφυλλών και των καροτενοειδών με βακτηριακές προσβολές στους ιστούς του μεσόφυλλου (Agiros, 2005). Για παράδειγμα σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε φυτά αγγουριάς βρέθηκε ότι τα υγιή φύλλα περιείχαν μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωροφύλλης a και καροτενοειδών σε σχέση με εκείνα που επιμολύνθηκαν με το βακτήριο *Pseudomonas syringae* pv. *Lachrymans*, γεγονός που υποδεικνύει καταπόνηση (Zhao *et al.*, 2016). Στο παρόν πείραμα, στα μέσα της καλλιέργειας των αγγουριών, οι τιμές της συγκέντρωσης των καροτενοειδών και της χλωροφύλλης a, χλωροφύλλης b και χλωροφύλλης a+b εμφάνισαν τις χαμηλότερες τιμές από όλες τις ημέρες. Πιθανώς το αποτέλεσμα αυτό να σχετίζεται με την βιοτική καταπόνηση που συνέβη στο μέσο του πειράματος, η οποία βέβαια αντιμετωπίστηκε άμεσα και αποτελεσματικά, όπως καταγράφηκε στα Υλικά και Μέθοδοι. Στο πείραμα σύγκρισης υδροπονίας-ενυδραιοπονίας των Roosta *et al.*, (2011) σε φυτά ντομάτας καταγράφηκε αποτέλεσμα αντίθετο από τα δικά μας, καθώς η συγκέντρωση της χλωροφύλλης a στην AQ ξεπέρασε αυτή της HP.

Όσον αφορά την συγκέντρωση των συνολικών χλωροφυλλών (χλωροφύλλη a+b) παρατηρείται μια αξιοσημείωτη μείωση στην AQ σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, σε όλες σχεδόν τις ημέρες καταγραφής. Η HP είχε τις υψηλότερες συγκεντρώσεις συνολικών χλωροφυλλών, παρότι παρατηρούνται πιο έντονες αυξομειώσεις των τιμών σε αντίθεση με την CAP και την AQ. Η παράμετρος αυτή έχει σχετιστεί στην βιβλιογραφία με τη συγκέντρωση του αζώτου στα φύλλα (Shibaeva & Markovskaya, 2013). Σε πείραμα όπου φυτά αγγουριάς ποτίστηκαν με θρεπτικό διάλυμα που περιείχε όλα τα μακροστοιχεία (μάρτυρας) και με θρεπτικό διάλυμα χωρίς άζωτο, διαπιστώθηκε ότι τα φυτά που δεν τους δόθηκε άζωτο είχαν πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης (Ji-Yong *et al.*, 2012). Με βάση αυτή τη

συσχέτιση μπορούμε να υποθέσουμε ότι πιθανώς τα φυτά της AQ αντιμετώπισαν κάποια καταπόνηση λόγω έλλειψης αζώτου. Ενδεχομένως, τα νιτρικά που έφταναν σε αυτά με το νερό των ψαριών δεν ήταν επαρκή και αυτό αποτυπώθηκε σε χαμηλότερη περιεχόμενο ολικών χλωροφυλλών.

Ο λόγος χλωροφύλλη a προς χλωροφύλλη b κινήθηκε σε παρόμοια επίπεδα για τις τρεις μεταχειρίσεις. Εντούτοις, μικρές αλλά στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρουσιάστηκαν από τα μέσα του πειράματος υπέρ της AQ, ο οποίος μεγεθύνθηκαν τις τελευταίες ημέρες του πειράματος. Ο λόγος ολικών χλωροφυλλών προς καροτενοειδή εμφάνισε μία μικρή και σταδιακή αύξηση κατά τη διάρκεια του πειράματος. Κατά την τελευταία μέτρηση η HP υπερτερούσε σημαντικά σε σχέση με την AQ, ενώ η CAP εμφάνισε ενδιάμεσες τιμές. Είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι η μείωση του λόγου των χλωροφυλλών προς τα καροτενοειδή μπορεί να προκληθεί λόγω της δυνατής ηλιακής ακτινοβολίας, συνθηκών στρες και γήρανσης των φύλλων, επηρεάζοντας έτσι την ανακλαστικότητα τους (Garrity *et al.*, 2011). Εντούτοις, δεν είναι αυτή η περίπτωση στο παρόν πείραμα καθώς φαίνεται ότι η αύξηση του λόγου σχετίζεται με πτώση της συγκέντρωσης των καροτενοειδών.

Οι φαινολικές ενώσεις, ως προϊόντα του δευτερογενούς μεταβολισμού είναι σημαντικά για την λειτουργία των φυτικών οργανισμών, καθώς έχουν πολλαπλούς ρόλους, ιδιαίτερα σε ότι αφορά την αλληλεπίδραση των φυτών με το βιοτικό αλλά και το αβιοτικό τους περιβάλλον. Έτσι, η συγκέντρωσή τους αυξάνεται στα φυτά όταν αυτά βιώνουν καταπονήσεις βιοτικές ή αβιοτικές (Βασιλακάκης, 2006). Η συγκέντρωση των φαινολικών ήταν ελαφρώς αυξημένη στην AQ σε σχέση με την HP και την CAP. Στις πρώτες δύο μετρήσεις οι τιμές ήταν συνολικά μεγαλύτερες και στη συνέχεια εμφάνισαν μια πτώση. Αυτό πιθανώς σχετίζεται με αυξημένη προστασία που απαιτείται κατά την αρχική φάση της καλλιέργειας, όταν τα φύλλα είναι νεαρά και η φωτοσυνθετική τους συσκευή ανώριμη.

Ο φθορισμός ορίζεται ως η εκπομπή φωτός που ακολουθεί μετά την απορρόφηση και λαμβάνει χώρα σε μήκος κύματος ελαφρώς μακρότερο σε σχέση με το απορροφώμενο φως. Δηλαδή, οι χλωροφύλλες κατά τη διάρκεια της απορρόφησης της ακτινοβολίας εκπέμπουν ταυτόχρονα ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας διέγερσης υπό μορφή φθορισμού. Για την σωστή εκτίμηση του φθορισμού τα δείγματα των φύλλων παραμένουν αρχικά στο σκοτάδι και στη συνέχεια εκτίθενται ξαφνικά σε φως έτσι ώστε να μπορούν να ακολουθήσουν την καμπύλη Kautsky (Καραμπουρνιώτης *et al.*, 2012). Το πλεονέκτημα των μη επεμβατικών

φθορισμόμετρων είναι ότι μπορούν να δώσουν πληθώρα πληροφοριών ως προς τις καταπονήσεις των φυτών (Lazár *et al.*, 2006).

Ο δείκτης Fv/Fm, που μετρήθηκε με τη βοήθεια του φθορισμόμετρου, εκφράζει την μέγιστη ανά φωτόνιο απόδοση της πρωτογενούς φωτοχημείας του φωτοσυστήματος PSII ή την μέγιστη κβαντική φωτοχημική απόδοση. Το Fm αποτελεί τον μέγιστο φθορισμό στην καμπύλη Kautsky, ενώ το Fv είναι η παράμετρος που λέγεται μεταβλητός φθορισμός και υπολογίζεται ως $Fv = Fm - F_0$, δηλαδή ο μέγιστος φθορισμός μείον τον ελάχιστο φθορισμό (Καραμπουρνιώτης *et al.*, 2012). Ο λόγος Fv/Fm εμφάνισε σημαντικά μεγαλύτερες τιμές στην μεταχείριση AQ για όλες τις ημέρες σε σχέση με την HP και την CAP. Επιπλέον, το Fv/Fm για την HP και την CAP μειώθηκε αισθητά στα μέσα του πειράματος σε αντίθεση με την AQ που διατήρησε υψηλότερες τιμές. Έχει αποδειχθεί από πειράματα ότι τιμές του λόγου Fv/Fm από 0,80 έως 0,85 υποδεικνύουν φυτά που δεν έχουν υποστεί καταπονήσεις και είναι εγκλιματισμένα στις συνθήκες ανάπτυξής τους (Καραμπουρνιώτης *et al.*, 2012). Όσο πιο χαμηλές τιμές εμφανίζει ο λόγος Fv/Fm τόσο μεγαλώνουν οι πιθανότητες τα φυτά να έχουν καταπονηθεί, να έχουν μειωμένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και να αντιμετωπίζουν βλάβες στο φωτοσύστημα PSII. Ωστόσο, μέσω της ανάλυσης του λόγου Fv/Fm δεν μπορεί να προσδιοριστεί συγκεκριμένα το είδος της καταπόνησης που είναι υπεύθυνο. Παρόλα αυτά η πτώση των τιμών του λόγου Fv/Fm υποδηλώνει την ανάπτυξη διαδικασιών απόσβεσης με αργό ρυθμό και την βλάβη των κέντρων αντίδρασης του φωτοσυστήματος PSII (Baker & Rosenqvist, 2004). Διάφορες έρευνες αναφέρουν ότι στα ενυδρειοπονικά συστήματα μπορεί να εμφανιστεί έλλειψη σιδήρου (Fe) (Adler *et al.*, 1996), πρόβλημα το οποίο επηρεάζει τη φυσιολογία των φυτών και τη βιοσύνθεση των χλωροφυλλών με αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης και επηρεάζοντας την αποδοτικότητα του φωτοσυστήματος PSII (Roosta *et al.*, 2012). Επομένως στην περίπτωση ανεπάρκειας σιδήρου θα ήταν αναμενόμενο ο λόγος Fv/Fm να είναι μειωμένος (Roosta *et al.*, 2012), κάτι όμως που δεν καταγράφηκε στην παρούσα μελέτη στο συζευγμένο ενυδρειοπονικό σύστημα (AQ). Βέβαια, στο πλαίσιο αυτής της μελέτης δεν έχει γίνει μια φυλλοδιαγνωστική ανάλυση ώστε να επιβεβαιωθεί εάν τα φυτά υπέστησαν τροφοπενία σιδήρου. Τέλος, οι Roosta *et al.* (2011) στο πείραμά τους που αναλύθηκε παραπάνω δεν παρατήρησαν διαφορές στο λόγο Fv/Fm μεταξύ των υδροπονίας και ενυδρειοπονίας.

Ο δείκτης PI (Performance Index), αποτελεί μία βιοφυσική παράμετρο που μπορεί να καταγράψει τις διαφορετικές αντιδράσεις το φωτοσυστήματος PSII των φυτών, με την προϋπόθεση ότι τα φύλλα τους έχουν προσκοτεινιαστεί (Ferrante & Maggiore, 2007). Οι

μετρήσεις του δείκτη PI total παρέχουν δεδομένα που σχετίζονται με τις εξής διεργασίες της φωτοσύνθεσης: τον αριθμό των ενεργών κέντρων, την μέγιστη ενεργειακή ροή που καταλήγει στο κέντρο αντίδρασης του PSII και την ροή των ηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια της έναρξης του φωτισμού, αποτυπώνοντας με αυτόν τον τρόπο την συνολική φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών (Μουραντιάν, 2019). Επομένως, ο δείκτης PI παρέχει πληροφορίες για τη φυσιολογική κατάσταση των φυτικών οργανισμών και την πιθανή επίδραση διαταραχών (Clark *et al.*, 2000). Ο παράγοντας PI total φάνηκε να είχε μεγαλύτερες τιμές στην AQ και μετά ακολούθησε η HP και τέλος η CAP. Τα συστήματα HP και CAP συμβάδισαν από την ημέρα 30 και έπειτα, όσο αφορά την πορεία των μετρήσεων, αν και στις πρώτες δύο μετρήσεις εμφάνισαν αποκλίσεις. Από την άλλη πλευρά, η AQ ξεχώρισε σε σχέση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, αφού εμφάνισε σημαντικές διαφορές στις περισσότερες μετρήσεις και σχετική αύξηση των τιμών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι στην αρχή του πειράματος η HP και η CAP έδειξαν καλύτερη προσαρμογή στις συνθήκες, ενώ η AQ άργησε αλλά εν τέλει προσαρμόστηκε καλύτερα εμφανίζοντας υψηλότερες τιμές PI total από την 30^η ημέρα και μέχρι το τέλος του πειράματος.

Η ανακλαστικότητα είναι μία ιδιότητα των φύλλων ως προς τη διαχείριση της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω σε αυτά. Σχετίζεται με δομικές προσαρμογές του φύλλου αλλά και βιοχημικές παραμέτρους αυτών για αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη δυναμική κατάσταση του φύλλου ως προς τις αποκρίσεις του στο περιβάλλον ανάπτυξης (Carter and Knapp, 2001). Ο δείκτης PRI, τα αρχικά του οποίου σημαίνουν Photochemical Reflectance Index, χρησιμοποιείται ως εργαλείο για την φυσιολογική και βιοχημική μελέτη των φυτών και την εκτίμηση της απόδοσης της χρήσης της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (Photosynthetic radiation use efficiency) (Garrity *et al.*, 2011). Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης PRI σχετίζεται με τον κύκλο των ξανθοφυλλών, δηλαδή με την μη φωτοχημική απόσβεση της περίσσειας ενέργειας και η μείωση των τιμών του δηλώνει καταπόνηση της φωτοσυνθετικής συσκευής (Sims *et al.*, 2002). Γενικά ο δείκτης PRI εμφάνισε υψηλότερες τιμές στην HP και την CAP σε σχέση με την AQ. Φαίνεται ότι στα μέσα του πειράματος υπήρξε μια μείωση ενώ αντιθέτως στις δύο τελευταίες μετρήσεις υπήρξε μία άνοδος των τιμών και για τις τρεις μεταχειρίσεις. Έχει αποδειχτεί από έρευνες ότι η αποδοτικότητα χρήσης του φωτός (Light use efficiency, LUE) συνδέεται στενά με τον δείκτη PRI, αν και η σύνδεση των δύο εξαρτάται από την ένταση του φωτός στην οποία εκτίθεται η φωτοσυνθετική συσκευή (Garbulsky *et al.*, 2011). Επομένως σε περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβαλλόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, μέσω του δείκτη PRI μπορούν να καταγραφούν ακόμα

και ελάχιστες αλλαγές της αποδοτικότητας χρήσης του φωτός (LUE) και αποτυπωθούν οι φυσιολογικές μεταβλητές των φωτεινών αντιδράσεων της φωτοσύνθεσης, δηλαδή αυτές που αφορούν το φωτοσύστημα PSII (Κονιάτ *et al.*, 2018). Η διακύμανση του PRI στη διάρκεια του παρόντος πειράματος μπορεί να επηρεάστηκε από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που υπήρχε κατά την ημέρα που έλαβαν χώρα οι μετρήσεις. Για παράδειγμα, στις τελευταίες δύο μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τον Νοέμβριο, ο καιρός ήταν συννεφιασμένος και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ήταν μικρότερη σε σχέση με την πρώτη μέτρηση που έγινε αρχές Σεπτεμβρίου.

Οι μετρήσεις της ανακλαστικότητας κοντά στα 700 nm έχει αποδειχθεί ότι εντοπίζουν αποτελεσματικά τις καταπονήσεις των φυτών και εκτιμούν το ποσοστό της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης που υπάρχει στην φυλλική επιφάνεια (Carter and Knapp, 2001). Στην βιβλιογραφία αναφέρεται επίσης ότι οι καταπονήσεις μεταβάλλουν την ανακλαστικότητα, όταν αυτή αφορά το ορατό φάσμα φωτός, λόγω αλλαγών σε βιοχημικές παραμέτρους, όπως η συγκέντρωση των χλωροφυλλών στα φύλλα (Knippling, 1970). Εάν συγκριθούν τα γραφήματα 6 και 10 που αφορούν τη συγκέντρωση των χλωροφυλλών a+b και τον δείκτη PRI, παρατηρείται μία ομοιότητα στην πορεία των γραφημάτων. Για παράδειγμα και στα δύο γραφήματα εμφανίζονται μειωμένες τιμές και στις τρεις μεταχειρίσεις για την ημέρα 10. Στη συνέχεια υπάρχει μια πτώση των χλωροφυλλών και του δείκτη PRI στη μέση του πειράματος και τέλος μια αύξηση στις τελευταίες δύο μετρήσεις.

Συμπερασματικά, φαίνεται από τις φυσιολογικές μετρήσεις ότι και οι τρεις μεταχειρίσεις αντιμετώπισαν προβλήματα και καταπονήσεις. Όμως η ενυδραιοπνία είναι ένα καινοτόμο σύστημα παραγωγής, αειφόρο και στο μέλλον μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρκετά εάν γίνει περεταίρω έρευνα για να είναι πιο αποδοτικό. Μια καλή λύση αποτελεί η αποζευγμένη μέθοδος ή CAP, έτσι ώστε τα φυτά να λαμβάνουν τα θρεπτικά στοιχεία που δεν μπορεί να τους παρέχει πλήρως η ενυδραιοπνία και να έχουν μεγαλύτερες αποδόσεις.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Οι μεταχειρίσεις HP και CAP εμφάνισαν μία παρόμοια επίδραση στις φυσιολογικές παραμέτρους που καταγράφηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου.
- Η AQ επέδρασε αρνητικά στη συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών στα φύλλα της αγγουριάς, αλλά αύξησε το λόγο χλωροφύλλης a/b.
- Τα νεαρά φύλλα της μεταχείρισης AQ είχαν σημαντικά χαμηλότερο περιεχόμενο σε ολικές χλωροφύλλες σε σχέση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις.
- Η συγκέντρωση ολικών φαινολικών κατά την αρχική περίοδο της καλλιέργειας ήταν σημαντικά αυξημένη σε σχέση με τις υπόλοιπες φάσεις αυτής, υποδεικνύοντας την ανάγκη προστασίας των νεαρών φύλλων. Το αποτέλεσμα αυτό παρατηρήθηκε σε όλες τις μεταχειρίσεις, χωρίς ουσιαστικές διαφορές μεταξύ τους.
- Ο δείκτης λειτουργικότητας της φωτοσυνθετικής συσκευής Fv/Fm και PI total ήταν πιο υψηλοί στην AQ.
- Ο δείκτης PRI δεν εμφάνισε καθαρό πρότυπο σε ότι αφορά τις διαφορές μεταξύ των φυτών των τριών μεταχειρίσεων, επομένως η αποδοτικότητα χρήσης φωτός δεν φάνηκε να επηρεάζεται ισχυρά από την μεταχείριση.
- Η αποξευγμένη ενυδρειοπονία ή CAP, αποδεικνύεται μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος καθώς οδηγεί σε μία καλή λειτουργική κατάσταση των φυτών, εκμεταλλευόμενη το νερό της ενυδρειοπονίας με μικρή προσθήκη λιπασμάτων, έχει συνεπώς βελτιωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με την υδροπονία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

I. Ξένη βιβλιογραφία

1. Adler, P. R., Takeda, F., Glenn, D. M. and Summerfelt, S. T. (1996). Utilizing byproducts to enhance aquaculture sustainability. *World Aquaculture*, 27(2): 24–26.
2. Álvarez-Fernández, A., Garcia-Lavina, P., Fidalgo, J., Abadia, J., Abadia, A., (2004). Foliar fertilization to control iron chlorosis in pear (*Pyrus communis* L.) trees. *Plant Soil* 263, 5–15.
3. Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403), 1607-1621. doi:10.1093/jxb/erh196
4. Blanchard, C., Wells, D. E., Pickens, J. M., & Blersch, D. M. (2020). Effect of pH on cucumber growth and nutrient availability in a decoupled aquaponic system with minimal solids removal. *Horticulturae*, 6(1) doi:10.3390/horticulturae6010010
5. Brown, J.J.; Glenn, E.P.; Fitzsimmons, K.M.; Smith, S.E. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. *Aquaculture* (1999), 175, 255–268.
6. Carter, G. A., and Knapp, A. K. (2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American journal of botany* 88(4), 677-684
7. Clark, A.J., Landolt, W., Bucher, J.B., Strasser, R.J., (2000). Beech (*Fagus sylvatica*) response to ozone exposure assessed with a chlorophyll a fluorescence performance index. *Environ. Pollut.* 109, 501–507.
8. Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 78, 130-139. doi:10.1016/j.aquaeng.2017.06.002
9. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, Rome, Italy.
10. FAOSTAT, 2020, Food and Agriculture Data, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy (2020)
11. Ferrante, A., & Maggiore, T. (2007). Chlorophyll a fluorescence measurements to evaluate storage time and temperature of valeriana leafy vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 45(1), 73-80. doi:10.1016/j.postharvbio.2007.02.003

12. Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., Poincelot, R. Salomonsson, L.; Helenius, J.; Rickerl, D.; Salvador, R. (2003). Agroecology: The ecology of food systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 22(3), 99-118. doi:10.1300/J064v22n03_10
13. Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Gamon, J., Inoue, Y., Filella, I. (2011). The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies. A review and meta-analysis. *Remote Sens. Environ.*, 115, 281–297.
14. Garrity, S. R., Eitel, J. U. H., & Vierling, L. A. (2011). Disentangling the relationships between plant pigments and the photochemical reflectance index reveals a new approach for remote estimation of carotenoid content. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 628-635. doi:10.1016/j.rse.2010.10.007
15. Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1994). Spectral reflectance changes associate with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143, 286 – 292.
16. Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability (Switzerland)*, 7(4), 4199-4224. doi:10.3390/su7044199
17. Goddek, S., Espinal, C. A., Delaide, B., Jijakli, M. H., Schmutz, Z., Wuertz, S., & Keesman, K. J. (2016). Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach. *Water (Switzerland)*, 8(7) doi:10.3390/W8070303
18. Goddek, S., & Körner, O. (2019). A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: A case study for system sizing in different environments. *Agricultural Systems*, 171, 143-154. doi:10.1016/j.agry.2019.01.010
19. Hochmuth, G. J. (2001a). “Fertilizer management for greenhouse vegetables”. In *Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook*, Vol. 3, Gainesville, FL: Horticultural Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, University of Florida. Available at <http://edis.ifas.ufl.edu/CV265>, HS787
20. Hochmuth, R. C. (2001b). “Greenhouse Cucumber Production”. In *Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook*, Vol. 3, Gainesville, FL: Horticultural Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, University of Florida. Available at <http://edis.ufl.wdu/CV268>

21. Ji-Yong, S., Xiao-Bo, Z., Jie-Wen, Z., Kai-Liang, W., Zheng-Wei, C., Xiao-Wei, H. Holmes, M. (2012). Nondestructive diagnostics of nitrogen deficiency by cucumber leaf chlorophyll distribution map based on near infrared hyperspectral imaging. *Scientia Horticulturae*, 138, 190-197. doi:10.1016/j.scienta.2012.02.024
22. Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Graupner, J., Monsees, H., Schmidt, U., Rennert, B. (2015). A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquaculture Environment Interactions*, 7(2), 179-192. doi:10.3354/aei00146
23. Knipling, E.B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1: 155-159.
24. Kováč, D., Veselovská, P., Klem, K., Večeřová, K., Ač, A., Peñuelas, J., & Urban, O. (2018). Potential of photochemical reflectance index for indicating photochemistry and light use efficiency in leaves of european beech and norway spruce trees. *Remote Sensing*, 10(8) doi:10.3390/rs10081202
25. Lazár, D., Sušila, P., & Nauš, J. (2006). Early detection of plant stress from changes in distributions of chlorophyll a fluorescence parameters measured with fluorescence imaging. *Journal of Fluorescence*, 16(2), 173-176. doi:10.1007/s10895-005-0032-1
26. Lehman, H., Clark, E. A., & Weise, S. F. (1993). Clarifying the definition of sustainable agriculture. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 6(2), 127-143. doi:10.1007/BF01965480
27. Licamele, J.D. (2009). Biomass Production and Nutrient Dynamics in an Aquaponics System. Ph.D. Thesis, University of Arizona, Tucson, AZ, USA.
28. Lichtenthaler, H. and Wellburn, A. (1983) Determinations of Total Carotenoids and Chlorophylls a and b of Leaf Extracts in Different Solvents. *Biochemical Society Transactions*, 603, 591-592.
29. Lim, C. & Webster, C.D. 2006 *Tilapia: Biology, culture, and nutrition* The Food Products Press Binghamton, NY
30. Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens, K. (2014). An international survey of aquaponics practitioners. *PLoS ONE*, 9(7) doi:10.1371/journal.pone.0102662
31. Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67-74. doi:10.1016/j.aquaculture.2014.09.023

32. Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, *13*(1), 1-11. doi:10.4081/ija.2017.1012
33. Monje, O. A., & Bugbee, B. (1992). Inherent limitations of nondestructive chlorophyll meters: A comparison of two types of meters. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, *27*(1), 69-71. doi:10.21273/hortsci.27.1.69
34. Monsees, H., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. *PLoS ONE*, *12*(9) doi:10.1371/journal.pone.0183056
35. Monsees, H., Suhl, J., Paul, M., Kloas, W., Dannehl, D., & Würtz, S. (2019). Lettuce (*lactuca sativa*, variety *salanova*) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer. *PLoS ONE*, *14*(6) doi:10.1371/journal.pone.0218368
36. Montanhini Neto, R., & Ostrensky, A. (2013). *Nutrient load estimation in the waste of Nile tilapia Oreochromis niloticus(L.) reared in cages in tropical climate conditions. Aquaculture Research*, *46*(6), 1309–1322. doi:10.1111/are.12280
37. Murchie, E. H., & Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: A guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, *64*(13), 3983-3998. doi:10.1093/jxb/ert208
38. National Agricultural Statistics Service, USDA, https://www.nass.usda.gov/Quick_Stats/Ag_Overview/stateOverview.php?state=CALIFORNIA
39. Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2012). *Aquaponics vs. hydroponics: Production and quality of lettuce crop* doi:10.17660/actahortic.2012.927.109
40. Rakocy, J. E., Shultz, R. C., Bailey, D. S., & Thoman, E. S. (2004). *Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system* doi:10.17660/ActaHortic.2004.648.8
41. Raven P., Evert Ray F., Eichhorn S. E., (2014), «Βιολογία των Φυτών», Εκδόσεις Utopia.
42. Resh, H. M. (2004). *Hydroponic Food Production*, , 6th ed, Mahwah, NJ: New Concept Press Publishing Co.

43. Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 396-402. doi:10.1016/j.scienta.2011.04.006
44. Roosta, H. R., & Mohsenian, Y. (2012). *Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (Capsicum annum L.) plants in aquaponic system. Scientia Horticulturae*, 146, 182–191. doi:10.1016/j.scienta.2012.08.018
45. Savidov, N. A., Hutchings, E., & Rakocy, J. E. (2007). *Fish and plant production in a recirculating aquaponic system: A new approach to sustainable agriculture in canada* doi:10.17660/actahortic.2007.742.28
46. Seawright, D. E., Stickney, R. R. and Walker, R. B. 1998. Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. *Aquaculture*, 160: 215–237.
47. Shibaeva, T. G., & Markovskaya, E. F. (2013). Growth and development of cucumber cucumis sativus L. in the prereproductive period under long photoperiods. *Russian Journal of Developmental Biology*, 44(2), 78-85. doi:10.1134/S1062360413020082
48. Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 337-354. doi:10.1016/S0034-4257(02)00010-X
49. Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T. and Vinci, B. J. (2002). *Recirculating Aquaculture Systems*, 2nd ed, Ithaca, NY: Cayuga Aqua Ventures.
50. Turcios, A. E., & Papenbrock, J. (2014). Sustainable treatment of aquaculture effluents- what can we learn from the past for the future? *Sustainability (Switzerland)*, 6(2), 836-856. doi:10.3390/su6020836
51. Tyson, R. V., Hochmuth, R. C., Lamb, E. M., Hochmuth, G. J. and Sweat, M. S. (2001). A decade of change in Florida's greenhouse vegetable industry: 1991–2001. *Proc. Fla State Hort. Soc.*, 114: 280–283.
52. Tyson R. V., Simonne E. H., Treadwell D. D., Davis M. & White J. M. (2008) Effect of Water pH on Yield and Nutritional Status of Greenhouse Cucumber Grown in Recirculating Hydroponics, *Journal of Plant Nutrition*, 31:11, 2018-2030, DOI: [10.1080/01904160802405412](https://doi.org/10.1080/01904160802405412)
53. Tyson, R. V., Treadwel, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21(1), 1-13. doi:10.21273/horttech.21.1.6

54. Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges – A review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1586-1599. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.290
55. Zhao, Y., Li, X., Yu, K., Cheng, F., & He, Y. (2016). Hyperspectral imaging for determining pigment contents in cucumber leaves in response to angular leaf spot disease. *Scientific Reports*, 6 doi:10.1038/srep27790
56. <https://handheld.psi.cz/products/fluorpen-and-par-fluorpen/?fbclid=IwAR2RIxKZrO2EXRxyn0dUzYB9Tx-xftNEF0APrSAeDvfM8d4RKGqnO9ljHt8>

II. Ελληνική βιβλιογραφία

1. Βασιλακάκης Μ, (2006). «Μετασυλλεκτική φυσιολογία - Μεταχείριση οπωροκηπευτικών και Τεχνολογία». Εκδόσεις Γαρταγάνη. Θεσσαλονίκη
2. Δεδες Σ., Χρυσοφίτης Κ. (2017). «Ενυδραιοπονία-η χρήση αποβλήτων υδατοκαλλιέργειας για τη μαζική παραγωγή φυτών» ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας και Τεχνολογίας Τροφίμων και Διατροφής, Τμήμα Τεχνολογίας Αλιείας - Υδατοκαλλιεργειών.
3. Ελληνική Στατιστική Αρχή, Πίνακας 03α. Λαχανικά. Εκτάσεις και παραγωγή κατά Περιφέρεια και Περιφερειακή Ενότητα, <https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SPG06/>
4. Καραμπουρνιώτης Γ., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., (2012), «Φυσιολογία Καταπονήσεων των Φυτών, Οι λειτουργίες των φυτών κάτω από αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος» Εκδόσεις ΕΜΒΡΥΟ, Αιγάλεω.
5. Μουραντιάν Α. (2019). «Εκτίμηση πιθανών καταπονήσεων του βασιλικού που αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδραιοπονίας» Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
6. Μπίκας Αλέξανδρος, (2021). «Δίχως τέλος η άνοδος τιμής παραγωγού στο αγγούρι, υψηλότερη ζήτηση εδώ και έναν μήνα» Εκδόσεις ΑγροΤύπος, <https://www.agrotypos.gr/kalliergeies/kipeftika/dichos-telos-i-anodos-timis-paragogou-sto-aggouri-ypsilotati-zitisi-edo-kai-?fbclid=IwAR2K0yTfGUyHTHF-OCOS4pyWpGpZW02AyCLOgXerOAgHjdf-fbaZ3sOgsAY>

7. Ολύμπιος Χ.Μ. (2001). «Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια» Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα σελ.
8. Παπουτσόγλου Σ.Ε. (2008). « Διατροφή Ιχθύων ». Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα, σελ 127
9. Σάββας Δ. (2011). « Καλλιέργειες εκτός εδάφους: Υδροπονία, Υποστρώματα». Αθήνα, Εκδόσεις ΑγροΤύπος
10. Σταθοπούλου Π. (2017). «Καλλιέργεια φυτών και εκτροφή ψαριών σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας» Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
11. Χα Ιμπραχίμ-Αβραάμ, Πετρόπουλος Σπύρος. (2014). «Γενική Λαχανοκομία & Υπαίθρια Καλλιέργεια Λαχανικών» Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος