



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Συν-επιδράσεις βιοδιεγερτών με το ενυδρειοπονικό σύστημα παραγωγής σε
φυσιολογικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά του μαρουλιού»**

ΧΑΝΔΡΟΥ ΕΙΡΗΝΗ



ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Λεβίζου Ευθυμία

ΒΟΛΟΣ, 2022

«Συν-επιδράσεις βιοδιεγερτών με το ενυδρειοπονικό σύστημα παραγωγής σε φυσιολογικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά του μαρουλιού»

“Interactions between bio-elicitors and aquaponics production system on physiological and growth characteristics of lettuce”

Χάνδρου Ειρήνη

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Λεβίζου Ευθυμία, Αναπληρώτρια 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 ΤΓΦ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα. Λεβίζου Ευθυμία για την πολύτιμη καθοδήγησή και τη βοήθεια που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας. Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στην υποψήφια διδάκτορα Μουραντιάν Αναστασία, με την οποία εκπονήσαμε μαζί το πείραμα.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:	xi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ:	1
ΥΔΡΟΠΟΝΙΑ:	2
<i>Γενικά:</i>	2
<i>Ιστορική αναδρομή:</i>	2
<i>Πλεονεκτήματα Υδροπονίας:</i>	3
<i>Μειονεκτήματα Υδροπονίας:</i>	3
<i>Τύποι υδροπονικού συστήματος με βάση τον τρόπο διαχείρισης των απορροών:</i>	4
ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ:	5
ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΑ:	7
<i>Γενικά:</i>	7
<i>Ιστορική αναδρομή:</i>	7
<i>Μέρη ενός ενυδρειοπονικού συστήματος:</i>	8
<i>Δεξαμενή ψαριών:</i>	9
<i>Μηχανικό φίλτρο:</i>	9
<i>Βιολογικό φίλτρο (Bio-filter):</i>	9
<i>Εμπλουτισμός δεξαμενών ψαριών με οξυγόνο:</i>	10
<i>Dissolved Oxygen (DO):</i>	10
<i>pH:</i>	10
<i>Ο κύκλος του αζώτου- Νιτροποίηση- Βακτήρια:</i>	11
<i>Βασικές αρχές της Ενυδρειοπονίας:</i>	12
<i>Πλεονεκτήματα Ενυδρειοπονίας:</i>	13
<i>Μειονεκτήματα Ενυδρειοπονίας:</i>	13
<i>Συστήματα Ενυδρειοπονίας:</i>	14
<i>Εφαρμογές Ενυδρειοπονίας:</i>	15
<i>Είδη φυτών και ψαριών που χρησιμοποιούνται στην ενυδρειοπονία:</i>	15
ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΑ ΜΕ ΑΠΟΖΕΥΓΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟ (CAP ή DAPS):	16
ΜΑΡΟΥΛΙ:	18
<i>Γενικά:</i>	18
<i>Ιστορική αναδρομή:</i>	18
<i>Βοτανικά χαρακτηριστικά:</i>	18
<i>Απαιτήσεις:</i>	19
<i>Άρδευση και Λίπανση:</i>	20
<i>Συγκομιδή:</i>	20
<i>Αποθήκευση:</i>	20

ΒΙΟΔΙΕΓΕΡΤΕΣ:	20
<i>Εκχυλίσματα φυκιών και φυτικών συστατικών:</i>	22
<i>Οφέλη χρήσης εκχυλισμάτων φυκιών:</i>	22
ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:	23
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ:	24
<i>Καλλιέργεια φυτών-Μαρούλι:</i>	24
<i>Τιλάπια:</i>	24
<i>Θάλαμος Ενυδρειοπονίας:</i>	25
<i>Θερμοκηπιακός χώρος:</i>	26
<i>Λιπάσματα και Βιοδιεγέρτες:</i>	29
<i>Μετρήσεις στο θάλαμο Ενυδρειοπονίας:</i>	30
<i>Μετρήσεις φυτών- μαρουλιού:</i>	30
<i>Μέτρηση χλωροφύλλης:</i>	32
<i>Μέτρηση ανακλαστικότητας:</i>	32
<i>Μέτρηση φθορισμού της χλωροφύλλης:</i>	33
<i>Μέτρηση φαιολικών:</i>	35
<i>Στατιστική Ανάλυση:</i>	36
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	37
Μετρήσεις SPAD	37
Δείκτης PRI	38
Μετρήσεις Φθορισμού της χλωροφύλλης	40
<i>Fv/Fm</i>	40
<i>PI total</i>	41
Συγκέντρωση ολικών φαιολικών φυλλώματος	42
Συγκέντρωση ολικών φαιολικών ρίζας	43
Αναπτυξιακές παράμετροι των φυτών	44
<i>Αριθμός Φύλλων</i>	44
<i>Νωπό βάρος υπέργειου τμήματος</i>	45
<i>Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος</i>	46
<i>Ξηρό βάρος ρίζας</i>	47
ΣΥΖΗΤΗΣΗ:	48
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:	54

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ:

Εικόνα 1: (α) απεικόνιση ενός ανοιχτού συστήματος υδροπονίας, (β) απεικόνιση ενός κλειστού συστήματος υδροπονίας κατά το οποίο το νερό μετά τη χρήση του επιστρέφει και ξαναχρησιμοποιείται στο επόμενο πότισμα των φυτών.....	5
Εικόνα 2: Απεικόνιση ενός συστήματος RAS (Recirculating aquaculture system) Πηγή: Swiss Alpine Fish.....	6
Εικόνα 3: Ο κύκλος του αζώτου μέσα στο σύστημα της ενυδρείοπονίας. Πηγή: Tyson <i>et al</i> , 2011.....	12
Εικόνα 4: Απεικόνιση ενός τυπικού RAS συστήματος ενυδρείοπονίας Πηγή: Bikash Chandra Mohapatra <i>et al</i> (2020).....	16
Εικόνα 5: Σχεδίαση των συστημάτων ενυδρείοπονίας. Αριστερά είναι ένα συζευγμένο σύστημα και δεξιά ένα αποζευγμένο σύστημα ενυδρείοπονίας.....	18
Εικόνα 6: Απεικόνιση φυτού μαρουλιού ποικιλίας Station.....	19
Εικόνα 7: (Α) Δεξαμενή SUMP (μαύρη) και δεξαμενή Bio-filter, (Β) Combi-Bio, (Γ) δεξαμενή Buffer.....	26
Εικόνα 8: Θερμοκηπιακός χώρος, τα κανάλια είναι αριθμημένα από το 1 έως το 6. Σε κάθε σάκο είναι τοποθετημένα 4 φυτά και υπάρχουν 5-6 σταλάκτες τύπου μικροσωλήνα.....	27
Εικόνα 9: (Α) Μπροστά φαίνονται τα έξι πυκνά διαλύματα και πίσω είναι η κεφαλή υδρολίπανσης, (Β) Οι έξι δοσομετρικές αντλίες.....	28
Εικόνα 10: Οι έξι δεξαμενές απορροής.....	28
Εικόνα 11: Οι δεξαμενές των ψαριών.....	30
Εικόνα 12: Όργανο SPAD (SPAD 502Plus, Konica Minolta).....	32
Εικόνα 13: Όργανο PRI (PRI 210, PlantPen).....	33
Εικόνα 14: Κεντρική μονάδα Handy-PEA (Plant Efficiency Analyser, Hansatech Instruments).....	34
Εικόνα 15: (α) Κεφαλή του οργάνου Handy-PEA με λαμπτήρες LED, (β) Μανταλάκια του οργάνου Handy-PEA με κλειστό και ανοιχτό το κλείστρο.....	35
Εικόνα 16: Εξοπλισμός για τον προσδιορισμό των φαινολικών.....	36
Εικόνα 17: (α) Δείγματα φυλλώματος μαρουλιού μετά την διαδικασία της εκχύλισης, (β) Δείγματα φυλλώματος μαρουλιού μετά την διαδικασία της αντίδρασης με την μέθοδο μέθοδος Folin-Ciocalteu.....	36

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ:

Πίνακας 1: Μέσο βάρος ψαριών τιλάπιας και συνολική βιομάζα κατά ζύγισμα στις 03/11/21.....	24
Πίνακας 2: Τυχαιοποιημένο σύστημα κατανομής μεταχειρίσεων. Οι αριθμοί έξω από τις παρενθέσεις αποτελούν τα κανάλια και οι αριθμοί μέσα στις παρενθέσεις αποτελούν τις επαναλήψεις του πειράματος.	27
Πίνακας 3: Οι αναλυτικές συνταγές θρέψης για τις μεταχειρίσεις HP, CAP και AQ κατά την διάρκεια του πειράματος.....	29
Πίνακας 4: Οι εφαρμογές των βιοδιεγερτών και οι δόσεις που χορηγήθηκαν σε φυτά μαρουλιού κατά τη διάρκεια του πειράματος.....	29
Πίνακας 5: Σχεδιάγραμμα με βάση το οποίο πραγματοποιούνταν όλες οι φυσιολογικές μετρήσεις.....	31
Πίνακας 6 : Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις SPAD που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p<0.05$).....	38
Πίνακας 7: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του δείκτη PRI που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p<0.05$).....	39
Πίνακας 8: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του παράγοντα φθορισμού Fv/Fm που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p<0.05$).....	40
Πίνακας 9: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του παράγοντα φθορισμού PI total που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p<0.05$).....	41
Πίνακας 10: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις της συγκέντρωσης των ολικών φαινολικών του φυλλώματος που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p<0.05$).....	42
Πίνακας 11: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις της συγκέντρωσης των ολικών φαινολικών ριζικού ιστού που έγιναν στις μεταχειρίσεις κατά την τελική συγκομιδή. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p<0.05$).....	43

Πίνακας 12: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του αριθμού των φύλλων ανά φυτό που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).....	44
Πίνακας 13: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του νωπού βάρους του φυλλώματος μαρουλιού που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).....	45
Πίνακας 14: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του ξηρού βάρους του φυλλώματος μαρουλιού που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).....	46
Πίνακας 15: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του ξηρού βάρους ριζικού ιστού φυτών μαρουλιού που έγιναν στις μεταχειρίσεις κατά την τελική συγκομιδή. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).....	47

Γράφημα 1: Δείκτης SPAD ανά μέσο όρο φυτού μαρουλιού στις εννιά μεταχειρίσεις για πέντε ξεχωριστές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0.05$).....

37

Γράφημα 2: Αποτελέσματα του δείκτη PRI μετά την έναρξη της φωτοσύνθεσης σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις για τις εννιά μεταχειρίσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0.05$).....

39

Γράφημα 3: Η παράμετρος φθορισμού Fv/Fm των μεταχειρίσεων σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0.05$

40

Γράφημα 4: Η παράμετρος φθορισμού PI total των μεταχειρίσεων σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0.05$

41

Γράφημα 5: Συγκέντρωση ολικών φαινολικών φυλλώματος σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος (mg GA /g DW) κατά τις τρεις συγκομιδές των φυτών μαρουλιού (M.O±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p<0.05$	42
Γράφημα 6: Συγκέντρωση ολικών φαινολικών ριζικού ιστού σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος (mg GA /g DW) κατά την τελική συγκομιδή των φυτών μαρουλιού (M.O±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p<0.05$	43
Γράφημα 7: Αποτελέσματα του αριθμού των φύλλων ανά φυτό για κάθε μεταχείριση για τρεις διαφορετικές μετρήσεις (M.O±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p<0.05$	44
Γράφημα 8: Αποτελέσματα του νωπού βάρους του φυλλώματος των φυτών μαρουλιού ανά μεταχείριση για τρεις διαφορετικές μετρήσεις (M.O±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p<0.05$	45
Γράφημα 9: Αποτελέσματα του ξηρού βάρους του φυλλώματος των φυτών μαρουλιού ανά μεταχείριση για τρεις διαφορετικές μετρήσεις (M.O±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p<0.05$	46
Γράφημα 10: Αποτελέσματα του ξηρού βάρους του ριζικού ιστού των φυτών μαρουλιού ανά μεταχείριση στην τελική συγκομιδή των φυτών (M.O±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p<0.05$	47

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Σε μία περίοδο όπου ο πλανήτης αδυνατεί να καλύψει τις ανάγκες των κατοίκων του για τροφή κρίνεται απαραίτητο να βρεθούν καινοτόμες τεχνολογίες για την επίλυση του προβλήματος. Προς αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε η ενυδρειοπονία, μία νέα τεχνική καλλιέργειας που συνδυάζει την υδροπονία και την υδατοκαλλιέργεια, μέσω επανακυκλοφορίας νερού και των διαλυμένων σε αυτό θρεπτικών στοιχείων μεταξύ των δύο αυτών υπο-συστημάτων, οδηγώντας σε συνδυασμένη παραγωγή φυτών και ψαριών. Σκοπός της παρούσας διατριβής ήταν να εξετάσει το αποτέλεσμα συζευγμένου (AQ) και του αποζευγμένου (CAP) ενυδρειοπονικού συστήματος, σε σύγκριση με την κλασική υδροπονία (HP) σε αναπτυξιακά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά μαρουλιού, όταν ταυτόχρονα εφαρμόζονται δύο διαφορετικοί βιοδιεγέρτες από εκχυλίσματα φυκιών (Bio 1 & 2), με παράλληλη εκτροφή τιλάπιας. Το πείραμα διεξήχθη στο θερμοκήπιο ενυδρειοπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, είχε διάρκεια 56 ημέρες και περιλάμβανε εννιά μεταχειρίσεις: HP, HP Bio 1, HP Bio 2, AQ, AQ Bio 1, AQ Bio 2, CAP, CAP Bio 1 και CAP Bio 2. Στην πορεία του πειράματος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φυσιολογικών παραμέτρων, όπως ο προσδιορισμός συγκέντρωσης ολικής χλωροφύλλης, ο δείκτης ανακλαστικότητας PRI και δείκτες φθορισμού της χλωροφύλλης των φυτών, ενώ πραγματοποιήθηκαν και τρεις συγκομιδές προκειμένου να εκτιμηθούν οι αναπτυξιακές παράμετροι της καλλιέργειας, συγκεκριμένα ο αριθμός φύλλων, το ξηρό και νωπό βάρος υπέργειου τμήματος, ξηρό βάρος μέρος του ριζικού ιστού και οι συγκεντρώσεις φαιολικών σε υπέργειο και υπόγειο τμήμα.

Η αυξημένη συγκέντρωση ολικών χλωροφυλλών στην αρχή της αναπτυξιακής περιόδου μειώθηκε ελαφρώς στην διάρκεια της ζωής των φυτών, παραμένοντας όμως σε υψηλές τιμές, χωρίς συμπτώματα χλόρωσης σε καμία μεταχείριση. Ο δείκτης PRI των φύλλων εμφάνισε σημαντικές διακυμάνσεις καθώς η αποδοτικότητα χρήσης φωτός άλλαζε κατά την ανάπτυξη του φυτού, φάνηκε όμως να είναι χαμηλότερος στις μεταχειρίσεις AQ τις περισσότερες ημέρες μετρήσεων. Όσον αφορά τον φθορισμό της χλωροφύλλης ο δείκτης Fv/Fm έδειξε αξιοσημείωτη σταθερότητα καθ' όλη την αναπτυξιακή περίοδο, υποδεικνύοντας την έλλειψη καταπόνησης της φωτοσυνθετικής συσκευής. Ο δείκτης της συνολικής φωτοσυνθετικής απόδοσης P_{total}, εμφάνισε σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, αποτυπώνοντας την τρέχουσα φωτοσυνθετική απόδοση, ήταν όμως σταθερά

χαμηλότερος στις μεταχειρίσεις AQ. Η συγκέντρωση ολικών φαινολικών ήταν υψηλότερη στα φύλλα και χαμηλότερη στη ρίζα των AQ, με την δεύτερη μόνο διαφορά να είναι σημαντική. Τα φυτά των μεταχειρίσεων CAP και HP είχαν τις καλύτερες αποδόσεις σε όλα τα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν στις τρεις συγκομιδές που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος, ενώ οι μεταχειρίσεις AQ υπολείπονταν σημαντικά. Η εφαρμογή του βιοδιεγέρτη Bio2 επέφερε στατιστικώς σημαντική αύξηση στο ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος της HP, και μία τάση για αύξηση στην CAP, ενώ οι αντίστοιχες αυξήσεις στο νωπό βάρος ήταν ορατές, αλλά μη σημαντικές. Η συνολική εικόνα είναι ότι οι μεταχειρίσεις CAP και HP εμφάνισαν τις υψηλότερες τιμές σε όλες τις παραμέτρους που μετρήθηκαν και δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Αντίθετα οι μεταχειρίσεις της AQ, εμφάνισαν γενικά σημαντικά χαμηλότερη απόδοση. Τέλος, η χρήση των συγκεκριμένων βιοδιεγερτών δεν είχε σημαντικό όφελος στην λειτουργία, αλλά καταγράφηκε μία μικρή βελτίωση στη συσσώρευση βιομάζας σε HP και CAP με την εφαρμογή του Bio2.

Λέξεις κλειδιά: Υδροπονία, ενυδραιοπονία, αποζευγμένη μέθοδος ενυδραιοπονίας, βιοδιεγέρτες, μαρούλι, τιλάπια, PRI, PItotal, φαινολικά

ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

Ο ολοένα αυξανόμενος πληθυσμός της γης, έχει οδηγήσει την τρέχουσα παραγωγή τροφίμων σε αδιέξοδο. Υπάρχει γενική ομοφωνία ότι οι περιβαλλοντικές και οι οικονομικές προκλήσεις έχουν οδηγήσει στην ανάγκη για εύρεση νέων και βελτιωμένων λύσεων για τα συστήματα παραγωγής και κατανάλωσης τροφίμων. Από την πλευρά της παραγωγής, οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε τρόφιμα δεν μπορούν να καλυφθούν με την πρόσθετη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και της γης. Από την πλευρά της κατανάλωσης, είναι απαραίτητες ορισμένες τροποποιήσεις για την βέλτιστη επισιτιστική ασφάλεια στις αναπτυσσόμενες χώρες, αλλά και για την υγεία και βιωσιμότητα της δυτικής διατροφής στις ανεπτυγμένες χώρες (Schuetze et. al., 2008) , (Binz et. al., 2010), (Carnett, 2011), (van der Goot et. al., 2016), (Ashley, 2016).

Η παραγωγή τροφίμων πλέον, απαιτεί καινοτομίες που υπερβαίνουν τις παραδοσιακές μεθόδους καλλιέργειας (McIntyre et. al., 2009), (Pretty et. al., 2010), (Leach et al., 2012). Με την άλογη και συνεχή εκμετάλλευση της φύσης έχει προκληθεί η εξάντληση των φυσικών πόρων, όπως επίσης και η αύξηση της ακαταλληλότητας των εδαφών. Γι' αυτό, σήμερα οι επιστήμονες, ψάχνουν να βρουν απαντήσεις στην επίλυση των ζητημάτων αυτών. Προς αυτή την κατεύθυνση είναι η ανάπτυξη της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας.

Η υδατοκαλλιέργεια, αποτελεί παγκοσμίως μία από τις πιο σημαντικές πηγές παραγωγής πρωτεΐνης. Για να μπορέσουν όμως, να καλυφθούν οι ανάγκες των ψαριών σε θρεπτικά, χρησιμοποιούνται, κατά κανόνα, τεράστιες ποσότητες επεξεργασμένων τροφών, ορμονών, καθώς και αντιβιοτικών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αρκετές από τις ουσίες, καθώς και μεταβολίτες τους, να καταλήγουν στο νερό και να ρυπαίνουν το περιβάλλον.

Η υδροπονία, αναπτύχθηκε αρχικά σε άνυδρες περιοχές, ενώ σε περιοχές με φτωχό και άγονο έδαφος, θεωρήθηκε ως μία ευκαιρία για να αυξηθεί η παραγωγικότητα με λιγότερες εισροές λιπασμάτων. Στη δεκαετία του 1950, η υδατοκαλλιέργεια ανακυκλοφορίας (RAS) εμφανίστηκε, ως απάντηση σε παρόμοιους περιορισμούς νερού, με σκοπό την καλύτερη χρήση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων και τον καλύτερο έλεγχο των απόβλητων (Goddek et. al., 2019).

Η ενυδρειοπονία αποτελεί ένα συνδυασμό των παραπάνω συστημάτων καλλιέργειας, καθώς αφορά την ταυτόχρονη παραγωγή φυτών και ψαριών σε ένα κοινό

σύστημα που βασίζεται στην επανακυκλοφορία νερού μεταξύ των υπο-συστημάτων του. Πρόκειται για μία ταχεία αναπτυσσόμενη μέθοδο καλλιέργειας, έχοντας κερδίσει πλέον την προσοχή ως πολλά υποσχόμενη για την επίτευξη μίας βιώσιμης παραγωγής τροφίμων και την καταπολέμηση του υποσιτισμού και της φτώχειας σε πόλεις και αγροτικές περιοχές (FAO, 2014). Καθώς βρισκόμαστε αντιμέτωποι με τη ρύπανση των εδαφών, την ξηρασία και την κλιματική αλλαγή, τα ενυδραιοπονικά συστήματα έχουν προσελκύσει την προσοχή λόγω της εξοικονόμησης πόρων, της υψηλής απόδοσης και της χαμηλής κατανάλωσης και έχουν γίνει η κατεύθυνση της σύγχρονης αγροτικής παραγωγής (Ehrlich et. al., 2015), (Mchunu et. al., 2018).

Σήμερα, οι επιστήμονες προσπαθούν με τη βοήθεια της τεχνολογίας, να μειώσουν όσο είναι δυνατόν περισσότερο τα μειονεκτήματα αυτών των μεθόδων και να βρουν νέες, πιο οικολογικές μορφές τους, έτσι ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα για την κάλυψη των διατροφικών αναγκών του πλανήτη με τις μικρότερες πιθανές συνέπειες προς το περιβάλλον.

ΥΔΡΟΠΟΝΙΑ:

Γενικά:

Η υδροπονία προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις *ύδωρ* (νερό) και *πόνημα* (έργο) και είναι μία τεχνική καλλιέργειας φυτών, των οποίων το ριζικό σύστημα βρίσκεται εκτός εδάφους (Soiless culture). Τα φυτά, μπορούν να αναπτυχθούν, είτε σε σκέτο θρεπτικό διάλυμα, είτε επάνω σε υποστρώματα. Τα υποστρώματα αυτά είναι συνήθως αδρανή, πορώδη υλικά που μπορεί να είναι φυσικής προέλευσης ή να προέρχονται από βιομηχανική επεξεργασία. Η πορώδης σύσταση, τους επιτρέπει να συγκρατούν επαρκείς ποσότητες νερού και αέρος, επιτυγχάνοντας ικανοποιητικές συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών (Τζωρτζάκης, 2008) (Νεοκλέους, 2014), (Κωνσταντοπούλου, 2014).

Ιστορική αναδρομή:

Η υδροπονία, με μία παραπλήσια μορφή, εφαρμόστηκε πολλούς αιώνες πριν στον Αμαζόνιο, τη Βαβυλώνια, την Αίγυπτο, την Κίνα και την Ινδία, όπου οι αρχαίοι πολιτισμοί χρησιμοποιούσαν διαλυμένη κοπριά για να καλλιεργήσουν φυτά σε αμμώδη πεζούλια στην άκρη των ποταμών. Οι Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας, δημιουργήθηκαν το 600 π.Χ. από τον βασιλιά Ναβουχοδονόσωρ και αποτελούσαν τους πιο γνωστούς υδροπονικούς κήπους του αρχαίου κόσμου. Τη δεκαετία του 1930,

ορισμένες δημοσιεύσεις του Καλιφορνέζου επιστήμονα, Gericke, διέδωσαν την ιδέα της καλλιέργειας φυτών χωρίς κάποιο μέσο ανάπτυξης (Gericke, 1937). Ωστόσο, μόλις τη δεκαετία του 1980, η υδροπονία θεωρήθηκε ως μια κερδοφόρα εμπορική μέθοδος παραγωγής τροφίμων και καλλωπιστικών φυτών (Jones, 2004). Στο σύγχρονο κόσμο, τις τελευταίες δεκαετίες, η NASA έχει κάνει εκτεταμένη υδροπονική έρευνα για το Σύστημα Ελεγχόμενης Οικολογικής Υποστήριξης Ζωής (CELSS). (Κωνσταντοπούλου, 2014), (Παπαχρήστος, 2018) .

Πλεονεκτήματα Υδροπονίας:

- Λόγω της απουσίας εδάφους, η υδροπονία αποτελεί μία εναλλακτική και αξιόπιστη λύση για την αντιμετώπιση των ασθενειών που προκαλούνται από διάφορα παθογόνα εδάφους, όπως *Furarium*, *Verticillium* κ.ά. Ταυτόχρονα, μειώνεται σημαντικά η ανάγκη για εφαρμογές φυτοπροστατευτικών ουσιών
- Έχει απλές βασικές αρχές λειτουργίας και παρουσιάζει σχετικά ομοιόμορφα αποτελέσματα
- Απαλλάσσει την καλλιέργεια από την ύπαρξη ζιζανίων, άρα και από την ανάγκη για εφαρμογή ζιζανιοκτόνων
- Λύνει το πρόβλημα των άγονων και ανεπαρκώς στραγγιζόμενων εδαφών
- Μειώνει σημαντικά τις απαιτήσεις σε εργατικά χέρια, καθώς δεν χρειάζεται η προετοιμασία του εδάφους (π.χ. το όργωμα)
- Λόγω των σταθερών και συνήθως βέλτιστων κλιματικών συνθηκών που επικρατούν η παραγωγή προωμίζεται σημαντικά, ενώ μειώνεται παράλληλα και το κόστος της θέρμανσης
- Δίνει συνήθως υψηλότερες αποδόσεις, λόγω της ισορροπημένης θρέψης, πυκνότερης φύτευσης και καλύτερης διατήρησης των θερμοκρασιών στο ριζόστρωμα αλλά και στο υπέργειο τμήμα των φυτών.

Μειονεκτήματα Υδροπονίας:

- Ένα υδροπονικό σύστημα έχει αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης, όπως επίσης κοστοβόρα είναι και τα έτοιμα μείγματα θρεπτικών διαλυμάτων
- Ο χειρισμός του νερού και των θρεπτικών διαλυμάτων είναι συχνά πολύπλοκος και τυχόν λανθασμένος χειρισμός σε κάποια λειτουργία μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην πορεία της καλλιέργειας

- Οι παραγωγοί πρέπει να έχουν ειδικές γνώσεις για την προετοιμασία των θρεπτικών διαλυμάτων και τον έλεγχο των κλιματικών και περιβαλλοντικών συνθηκών
- Το υδροπονικό σύστημα μπορεί να μειώνει σημαντικά τη μετάδοση ασθενειών εδάφους, όμως υπάρχει ακόμα κίνδυνος μετάδοσης ασθενειών μέσω του θρεπτικού διαλύματος, ειδικά στα κλειστά συστήματα
- Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στον συνδυασμό νερού με ηλεκτρισμό.

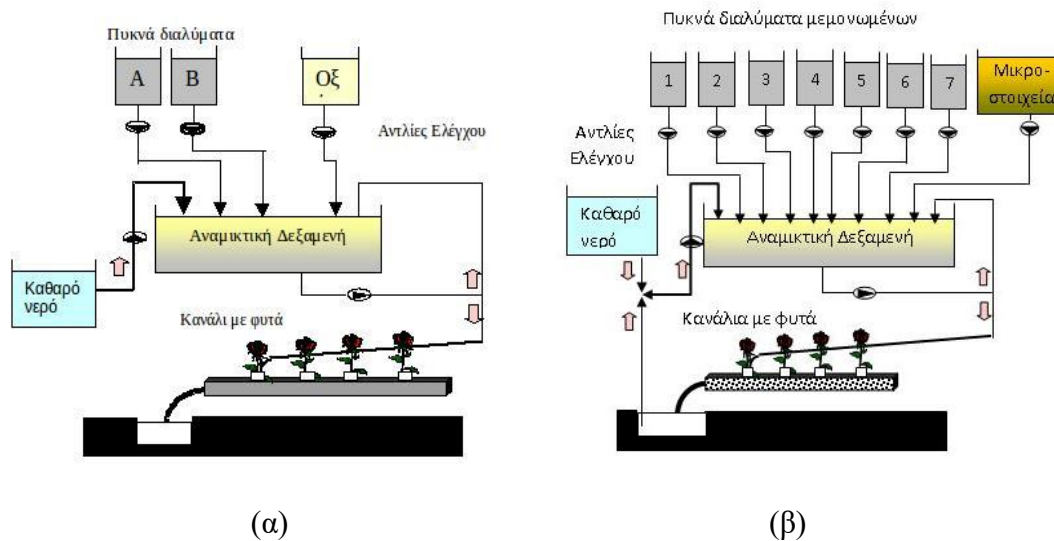
Τύποι υδροπονικού συστήματος με βάση τον τρόπο διαχείρισης των απορροών:

1) Ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας:

Τα ανοιχτά συστήματα υδροπονίας, ήταν από τα πρώτα συστήματα που δημιουργήθηκαν, κυρίως λόγω της απλότητας και της ευκολίας τους. Στα συστήματα αυτά, το θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται στην καλλιέργεια δεν ανακυκλώνεται αλλά απορρίπτεται προς το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση μεγάλων ποσοτήτων λιπασμάτων με την απορροή των διαλυμάτων, την μεγάλη σπατάλη νερού καθώς και τη ρύπανση του εδάφους και του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

2) Κλειστά συστήματα καλλιέργειας:

Σε αυτά τα συστήματα, το πλεονάζον θρεπτικό διάλυμα των απορροών δεν απορρίπτεται προς το περιβάλλον, αλλά όπως συλλέγεται, συμπληρώνεται εκ νέου με θρεπτικό διάλυμα και επαναχρησιμοποιείται στην επόμενη τροφοδοσία των φυτών. Βασικό τους μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος του εξοπλισμού της απολύμανσης για την ανακύκλωση του νερού, καθώς και η αυξημένη ευαισθησία στην εξάπλωση ασθενειών μέσω του νερού. Ακόμη, λόγω της συσσώρευσης θρεπτικών ουσιών κατά τη διαδικασία της ανακύκλωσης του νερού, πρέπει να ελέγχονται διεξοδικά οι θρεπτικές αναλογίες των στοιχείων, ώστε να μην προκληθεί κάποια ζημιά στα φυτά.



Εικόνα 1: (α) απεικόνιση ενός ανοιχτού συστήματος υδροπονίας, (β) απεικόνιση ενός κλειστού συστήματος υδροπονίας κατά το οποίο το νερό μετά τη χρήση του επιστρέφει και ξαναχρησιμοποιείται στο επόμενο πότισμα των φυτών.

ΥΔΑΤΟΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ:

Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας (FAO), ως υδατοκαλλιέργεια ορίζεται η εκτροφή υδρόβιων οργανισμών (μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται ψάρια, μαλάκια και υδρόβια φυτά) σε φυσικό ή ελεγχόμενο θαλάσσιο περιβάλλον ή σε εσωτερικά νερά. Η καλλιέργεια αυτή, μπορεί να περιλαμβάνει πληθυσμούς γλυκού ή αλμυρού νερού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι υδατοκαλλιέργειας, όπως είναι τα ανοιχτά συστήματα ύδατος, τα συγκοινωνούντα συστήματα, οι υδατοσυλλογές καλλιέργειας και τα συστήματα επανακυκλοφορίας του νερού (recirculating aquaculture systems: RAS).

Η Κίνα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παραγωγούς προϊόντων υδατοκαλλιέργειας στον κόσμο (Klinger et. al., 2012). Το 2018, αντιπροσώπευε περισσότερο από το 60% της παγκόσμιας παραγωγής υδατοκαλλιέργειας, με ποσό που ξεπερνούσε τους 50 εκατομμύρια τόνους.

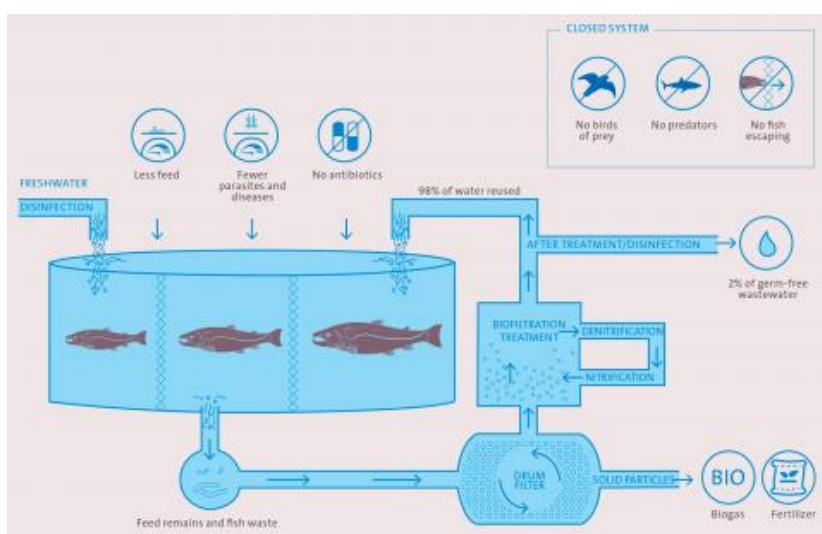
Η υδατοκαλλιέργεια με ανακύκλωση νερού (RAS) είναι μια μέθοδος παραγωγής που εξοικονομεί νερό, είναι αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον. Μέσω μιας σειράς διαδικασιών, που επεξεργάζονται το νερό, τα συστήματα αυτά, δίνουν την ευκαιρία για μείωση του χρησιμοποιούμενου νερού, την αξιοποίηση των απορριμμάτων και την ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών. Σε σχέση με την υπαίθρια υδατοκαλλιέργεια, τα RAS μπορεί να ανακυκλώσουν έως το 90-99% του νερού που χρησιμοποιούν, ενώ παράλληλα αυξάνεται σημαντικά και η πυκνότητα της

καλλιέργειας (Turcios et. al., 2014). Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Ταμείο για τη Φύση (WWF), η υδατοκαλλιέργεια προσφέρει μία αειφορική λύση στο παγκόσμιο επισιτιστικό πρόβλημα. Έτσι, τα ψάρια ιχθυοκαλλιέργειας όταν παράγονται με αρχές και κανόνες ορθής πρακτικής συμβάλουν ουσιαστικά στην προστασία του περιβάλλοντος.

Παράλληλα με την ραγδαία βιομηχανική ανάπτυξη των συστημάτων αυτών, δημιουργήθηκαν προβλήματα σε διάφορους τομείς, όπως η τεράστια κατανομή των περιοχών της υδατοκαλλιέργειας, η ρύπανση των υδάτων και η λιγοςτή οργάνωση τους. Υπολογίζεται ότι σε μια υδατοκαλλιέργεια, το 52-95% άζωτο, 85% φώσφορο και 60% της ζωοτροφής, τελικά θα μετατραπεί σε σωματίδια, διαλυμένες χημικές ουσίες ή αέρια και θα παραμείνουν στο νερό. Λόγω της συνεχούς συσσώρευσης περιττωμάτων, τα απόβλητα αυτά μετατρέπονται σε νιτρική αμμωνία, νιτρώδη, υδρόθειο και άλλες ουσίες. Όλα αυτά, θα καταλήξουν στο νερό και θα έχουν αρνητικά αποτελέσματα στην υγεία των ψαριών και σε μεγαλύτερη κλίμακα μπορούν να προκαλέσουν ζημιά σε ολόκληρο το περιβάλλον.

Στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας υπάρχει μεγάλη ποσότητα στερεών αποβλήτων, που παράγεται από τα ψάρια: για κατανάλωση 1Kg τροφής, τα ψάρια τείνουν να παράγουν 0,25 Kg στερεών απεκκριμάτων. Τα ψάρια μεταβολίζουν μεγάλο μέρος της τροφής τους, αλλά χρησιμοποιούν περίπου το 25–35% των θρεπτικών συστατικών (Timmons et. al., 2002). Αυτό σημαίνει ότι έως και το 75% των θρεπτικών συστατικών που προστίθενται στα RAS σπαταλούνται και δεν χρησιμοποιούνται. Η συσσώρευση αυτή, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός τοξικού περιβάλλοντος και στον θάνατο

των ψαριών. Για αυτό, είναι απαραίτητη η αφαίρεση τους είτε με φυσικούς (π.χ. φυσική καθίζηση) είτε με τεχνητούς τρόπους.



Εικόνα 2: Απεικόνιση ενός συστήματος RAS (Recirculating aquaculture system) Πηγή: Swiss Alpine Fish

ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΑ:

Γενικά:

Με την κλασική μέθοδο της υδροπονίας και της υδατοκαλλιέργειας, υπάρχουν βασικά προβλήματα, όπως η μεγάλη κατανάλωση των πόρων της γης και των υδάτινων πόρων αντίστοιχα, καθώς και η ρύπανση των περιβαλλόντων αυτών. Τα ζητήματα της συνεχούς αύξησης του πληθυσμού και της εξασφάλισης τροφίμων έχουν προωθήσει την έννοια της ενυδρειοπονίας, δηλαδή έναν τρόπο πιο οικολογικής φύτευσης, ανακύκλωσης και αναπαραγωγής. Η ενυδρειοπονία, είναι μία σχετικά καινούρια τεχνολογία, η οποία συνδυάζει την υδατοκαλλιέργεια με την υδροπονία. Με αυτόν τον τρόπο, ελαχιστοποιούνται έως και εκμηδενίζονται οι απαιτήσεις των φυτών σε θρεπτικά, καθώς τα προμηθεύονται από το θρεπτικό διάλυμα των ψαριών και οι ιχθυοκαλλιέργειες δεν απαιτούν τόσο συχνά αλλαγές νερού. Έτσι, οι δύο μέθοδοι εξαρτώνται άμεσα η μία από την άλλη, ενώ παράλληλα τα ψάρια, τα φυτά και οι μικροοργανισμοί δημιουργούν μεταξύ τους ένα συμβιωτικό περιβάλλον. Ο ορισμός της ενυδρειοπονίας, μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα με ποιο τμήμα της τονίζεται, όπως είναι το κομμάτι της παροχής θρεπτικών ή το κομμάτι της τεχνολογίας, του εξοπλισμού και του υλικού που εφαρμόζεται (Gooley & Gavine, 2003).

Ουσιαστικά, τόσο τα συστήματα παραγωγής φυτών όσο και των ψαριών μοιράζονται έναν κοινό πόρο: το νερό. Οι πηγές νερού είναι σημαντικές, ώστε τα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται για την παραγωγή ψαριών και φυτών να είναι διαθέσιμα και ισορροπημένα. Ακόμη, η χημική σύσταση του νερού που χρησιμοποιείται, είναι σημαντική για την βέλτιστη παραγωγή των προϊόντων. Τα συστήματα μπορούν να διαμορφωθούν με διάφορους τρόπους, για παράδειγμα, τα συστήματα που ανακυκλώνονται πλήρως και εκείνα που είναι αποσυνδεδεμένα.

Η ενυδρειοπονία, λοιπόν, επιδιώκει να εφαρμόσει μεθόδους που παρέχουν τεχνικά, χημικά, βιολογικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα. Έχει σημαντικές προοπτικές για τις μελλοντικές εφαρμογές των καλλιέργειών.

Ιστορική αναδρομή:

Οι Αζτέκοι, καλλιεργούσαν γεωργικά νησιά γνωστά ως chinampas σε ένα σύστημα που θεωρείται από μερικούς ως μία πρόιμη μορφή της ενυδρειοπονίας. Έτσι, καλλιεργούσαν φυτά, σε σταθερά νησιά στα ρηχά των λιμνών, τα οποία έπαιρναν τα απαραίτητα θρεπτικά τους από τα απόβλητα των εκτροφών και των γύρω περιοχών. Στην Νότια Κίνα και γενικά σε ολόκληρη την Νοτιοανατολική Ασία, υπήρχαν ορυζώνες με παράλληλη εκτροφή ψαριών. Στην πραγματικότητα όμως, ιστορικά τα

ψάρια σπάνια προστέθηκαν ενεργά στους ορυζώνες μέχρι τον 19^ο αιώνα (Halwart & Gupta, 2004) και παρουσίαζαν πολύ χαμηλές πυκνότητες με τελική συνέπεια να μην έχουν κάποια θρεπτική βοήθεια στα φυτά.

Η ανάπτυξη της σύγχρονης ενυδραιοπονίας, αποδίδεται συχνά στις εργασίες του Dr. Mark McMurtry στο North Carolina State University, ο οποίος επινόησε ένα «Ολοκληρωμένο Σύστημα Aqua-Vegeculture System» (iAVs) που βασιζόταν στο συνδυασμό της υδατοκαλλιέργειας και των κλινών καλλιέργειας με βάση την άμμο. Το 1979, ο Dr. James Rakocy και οι συνεργάτες του στο University of the Virgin Islands (UVI) ερεύνησαν και ανέπτυξαν τη χρήση κλινών υδροπονικής καλλιέργειας βαθέων υδάτων σε ένα σύστημα ενυδραιοπονίας μεγάλης κλίμακας.

Η ενυδραιοπονία θεωρήθηκε ιστορικά ως ένα προσοδοφόρο σύστημα για την καλλιέργεια φυτών, χρησιμοποιώντας απεκκρίματα ψαριών από υδατοκαλλιέργεια, έτσι ώστε αυτά τα απόβλητα να έχουν μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Τα απεκκρίματα θεωρούνται με αυτόν τον τρόπο, ως ένα θετικό και κερδοφόρο προϊόν, αντί ως ένα ενοχλητικό απόβλητο με σχετικό κόστος για την κάλυψη των περιβαλλοντικών-νομοθετικών απαιτήσεων για την απόρριψη του (Rakocy & Hargreaves, 1993), (Love et. al., 2015). Σήμερα, η ενυδραιοπονία θεωρείται πλέον μια νέα και αναδύομενη βιομηχανία με σχετική θέση στο παγκόσμιο πλαίσιο γεωργικής παραγωγής και υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της τεχνολογίας της (Knaus & Palm, 2017).

Μέρη ενός ενυδραιοπονικού συστήματος:

Το σύστημα της ενυδραιοπονίας αποτελείται από δύο επιμέρους βασικά συστήματα, της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας. Τα φυτά της υδροπονίας εκμεταλλεύονται τα θρεπτικά στοιχεία που βρίσκονται στα απεκκρίματα των ψαριών, αφού περάσουν πρωτίστως από ειδικά φίλτρα για τον καθαρισμό τους.

Ένα τυπικό σύστημα ενυδραιοπονίας αποτελείται από:

- Τη δεξαμενή εκτροφής ψαριών
- Το μηχανικό φίλτρο
- Το βιολογικό φίλτρο
- Τη δεξαμενή για την ανάπτυξη των φυτών
- Σωλήνες παροχής και απορροής του θρεπτικού διαλύματος

Δεξαμενή ψαριών:

Οι δεξαμενές ψαριών είναι ένα κρίσιμο και βασικό συστατικό και μπορούν να αντιπροσωπεύουν έως το 20% του συνολικού κόστους μιας μονάδας ενυδρείοπονίας. Τα ψάρια απαιτούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις για να επιβιώσουν και να αναπτυχθούν καλά, και γι' αυτό οι δεξαμενές τους θα πρέπει να επιλέγονται με σύνεση και πάντα με βάση τις απαιτήσεις του κάθε είδους. Γενικά, συνιστώνται οι στρόγγυλες δεξαμενές, ανοιχτού χρώματος κατασκευασμένες είτε από πλαστικό είτε από fiberglass (2012).

Μηχανικό φίλτρο:

Όπως συμβαίνει στα κλασικά συστήματα υδατοκαλλιέργειας, έτσι και στα ενυδρείοπονικά, η συσσώρευση περιττωμάτων θα δημιουργήσει σε σύντομο χρονικό διάστημα, ένα τοξικό περιβάλλον για την ανάπτυξη των ψαριών, το οποίο θα οδηγήσει στην απόφραξη του συστήματος, τη διατάραξη του ρυθμού της ροής νερού και τελικά τη δημιουργία ενός ασταθούς συστήματος (Mullins et. al., 2016). Σε ένα συγκεκριμένο σύστημα, η καταλληλότερη συσκευή για την αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και των περιττωμάτων εξαρτάται κυρίως από τον ρυθμό οργανικής φόρτωσης, δηλαδή, τον ημερήσιο όγκο τροφής και την παραγωγή απεκκριμάτων των ψαριών (Rakocy, 2012), (Lennard, 2012). Έτσι, ανάλογα με την περίπτωση χρησιμοποιούνται είτε φίλτρα τυμπάνου είτε φίλτρα καθίζησης.

Βιολογικό φίλτρο (Bio-filter):

Η αμμωνία είναι το πιο σημαντικό συστατικό των απεκκριμάτων των ψαριών και παράγεται κυρίως κατά την πέψη της τροφής από την αποσύνθεση των απεκκριμάτων και της οργανικής ύλης. Η συσσώρευση αμμωνίας μπορεί να φτάσει σε ένα επίπεδο τοξικό για τα ψάρια ($0,05 \text{ mg L}^{-1}$) (Edaroyati et. al., 2017). Στα RAS, η αμμωνία μπορεί να αφαιρεθεί με την διαδικασία της νιτροποίησης. Το βιολογικό φίλτρο μετατρέπει την αμμωνία σε μη τοξικές και ταυτόχρονα ωφέλιμες μορφές αζώτου για τα φυτά, με τη βοήθεια των νιτροποιητικών βακτηρίων *Nitrosomonas* και *Nitrobacter*. Η διαδικασία αυτή, μπορεί να μετατρέψει μεταξύ 93- 96% της αμμωνίας σε νιτρικά άλατα. Η κατάλληλη επιλογή του φίλτρου γίνεται με βάση το είδος που καλλιεργείται και το περιβάλλον καλλιέργειας (Lekang & Kleppe, 2000).

Το βέλτιστο περιβάλλον ενός βιολογικού φίλτρου είναι το εξής:

- η κατάλληλη θερμοκρασία είναι μεταξύ 25 και 30 °C,
- το pH είναι μεταξύ 7 και 9
- η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD) να είναι μικρότερη από 20 mg/L,

- το κορεσμένο διαλυμένο οξυγόνο (DO) και η ολική αλκαλικότητα να είναι 100 mg/L ή περισσότερο (Rakocy et. al., 2006).

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί νέες, εναλλακτικές τεχνολογίες αφαίρεσης αζώτου με μία πιο βιολογική-οικολογική μορφή. Σημαντικό μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η κακή οικονομική απόδοση καθώς και η δυσκολία στην αναγέννηση μεγάλων ποσοτήτων προσροφητικών υλικών (Lekang, 2013).

Εμπλουτισμός δεξαμενών ψαριών με οξυγόνο:

Στο σύστημα υδατοκαλλιέργειας, καταναλώνεται μεγάλη ποσότητα οξυγόνου κατά τη διαδικασία καλλιέργειας των ψαριών με ανακυκλώσιμο νερό (RAS). Ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου διαφορετικών ειδών ψαριών κυμαίνεται μεταξύ 200-500 mg O₂/kg/h (Summerfelt, 2000). Το επίπεδο οξυγόνου παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών (Bodenmiller, 2017). Οι παραδοσιακές μέθοδοι αύξησης του οξυγόνου μπορούν να προσθέσουν αέρα στο νερό των ψαριών μέσω αεριστήριων, αντλιών αέρα, φυσητήρες αέρα και συμπιεστών (Wardlow, 2002).

Dissolved Oxygen (DO):

Το διαλυμένο οξυγόνο (DO) είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες, σχετικά με την ποιότητα του νερού στα υδατικά συστήματα. Γενικά, τα ψάρια χρειάζονται περίπου 4-5 mg/L διαλυμένου οξυγόνου. Χαμηλά επίπεδα DO, μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην υγεία των ψαριών, στο βιολογικό φίλτρο και συνεπώς στη διαδικασία της νιτροποίησης. Στα RAS, το DO μπορεί να ελεγχθεί μέσω αερισμού ή με την προσθήκη καθαρού οξυγόνου ή ακόμα με τον συνδυασμό των δύο.

pH:

Τα ψάρια μπορούν να αναπτυχθούν ικανοποιητικά σε περιβάλλον με pH 6-9. Με τη μείωση του pH, αυξάνεται η συγκέντρωση της ιονισμένης μορφής του αμμωνίου (NH₄), η οποία είναι λιγότερο τοξική για τα ψάρια. Αντίθετα, όσο γίνεται πιο αλκαλικό, τόσο αυξάνεται η συγκέντρωση της μη ιονισμένης, τοξικής μορφής του αμμωνίου (NH₃). Η διαδικασία της νιτροποίησης γίνεται λιγότερο αποδοτική σε pH κάτω από 6,5 ενώ τα φυτά δείχνουν να προτιμούν το ελαφρώς όξινο pH:5-6,9. Έτσι σε ένα υγιές σύστημα ενυδρείοποιίας γίνεται ένας συμβιβασμός και το κατάλληλο εύρος pH θεωρείται γύρω στο 6,5-7,5 με ιδανικότερο το 6,8-7,2. Σε pH πάνω από 7,5 τα φυτά δεν μπορούν να απορροφήσουν συγκεκριμένα θρεπτικά στοιχεία, παρουσιάζοντας καθυστερημένη ανάπτυξη και τελικά συμπτώματα έλλειψης ιχνοστοιχείων στα φύλλα τους. Με την πάροδο του χρόνου, το pH ενός ενυδρείοποιικού συστήματος τείνει να

γίνει πιο όξινο και αυτό γιατί συσσωρεύεται CO₂ από τα ψάρια και τις ρίζες των φυτών, το οποίο θα μετατραπεί σε ανθρακικό οξύ, ενώ και η διαδικασία της νιτροποίησης παράγει νιτρικό οξύ.

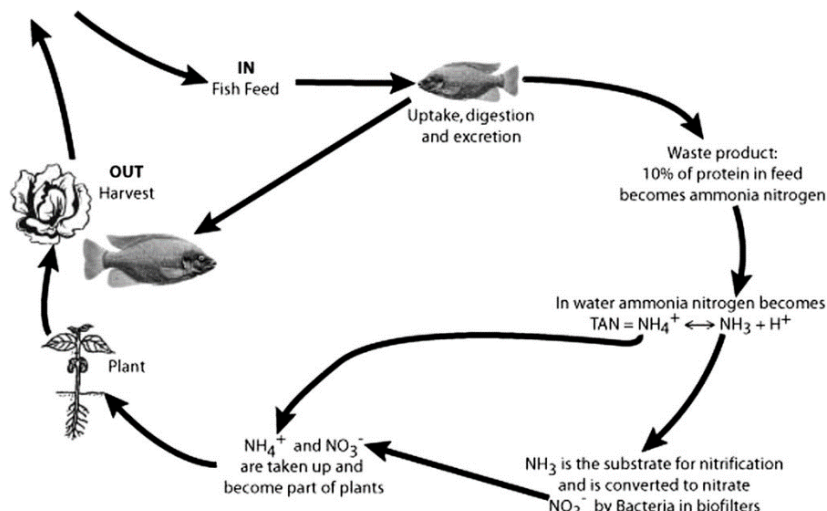
Ο κύκλος του αζώτου- Νιτροποίηση- Βακτήρια:

Το Άζωτο (N), είναι ένα απαραίτητο χημικό και δομικό στοιχείο για όλες τις μορφές της ζωής. Τα ζώα παράγουν απόβλητα που περιέχουν σε μεγάλο βαθμό αμμωνία (NH₃). Αυτή η αμμωνία μεταβολίζεται από μια συγκεκριμένη ομάδα βακτηρίων, που ονομάζονται νιτροποιητικά βακτήρια και είναι πολύ σημαντικά στη λειτουργία των συστημάτων ενυδρείοπονίας. Τα βακτήρια μετατρέπουν πρώτα την αμμωνία σε νιτρώδεις ενώσεις (NO₂⁻) και στη συνέχεια σε νιτρικές (NO₃⁻). Τα φυτά, μπορούν να χρησιμοποιούν την αμμωνία και τα νιτρικά άλατα για να εκτελέσουν τις διαδικασίες ανάπτυξής τους, αλλά τα νιτρικά είναι καλύτερα, καθώς αφομοιώνονται ευκολότερα από τις ρίζες τους. Έτσι, στα κλειστά RAS, τα φυτά αποτελούν ένα είδος φίλτρου, καθαρίζοντας το νερό από μορφές αζώτου που είναι τοξικές για τα ψάρια.

Γενικά, στα συστήματα ενυδρείοπονίας, το νερό απορροής μεταφέρεται από τη δεξαμενή των ψαριών, σε ένα μηχανικό φίλτρο και στη συνέχεια, κατευθύνεται στο βιολογικό φίλτρο, ώστε με τη βοήθεια βακτηρίων, η ολική αμμωνία (NH₃+NH₄) να οξειδωθεί βιοχημικά σε νιτρικά ιόντα (NO₃), τα οποία είναι μη τοξικά για τα φυτά. Τα νιτροποιητικά βακτήρια μπορούν να αναπτυχθούν σε ποικίλα περιβάλλοντα, όπως το έδαφος, το νερό και ο αέρας. Αποτελούν το βασικό συστατικό της νιτροποίησης και βοηθούν στη μετατροπή των ζωικών και φυτικών αποβλήτων σε προσιτά θρεπτικά συστατικά για τα φυτά. Στη διαδικασία της νιτροποίησης εμπλέκονται δύο κύριες ομάδες νιτροποιητικών βακτηρίων:

1. τα βακτήρια που οξειδώνουν την αμμωνία (AOB), με πιο κοινό το γένος *Nitrosomonas*. Τα βακτήρια αυτά μετατρέπουν αρχικά την αμμωνία (NH₃) σε νιτρώδη (NO₂)
2. τα νιτρώδη βακτήρια (NOB) με πιο κοινό το γένος *Nitrobacter*, τα οποία μετατρέπουν τα νιτρώδη (NO₂⁻) σε νιτρικό άλας (NO₃⁻)

Οι βασικότεροι παράγοντες για τη διατήρηση υγιών βακτηρίων, είναι η θερμοκρασία του νερού (ιδανική θερμοκρασία: 17 °C), το pH (7,2–7,8 και 7,2–8,2 αντίστοιχα), το DO (4–8 mg/L) και επαρκή επιφάνεια στην οποία μπορούν να αναπτυχθούν τα βακτήρια.



Εικόνα 3: Ο κύκλος του αζώτου μέσα στο σύστημα της ενυδρείοπονίας. Πηγή: Tyson et al., 2011. Ο κύκλος του αζώτου μέσα στο σύστημα της ενυδρείοπονίας. Πηγή: Tyson et al., 2011

Βασικές αρχές της Ενυδρείοπονίας:

Ίσως η πιο σημαντική αρχή της ενυδρείοπονίας, είναι η χρήση των αποβλήτων που παράγονται από τα ψάρια ως βασική πηγή θρεπτικών συστατικών για τα φυτά. Η χρήση των αποβλήτων θα πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα και αποτελεσματικά για τη βέλτιστη παραγωγή των δύο κύριων προϊόντων (ψαριών και φυτών) (Rakocy & Hargreaves, 1993) (Delaide et. al., 2016) (Knaus & Palm, 2017).

Για τη βελτιστοποιημένη ενσωμάτωση στην ενυδρείοπονία είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της αναλογίας μεταξύ της παραγωγής απεκκριμάτων ψαριών (όπως επηρεάζεται άμεσα από την προσθήκη τροφής των ψαριών) και της θρεπτικής τροφοδότησης των φυτών (Rakocy & Hargreaves, 1993), (Lennard & Leonard, 2006), (Goddek et. al., 2015). Επίσης, για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, είναι σημαντικό να πραγματοποιείται διαδικτυακή παρακολούθηση του θερμοκηπίου σε πραγματικό χρόνο και περιβάλλον, της ποιότητας του νερού της υδατοκαλλιέργειας και των θρεπτικών συστατικών των καλλιεργειών.

Το σύστημα θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να ελαχιστοποιεί ή ιδανικά να εκμηδενίζει, τις άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από το νερό ή τα θρεπτικά συστατικά. Ο σχεδιασμός του συστήματος δεν θα πρέπει να σπαταλά θρεπτικά στοιχεία μέσω της παραγωγής εξωτερικών αποβλήτων. Εάν τα λύματα και τα θρεπτικά συστατικά εγκαταλείπουν το σύστημα, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε εναλλακτικές τεχνολογίες παραγωγής φυτών, έτσι ώστε να συμβάλλουν στη συνολική παραγωγή βρώσιμης ή εμπορεύσιμης βιομάζας και να μην παρουσιάζουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Tyson et. al., 2011).

Τα συστήματα, θα πρέπει ιδανικά να βρίσκονται μέσα σε περιβαλλοντικά ελεγχόμενες δομές και εγκαταστάσεις (π.χ. θερμοκήπια). Αυτό προσφέρει τη δυνατότητα επίτευξης καλύτερων παραγωγικών ποσοστών για τα προϊόντα (Lennard, 2017).

Πλεονεκτήματα Ενυδραιοπονίας:

- Προσφέρει μία βιώσιμη και εντατική παραγωγή τροφίμων με την ταυτόχρονη παραγωγή δύο αγροτικών προϊόντων με μία πηγή αζώτου
- Υπάρχει η αντίληψη ότι η παρουσία ψαριών και φυτών στο ίδιο υδάτινο σύστημα παρέχει θετικά συνεργιστικά αποτελέσματα στην υγεία και την ανάπτυξή τους (Blidariu & Grozea, 2011)
- Γίνεται πιο αποδοτική χρήση και εξοικονόμηση νερού. Η μέθοδος αυτή, μπορεί να επιτρέψει στον παραγωγό να χρησιμοποιήσει μόνο το 10% των υδάτινων πόρων σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής τροφίμων
- Σε ορισμένα συστήματα, η βακτηριακή βιομάζα μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί ως ζωοτροφή (παραγωγή biofloc) και καθιστά τα συστήματα αυτά ολοένα και πιο αυτοτελή (Pinho et. al., 2017)
- Δεν απαιτεί έδαφος και δεν χρησιμοποιούνται χημικά φυτοπροστατευτικά και λιπάσματα
- Έχουν υψηλότερες αποδόσεις και ποιοτική παραγωγή
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις, όπως ερήμους, υποβαθμισμένο έδαφος ή αλμυρά και αμμώδη νησιά
- Δημιουργεί ελάχιστα απόβλητα, καθώς τα απόβλητα των ψαριών χρησιμοποιούν ως λιπάσματα
- Τα υλικά κατασκευής και η βάση πληροφοριών είναι ευρέως διαθέσιμα.

Μειονεκτήματα Ενυδραιοπονίας:

- Υψηλό κόστος αρχικής εγκατάστασης σε σύγκριση με την κλασική παραγωγή στο έδαφος ή την υδροπονική
- Η γνώση των ψαριών, των βακτηρίων και της φυτικής παραγωγής είναι απαραίτητη για κάθε παραγωγό
- Οι απαιτήσεις για ψάρια και φυτά μπορεί να μην ταιριάζουν
- Δεν συνιστάται σε μέρη όπου τα καλλιεργημένα ψάρια και φυτά δεν μπορούν να ανταποκριθούν στο βέλτιστο επίπεδο λόγω αβιοτικών παραγόντων (π.χ. θερμοκρασία)

- Έχουν μειωμένες επιλογές διαχείρισης σε σύγκριση με τα αυτόνομα συστήματα υδατοκαλλιέργειας ή υδροπονίας
- Τυχόν κίνδυνοι ή ατυχήματα μπορεί να προκαλέσουν κατάρρευση του συστήματος
- Είναι υποχρεωτική η καθημερινή διαχείριση του συστήματος
- Υπάρχει έλλειψη στρατηγικής γνώσης σχετικά με το πώς να κατευθύνουν περαιτέρω δραστηριότητες για την ανάπτυξη των τεχνολογιών παραγωγής τροφίμων διατηρώντας την υπόσχεσή βιωσιμότητα και πιθανές λύσεις για επείγοντα ζητήματα (Höhne et. al., 2014).

Συστήματα Ενυδρειοπονίας:

Τα ενυδρειοπονικά συστήματα παίρνουν το όνομα τους από τις αντίστοιχες υδροπονικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την καλλιέργεια των φυτών. Ανάλογα λοιπόν με το αν υπάρχει υπόστρωμα για την ανάπτυξη των φυτών, οι τύποι των ενυδρειοπονικών συστημάτων διακρίνονται στους εξής (Maucieri et. al., 2018):

MBT (Media Bed Technique): Το σύστημα αυτό αποτελείται από αδρανή υποστρώματα (πχ. περλίτη) πάνω σε ένα μέσο καλλιέργειας ή κλίνες. Με αυτόν τον τρόπο, οι πόροι του υποστρώματος προφέρουν στήριξη στο ριζικό σύστημα των φυτών, ενώ ταυτόχρονα φιλτράρουν το διάλυμα των απορροών, όπως θα έκανε και το μηχανικό ή βιολογικό φίλτρο (FAO, 2014). Η μέθοδος αυτή είναι η πιο συνηθισμένη για συστήματα ενυδρειοπονίας μικρής κλίμακας.

NFT (Nutrient Film Technique): Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί οριζόντια κανάλια από τα οποία περνάει το θρεπτικό διάλυμα και διαβρέχει τις ρίζες των φυτών. Τα φυτά είναι τοποθετημένα σε τρύπες στο πάνω μέρος των καναλιών.

DWC (Deep Water Culture): Στην περίπτωση αυτή, τα φυτά βρίσκονται σε μικρές γλάστρες με τρύπες, από τις οποίες κρέμονται οι ρίζες των φυτών. Οι γλάστρες τοποθετούνται σε ειδικά ανοίγματα πάνω σε σχεδίες πολυστυρενίου ή σε σανίδες. Το θρεπτικό διάλυμα βρίσκεται κάτω από τις σανίδες και τροφοδοτεί τα φυτά με τα απαραίτητα θρεπτικά (FAO, 2014).

Οι τεχνικές των NFT και DWC μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εμπορικά συστήματα ενυδρειοπονίας, σε αντίθεση με τα MBT.

Εφαρμογές Ενυδρειοπονίας:

1) Μικρής κλίμακας ενυδρειοπονικά συστήματα:

Οι μονάδες αυτές έχουν μέγεθος δεξαμενής ψαριών περίπου 1000 L και χώρο καλλιέργειας περίπου 3 m². Θεωρούνται μικρής κλίμακας και είναι κατάλληλες για προσωπική παραγωγή. Μονάδες αυτού του μεγέθους έχουν δοκιμαστεί με μεγάλη επιτυχία σε πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο. Ο κύριος σκοπός τους, είναι η παραγωγή τροφίμων για οικιακή χρήση, καθώς πολλές μονάδες μπορούν να έχουν διάφορα είδη λαχανικών και βοτάνων που αναπτύσσονται ταυτόχρονα.

2) Ημι-εμπορικές και εμπορικές μονάδες ενυδρειοπονίας:

Λόγω του υψηλού αρχικού κόστους εγκατάστασης και της περιορισμένης εμπειρίας σε αυτήν την κλίμακα, τα συγκεκριμένα συστήματα είναι λίγα σε αριθμό. Τα περισσότερα από αυτά που υπάρχουν χρησιμοποιούν πρακτικές μονοκαλλιέργειας και συνήθως παράγουν μαρούλι ή βασιλικό.

3) Εκπαιδευτικές μονάδες ενυδρειοπονίας:

Αρκετές από τις μονάδες ενυδρειοπονίας που υπάρχουν, έχουν δημιουργηθεί για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς λόγους με απώτερο στόχο την προώθηση της αειφορίας.

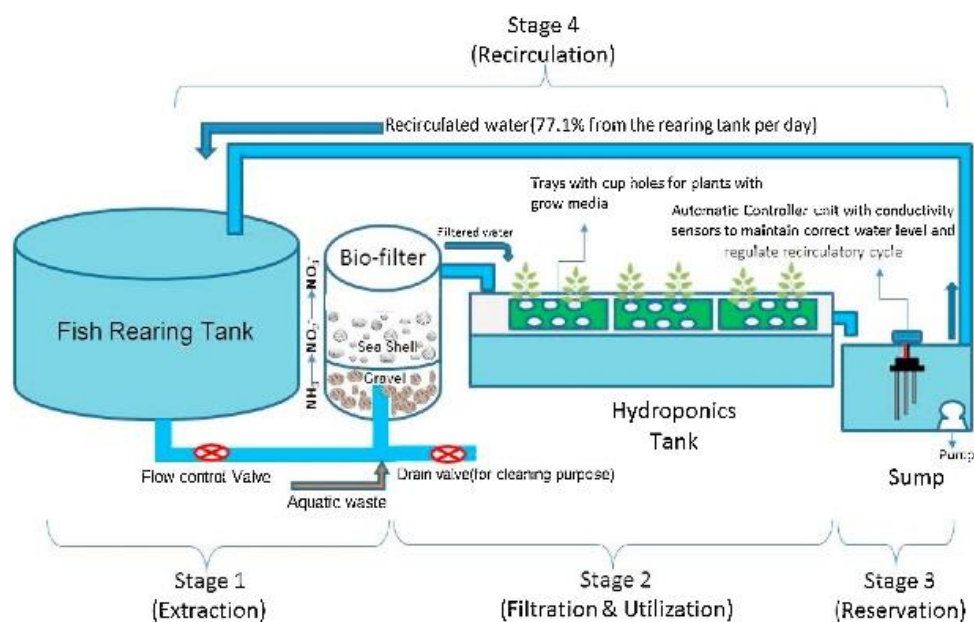
4) Μονάδες ενυδρειοπονίας με στόχο την επισιτιστική ασφάλεια σε χώρες που το έχουν ανάγκη.

Είδη φυτών και ψαριών που χρησιμοποιούνται στην ενυδρειοπονία:

Η ενυδρειοπονία βασίζεται στην κοινή πεποίθηση μιας βιολογικής κοινής παραγωγής φυτών και ψαριών.

Στην παραγωγή ψαριών συνήθως χρησιμοποιούνται Τιλάπια, τα ψάρια Bluegill, και τα γατόψαρα. Άλλα ψάρια που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι: ο κυπρίνος, η πέρκα, η πέστροφα και το λαβράκι, τα οποία δεν προορίζονται απαραίτητα για εμπόριο. Όλα τα ψάρια, όπως χρυσόψαρα και τροπικά ψάρια, είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή φυτών και λαχανικών, ακόμα και σε μικρές δεξαμενές, αρκεί να μπορούν να αναπτυχθούν στα συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Η Τιλάπια είναι το πιο δημοφιλές είδος για καλλιέργεια ενυδρειοπονίας (69% του είδος που χρησιμοποιούνται είναι τιλάπια) (Love et. al., 2015). Είναι εύκολο στην αναπαραγωγή και αναπτύσσεται εξαιρετικά γρήγορα. Επίσης, είναι παμφάγο είδος και αντέχει αρκετά σε κακές συνθήκες νερού.

Η φυτική παραγωγή ποικίλλει ανάλογα με την ποσότητα τροφής που μπορούν να καταναλώσουν τα ψάρια, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των αποβλήτων ως τροφή για τα βακτήρια και τα φυτά. Μερικά από τα κυριότερα είδη είναι ο βασιλικός, οι τομάτες, το αγγούρι, το μαρούλι κ.ά. Το Μαρούλι (*Lactuca sativa*) καλλιεργείται ιδανικά σε pH: 6-7 και σε θερμοκρασία 15-20 °C, ενώ συνιστάται να φυτεύεται σε αποστάσεις 10-25 cm μεταξύ των φυτών.



Εικόνα 4: Απεικόνιση ενός τυπικού RAS συστήματος ενυδρείοπονίας. Πηγή: Bikash Chandra Mohapatra et al (2020)

ΕΝΥΔΡΕΙΟΠΟΝΙΑ ΜΕ ΑΠΟΖΕΥΓΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟ (CAP ή DAPS):

Τα συστήματα ενυδρείοπονίας μπορούν να διακριθούν σε συζευγμένα και αποζευγμένα, ανάλογα με το πώς συνδέονται μεταξύ τους οι επιμέρους μονάδες. Σήμερα, τα περισσότερα συστήματα ενυδρείοπονίας είναι συζευγμένα. Στην κατηγορία αυτή, η μονάδα υδατοκαλλιέργειας και η μονάδα υδροπονίας είναι διατεταγμένες σε έναν ενιαίο βρόχο, όπου το νερό κατευθύνεται από την μία μονάδα στην άλλη και πάλι πίσω. Έτσι, λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων των δύο μονάδων, δημιουργείται αυτόματα ένας συστηματικός συμβιβασμός, με απώτερο στόχο να λειτουργούν ικανοποιητικά και τα δύο συστήματα χωρίς να υπάρχει σημαντική μείωση της απόδοσης τους.

Αντιθέτως, στα αποζευγμένα συστήματα ενυδρείοπονίας (DAPS ή συστήματα 2 βρόχων ή συστήματα πολλαπλών βρόχων), το θρεπτικό διάλυμα των ψαριών

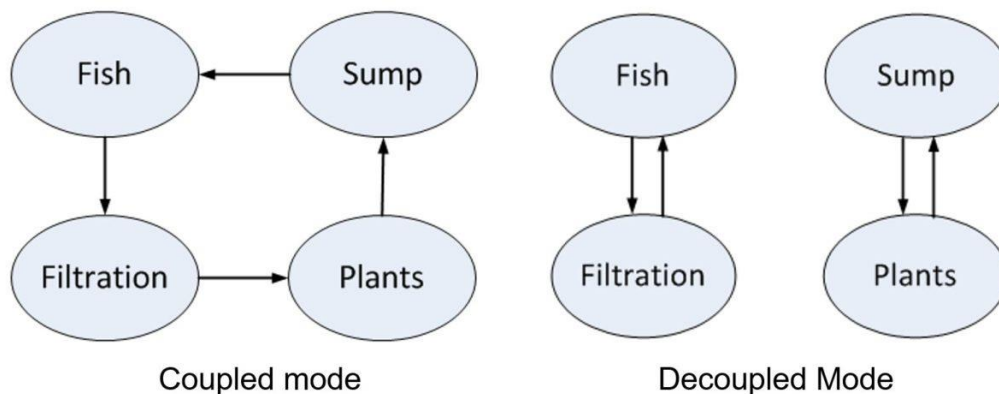
κατευθύνεται σε έναν ανεξάρτητο βρόχο. Ο διαχωρισμός αυτός, επιτρέπει αλλαγές στις αναλογίες του θρεπτικού διαλύματος με την προσθήκη θρεπτικών συστατικών αλλά και ρύθμιση του pH, της θερμοκρασίας και άλλων παραγόντων, τόσο για τα φυτά όσο και για τα ψάρια. Ταυτόχρονα, επιτρέπει την καλύτερη ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων και των υπολειμμάτων τροφής.

Σχετικά με τις αποδόσεις, φαίνεται ότι τα συστήματα συζευγμένης ενυδρείοπονίας είναι παρόμοια ή και καλύτερα των κλασικών συστημάτων υδροπονίας. Το αποτέλεσμα όμως αυτό, ενδέχεται να τροποποιηθεί εύκολα, καθώς το σύστημα επηρεάζεται άμεσα από τη συμβατότητα της σχέσης ψαριών-φυτών. Στο πρόβλημα αυτό, δίνει λύση η έννοια της αποζευγμένης ενυδρείοπονίας. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να γίνουν προσαρμογές στο νερό που προορίζεται για τα φυτά, χωρίς να προκαλείται κάποια ζημιά στα ψάρια (Kloas et. al., 2015). Έτσι, τα αποζευγμένα συστήματα διατηρούν τα πλεονεκτήματα της κλασικής ενυδρείοπονίας, αλλά ταυτόχρονα δίνουν την ευκαιρία να δημιουργήσουν συγκρίσιμες παραγωγές, όπως σε μεμονωμένες συμβατικές μονάδες RAS και υδροπονικές μονάδες (Suhl et. al., 2016).

Το μέγεθος της καλλιέργειας των φυτών, καθώς και οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα την ποσότητα του νερού που εξατμίζεται μέσω των φύλλων και αποτελούν κύριους παράγοντες του ρυθμού αντικατάστασης του νερού. Το νερό που στέλνεται από την μονάδα RAS στην υδροπονική, αναπληρώνεται συνεχώς με καθαρό νερό, το οποίο βελτιώνει τη γενική ποιότητα του, μειώνοντας τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων (Monsees et. al., 2017). Επίσης, συμπληρώνεται και το νερό που χάνεται λόγω της εξατμισοδιαπνοής των φυτών.

Τα πλεονεκτήματα των DAPS έχουν μελετηθεί κυρίως σε πειράματα εργαστηριακής κλίμακας. Οι Jijakli et al (Jijakli et. al., 2016) παρατήρησε αύξηση στην ανάπτυξη των φυτών κατά 39% σε σύγκριση με ένα καθαρό ενυδρείοπονικό θρεπτικό διάλυμα ελέγχου. Ωστόσο, αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε κυρίως κατά την καλλιέργεια φυλλωδών λαχανικών και δεν ισχύει για όλες τις καλλιέργειες.

Από την άλλη πλευρά, μειονέκτημα των συστημάτων αυτών, είναι η περιοδική αλλαγή του νερού εξαιτίας της αυξημένης συγκέντρωσης συσσωρευμένων θρεπτικών στα RAS (Carmassi et. al., 2005), (Savvas et. al., 2008). Ίσως, το μεγαλύτερο και πιο σημαντικό μειονέκτημα των αποζευγμένων συστημάτων είναι το πολύ μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης τους. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων απαιτείται η εφαρμογή πρόσθετων βρόχων με στόχο τη μείωση της ποσότητας των αποβλήτων που παράγονται στο σύστημα (Goddek et. al., 2019).



Εικόνα 5: Σχεδίαση των συστημάτων ενυδρείοπονίας. Αριστερά είναι ένα συζευγμένο σύστημα και δεξιά ένα αποζευγμένο σύστημα ενυδρείοπονίας. Πηγή: www.theaquaponicsource.com

ΜΑΡΟΥΛΙ:

Γενικά:

Το μαρούλι (*Lactuca sativa*) είναι ένα ποώδες, ετήσιο φυτό, το οποίο ανήκει στην τάξη Asterales και την οικογένεια Asteraceae. Το είδος που καλλιεργείται σήμερα προέρχεται από το άγριο μαρούλι (*Lactuca serriola* ή *scariola* L), το οποίο συναντάται ως αυτοφυές στην Ευρώπη. Οι ποικιλίες μαρουλιού είναι πολλές και μπορούν να διακριθούν με βάση το χρώμα, την πρωιμότητα, την εποχή καλλιέργειας, την ανθεκτικότητα σε ασθένειες κ.λπ.

Ιστορική αναδρομή:

Οι αρχαίοι Αιγύπτιοι ήταν από τους πρώτους λαούς που καλλιέργησαν το μαρούλι. Έπειτα, η καλλιέργεια διαδόθηκε στους αρχαίους Έλληνες και στη συνέχεια στους Ρωμαίους, ενώ στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη, έγινε γνωστό περί τα 800 μ.Χ. Σήμερα, το μαρούλι είναι διαδεδομένο σε όλη την υφήλιο και θεωρείται ένα από τα πιο σημαντικά φυλλώδη λαχανικά. (Δημητράκης, 1998).

Βοτανικά χαρακτηριστικά:

Η ρίζα του μαρουλιού είναι πασσαλώδης με μήκος που φτάνει έως τα 0,5 m. Τα φύλλα εξέρχονται από τον βλαστό, ο οποίος είναι κοντός και δεν αναπτύσσεται σε ύψος, με αποτέλεσμα αρχικά το φυτό να μοιάζει με ροζέτα. Τα φύλλα είναι λεία, διαφόρου μεγέθους, επιμήκη και εμφανίζονται σε σπειροειδή διάταξη. Τα πρώτα

φύλλα είναι σχεδόν επίπεδα, ενώ στη συνέχεια τα φύλλα εμφανίζονται με μια κύρτωση. Τα άνθη είναι ερμαφρόδιτα και οργανώνονται σε ταξιανθίες (15-25 άνθη).



Εικόνα 6: Απεικόνιση φυτού μαρουλιού ποικιλίας Station. Πηγή: www.rijkzwaan.gr

Απαιτήσεις:

Έδαφος: Γενικά, το μαρούλι είναι ευαίσθητο φυτό και απαιτεί γόνιμο έδαφος, πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία, με καλή στράγγιση και υψηλό βαθμό υδατοϊκανότητας. Επιπλέον, το έδαφος της καλλιέργειας θα πρέπει να έχει χαμηλή συγκέντρωση σε άλατα. Τα πιο κατάλληλα εδάφη για καλλιέργεια θεωρούνται τα αμμοπηλώδη με άριστο pH από 6 έως 7.

Θερμοκρασία: Το μαρούλι θεωρείται φυτό ψυχρής εποχής και απαιτεί σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες για να αναπτυχθεί ικανοποιητικά. Οι άριστες συνθήκες θερμοκρασίας εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες όπως είναι ο τύπος και η ποικιλία του μαρουλιού, η εποχή καλλιέργειας και το επίπεδο του CO₂. Στο σπορείο, η άριστη θερμοκρασία για τη βλάστηση των σπόρων κυμαίνεται μεταξύ 15-21 °C. Γενικά, συνιστάται η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της νύχτας να διατηρείται 5-7 °C χαμηλότερα σε σχέση με τη θερμοκρασία που επικρατεί κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Φως: Ως φυτό μεγάλης ημέρας, ο φωτισμός είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες, ειδικά στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Το φως επηρεάζει σημαντικά τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα, συνεπώς και τον ρυθμό ανάπτυξης. Επίσης, η ένταση του φωτισμού σε συνδυασμό με τη σύσταση του θρεπτικού διαλύματος, επηρεάζουν την απορρόφηση του αζώτου. Έτσι, σύμφωνα με τον Wheeler (Wheeler, 1994) η απορρόφηση του αζώτου από τα φυτά αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση της εντάσεως του φωτός.

CO₂: Έχει αποδειχθεί ότι η τεχνική αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στο χώρο του θερμοκηπίου σε επίπεδα υψηλότερα από τα κανονικά (γύρω στα 1000-1500 ppm) έχουν μία θετική επίδραση στην ανάπτυξη, την πρωίμηση και την παραγωγή του μαρουλιού (Walls, 1993).

Άρδευση και Λίπανση:

Το μαρούλι έχει σημαντικές ανάγκες σε νερό, ειδικά όταν η καλλιεργείται κατά τις θερμές εποχές του έτους. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι κατά τους θερμούς μήνες, η κατανάλωση νερού ανά στρέμμα καλλιέργειας ανέρχεται σε 2-3 m³. Στην Ελλάδα και άλλες Μεσογειακές χώρες στο σύστημα άρδευσης που ακολουθείται είναι κατά κανόνα στάγδην.

Συνήθως, γίνεται υδρολίπανση, κατά την οποία τα θρεπτικά παρέχονται στα φυτά μέσω του νερού άρδευσης. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών αλλάζουν, ανάλογα με το είδος του εδάφους. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στα θρεπτικά διαλύματα θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των 2,2-2,6 dS m⁻¹ (Σάββας, 2011).

Συγκομιδή:

Ο χρόνος της συγκομιδής εξαρτάται από την ποικιλία, την εποχή μεταφύτευσης και την εποχή της καλλιέργειας. Σε γενικές γραμμές στην Ελλάδα απαιτούνται 1,5-3 μήνες από τη μεταφύτευση έως την συγκομιδή. Σημαντικό είναι να γίνεται όταν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες και τα φυτά είναι στεγνά.

Αποθήκευση:

Διατηρούνται σε καλή ποιότητα για 10-14 ημέρες σε θερμοκρασία 1 °C και σε σχετική υγρασία 95-97%.

ΒΙΟΔΙΕΓΕΡΤΕΣ:

Ο όρος βιοδιεγέρτες δόθηκε αρχικά από τους Zhang και Schmidt, το 1997 στο Κρατικό Πανεπιστήμιο της Βιρτζίνια και αναφερόταν στις «ουσίες που εφαρμόζονται σε μικρές ποσότητες στα φυτά και μπορούν να βοηθήσουν στην ανάπτυξη τους» (du Jardin, 2015). Σήμερα, σύμφωνα με το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Βιομηχανίας Βιοδιεγερτών, ως βιοδιεγέρτης φυτών ορίζεται οποιαδήποτε ουσία ή μικροοργανισμός που όταν εφαρμόζεται σε φυτό, σπόρο, έδαφος ή θρεπτικό υπόστρωμα και σε συνδυασμό πάντα με το πρόγραμμα θρέψης, τείνει να βελτιώσει την ανάπτυξη των φυτών, την ποιότητα παραγωγής και την αντοχή στην αβιοτική και βιοτική καταπόνηση

(π.χ. αλατότητα, ξηρασία). Βέβαια, ο ορισμός και η έννοια των βιοδιεγερτών συνεχίζει ακόμα να εξελίσσεται και να τροποποιείται (du Jardin, 2015).

Γενικά, οι βιοδιεγέρτες προορίζονται για να επηρεάσουν φυσικές διεργασίες των φυτών ανεξάρτητα από το περιεχόμενό τους σε θρεπτικά συστατικά, σε αντίθεση με τα λιπάσματα και τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα (du Jardin, 2015). Μπορούν να δράσουν, είτε άμεσα στην φυσιολογία και το μεταβολισμό των φυτών, είτε έμμεσα βελτιώνοντας τις εδαφικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, έχουν υποστηρικτική δράση, αυξάνουν τη δυνατότητα πρόσληψης θρεπτικών συστατικών και με αυτόν τον τρόπο βελτιώνουν την αντοχή τους σε βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες καταπόνησης (Shekhar Sharma et. al., 2014), (du Jardin, 2015), (Povero et. al., 2016), (van Oosten et. al., 2017).

Η δράση τους περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους από τους εξής μηχανισμούς: α) τα προϊόντα της υδρόλυσης των πρωτεϊνών ρυθμίζουν ορισμένα ένζυμα βοηθώντας τα φυτά στην πρόσληψη του αζώτου και προστατεύοντάς τα από ακατάλληλες συνθήκες ανάπτυξης (αυξημένη αλατότητα, ξηρασία), β) οι χουμικές ουσίες που περιέχονται στους βιοδιεγέρτες σχηματίζουν σύμπλοκα με μόρια σιδήρου (Fe) και ψευδαργύρου (Zn) βοηθώντας τα φυτά να αξιοποιήσουν τα στοιχεία αυτά καλύτερα (du Jardin, 2015), ενώ οι μικροοργανισμοί που υπάρχουν στους βιοδιεγέρτες γ) ενισχύουν την αποικοδόμηση άρα εμπλουτίζουν το έδαφος με οργανικές ουσίες και δ) συνθέτουν φυτορμόνες οι οποίες επηρεάζουν διάφορες φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών (Calvo et. al., 2014).

Η εφαρμογή τους, μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους, όπως με: ριζοπότισμα, ψεκασμό του φυλλώματος και με τη προσθήκη του προϊόντος στο νερό άρδευσης (Halpern et. al., 2015), (Povero et. al., 2016), (van Oosten et. al., 2017). Συχνότερη είναι εφαρμογή τους στο έδαφος για ευκολότερη αξιοποίηση των ουσιών και/ή των μικροοργανισμών που περιέχουν μέσω του ριζικού συστήματος των φυτών (van Oosten et. al., 2017).

Οι βιοδιεγέρτες μπορούν να διακριθούν σε φυτικούς και φυσικούς. Οι φυτικοί, περιλαμβάνουν ποικιλία ουσιών και μικροοργανισμών, οι οποίοι συντελούν στην ανάπτυξη των φυτών. Οι φυσικοί βιοδιεγέρτες μπορεί να προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές και βιομηχανικά απόβλητα ή/και να περιέχουν ωφέλιμους μικροοργανισμούς του εδάφους.

Ανάλογα με την πηγή των πρώτων υλών, οι βιοδιεγέρτες διακρίνονται σε (Calvo et. al., 2014):

- Χουμικά και φουλβικά οξέα
- Προϊόντα υδρόλυσης πρωτεϊνών και αμινοξέα
- Εκχυλίσματα φυκιών και φυτικών συστατικών
- Χιτοσάνη και άλλα βιοπολυμέρη
- Ανόργανες ενώσεις
- Ευεργετικοί μύκητες και βακτήρια.

Εκχυλίσματα φυκιών και φυτικών συστατικών:

Τα φύκια χρησιμοποιούνται εδώ και αιώνες για να εξυπηρετήσουν ποικίλες ανθρώπινες ανάγκες (Calvo et. al., 2014), (du Jardin, 2015). Τα φύκια και γενικά τα προϊόντα που προέρχονται από αυτά, χρησιμοποιούνται ευρέως ως βιοδιεγερτικά λόγω της παρουσίας πολλών ρυθμιστών ανάπτυξης (κυτοκινίνες, αυξίνες, γιββερελλίνες, βεταΐνες) καθώς και πολλών μακρο- και μικρο- θρεπτικών στοιχείων (Ca, K, P και Fe, Cu, Zn, B, Mn). Επίσης, περιέχουν μια ποικιλία οργανικών ενώσεων περιλαμβάνοντας αμινοξέα (ασπαρταμικό οξύ, γλουταμικό οξύ και αλανίνη), βιταμίνες (C, B, B2, B12, E, K) και πολύπλοκους πολυσακχαρίτες (λαμιναρίνη, φουκάνες, παράγωγα αλγινικού οξέος) (Kuzetsova et. al., 2020), (Kraan, 2012). Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για την καλή ανάπτυξη και λειτουργία των φυτών.

Οφέλη χρήσης εκχυλισμάτων φυκιών:

- Δρουν ικανοποιητικά ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις ενισχύοντας την αξιοποίηση των θρεπτικών συστατικών και τη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους (Milton, 1964), (Battacharyya et. al., 2015)
- Διεγείρουν τη φύτευση των σπερμάτων
- Βελτιώνουν τον αερισμό και τη δομή του εδάφους και αυξάνουν την ικανότητα του να προσλαμβάνει και να συγκρατεί νερό (Calvo et. al., 2014), (Battacharyya et. al., 2015).
- Ενισχύουν στην ανάπτυξη, την άνθηση, την καρπόδεση των φυτών καθώς και στη συνολική ποιότητα και παραγωγή
- Μελέτες αναφέρουν ότι αυξάνουν την αντοχή των φυτών, χάρη σε ορισμένες ουσίες που περιέχουν (π.χ. μεπαΐνη, προλίνη) σε ποικίλους αβιοτικούς στρεσογόνους παράγοντες, όπως η αλατότητα, η ξηρασία, οι ακραίες θερμοκρασίες κ.λπ. (Khan et. al., 2009), (Calvo et. al., 2014).

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

Η ενυδραιοπονία, αποτελεί μία εναλλακτική και φιλική λύση προς το περιβάλλον για την παραγωγή φυτικών προϊόντων. Σε συνδυασμό με τη χρήση βιοδιεγερτών μπορεί να λύσει πολλά από τα οικολογικά ζητήματα που δημιουργούνται με τις συμβατικές μεθόδους καλλιέργειας. Η εργασία αυτή, θα προσπαθήσει να καλύψει το κενό που υπάρχει στη βιβλιογραφία, σε σχέση με τη συνολική σύγκριση όλων των παραγόντων.

Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι πρωτίστως, η σύγκριση των μεθόδων της κλασικής υδροπονίας και ενυδραιοπονίας καθώς και της αποζευγμένης μεθόδου ενυδραιοπονίας, όσον αφορά τις αποδόσεις τους σε φύλλα, νωπό και ξηρό βάρος, παραγωγή φαιολικών και άλλων φυσιολογικών παραμέτρων σε καλλιέργεια μαρουλιού με ιχθυοκαλλιέργεια τιλάπια. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω συγκρίνονται και δύο διαφορετικοί βιοδιεγέρτες φυκιών με υψηλή περιεκτικότητα σε αμινοξέα, οι οποίοι εφαρμόστηκαν σε κάθε μέθοδο καλλιέργειας.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ:

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο αγρόκτημα του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, το οποίο βρίσκεται στο Βελεστίνο. Είχε διάρκεια 56 ημέρες, από τις 12 Νοεμβρίου 2021 έως τις 7 Ιανουαρίου 2022. Το θερμοκήπιο στο οποίο διεξήχθη το πείραμα, έχει έκταση 440 m² και ύψος 5 m και περιλαμβάνει δύο τμήματα, το κύριο μέρος της υδροπονίας (με έκταση 360 m²) και το θάλαμο της υδατοκαλλιέργειας (με έκταση 80 m²).

Καλλιέργεια φυτών-Μαρούλι:

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν φυτά μαρουλιού (*Lactuca sativa*) της ποικιλίας Station. Τα φυτά μεταφύτευτηκαν στις μόνιμες θέσεις τους στο θερμοκήπιο, στις 12 Νοεμβρίου 2021, έχοντας 2-3 πραγματικά φύλλα, ύψος περίπου 5 cm και τοποθετήθηκαν σε σάκους με υπόστρωμα περλίτη (Hydroperl, NORDIA AGRO, Athens, Greece).

Τιλάπια:

Το είδος τιλάπιας που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν το *Oreochromis niloticus*. Τα ψάρια προήλθαν από ιχθύδια που αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Ενυδραιοπονίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου. Το ζύγισμα των ψαριών έγινε στις 3 Νοεμβρίου 2021 και στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε 3 δεξαμενές ανάλογα με το βάρος τους. Μία μέρα πριν το ζύγισμα τους, τα ψάρια δεν ταΐστηκαν, διότι σε αντίθετη περίπτωση το αναισθητικό που χρησιμοποιήθηκε (φαινοξυαιθανόλη) θα επηρέαζε δυσμενώς στην υγεία τους.

	Μέσο βάρος ψαριών (g)	Συνολική βιομάζα ψαριών (kg)
Tank 1	56,1	11,8
Tank 2	116,0	9,0
Tank 3	150,6	11,9

Πίνακας 1: Μέσο βάρος ψαριών τιλάπιας και συνολική βιομάζα κατά ζύγισμα στις 03/11/21.

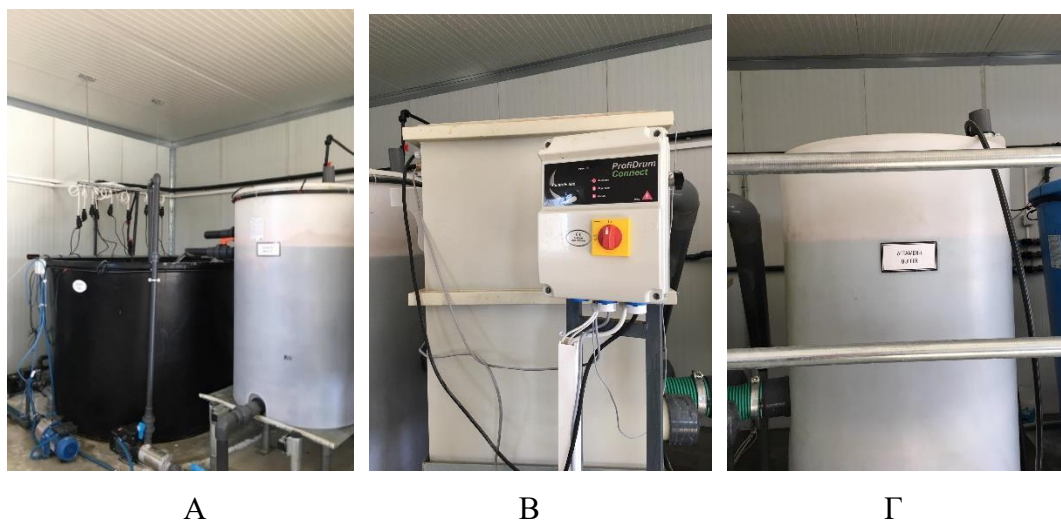
Μέχρι να ξεκινήσει το πείραμα, το τάισμα των ψαριών ήταν συντήρησης, δηλαδή γινόταν ανά 2-3 ημέρες. Λίγες ημέρες πριν την έναρξη, το τάισμα τους άλλαξε σε κανονικό, για να προλάβουν να εξοικειωθούν με τις νέες ποσότητες τροφής, έτσι ώστε με την έναρξη του πειράματος να υπάρχει μία σταθερή παραγωγή θρεπτικών. Το τάισμα των ψαριών επαναλαμβανόταν τρεις φορές κατά την διάρκεια της ημέρας για πέντε ημέρες της εβδομάδας, στις 09:30, 11:30 και 13:30 αντίστοιχα, έως ότου φτάσουν σε κορεσμό.

Θάλαμος Ενυδρειοπονίας:

Στο χώρο της ενυδρειοπονίας, ήταν εγκατεστημένο ένα κλειστό σύστημα RAS, το οποίο αποτελούνταν από τρεις μεγάλες δεξαμενές ψαριών. Δίπλα στις δεξαμενές ήταν διατεταγμένα με τη σειρά: η δεξαμενή Buffer, το Combi-Bio, η δεξαμενή Bio-filter και η δεξαμενή SUMP. Οι δεξαμενές των ψαριών είχαν χωρητικότητα 1500 L και ήταν τοποθετημένες κάτω από μία ειδική λάμπα, έτσι ώστε τα ψάρια να έχουν επαρκή φωτισμό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η δεξαμενή Buffer (χωρητικότητάς 600 L) στην οποία κατέληγαν όλα τα διαλύματα από τις δεξαμενές ψαριών, αποτελούσε ένα ενδιάμεσο στάδιο, όπου παρέμενε το υδατικό διάλυμα των ψαριών μέχρι να περάσει από τα ειδικά φίλτρα. Στο σημείο αυτό, καθίζαναν τα μεγαλύτερα κομμάτια των απεκκριμάτων και τα υπολείμματα τροφών, τα οποία δεν είχαν διαλυθεί. Το Combi-Bio (ProfiDrum Combi Bio 15) ήταν ένα βιολογικό φίλτρο αποτελούμενο από φίλτρα τυμπάνου, τα οποία επέτρεπαν την ελεύθερη κίνηση των διαλυμάτων με την ταυτόχρονη κατακράτηση των στερεών απεκκριμάτων. Επόμενη στη σειρά ήταν η δεξαμενή Bio-filter (χωρητικότητάς 600 L), στην οποία λάμβανε χώρα, η μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα με τη βοήθεια των νιτροποιητικών βακτηρίων *Nitrosomonas* και *Nitrobacter*. Αφού περνούσε και το Bio-filter, το διάλυμα κατέληγε στη δεξαμενή SUMP (χωρητικότητάς 2500 L) και από εκεί με τη βοήθεια σωλήνων κατευθυνόταν στον εξωτερικό χώρο, για να γίνει η τροφοδοσία των φυτών, όπως θα αναφερθεί παρακάτω. Μέχρι να ξεκινήσει το πείραμα, το διάλυμα από τη δεξαμενή SUMP επέστρεφε πίσω στις δεξαμενές των ψαριών.

Η δεξαμενή SUMP ήταν συνδεδεμένη με την κεφαλή υδρολίπανσης, η οποία ήταν εγκατεστημένη στο χώρο της υδροπονίας και είχε όγκο 200 L. Δίπλα από την κεφαλή υπήρχαν έξι πυκνά διαλύματα, εκ των οποίων τα δύο ήταν για την HP, τα άλλα δύο για την CAP και τα τελευταία ήταν Νιτρικό και Θεϊκό οξύ. Τα διαλύματα αυτά μεταφέρονταν στην κεφαλή υδρολίπανσης, όπου πραγματοποιούνταν η αραίωση τους

και η δημιουργία του ποτιστικού διαλύματος για τις μεταχειρίσεις HP και CAP. Δεξαμενή για την μεταχείριση AQ δεν υπήρχε, καθώς το διάλυμα της προερχόταν απευθείας από την δεξαμενή SUMP. Δίπλα από τα πυκνά διαλύματα, βρίσκονταν έξι δοσομετρητές αντλίες, μία για κάθε κανάλι, στις οποίες έμενε αποθηκευμένο το θρεπτικό διάλυμα του κάθε καναλιού μέχρι να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια του ποτίσματος.



Εικόνα 7: (Α) Δεξαμενή SUMP (μαύρη) και δεξαμενή Bio-filter, (Β) Combi-Bio, (Γ) δεξαμενή Buffer

Θερμοκηπιακός χώρος:

Στο χώρο του θερμοκηπίου ήταν εγκατεστημένες τρεις επαναλήψεις του πειράματος. Η κάθε επανάληψη περιλάμβανε 6 γραμμές ή αλλιώς κανάλια. Σε κάθε κανάλι υπήρχαν σάκοι με περλίτη, στους οποίους αργότερα τοποθετήθηκαν 4 φυτά ανά σάκο. Στις δύο πρώτες επαναλήψεις ήταν τοποθετημένοι 8 σάκοι ανά κανάλι, ενώ στην τρίτη επανάληψή υπήρχαν 7 σάκοι. Το πείραμα περιλάμβανε τρεις βασικές μεταχειρίσεις: υδροπονία (HP), ενυδρειοπονία (AQ) και συνδυασμένη ενυδρειοπονία με λιπάσματα (CAP). Εκτός όμως από αυτές, η κάθε βασική μεταχείριση χωρίστηκε σε δύο μέρη και της χορηγήθηκαν δύο είδη βιοδιεγερτών που περιείχαν διαφορετικά είδη μικροφυκών (Neoalga, Ισπανία). Τα σκευάσματα περιείχαν κυρίως αμινοξέα, μικροβιακά εκχυλίσματα και βιο-πολυμερή για διαφυλλική εφαρμογή. Ονομάστηκαν Bio1 & Bio2. Έτσι, τελικά δημιουργήθηκαν 9 μεταχειρίσεις και με τη χρήση του τυχαιοποιημένου συστήματος τοποθετήθηκαν στα κανάλια σύμφωνα με το εξής σχεδιάγραμμα:

Block 1		Block 2		Block 3	
6(1)	HP	6(2)	Bio HP	6(3)	HP
5(1)	Bio AQ	5(2)	AQ	5(3)	AQ
4(1)	Bio CAP	4(2)	Bio CAP	4(3)	Bio CAP
3(1)	AQ	3(2)	Bio AQ	3(3)	Bio AQ
2(1)	Bio HP	2(2)	HP	2(3)	Bio HP
1(1)	CAP	1(2)	CAP	1(3)	CAP

Πίνακας 2: Τυχαιοποιημένο σύστημα κατανομής μεταχειρίσεων. Οι αριθμοί έξω από τις παρενθέσεις αποτελούν τα κανάλια και οι αριθμοί μέσα στις παρενθέσεις αποτελούν τις επαναλήψεις του πειράματος.

Στα κανάλια με τους βιοδιεγέρτες, τα σκευάσματα εναλλάσσονταν ανά σάκο. Έτσι, ο 2^{ος}, 4^{ος} και 6^{ος} σάκος ψεκάζονταν με το σκεύασμα Βιο 1, ενώ ο 3^{ος}, 5^{ος} και 7^{ος} σάκος ψεκάζονταν με το σκεύασμα Βιο 2.

Την ημέρα που έγινε η μεταφύτευση των φυτών (12 Νοεμβρίου 2021) έγινε και το σκίσιμο των σάκων για την απορροή των θρεπτικών. Σε κάθε σάκο, έγιναν δύο μικρές τομές προς το κατώτερο μέρος τους. Για την διευκόλυνση της απορροής των θρεπτικών υπήρχαν δύο μικρά αυλάκια κατά μήκος της υδρορροής και επίσης ολόκληρη η κατασκευή ήταν τοποθετημένη με μία μικρή κλίση, ώστε να απορρέουν καλύτερα τα πλεονάζοντα θρεπτικά διαλύματα. Σε κάθε σάκο ήταν συνδεδεμένοι 5-6 σταλάκτες, τύπου μικροσωλήνα, οι οποίοι μέσω πλευρικών σωλήνων συνδέονταν με τα θρεπτικά διαλύματα. Το πότισμα είχε διάρκεια 1,5 λεπτό και γινόταν τρεις φορές την ημέρα στις 09:00, 12:00 και 15:00 αντίστοιχα. Οι απορροές από κάθε κανάλι οδηγούνταν με ξεχωριστό σωλήνα σε ξεχωριστές δεξαμενές απορροής. Οι απορροές από την καθαρή ενυδραιοπονία (AQ) επέστρεφαν πίσω στις δεξαμενές ψαριών (κλειστό σύστημα), ενώ οι υπόλοιπες απορροές απορρίπτονταν προς το περιβάλλον (ανοιχτό σύστημα).



Εικόνα 8: Θερμοκηπιακός χώρος, τα κανάλια είναι αριθμημένα από το 1 έως το 6. Σε κάθε σάκο είναι τοποθετημένα 4 φυτά και υπάρχουν 5-6 σταλάκτες τύπου μικροσωλήνα.



A



B

Εικόνα 9: (A) Μπροστά φαίνονται τα έξι πυκνά διαλύματα και πίσω είναι η κεφαλή υδρολίπανσης, (B) Οι έξι δοσομετρικές αντλίες.



Εικόνα 10: Οι έξι δεξαμενές απορροής.

Λιπάσματα και Βιοδιεγέρτες:

Οι συνταγές θρέψης για τις μεταχειρίσεις HP και CAP, ήταν ίδιες για όλη τη διάρκεια του πειράματος, ενώ η συνταγή θρέψης για την AQ άλλαζε συχνά, καθώς άλλαζε και η περιεκτικότητα του διαλύματος και θρεπτικά, δηλαδή σε απεκκρίματα. Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης θρεπτικών στο υδατικό διάλυμα γινόταν υπολογισμός των νιτρικών στη δεξαμενή SUMP. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι συγκεντρώσεις των στοιχείων:

				8-Νοε	22-Νοε	29-Νοε	15-Δεκ
		HP	CAP	AQ			
mmol/L	<i>N-NO₃</i>	16,4	16,4	1,7	1,6	1,3	1,1
	<i>N-NH₄</i>	1,3	1,3	0,001	0,006	0,002	0,002
	<i>P</i>	1,4	1,4	0,1	0,2	0,1	0,1
	<i>K</i>	8,0	8,0	0,3	0,4	0,3	0,3
	<i>Ca</i>	4,8	4,8	0,5	0,7	0,6	0,7
	<i>Mg</i>	1,6	1,6	1,8	1,8	1,7	1,8
	<i>Na</i>	2,0	2,0	1,8	1,9	1,7	1,7
	<i>S-SO₄</i>	2,2	2,2	0,3	0,3	0,1	0,2
	<i>Cl</i>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
μmol/L	<i>Fe</i>	35,0	35,0	1,3	1,3	1,3	1,3
	<i>B</i>	30,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	<i>Cu</i>	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
	<i>Zn</i>	5,0	5,0	1,2	1,2	1,2	1,2
	<i>Mn</i>	5,0	5,0	1,3	1,3	1,3	1,3
	<i>Mo</i>	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	EC (dS/m)	2,48	2,48	0,82	0,86	0,82	0,85

Πίνακας 3: Οι αναλυτικές συνταγές θρέψης για τις μεταχειρίσεις HP, CAP και AQ κατά την διάρκεια του πειράματος.

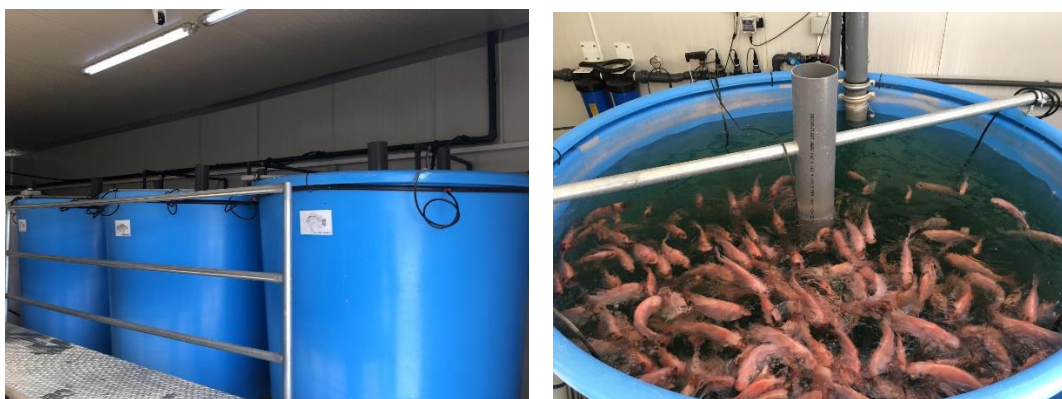
Σε ότι αφορά την εφαρμογή των βιοδιεγερτών, συνολικά έγιναν 3 ψεκασμοί φυλλώματος στο μαρούλι. Οι εφαρμογές καθώς και οι δόσεις που χορηγήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	Ημέρες από τη μεταφύτευση	Εφαρμογή βιοδιεγέρτη	Δόση (ml βιοδιεγέρτη / L νερού)
19/11/2021	7	1η	4.1 / 0.54
9/12/2021	27	2η	7.0 / 0.70
22/12/2021	40	3η	10.0 / 1.00

Πίνακας 4: Οι εφαρμογές των βιοδιεγερτών και οι δόσεις που χορηγήθηκαν σε φυτά μαρουλιού κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Μετρήσεις στο θάλαμο Ενυδρειοπονίας:

Για τη βέλτιστη λειτουργία και ανάπτυξη των φυτών αλλά και των ψαριών, έπρεπε να ελέγχονται σε καθημερινή βάση οι παράμετροι που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τόσο την υδατοκαλλιέργεια όσο και το υδροπονικό σύστημα. Για την παρακολούθηση των κλιματικών συνθηκών στο θάλαμο της υδατοκαλλιέργειας, ήταν εγκατεστημένο ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα στις δεξαμενές. Επίσης, για τη σωστή οξυγόνωση των ψαριών χρησιμοποιούνταν αερόπετρες σε κάθε τμήμα της υδατοκαλλιέργειας. Σε ημερήσια βάση, καταγράφονταν η θερμοκρασία και η υγρασία του χώρου, καθώς και η θερμοκρασία, το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του νερού των ψαριών. Σε εβδομαδιαία βάση μετριούνταν το DO νερού και το ποσοστό του οξυγόνου.



Εικόνα 11: Οι δεξαμενές των ψαριών.

Μετρήσεις φυτών- μαρουλιού:

Για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών ήταν εγκατεστημένο στο χώρο της υδροπονίας ένα σύστημα παρακολούθησης της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του χώρου (EMMANOUILIDIS, Greece).

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, μία φορά την εβδομάδα πραγματοποιούνταν κάποιες φυσιολογικές μετρήσεις σε 7 καθορισμένα φυτά, τα οποία είχαν επιλεγεί στην αρχή του πειράματος, με τυχαίο τρόπο και παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 5). Οι μετρήσεις περιλάμβαναν τη μέτρηση της ολικής χλωροφύλλης, της ανακλαστικότητας και του φθορισμού της χλωροφύλλης των φυτών. Στο σύνολο έγιναν 5 μετρήσεις για κάθε παράμετρο.

Κανάλι-Block	6(1)	5(1)		4(1)		3(1)	2(1)		1(1)
Bio		Bio 1	Bio 2	Bio 1	Bio 2		Bio 1	Bio 2	
Φυτά	6	6	9	5	10	8	5	9	7
	8	7	11	6	12	10	6	11	10
	10	14	18	8	17	13	13	18	16
	15	16	19	14	19	16	15	20	18
	18	21	26	16	20	18	16	25	20
	23	22	27	22	26	22	22	26	21
	28	24	28	24	28	28	24	27	26
Κανάλι-Block	6(2)		5(2)	4(2)		3(2)		2(2)	1(2)
Bio	Bio 1	Bio 2		Bio 1	Bio 2	Bio 1	Bio 2		
Φυτά	5	9	7	5	9	7	10	6	7
	7	11	10	6	11	8	11	10	9
	13	18	11	13	18	13	12	11	12
	16	19	14	14	19	16	18	16	15
	21	20	19	16	20	22	20	18	20
	22	26	24	22	25	23	26	23	23
	24	28	25	23	28	24	27	28	25
Κανάλι-Block	6(3)	5(3)	4(3)		3(3)		2(3)		1(3)
Bio			Bio 1	Bio 2	Bio 1	Bio 2	Bio 1	Bio 2	
Φυτά	6	7	5	10	6	10	6	10	6
	10	10	6	11	7	11	7	11	9
	12	12	14	12	8	17	14	17	12
	16	15	15	17	15	18	15	18	14
	18	19	16	19	16	19	21	20	18
	23	22	22	26	21	26	22	25	23
	25	27	23	28	23	27	24	26	25

Πίνακας 5: Σχεδιάγραμμα με βάση το οποίο πραγματοποιούνταν όλες οι φυσιολογικές μετρήσεις.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 3 καταστροφικές: στις 8 Δεκεμβρίου 2021, στις 20 Δεκεμβρίου 2021 και στις 7 Ιανουαρίου 2022, αντίστοιχα. Σε κάθε καταστροφική καταγράφονταν το νωπό και ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος, ο αριθμός των φύλλων, το ξηρό βάρος του ριζικού τμήματος και προσδιορισμός των φαινολικών σε ρίζα και υπέργειο μέρος. Για κάθε μεταχείριση επιλέγονταν 6 τυχαία φυτά/μεταχείριση, στα οποία δεν συμπεριλαμβάνονταν τα φυτά που χρησιμοποιούνταν για τις φυσιολογικές μετρήσεις. Έτσι, συνολικά σε κάθε καταστροφική υπήρχαν 54 φυτά προς ανάλυση (9 μεταχειρίσεις * 6 επαναλήψεις).

Για τη μέτρηση του ξηρού ιστού, τα φυτά αφού είχαν κοπεί και είχε μετρηθεί το νωπό βάρος τους, τοποθετούνταν σε φούρνους στους 70 °C για τουλάχιστον 2 ημέρες. Όταν ήταν πλήρως αποξηραμένα καταγράφονταν το ξηρό τους βάρος.

Μέτρηση χλωροφύλλης:

Για τη μέτρηση της ολικής χλωροφύλλης των φυτών χρησιμοποιήθηκε το όργανο SPAD (SPAD 502Plus, Konica Minolta). Το όργανο αυτό, είναι φορητό και μετράει τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης των φυτών χωρίς να προκαλεί ζημιά στα φύλλα. Συγκεκριμένα, μετράει την απορρόφηση των φύλλων σε δύο περιοχές του μήκους κύματος (στην κόκκινη περιοχή και κοντά στην υπέρυθρη). Στο πείραμα, η μέτρηση αυτή ήταν εβδομαδιαία και έγινε συνολικά 5 φορές στις εξής ημερομηνίες:

Day 12 (24/11/21) =1^η μέτρηση

Day 19 (01/12/21) =2^η μέτρηση

Day 27 (09/12/21) =3^η μέτρηση

Day 34 (16/12/21) =4^η μέτρηση

Day 54 (05/01/22) =5^η μέτρηση

Για κάθε φυτό λήφθηκαν 2 τιμές, μία από κάθε πλευρά του φύλλου, έχοντας σαν μέσο το κεντρικό νεύρο και έπειτα καταγράφονταν ο μέσος όρος αυτών των δύο. Οι μετρήσεις έγιναν κατά τις πρωινές ώρες σε ώριμα φύλλα. Για κάθε μεταχείριση λήφθηκαν τιμές από 7 προκαθορισμένα φυτά. Έτσι, για τις 3 επαναλήψεις, είχαμε 21 τιμές συγκέντρωσης ολικής χλωροφύλλης των φύλλων για κάθε μεταχείριση και συνολικά για όλες τις μεταχειρίσεις είχαμε ανά ημέρα μέτρησης 189 τιμές.



Εικόνα 12: Όργανο SPAD (SPAD 502Plus, Konica Minolta).

Μέτρηση ανακλαστικότητας:

Για τη μέτρηση της ανακλαστικότητας χρησιμοποιήθηκε το όργανο PRI (PRI 210, PlantPen). Το όργανο αυτό, μετράει το δείκτη φωτοχημικής ανάκλασης (Photochemical Reflectance Index, PRI), συγκρίνοντας την ανάκλαση των φύλλων σε δύο ζώνες μήκους κύματος με κέντρο τα 531 nm και 570 nm. Το PRI είναι ευαίσθητο

στις αλλαγές των καροτενοειδών χρωστικών που είναι ενδεικτικές των αλλαγών στην αποδοτικότητα χρήσης φωτοσυνθετικού φωτός, στον ρυθμό πρόσληψης CO₂ και λειτουργεί ως αξιόπιστος δείκτης καταπόνησης νερού. Στο πείραμα, η μέτρηση αυτή ήταν εβδομαδιαία και έγινε συνολικά 5 φορές στις εξής ημερομηνίες:

Day 14 (26/11/21) =1^η μέτρηση

Day 19 (01/12/21) =2^η μέτρηση

Day 26 (08/12/21) =3^η μέτρηση

Day 34 (16/12/21) =4^η μέτρηση

Day 54 (05/01/22) =5^η μέτρηση

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν πρωινές έως μεσημεριανές ώρες, με το όργανο να κοιτάζει πάντα την επάνω επιφάνεια των φύλλων. Σημαντικό και σε αυτό το όργανο ήταν το calibration του πριν την έναρξη των μετρήσεων και γενικά κάθε φορά που άνοιγε το όργανο. Για κάθε μεταχείριση λήφθηκαν τιμές από 7 προκαθορισμένα φυτά. Έτσι, για τις 3 επαναλήψεις, υπήρχαν τελικά 21 τιμές ανακλαστικότητας των φύλλων και συνολικά για όλες τις μεταχειρίσεις 189 τιμές. Οι τιμές από τις μετρήσεις καταγράφονταν στη μνήμη του οργάνου και για να περαστούν στον υπολογιστή χρειάστηκε ειδική εφαρμογή, η οποία ονομαζόταν “FluorPen-PRI”.



Εικόνα 13: Όργανο PRI (PRI 210, PlantPen).

Μέτρηση φθορισμού της χλωροφύλλης:

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του φθορισμού της χλωροφύλλης ήταν το Handy-PEA (Plant Efficiency Analyser, Hansatech Instruments), το οποίο αποτελείται από την κεντρική μονάδα, την κεφαλή με τρεις λαμπτήρες LED στο κέντρο των οποίων υπάρχει ένας ειδικός αισθητήρας, καθώς και τα ειδικά μανταλάκια. Το

όργανο αυτό μετρά τη δραστηριότητα του φωτοσυστήματος II (PSII), το οποίο αποτελεί δείκτη της κατάστασης των φυτών στην επίδραση των βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων (Murchie E. H. & Lawson T. , 2013). Για τη σωστή και αξιόπιστη λειτουργία του, τα μανταλάκια θα έπρεπε να τοποθετηθούν κλειστά στα φυτά τουλάχιστον 20-30 λεπτά πριν την έναρξη των μετρήσεων. Κατά τη διάρκεια, όπου τα μανταλάκια παρέμεναν κλειστά επάνω στα φύλλα, όλα τα κέντρα αντίδρασης του φυτού οξειδώνονταν πλήρως και ήταν διαθέσιμα για τις φωτοχημικές αντιδράσεις. Μετά το πέρας του απαιτούμενου χρόνου γινόταν το calibration του οργάνου σε ένα φυτό HP χωρίς κάποιον βιοδιεγέρτη και ιδανικά από τους πρώτους σάκους Στο πείραμα, η μέτρηση αυτή ήταν εβδομαδιαία και έγινε συνολικά 5 φορές στις εξής ημερομηνίες:

Day 12 (24/11/21) =1^η μέτρηση

Day 20 (02/12/21) =2^η μέτρηση

Day 27 (09/12/21) =3^η μέτρηση

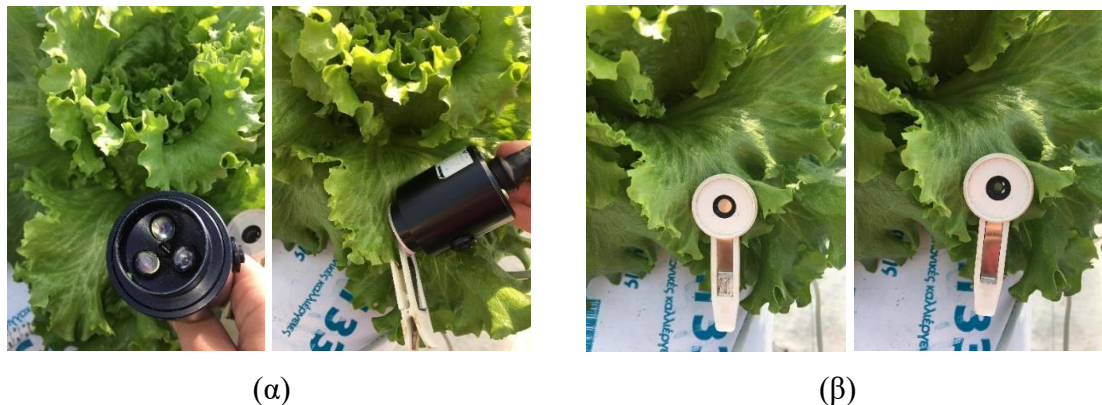
Day 35 (17/12/21) =4^η μέτρηση

Day 54 (05/01/22) =5^η μέτρηση

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν πρωινές ώρες. Για κάθε μεταχείριση λήφθηκαν τιμές από 7 προκαθορισμένα φυτά. Έτσι, για τις 3 επαναλήψεις, υπήρχαν τελικά 21 τιμές του φθορισμού της χλωροφύλλης των φύλλων και συνολικά για όλες τις μεταχειρίσεις, 189 τιμές. Για τη μεταφορά των δεδομένων, το όργανο συνδέονταν μέσω του PC mode σε μία ειδική εφαρμογή στον υπολογιστή, η οποία ονομάζεται “PEA Plus”.



Εικόνα 14: Κεντρική μονάδα Handy-PEA (Plant Efficiency Analyser, Hansatech Instruments).



Εικόνα 15: (α) Κεφαλή του οργάνου Handy-PEA με λαμπτήρες LED, (β) Μανταλάκια του οργάνου Handy-PEA με κλειστό και ανοιχτό το κλείστρο.

Μέτρηση φαινολικών:

Για τη μέτρηση των ολικών φαινολικών των φύλλων και της ρίζας των φυτών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Folin-Ciocalteu (Waterman & Mole, 1994). Για κάθε δείγμα ζυγίστηκαν 0,270 g φυλλικού ξηρού ιστού, για κάθε φυτό σε κάθε μία καταστροφική που πραγματοποιήθηκε, και τοποθετήθηκαν σε πλαστικούς δοκιμαστικούς σωλήνες. Αντίστοιχα, για τις μετρήσεις του ριζικού ξηρού ιστού, ζυγίστηκαν 0,20-0,21 g ιστού και ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία. Έπειτα, προστέθηκαν 6 mL υδατικού διαλύματος μεθανόλης 50% και τοποθετήθηκαν σε υδατόλουτρο (GFL 1083) στους 40 °C για 1 ώρα, υπό ήπια ανάδευση. Μετά το πέρας της μίας ώρας, προστέθηκαν σε ένα δοκιμαστικό σωλήνα 0,05 mL του υπερκείμενου υγρού, 3,95 mL απιονισμένου νερού και 0,25 mL αντιδραστηρίου Folin-Ciocalteu και αναδεύτηκαν στο Vortex. Στη συνέχεια, προστέθηκαν 0,75 mL διαλύματος ανθρακικού νατρίου (Na_2CO_3) και τοποθετήθηκαν ξανά στο Vortex για ανάδευση. Ακολούθησε η επώαση τους σε θερμοκρασία δωματίου για 2 ώρες με συχνή ανάδευση. Τέλος, καταγράφηκε η απορρόφηση τους σε μήκη κύματος 760 nm στο φασματοφωτόμετρο (UV-1900i, SHIMADZU). Η απορρόφηση αυτή, συγκρίθηκε με τη συγκέντρωση του γαλλικού οξέος σύμφωνα με μία πρότυπη καμπύλη αναφοράς. Η συγκέντρωση ολικών φαινολικών εκφράζεται έτσι, σε mg ισοδύναμου γαλλικού οξέος ανά g ξηρής ουσίας, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{GAE (mg/g)} = \text{C} \cdot \text{V} / \text{M}, \text{ όπου}$$

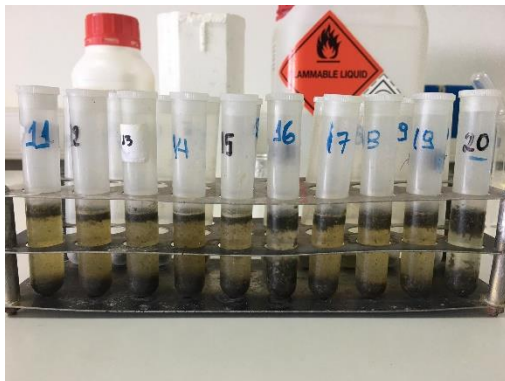
C είναι η τιμή γαλλικού οξέος σε mg/mL όπως προέκυψε από την πρότυπη καμπύλη

V είναι ο όγκος εκχυλίσματος που χρησιμοποιήθηκε (0,05 mL)

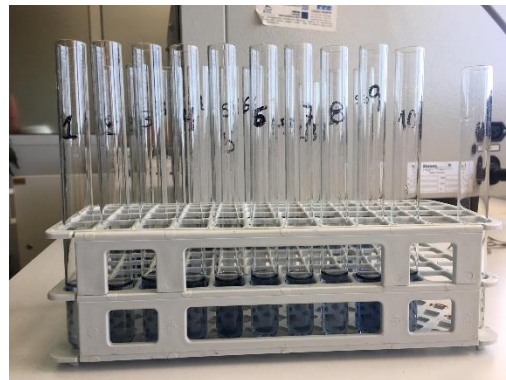
M τα g του ιστού.



Εικόνα 16: Εξοπλισμός για τον προσδιορισμό των φαινολικών.



(α)



(β)

Εικόνα 17: (α) Δείγματα φυλλώματος μαρουλιού μετά την διαδικασία της εκχύλισης, (β) Δείγματα φυλλώματος μαρουλιού μετά την διαδικασία της αντίδρασης με την μέθοδο μέθοδος Folin-Ciocalteu.

Στατιστική Ανάλυση:

Για τον έλεγχο των διαφορών μεταξύ των μεταχειρίσεων όλων των παραμέτρων που μετρήθηκαν στα φυτά χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση Two-way ANOVA, ακολουθούμενη από Tukey Post Hoc test για $p < 0.05$. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό JASP (JASP team, Version 0.14.2).

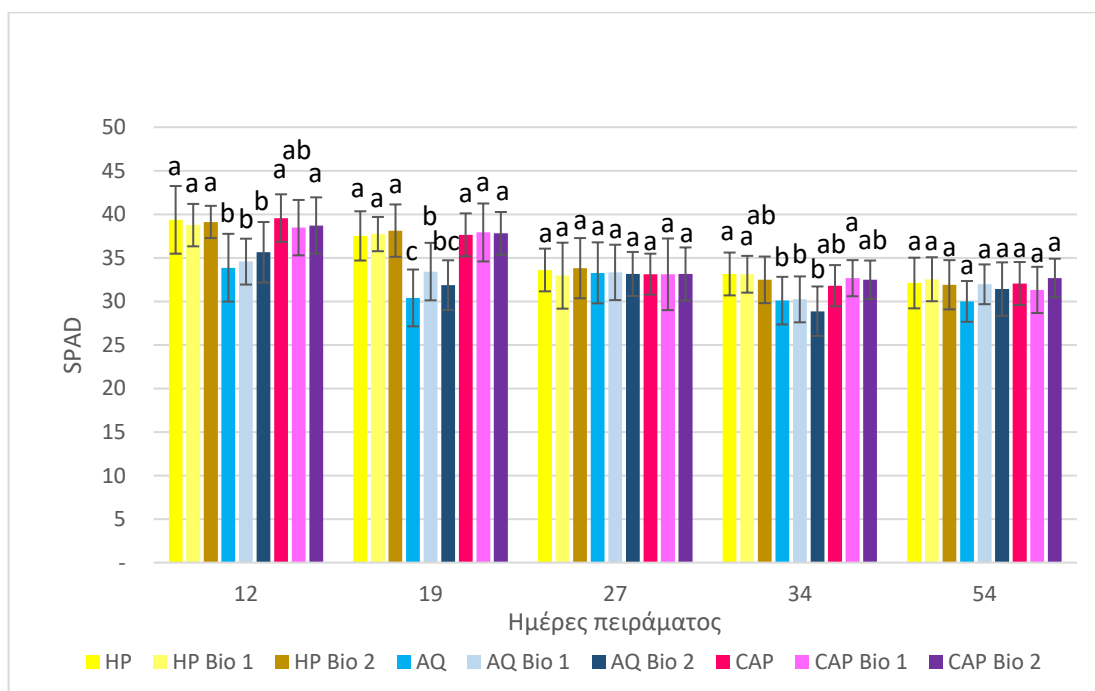
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, και τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης. Κύριος στόχος, είναι να μελετηθούν και να συγκριθούν οι τυχόν διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των κύριων μεταχειρίσεων των διαφορετικών διαλυμάτων, δηλαδή του συστήματος καλλιέργειας (Σύστημα), η επίδραση της εφαρμογής των βιοδιεγερτών (Βιοδιεγέρτης), καθώς και η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων (Σύστημα*Βιοδιεγέρτης).

Μετρήσεις SPAD

Ο δείκτης SPAD διέφερε στατιστικώς σημαντικά στις τρεις βασικές μεταχειρίσεις HP, AQ και CAP στις περισσότερες μετρήσεις που έλαβαν χώρα και συγκεκριμένα τις ημέρες πειράματος 12, 19 και 34. Ειδικότερα, σε αυτές τις ημέρες, τα φυτά της μεταχείρισης AQ είχαν σημαντικές μειώσεις σε σχέση με τα φυτά των υπόλοιπων μεταχειρίσεων (HP & CAP).

Η χρήση ή όχι βιοδιεγερτών δεν προκάλεσε κάποια διαφορά στις τιμές του SPAD ανάμεσα στις μεταχειρίσεις για όλες τις ημερομηνίες μετρήσεων, όπως επίσης δεν υπήρχε κάποια αλληλεπίδραση ανάμεσα στο νερό των μεταχειρίσεων και στην εφαρμογή ή τη μη εφαρμογή των βιοδιεγερτών.



Γράφημα 1: Δείκτης SPAD ανά μέσο όρο φυτού μαρουλιού στις εννιά μεταχειρίσεις για πέντε ξεχωριστές μετρήσεις (Μ.Ο.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0.05$).

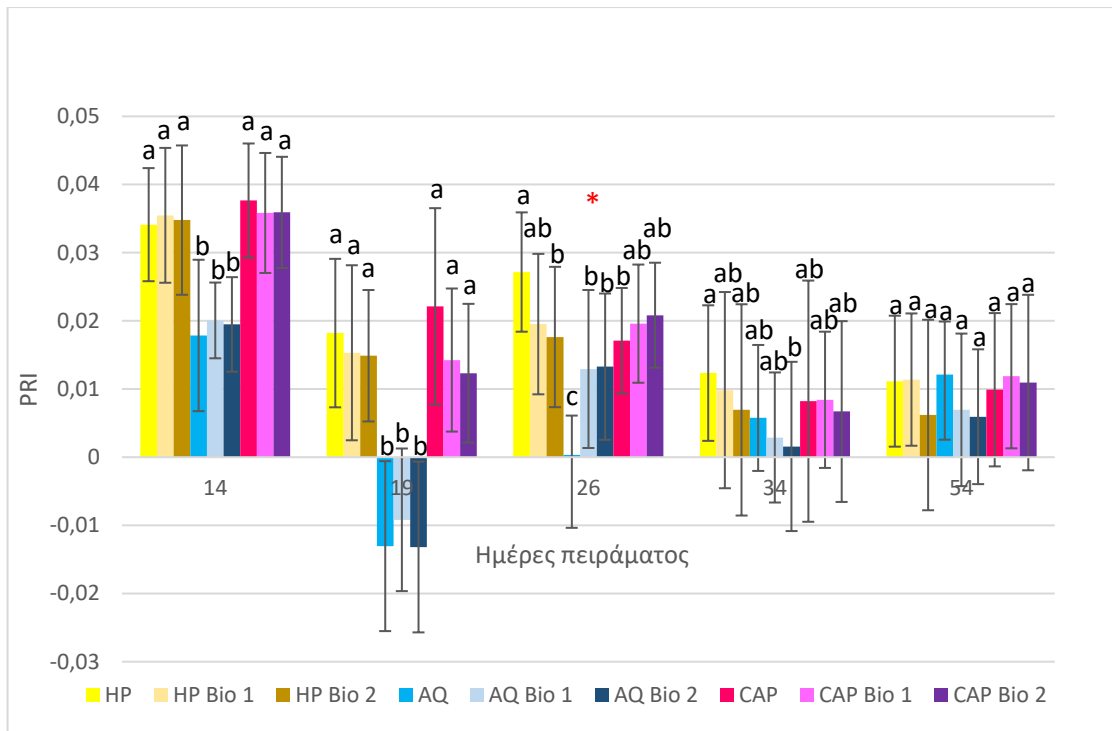
	24/11/2021	1/12/2021	9/12/2021	19/12/2021	5/1/2022
	Sig	Sig	Sig	Sig	Sig
Σύστημα	*	*	0.843	*	0.051
Βιοδιεγέρτης	0.592	0.070	0.903	0.253	0.345
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.373	0.147	0.957	0.481	0.105

Πίνακας 6: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις SPAD που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δύο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).

Δείκτης PRI

Το γράφημα 2 απεικονίζει την ανακλαστικότητα των φύλλων του μαρουλιού μέσω του δείκτη PRI. Ο δείκτης PRI όσον αφορά το σύστημα καλλιέργειας, έδειξε στατιστικώς σημαντικές διαφορές για τις περισσότερες μετρήσεις, με εξαίρεση τη μέτρηση που έγινε την ημέρα πειράματος 54. Η κύρια διαφορά ήταν οι μειωμένες τιμές της μεταχείρισης AQ συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, ενώ την ημέρα πειράματος 34, η μεταχείριση AQ διέφερε σημαντικά μόνο με τα φυτά της μεταχείρισης HP.

Ο δείκτης PRI σχετικά με τη χρήση ή όχι των βιοδιεγερτών, δεν έδειξε κάποια σημαντική διαφορά σε καμία μέτρηση, ενώ σημειώθηκε μία αλληλεπίδραση μεταξύ του είδους νερού των μεταχειρίσεων και την εφαρμογή ή μη εφαρμογή βιοδιεγερτών την ημέρα πειράματος 26.



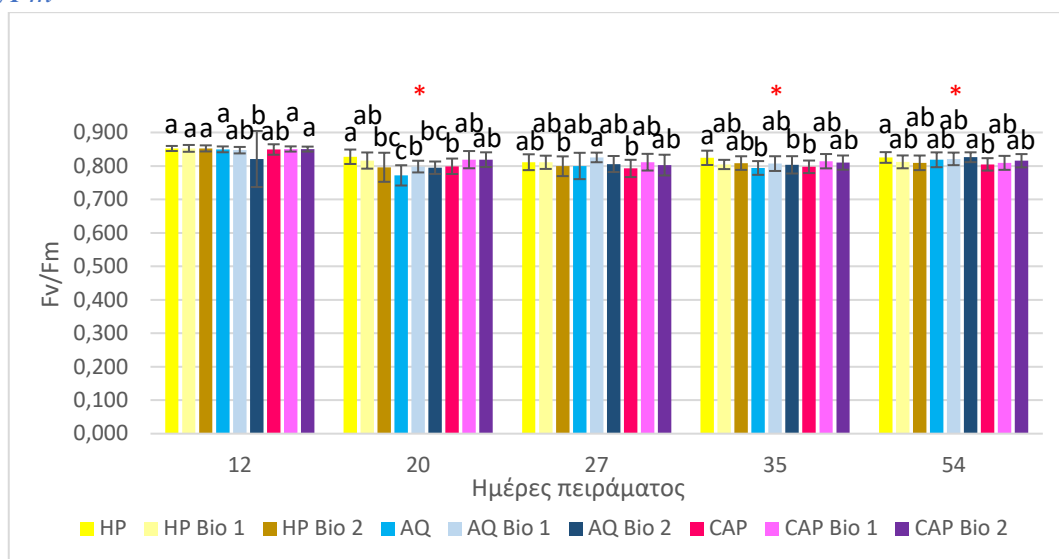
Γράφημα 2: Αποτελέσματα του δείκτη PRI μετά την έναρξη της φωτοσύνθεσης σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις για τις εννιά μεταχειρίσεις (Μ.Ο.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0,05$).

	26/11/2021	1/12/2021	8/12/2021	16/12/2021	5/1/2022
	Sig	Sig	Sig	Sig	Sig
Σύστημα	*	*	*	*	0.427
Βιοδιεγέρτης	0.931	0.106	0.265	0.261	0.217
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.848	0.174	*	0.957	0.410

Πίνακας 7: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του δείκτη PRI που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0,05$).

Μετρήσεις Φθορισμού της χλωροφύλλης

Fv/Fm



Γράφημα 3: Η παράμετρος φθορισμού *Fv/Fm* των μεταχειρίσεων σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (Μ.Ο.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0.05$.

	24/11/2021	2/12/2021	9/12/2021	17/12/2021	5/1/2022
	Sig	Sig	Sig	Sig	Sig
Σύστημα	*	*	0.216	*	*
Βιοδιεγέρτης	0.142	*	*	0.665	0.697
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.079	*	0.149	*	*

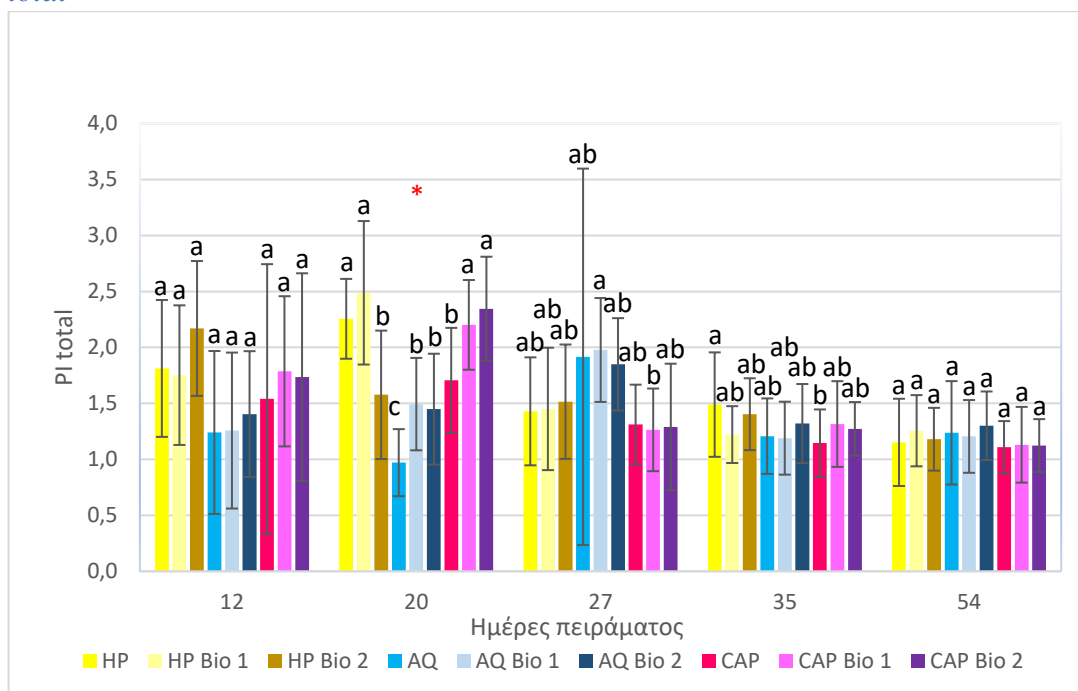
Πίνακας 8: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του παράγοντα φθορισμού *Fv/Fm* που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δύο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).

Η παράμετρος *Fv/Fm* διέφερε στατιστικώς σημαντικά μεταξύ των συστημάτων καλλιέργειας στην πλειοψηφία των μετρήσεων, με εξαίρεση την ημέρα πειράματος 27. Συγκεκριμένα, τα φυτά της μεταχείρισης AQ εμφάνισαν χαμηλότερες τιμές σε σύγκριση με τα φυτά της μεταχείρισης HP (ημέρες πειράματος 12 & 35), ή με τα φυτά της μεταχείρισης CAP (ημέρα πειράματος 54) ή και με τις δύο μεταχειρίσεις (ημέρα πειράματος 20).

Ο δείκτης *Fv/Fm* σχετικά με τη χρήση ή μη βιοδιεγερτών έδειξε στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων μόνο για τις ημέρες πειράματος 20 & 27. Συγκεκριμένα, την ημέρα 20 διέφεραν τα φυτά που είχαν ψεκαστεί με τον βιοδιεγέρτη Bio 1 με εκείνα που δεν είχαν ψεκαστεί με κάποιο σκεύασμα. Την ημέρα πειράματος 27 διέφεραν στατιστικώς σημαντικά, τα φυτά των μεταχειρίσεων που είχαν

ψεκαστεί με το σκεύασμα Bio 1 με τα φυτά που είχαν ψεκαστεί με το Bio 2, αλλά και με εκείνα που δεν είχαν ψεκαστεί με κάποιο σκεύασμα. Παρατηρήθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ του είδους νερού των μεταχειρίσεων και τη χρήση ή μη βιοδιεγερτών τις ημέρες πειράματος 20, 35 & 54.

PI total



Γράφημα 4: Η παράμετρος φθορισμού PI total των μεταχειρίσεων σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (Μ.Ο.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0.05$.

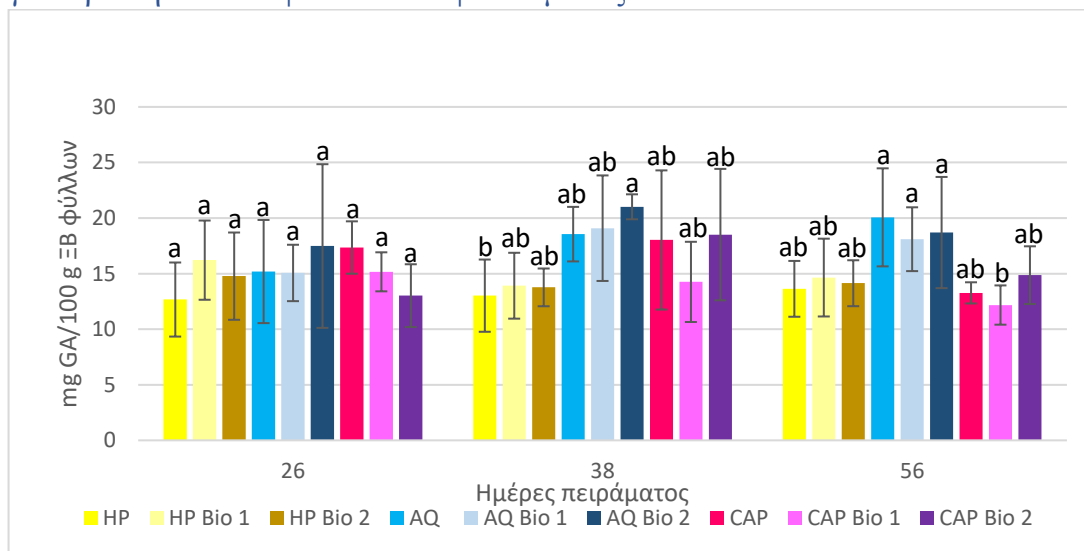
	24/11/2021	2/12/2021	9/12/2021	17/12/2021	5/1/2022
	Sig	Sig	Sig	Sig	Sig
Σύστημα	0.155	*	*	*	0.094
Βιοδιεγέρτης	0.087	*	0.994	0.326	0.803
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.612	*	0.970	0.056	0.798

Πίνακας 9: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του παράγοντα φθορισμού PI total που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικές στατιστικές διαφορές ($p < 0.05$).

Στο γράφημα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων φθορισμού της χλωροφύλλης για τον δείκτη PI total. Σχετικά με το σύστημα καλλιέργειας, ο δείκτης PI total διέφερε στατιστικά σημαντικά στην πλειοψηφία των μετρήσεων και συγκεκριμένα τις ημέρες πειράματος 20, 27 & 35. Σε αυτές τις μετρήσεις τα φυτά της μεταχείρισης AQ, διέφεραν σημαντικά από τα φυτά των μεταχειρίσεων HP και CAP.

Όσον αφορά τη χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, ο δείκτης PI total έδειξε να διαφέρει σημαντικά μόνο την ημέρα πειράματος 20, με τα φυτά που ψεκάστηκαν με το σκεύασμα Bio 1 να διαφέρουν από τα φυτά που ψεκάστηκαν με το σκεύασμα Bio 2 αλλά και με εκείνα που δεν είχαν ψεκαστεί.

Συγκέντρωση ολικών φαινολικών φυλλώματος



Γράφημα 5: Συγκέντρωση ολικών φαινολικών φυλλώματος σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος (mg GA /g DW) κατά τις τρεις συγκομιδές των φυτών μαρουλιού ($M.O \pm SD$). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0.05$.

	8/12/2021	20/12/2021	7/1/2022
	Sig	Sig	Sig
Σύστημα	0.632	*	*
Βιοδιεγέρτης	0.944	0.312	0.651
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.114	0.517	0.560

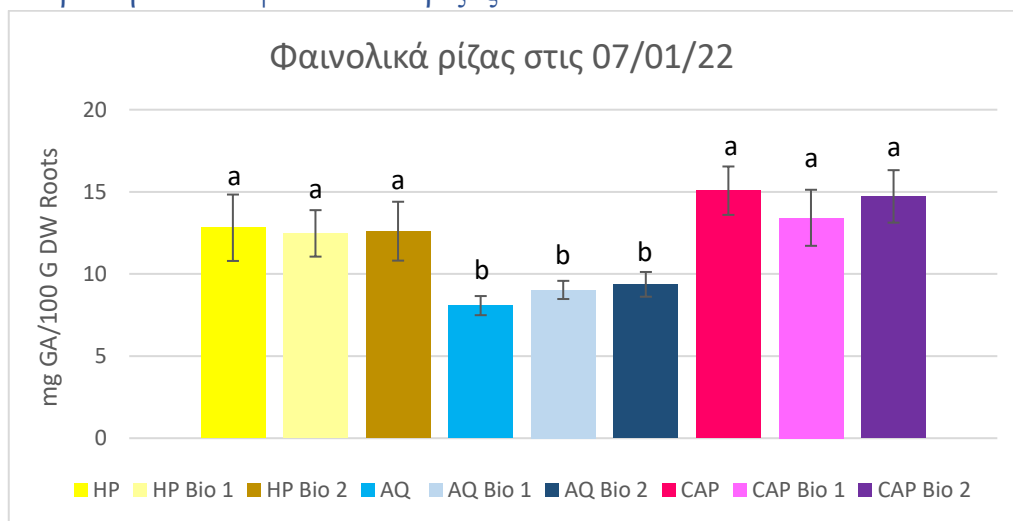
Πίνακας 10: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις της συγκέντρωσης των ολικών φαινολικών του φυλλώματος που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).

Στο γράφημα 5 απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις των ολικών φαινολικών του φυλλώματος των φυτών εκφρασμένα σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος. Η συγκέντρωση των φαινολικών σχετικά με το είδος νερού των μεταχειρίσεων έδειξε να διαφέρει στατιστικώς σημαντικά τις ημέρες πειράματος 38 & 56. Συγκεκριμένα, την ημέρα 38 τα φυτά της μεταχείρισης HP διέφεραν από τα φυτά των μεταχειρίσεων AQ και CAP,

ενώ την ημέρα 56 τα φυτά της μεταχείρισης AQ διέφεραν από τις άλλες δύο μεταχειρίσεις.

Η συγκέντρωση των φαινολικών όσον αφορά την χρήση βιοδιεγερτών καθώς και την αλληλεπίδραση τους με το είδος νερού των μεταχειρίσεων δεν έδειξε κάποια στατιστικώς σημαντική διαφορά κατά την πάροδο του πειράματος.

Συγκέντρωση ολικών φαινολικών ρίζας



Γράφημα 6: Συγκέντρωση ολικών φαινολικών ριζικού ιστού σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος (mg GA /g DW) κατά την τελική συγκομιδή των φυτών μαρουλιού (M.O±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0.05$.

	7/1/2022
	Sig
Σύστημα	*
Βιοδιεγέρτης	0.459
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.235

Πίνακας 11: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις της συγκέντρωσης των ολικών φαινολικών ριζικού ιστού που έγιναν στις μεταχειρίσεις κατά την τελική συγκομιδή. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).

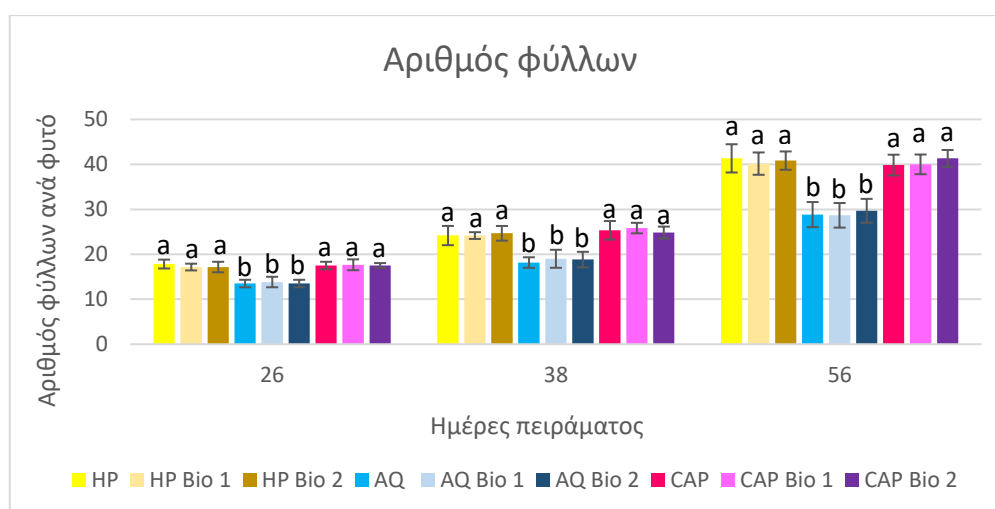
Στο γράφημα 6 απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις των ολικών φαινολικών μέρος του ριζικού ιστού των φυτών εκφρασμένα σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος κατά την τελική συγκομιδή. Η συγκέντρωση των φαινολικών ήταν σημαντικά χαμηλότερη στη μεταχείριση AQ συγκριτικά με τις HP και CAP, οι οποίες δεν διέφεραν μεταξύ τους.

Η συγκέντρωση των φαινολικών όσον αφορά τη χρήση βιοδιεγερτών, καθώς και την αλληλεπίδραση τους με το είδος νερού των μεταχειρίσεων δεν έδειξε κάποια στατιστικώς σημαντική διαφορά.

Αναπτυξιακές παράμετροι των φυτών

Αριθμός Φύλλων

Ο αριθμός των φύλλων σχετικά με το είδος του νερού των μεταχειρίσεων διέφερε στατιστικώς για όλες τις μετρήσεις και συγκεκριμένα διέφερε ο αριθμός των φύλλων ανάμεσα στα φυτά της μεταχείρισης AQ με τα φυτά των υπόλοιπων δύο μεταχειρίσεων HP και CAP. Αντίθετα, η χρήση βιοδιεγερτών, καθώς και την αλληλεπίδραση τους με το είδος νερού των μεταχειρίσεων δεν επέφερε στατιστικώς σημαντικές διαφορές.



Γράφημα 7: Αριθμός των φύλλων ανά φυτό για κάθε μεταχείριση για τρεις διαφορετικές μετρήσεις (Μ.Ο±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0.05$.

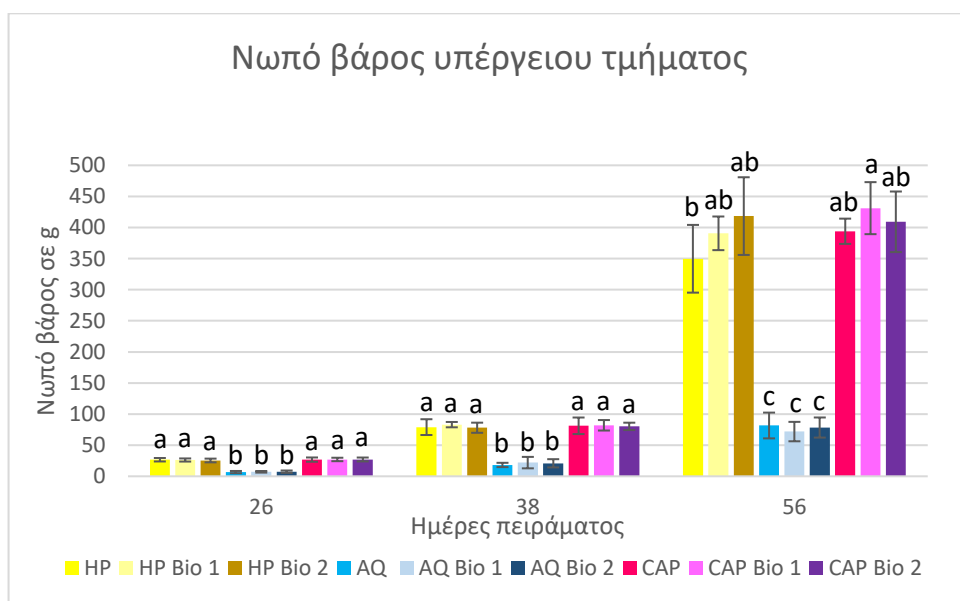
	8/12/2021	20/12/2021	7/1/2022
	Sig	Sig	Sig
Σύστημα	*	*	*
Βιοδιεγέρτης	0.767	0.714	0.486
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.727	0.782	0.901

Πίνακας 12: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του αριθμού των φύλλων ανά φυτό που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα

συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).

Νωπό βάρος υπέργειου τμήματος

Αντίστοιχα με τον αριθμό των φύλλων ήταν και τα αποτελέσματα του νωπού βάρους του υπέργειου μέρους που απεικονίζονται στο γράφημα 8. Και εδώ, η AQ έδωσε τις σημαντικά χαμηλότερες τιμές από τις HP CAP, ενώ η χρήση βιοδιεγερτών δεν είχε κάποιο αποτέλεσμα στη νωπή βιομάζα των φυτών.



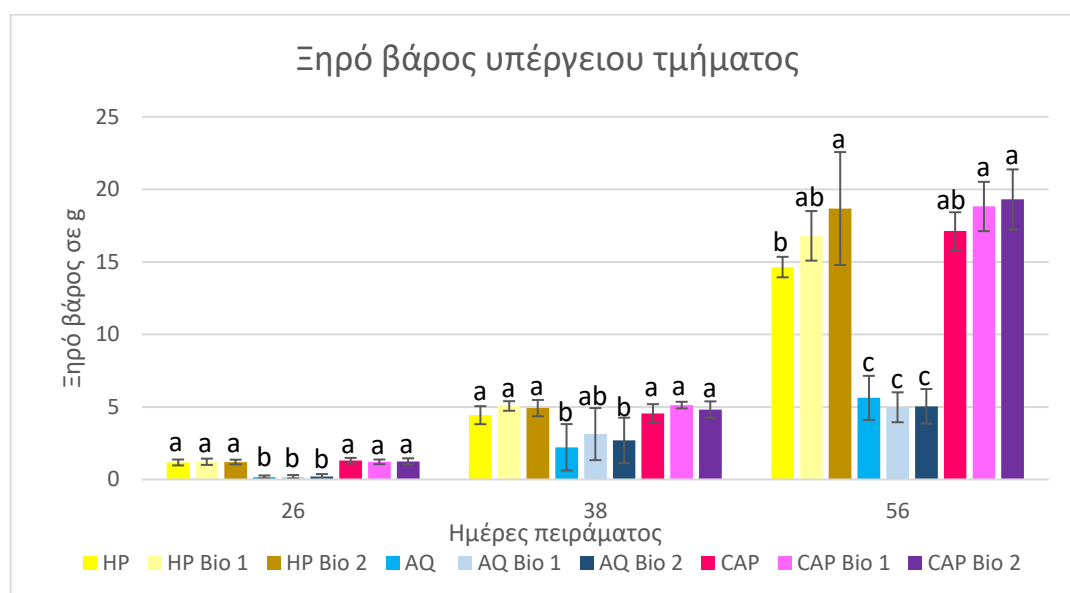
Γράφημα 8: Νωπό βάρος του φυλλώματος των φυτών μαρουλιού ανά μεταχείριση για τρεις διαφορετικές μετρήσεις ($M, O \pm SD$). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0.05$.

	8/12/2021	20/12/2021	7/1/2022
	Sig	Sig	Sig
Σύστημα	*	*	*
Βιοδιεγέρτης	0.971	0.549	0.086
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.925	0.957	0.121

Πίνακας 13: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του νωπού βάρους του φυλλώματος μαρουλιού που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).

Ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος

Αντίστοιχα με το νερό και στο ξηρό βάρος του φυλλώματος των φυτών, τα φυτά της μεταχείρισης AQ εμφάνισαν σημαντικά χαμηλότερες τιμές από τις HP και CAP. Κατά την 2^η ενδιάμεση συγκομιδή (38^η ημέρα) φάνηκε ότι το σκεύασμα Bio1 οδήγησε σε μία μικρή αύξηση του ξηρού ιστού σε σχέση με τις άλλες δύο ομάδες του AQ (AQ και AQ Bio2), χωρίς όμως να είναι σημαντική. Επίσης, στατιστικώς σημαντικές αυξήσεις προκάλεσε η χρήση βιοδιεγερτών Bio2 στη μεταχείριση HP κατά την τελική συγκομιδή (56^η ημέρα). Δεν παρατηρήθηκε σε καμία μέτρηση κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ του είδους νερού των μεταχειρίσεων και τη χρήση ή μη των βιοδιεγερτών.



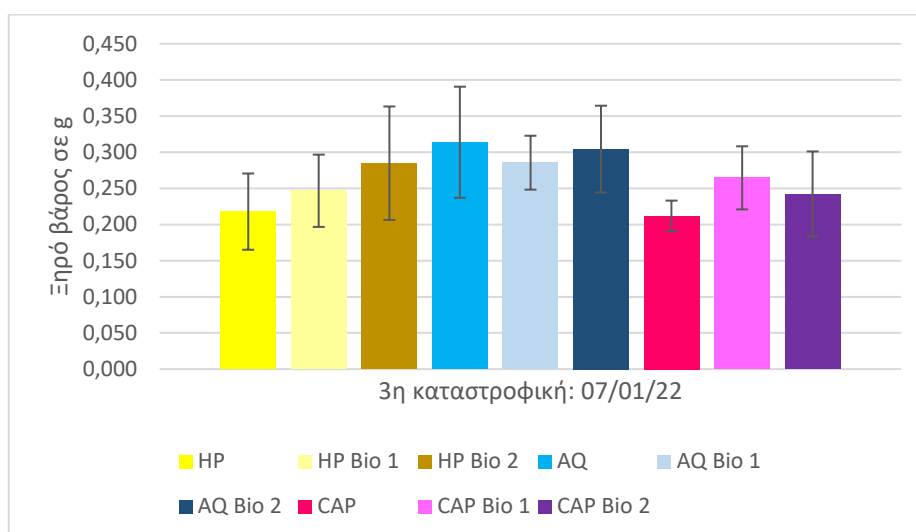
Γράφημα 9: Αποτελέσματα του ξηρού βάρους του φυλλώματος των φυτών μαρουλιού ανά μεταχείριση για τρεις διαφορετικές μετρήσεις (M.O±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0.05$.

	8/12/2021	20/12/2021	7/1/2022
	Sig	Sig	Sig
Σύστημα	*	*	*
Βιοδιεγέρτης	0.976	0.137	*
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.900	0.993	0.065

Πίνακας 14: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του ξηρού βάρους του φυλλώματος μαρουλιού που έγιναν στις μεταχειρίσεις σε τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p < 0.05$).

Ξηρό βάρος ρίζας

Το ξηρό βάρος του ριζικού ιστού των φυτών, σχετικά με το είδος του νερού των μεταχειρίσεων, διέφερε στατιστικώς σημαντικά ανάμεσα στα φυτά της μεταχείρισης AQ με τα φυτά των υπόλοιπων δύο μεταχειρίσεων HP και CAP. Το ξηρό βάρος του ριζικού ιστού των φυτών, όσον αφορά τη χρήση βιοδιεγερτών, καθώς και την αλληλεπίδραση τους με το είδος νερού των μεταχειρίσεων δεν έδειξε κάποια στατιστικώς σημαντική διαφορά κατά την πάροδο του πειράματος.



Γράφημα 10: Αποτελέσματα του ξηρού βάρους του ριζικού ιστού των φυτών μαρουλιού ανά μεταχείριση στην τελική συγκομιδή των φυτών (M.O±SD). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p<0.05$.

	7/1/2022
	Sig
Σύστημα	*
Βιοδιεγέρτης	0.306
Σύστημα * Βιοδιεγέρτης	0.286

Πίνακας 15: Αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Two-way ANOVA σε μετρήσεις του ξηρού βάρους ριζικού ιστού φυτών μαρουλιού που έγιναν στις μεταχειρίσεις κατά την τελική συγκομιδή. Συγκρίνονται οι διαφορές που έχουν τα συστήματα νερού μεταξύ τους, η χρήση ή μη των βιοδιεγερτών, καθώς και η τυχόν αλληλεπίδραση των δυο παραγόντων. Στον πίνακα παρεντίθενται με αστερίσκο (*) οι σημαντικά στατιστικώς διαφορές ($p<0.05$).

ΣΥΖΗΤΗΣΗ:

Στη συγκεκριμένη έρευνα καλλιεργήθηκαν φυτά μαρουλιού εννιά διαφορετικών μεταχειρίσεων με ταυτόχρονη ιχθυοκαλλιέργεια τιλάπιας. Κύριος στόχος του πειράματος ήταν η σύγκριση των μεταχειρίσεων, όσον αφορά διάφορες φυσιολογικές παραμέτρους κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, καθώς και τις τελικές αποδόσεις σε ανάπτυξη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος κανένα από τα φυτά των μεταχειρίσεων δεν αντιμετώπισε κάποιο πρόβλημα από εχθρούς ή ασθένειες. Επίσης, δεν εμφανίστηκε τροφопενία, όπως υποστηρίζουν θεωρούν πιθανό οι Nichols και Savidon (Nichols & Savidon, 2012), οι οποίοι έδειξαν ότι τα φυτά των συστημάτων ενυδραιοπονίας αναμένεται να εμφανίσουν ορισμένα συμπτώματα τροφопενίας, καθώς περιέχουν λιγότερα θρεπτικά στοιχεία από τα απαραίτητα για την παραγωγή των φυτών.

Ο δείκτης SPAD σχετίζεται ισχυρά με την περιεκτικότητα των φύλλων σε ολικές χλωροφύλλες (σύνολο χλωροφυλλών $a+b$). Η χλωροφύλλη που βρίσκεται στα φύλλα είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη συγκέντρωση των θρεπτικών ουσιών σε ολόκληρο το φυτό. Η συγκέντρωση χλωροφύλλης σε ένα φυτικό όργανο σχετίζεται με την ύπαρξη και την ποσότητα του N στα φύλλα, την φωτοσυνθετική του ικανότητα, καθώς και υποδεικνύει την ύπαρξη κάποιας καταπόνησης (Monje & Bugbee, 1992). Η ελάττωση του περιεχομένου της χλωροφύλλης, άρα και η μείωση της τιμής του δείκτη SPAD μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως η τροφопενία σιδήρου (Guardia & Alcántara, 2002) ή αυξημένη αλατότητα (Chen et. al., 1991). Στο συγκεκριμένο πείραμα, τα επίπεδα της ολικής συγκέντρωσης χλωροφυλλών έδειξαν να μειώνονται ελαφρώς μετά την πρώτη μέτρηση του δείκτη SPAD σε όλες τις μεταχειρίσεις σε σχέση με το είδος νερού των φυτών: HP, AQ και CAP. Τα φυτά της μεταχείρισης AQ διέφεραν στατιστικώς σημαντικά στην πλειοψηφία των μετρήσεων από τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, έχοντας τις χαμηλότερες τιμές, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε πιθανή έλλειψη N. Σε αντίθεση με το είδος νερού, ο δείκτης SPAD σε σχέση με τη χρήση ή μη των βιοδιεγερτών δεν έδειξε να διαφέρει στατιστικώς σημαντικά ανάμεσα στις μεταχειρίσεις, όμως και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρήθηκε σταδιακή μείωση των τιμών με την πάροδο του πειράματος. Τα αποτελέσματα αυτά δεν συμπίπτουν με αποτελέσματα άλλων ερευνών, κατά των οποίων τα φυτά των μεταχειρίσεων AQ είχαν καλύτερες αποδόσεις. Για παράδειγμα σύμφωνα με πείραμα που έγινε από τους Yang, T., & Kim, H. J. (Yang & Kim, 2020) σε φυτά τομάτας, βασιλικού και μαρουλιού σε

συστήματα υδροπονίας και ενυδρειοπονίας αποδείχτηκε ότι η ενυδρειοπονία παρουσίαζε μείωση στο ύψος του φυτού και το μήκος των φύλλων στη τομάτα, μείωση στον αριθμό των φύλλων στο βασιλικό αλλά δεν επηρέασε τις παραμέτρους ανάπτυξης στο μαρούλι. Ομοίως, μείωσε την τιμή SPAD στα φύλλα ντομάτας και βασιλικού αλλά όχι στο μαρούλι. Επίσης, σε πείραμα που έγινε στον βασιλικό από τους Rodger, et al, (Rodgers et. al., 2022), σε αποσυνδεδεμένα ενυδρειοπονικά συστήματα (DAP), αποσυνδεδεμένα με θρεπτικά συστατικά (DAP+) ή συμβατικά υδροπονικά (CON) θρεπτικά διαλύματα, έδειξε ότι τα φυτά που καλλιεργήθηκαν σε DAP+ και CON είχαν μεγαλύτερη βιομάζα, ύψος και δείκτη SPAD και χαμηλότερες αναλογίες βιομάζας ρίζας-βλαστών από αυτές του DAP.

Η ανακλαστικότητα των φύλλων είναι μία ιδιότητα αυτών που σχετίζεται τόσο με τη δομή τους όσο και με τη φυσιολογία των φυτών που επηρεάζεται άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Αφορά το ποσό της ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνειά των φύλλων, ενώ το υπόλοιπο ποσό της είτε απορροφάται είτε διέρχεται από αυτά. Ο δείκτης PRI χρησιμοποιείται ως εργαλείο για την φυσιολογική και βιοχημική μελέτη των φυτών και την εκτίμηση της απόδοσης της χρήσης της φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας (Garrity et. al., 2011). Συγκεκριμένα, ο δείκτης PRI είναι ενδεικτικός της λειτουργικότητας του κύκλου των ξανθοφυλλών, δηλαδή της μη φωτοχημικής απόσβεσης της περίσσειας ενέργειας. Μπορεί να παρατηρηθεί μείωση του δείκτη όταν τα φυτά βρίσκονται υπό κάποια καταπόνηση (Sims & Gamon, 2002). Στο συγκεκριμένο πείραμα οι τιμές του δείκτη PRI σχετικά με το είδος του νερού των μεταχειρίσεων (HP, AQ και CAP) έδειξε να αυξομειώνεται συνεχώς, καθώς αντικατοπτρίζουν την συγκεκριμένη κατάσταση της ημέρας. Οι μεταχειρίσεις διέφεραν στατιστικώς σημαντικά με αισθητά χαμηλότερες τιμές αυτές των φυτών της μεταχείρισης AQ και υψηλότερες τιμές αυτές των φυτών της μεταχείρισης CAP. Ο δείκτης PRI σε σχέση με τη χρήση ή μη βιοδιεγερτών δεν έδειξε να διαφέρει κάπου σημαντικά, ενώ παρατηρήθηκε και σε αυτήν την περίπτωση μια διακύμανση τιμών κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι την ημέρα πειράματος 19, όλες οι τιμές των φυτών από τις μεταχειρίσεις AQ, AQ Bio 1 και AQ Bio 2 είχαν αρνητικές τιμές καθώς και ότι την ημέρα πειράματος 26 τα φυτά της μεταχείρισης AQ είχαν σχεδόν μηδενική τιμή. Την ημέρα εκείνη, ήταν και η μοναδική φορά που παρατηρήθηκε μια αλληλεπίδραση στις τιμές του δείκτη PRI μεταξύ του νερού των μεταχειρίσεων και τη χρήση ή μη των βιοδιεγερτών.

Κατά τη διάρκεια της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από τις χλωροφύλλες εκπέμπεται ένα μικρό ποσό της ενέργειας διέγερσης υπό μορφή φθορισμού. Μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες παραμέτρους του φθορισμού είναι η παράμετρος Fv/Fm, η οποία αποτυπώνει τη μέγιστη φωτοχημική απόδοση ανά φωτόνιο της φωτοσυνθετικής συσκευής (Gallé et. al., 2007). Σύμφωνα με τον Καραμπουρνιώτη (Καραμπουρνιώτης et. al., 2012) οι τιμές του λόγου Fv/Fm από 0,80 έως 0,85 αποτελούν ένδειξη ότι τα φυτά δεν υπόκεινται κάποια σημαντική καταπόνηση. Η μείωση του λόγου αυτού παραπέμπει σε αύξηση της καταπόνησης, μείωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας των φύλλων και βλάβες στο PSII. Όταν η τιμή του δείκτη είναι μικρότερη από 0,75 υποδεικνύεται κάποια καταπόνηση, άρα και μειωμένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα. Γενικά, η μείωση του δείκτη μπορεί να σχετίζεται με έλλειψη ή ανεπάρκεια σε κάποια θρεπτικά, όπως ο σίδηρος και το μαγγάνιο (Roosta, 2014) ή ακόμα σε κάποια αβιοτική καταπόνηση (Gallé et. al., 2007). Στο συγκεκριμένο πείραμα, ο δείκτης Fv/Fm σχετικά με το είδος νερού των μεταχειρίσεων έδειξε να διαφέρει στατιστικά σημαντικά κυρίως ανάμεσα στα φυτά των μεταχειρίσεων AQ και HP, χωρίς να αλλάζουν όμως έντονα οι τιμές κατά τη διάρκεια του πειράματος. Ο δείκτης Fv/Fm σχετικά με τη χρήση ή μη των βιοδιεγερτών διέφερε στατιστικά σημαντικά τις ημέρες πειράματος 20 & 27 με τα φυτά που είχαν ψεκαστεί με το σκεύασμα Bio 1 να έχουν καλύτερες αποδόσεις. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα φάνηκε να υπάρχει αλληλεπίδραση των δύο πειραματικών παραγόντων (σύστημα*βιοδιεγέρτης) στην διαμόρφωση των τιμών αυτής της παραμέτρου.

Ο δείκτης PI total (Performance Index) θεωρείται ως δείκτης της συνολικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης, καθώς εμπεριέχει πληροφορίες για το πλήθος των ενεργών κέντρων, τη μέγιστη ενεργειακή ροή που φτάνει στο κέντρο αντίδρασης του PSII και την ροή ηλεκτρονίων κατά την έναρξη του φωτισμού (Μουραντιάν, 2019). Κατά τη διάρκεια του πειράματος παρατηρήθηκε μία πτώση των τιμών του δείκτη PI total στις περισσότερες μεταχειρίσεις και κυρίως από ημέρα πειράματος 27 και μετά. Τις χαμηλότερες τιμές κατά μέσο όρο τις είχαν τα φυτά των μεταχειρίσεων AQ. Επίσης, την ημέρα πειράματος 20 τα φυτά που είχαν ψεκαστεί με το Bio 1 είχαν σχετικά καλύτερες αποδόσεις από τα φυτά που είχαν ψεκαστεί με το Bio 2 και από εκείνα που δεν είχαν ψεκαστεί.

Σχετικά με τα αναπτυξιακά στοιχεία του φυλλώματος των φυτών στην πλειοψηφία των μετρήσεων τα φυτά των μεταχειρίσεων HP και CAP είχαν σχεδόν στις ίδιες τιμές, ενώ τα φυτά της μεταχείρισης AQ ήταν αρκετά πιο πίσω. Σχετικά με τον αριθμό των

φύλλων ανά φυτό την καλύτερη απόδοση είχε η μεταχείριση HP. Όσον αφορά το νωπό και το ξηρό βάρος των φυτών στην ημέρα πειράματος 56 τα φυτά των μεταχειρίσεων HP και CAP έδειξαν μία θεαματική άνοδο. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, το ξηρό βάρος του ριζικού ιστού των φυτών της μεταχείρισης AQ έδειξε οριακά καλύτερες αποδόσεις σε σχέση με τα άλλες δυο μεταχειρίσεις. Σχετικά με τη αποτελεσματικότητα των βιοδιεγερτών σε καμία παράμετρο δεν παρατηρήθηκε κάποια διαφορά με εξαίρεση το ξηρό βάρος του φυλλώματος την ημέρα πειράματος 56 κατά την οποία τα φυτά που είχαν ψεκαστεί με το Bio 2 είχαν καλύτερη απόδοση και διέφεραν σημαντικά από τα φυτά που δεν είχαν ψεκαστεί. Έρευνες σχετικά με τα αναπτυξιακά των μεταχειρίσεων HP, AQ και CAP δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ τους αναλόγως με το σύστημα που χρησιμοποιείται και το είδος του φυτού. Σύμφωνα με πείραμα που πραγματοποίησαν οι Goddek & Vermeulen (Goddek & Vermeulen, 2018) σε μαρούλι κλασικής υδροπονίας και ενυδρειοπονίας RAS, διαπίστωσαν ότι το τελικό φρέσκο βάρος των φυτών RAS ήταν 7,9% και το τελικό ξηρό βάρος τους ήταν ακόμη και 33,2% υψηλότερο από αυτό του υδροπονικού μάρτυρα. Το νερό για τη δεξαμενή του συστήματος υδροπονίας προερχόταν από νερό βροχής, ενώ το νερό της ενυδρειοπονίας προερχόταν από 30% του διαλύματος των RAS και 70% από νερό βροχής. Πείραμα που πραγματοποίησαν οι Delaide B. et, al., (Delaide et. al., 2016) σχετικά με την καλλιέργεια μαρουλιού σε τρεις μεταχειρίσεις: HP, AQ, και CAP απέδειξε ότι οι μεταχειρίσεις AQ και HP εμφάνισαν παρόμοια ($p>0,05$) ανάπτυξη φυτών, ενώ το βάρος του φυλλώματος της CAP έδειξε σημαντική ($p<0,05$) αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης κατά 39% κατά μέσο όρο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Επίσης, το βάρος της ρίζας ήταν παρόμοιο ($p>0,05$) στις AQ και CAP, και αμφότερες ήταν σημαντικά υψηλότερες ($p<0,05$) από αυτό που παρατηρήθηκε στην HP. Τέλος, μελέτη που έγινε σε φυτά μαρουλιού το 2016 στη Γερμανία σε υδροπονικά και ενυδρειοπονικά συστήματα (Monsees et. al., 2019), έδειξε παρόμοιες αποδόσεις χωρίς κάποια σημαντική διαφορά μετά από επτά εβδομάδες ανάπτυξης.

Η συγκέντρωση των φαινολικών ουσιών αυξάνεται σημαντικά όταν τα φυτά βρίσκονται σε συνθήκες βιοτικής ή αβιοτικής καταπόνησης. Τα φαινολικά είναι πολύ-λειτουργικά μόρια και σχετίζονται τόσο με την άμυνα των φυτών, όσο και με άλλες λειτουργίες όπως για παράδειγμα η απάντηση σε έλλειψη νερού ή N (Cartelat et. al., 2005). Στο πείραμα η συγκέντρωση των φαινολικών για τα φυτά της AQ αυξήθηκε σταδιακά, ενώ για τα φυτά της μεταχείρισης HP δεν είχαν σοβαρές αλλαγές και παρέμειναν περίπου στις ίδιες χαμηλές τιμές. Όσον αφορά τα φαινολικά στο ριζικό ιστό

τα φυτά της μεταχείρισης AQ είχαν τις μικρότερες τιμές ενώ τα φυτά της CAP τις μεγαλύτερες.

Γενικά όσον αφορά τη χρήση των βιοδιεγερτών σε καμία από τις παραμέτρους που μετρήθηκαν δεν έδειξαν να επηρεάζονται θετικά και να διαφέρουν σημαντικά από τις μεταχειρίσεις που δεν είχαν ψεκαστεί με κάποιο σκεύασμα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με αποτελέσματα από διάφορα πειράματα τα οποία κατέληξαν σε υψηλότερη ποιοτική και ποσοτική παραγωγή. Πειράματα σε ρόκα, η οποία αναπτύχθηκε σε πλωτό σύστημα με τη χρήση βιοδιεγερτών (Actiwave®, Valagro S.p.a.), έδειξαν ότι το σκεύασμα, αύξησε σημαντικά την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών και την αποτελεσματικότητα χρήσης σε όλες τις μεταχειρίσεις. Επίσης οι βιοδιεγέρτες είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση της περιεκτικότητας των φυτών σε νιτρικά άλατα και την αύξηση των καροτενοειδών και της χλωροφύλλης (Vernieri et. al., 2006). Επίσης σε πειράματα που έγιναν σε ποικιλίες μαρουλιού από τους Wang, Z. et al (Wang et. al., 2022) με τη χρήση διαφόρων βιοδιεγερτών, συμπέραναν ότι η χρήση βιοδιεγερτών φυκιών βελτίωνε τη βιομάζα του φυλλώματος καθώς και της ρίζας των φυτών. Παράλληλα, βρέθηκε ότι μείωνε περισσότερο από τους υπόλοιπους βιοδιεγέρτες, την περιεκτικότητα των φύλλων σε διαλυτά σάκχαρα και χλωροφύλλη. Όπως είναι προφανές, αυτό καθαυτό το σκεύασμα επηρεάζει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα, επομένως δεν μπορεί εύκολα να γίνει σύγκριση μεταξύ πειραμάτων, εάν οι βιοδιεγέρτες που χρησιμοποιούνται δεν είναι παρόμοιας σύστασης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

- Η αυξημένη συγκέντρωση ολικών χλωροφυλλών στην αρχή της αναπτυξιακής περιόδου μειώθηκε ελαφρώς στην διάρκεια της ζωής των φυτών, παραμένοντας όμως σε υψηλές τιμές, χωρίς συμπτώματα χλώρωσης σε καμία μεταχείριση.
- Ο δείκτης PRI των φύλλων εμφάνισε σημαντικές διακυμάνσεις καθώς η αποδοτικότητα χρήσης φωτός άλλαξε κατά την ανάπτυξη του φυτού, φάνηκε όμως να είναι χαμηλότερος στις μεταχειρίσεις AQ τις περισσότερες ημέρες μετρήσεων.
- Όσον αφορά τον φθορισμό της χλωροφύλλης ο δείκτης Fv/Fm έδειξε αξιοσημείωτη σταθερότητα καθ' όλη την αναπτυξιακή περίοδο, υποδεικνύοντας την έλλειψη καταπόνησης της φωτοσυνθετικής συσκευής. Ο δείκτης της συνολικής φωτοσυνθετικής απόδοσης PI total, εμφάνισε σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, αποτυπώνοντας την τρέχουσα φωτοσυνθετική απόδοση, ήταν όμως σταθερά χαμηλότερος στις μεταχειρίσεις AQ.
- Η συγκέντρωση ολικών φαινολικών ήταν υψηλότερη στα φύλλα και χαμηλότερη στη ρίζα των AQ, με την δεύτερη μόνο διαφορά να είναι σημαντική.
- Τα φυτά των μεταχειρίσεων CAP και HP είχαν τις καλύτερες αποδόσεις σε όλα τα αναπτυξιακά χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν στις τρεις συγκομιδές που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος, ενώ οι μεταχειρίσεις AQ υπολείπονταν σημαντικά. Η εφαρμογή του βιοδιεγέρτη Bio2 επέφερε στατιστικώς σημαντική αύξηση στο ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος της HP, και μία τάση για αύξηση στην CAP, ενώ οι αντίστοιχες αυξήσεις στο νωπό βάρος ήταν ορατές, αλλά μη σημαντικές.
- Η συνολική εικόνα είναι ότι οι μεταχειρίσεις CAP και HP εμφάνισαν τις υψηλότερες τιμές σε όλες τις παραμέτρους που μετρήθηκαν και δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Αντίθετα οι μεταχειρίσεις της AQ, εμφάνισαν γενικά σημαντικά χαμηλότερη απόδοση. Τέλος, η χρήση των συγκεκριμένων βιοδιεγερτών δεν είχε σημαντικό όφελος στην λειτουργία, αλλά καταγράφηκε μία μικρή βελτίωση στη συσσώρευση βιομάζας σε HP και CAP με την εφαρμογή του Bio2.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

1. van der Goot et. al. (2016). *Concepts for further sustainable production of foods*. Journal of Food Engineering.
2. Ashley. (2016). *Food Security in the Developing World*. London: Academic Press.
3. Battacharyya et. al. (2015). *Seaweed extracts as biostimulants in horticulture*. Scientia Horticulturae.
4. Binz et. al. (2010). *Zukunft der dezentralen Wassertechnologien*. Dubendorf: EAWAG.
5. Blidariu, & Grozea. (2011). *Increasing the economical efficiency and sustainability of indoor fish farming by means of aquaponics-review*. Animal science and biotechnologies, 44(2).
6. Bodenmiller. (2017). *Effects of aeration on lettuce (Lactuca sativa) growth in deep water culture aquaponics*. Tampereen Ammattikorkeakoulu, Tech. Rep.
7. Calvo et. al. (2014). *Agricultural uses of plant biostimulants*. Plant Soil, 383.
8. Carmassi et. al. (2005). *Modeling salinity build-up in recirculating nutrient solution culture*. J Plant Nutr.
9. Carnett. (2011). *Where are the best opportunities for reducing greengouse gas emissions in the food system (including thr food chain)?* Food Policy.
10. Cartelat et. al. (2005). *Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (Triticum aestivum L.)*. . Field crops research, 91(1).
11. Chen et. al. (1991). *Senescence of rice leaves. XXXI. Changes of chlorophyll, protein and polyamine contents and ethylene production during senescence of a chlorophyll-deficient mutant*. J. Plant Growth Reg.
12. Cohen A. et. al. (2018). *Combined fish and lettuce cultivation: an aquaponics life cycle assessment*. Procedia Cirp.
13. Delaide et. al. (2016). *Growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydro-ponics*.
14. Delaide et. al. (2016). *Lettuce (Lactuca sativa L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics*. Water, 8(10).
15. du Jardin. (2015). *Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation*. Scientia Horticulturae, 196.
16. Edaroyati et. al. (2017). *Requirements for inserting intercropping in aquaponics system for sustainability in agricultural production system*. Agronomy Res., vol. 15, no. 5,.
17. Ehrlich et. al. (2015). *Opinion: to feed the world in 2050 will require a global revolution*. ProcNatl Acad Sci USA.

18. FAO. (2014). *Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming*. Rome, Italy: FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper.
19. Gallé et. al. (2007). *Changes of photosynthetic traits in beech saplings (Fagus sylvatica) under severe drought stress and during recovery*. *Physiologia plantarum*, 131(3).
20. Garrity et. al. (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).
21. Gericke, W. (1937). *Hydroponics- Crop production in liquid culture media*. *Science*, 177-178.
22. Goddek et. al. (2015). *Challenges of sustainable and commercial aquaponics*. *Sustainability*.
23. Goddek et. al. (2019). *Aquaponics Food Production Systems*. Springer International Publishing: Cham, Switzerland.
24. Goddek et. al. (2019). *Aquaponics Food Production Systems, Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*.
25. Goddek, & Vermeulen. (2018). *Comparison of Lactuca sativa growth performance in conventional and RAS-based hydroponic systems*. *Aquaculture International*, 26(6).
26. Gooley, & Gavine. (2003). *Introduction to integrated agri-aquaculture systems in Australia*. Simon Hearn.
27. Guardia, D. I., & Alcántara. (2002). *Bicarbonate and low iron level increase root to total plant weight ratio in olive and peach rootstock*. *J. Plant Nutr.* 25.
28. Halpern et. al. (2015). *The Use of Biostimulants for Enhancing Nutrient Uptake*. *Advances in Agronomy*.
29. Halwart, & Gupta. (2004). *Culture of fish in rice fields*. FAO. WorldFish Center.
30. Höhne et. al. (2014). *Regional GHG reduction targets based on effort sharing: a comparison of studies*. *Climate Policy*, 14(1).
31. Jijakli et. al. (2016). *Plant production capacity and nutrient mass balance in the PAFF Box, an urban aquaponics module: Preliminary findings*. Geography and Environment University of Southampton: Southampton, UK.
32. Jones, J. (2004). *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton.
33. Khan et. al. (2009). *Seaweed extracts as bio-stimulants of plant growth and development*. *J Plant Growth Regul.*
34. Klinger et. al. (2012). *Searching for solutions in Aquaculture: Charting a sustainable course*. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 37.

35. Kloas et. al. (2015). *A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts*. *Aquacult Environ Interact*.
36. Knaus, & Palm. (2017). *Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania)*. *Aquaculture*, 473.
37. König, B., Janker, J., Reinhardt, T., Villarroel, M., & Junge, B. (2018). *Journal of Cleaner Production*. Ανάκτηση από Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652618300489?token=1A3E85A3305FFDFE0556325C19868EEC5E3DEA99FFB08A8964826215DE27E2AB3DB9192D963829EA6AD4A81981F31E37&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220521141259>
38. Kraan. (2012). *Algal Polysaccharides, Novel Applications and Outlook, Carbohydrates - Comprehensive Studies on Glycobiology and Glycotechnology*. Chuan-Fa Chang, IntechOpen.
39. Kuzetsova et. al. (2020). *Marine algae Polysaccharides as Basis for Wound Dressings, Drug Delivery, and Tissue Engineering*. A review. *J. Mar. Sci. Eng.*, 8(7).
40. Leach et al. (2012). *Transforming innovation for sustainability*.
41. Lekang. (2013). *Aquaculture hatchery water supply and treatment systems*. In *Advances in Aquaculture Hatchery Technology*. Woodhead Publishing.
42. Lekang, & Kleppe. (2000). *Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media*. *Aquacultural Eng.*, vol. 21, no. 3.
43. Lennard. (2012). *Aquaponic system design parameters: Solids filtration, treatment and re-use, in Aquaponic Fact Sheet Series: Aquaponic Solutions*.
44. Lennard. (2017). *Commercial aquaponic systems: integrating recirculating fish culture with hydroponic plant production*. In press.
45. Lennard, & Leonard. (2006). *A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravelbed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system*. *Aquac Int*.
46. Love et. al. (2015). *Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey*. *Aquaculture*.
47. Maucieri et. al. (2018). *Hydroponic systems and water management in aquaponics: a review*. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1).
48. Mchunu et. al. (2018). *Aquaponics in South Africa: Results of a national survey*. *Aquaculture Rep.*, vol. 12,.
49. McIntyre et. al. (2009). *International Assessment of Agriculture Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD), Synthesis Report*.

50. Milton. (1964). *Liquid seaweed as a fertilizer*. In Proc Int Seaweed Symp Vol. 4.
51. Monje, & Bugbee. (1992). *Inherent limitations of nondestructive chlorophyll meters: a comparison of two types of meters*. HortScience, 27(1).
52. Monsees et. al. (2017). *Decoupled systems on trial: eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes*. PLoS one, 12(9).
53. Monsees et. al. (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).
54. Mullins et. al. (2016). *Principles of small-scale aquaponics*. SRAC, San Jose, CA, USA, Tech. Rep. 5007.
55. 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).
56. Nichols, & Savidov. (2012). *Aquaponics: clean, green and organic*. Personal correspondence, (submitted).
57. Pantanella E. et. al. (2010). *Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop*. In XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 927.
58. Pinho et. al. (2017). *Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties*. Ecological Engineering.
59. Povero et. al. (2016). *A Systematic Approach to Discover and Characterize Natural Plant Biostimulants*. Frontiers in Plant Science.
60. Pretty et. al. (2010). *The top 100 questions of importance to the future of global agriculture*. International Journal of Agricultural Sustainability.
61. Rakocy. (2012). *Aquaponic-integrating fish and plant culture,*'' in *Aquaculture Production Systems*. J. H. Tidwell, Ed. Oxford, U.K.: WileyBlackwell, ch. 14.
62. Rakocy et. al. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics—Integrating fish and plant culture*. Southern Regional Aquaculture Center, Stoneville, MS, USA, Tech. Rep. 454.
63. Rakocy, & Hargreaves. (1993). *Nutrient accumulation in a recirculating aquaculture system integrated with hydroponic vegetable production (Vol. 3495)*.
64. Rodgers et. al. (2022). *Complementary Nutrients in Decoupled Aquaponics Enhance Basil Performance*. Horticulturae, 8(2).
65. Roosta. (2014). *Comparison of the vegetative growth, eco-physiological characteristics and mineral nutrient content of basil plants in different irrigation ratios of hydroponic: aquaponic solutions*. Journal of plant nutrition, 37(11).

66. Savvas et. al. (2008). *Modelling Na and Cl concentrations in the recycling nutrient solution of a closed-cycle pepper cultivation*. Biosyst Eng.
67. Schuetze et. al. (2008). *Every Drop Counts: Environmentally Sound Technologies for Urban and Domestic Water Use Efficiency*. Nairobi, Kenya: first ed. United Nations Environment Programme.
68. Schuetze, T., Tjallingi, S., Ryu, M., Graaf, R., & van der Ven, F. (2008). *Every Drop Counts: Environmentally Sound Technologies for Urban and Domestic Water Use Efficiency*. Nairobi.
69. Shekhar Sharma et. al. (2014). *Plant biostimulants: a review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses*. J Appl Phycol, 26.
70. Sims, & Gamon. (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).
71. Suhl et. al. (2016). *Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics*. Agricultural Water Management.
72. Summerfelt. (2000). *Water quality considerations for aquaculture*,. Dept. Animal Ecol., Iowa State Univ., Ames, IA, USA.
73. Timmons et. al. (2002). *Recirculating Aquaculture Systems*. , 2nd ed, Ithaca, NY: Cayuga Aqua Ventures.
74. Turcios et. al. (2014). *Sustainable treatment of aquaculture effluents—what can we learn from the past for the future?* Sustainability.
75. Tyson et. al. (2011). *Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems*. HortTechnology 21:6–13.
76. van Oosten et. al. (2017). *The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants*. Chemical and Biological Technologies in Agriculture.
77. Vernieri et. al. (2006). *USE OF BIOSTIMULANTS FOR REDUCING NUTRIENT SOLUTION CONCENTRATION IN FLOATING SYSTEM*. Acta Hort. 718.
78. Walls. (1993). *The Greenhouse*. London: Edition Wardlock.
79. Wang et. al. (2022). *Comparing Efficacy of Different Biostimulants for Hydroponically Grown Lettuce (*Lactuca sativa L.*)*. Agronomy, 12(4).
80. Wardlow. (2002). *Enhancing student interest in the agricultural sciences through aquaponics*. J. Natural Resour. Life Sci. Educ., vol. 31.
81. Waterman, & Mole. (1994). *Analysis of phenolic plant metabolites*. Blackwell Scientific.
82. Wheeler. (1994). *Plant growth and nitrogen uptake*. USA: Asae paper No. 947506,.

83. Yang, & Kim. (2020). *Characterizing nutrient composition and concentration in tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems*. *Water*, 12(5).
84. Δημητράκης. (1998). *Λαχανοκομία*. Εκδόσεις Αγρότυπος.
85. Καραμπουρνιώτης et. al. (2012). *Φυσιολογία Καταπονήσεων των Φυτών, Οι λειτουργίες των φυτών κάτω από αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος*. Αιγάλεω: Εκδόσεις ΕΜΒΡΥΟ.
86. Κωνσταντοπούλου. (2014). *Μορφολογικές και ανατομικές παρατηρήσεις σε υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού (ποικιλία Romana)*. Καλαμάτα: Πτυχιακή εργασία. ΤΕΙ Πελοποννήσου, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας και Τεχνολογίας Τροφίμων και Διατροφής.
87. Μουραντιάν. (2019). *Εκτίμηση πιθανών καταπονήσεων του βασιλικού που αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδραιοπονίας (Master's thesis)*.
88. Νεοκλέους. (2014). *Εγχειρίδιο Υδροπονίας Εκπαιδευτικό Κέντρο Υδροπονίας ΙΓΕ*. Κύπρος: Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών.
89. Παπαχρήστος. (2018). *Σύγχρονες Τάσεις στις Υδροπονικές Καλλιέργειες*. Άρτα: Πτυχιακή Εργασία.
90. Σάββας. (2011). *Καλλιέργειες εκτός εδάφους: Υδροπονία, Υποστρώματα*. Αθήνα: Εκδόσεις Αγρότυπος.
91. Τζωρτζάκης. (2008). *Καλλιέργειες εκτός εδάφους*. Σημειώσεις θεωρίας. Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, ΤΕΙ Κρήτης.
92. *Υδατοκαλλιέργειες και περιβάλλον, Σύνδεσμος Ελληνικών Θαλασσοκαλλιεργειών*, . (χ.χ.).
93. *Φτιάχνω μόνος μου, Ενυδραιοπονία: οδηγίες και κατασκευή ενυδραιοπονικού συστήματος*. (2012). Ανάκτηση από https://www.ftiaxno.gr/2012/06/blog-post_1543.html
94. www.wikipedia.com
95. www.gaiapedia.gr