



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

**Σχολή Γεωπονικών Επιστημών
Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Αειφόρος Αγροτική Παραγωγή και Διαχείριση Περιβάλλοντος»**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΖΙΖΑΝΙΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**«Εκτίμηση πιθανών καταπονήσεων του βασιλικού που αναπτύσσεται σε
σύστημα ενυδραιοπονίας»**



ΑΛΒΑΡΝΤ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΜΟΥΡΑΝΤΙΑΝ

ΒΟΛΟΣ, 2019

«Εκτίμηση πιθανών καταπονήσεων του βασιλικού που αναπτύσσεται σε σύστημα
ενυδραιοπονίας»

ΑΛΒΑΡΝΤ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΜΟΥΡΑΝΤΙΑΝ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Λεβίζου Ευθυμία, Επίκουρη Καθηγήτρια Φυσιολογίας Φυτών, Τμήμα Γεωπονίας
Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,
Επιβλέπουσα

Κατσούλας Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής Γεωργικών Κατασκευών με
έμφαση στα Θερμοκήπια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού
Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**

Μεντέ Έλενα, Καθηγήτρια Φυσιολογίας Θρέψης Υδροβίων Ζωικών Οργανισμών,
Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών
Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**

Copyright © ΑΛΒΑΡΝΤ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΜΟΥΡΑΝΤΙΑΝ, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διατριβής, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Η έγκριση της Μεταπτυχιακής Διατριβής Ειδίκευσης από το Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δε δηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή με θέμα την «Εκτίμηση πιθανών καταπονήσεων του βασιλικού που αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδρευσιμότητας», πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Π.Μ.Σ. «Αειφόρος Αγροτική Παραγωγή και Διαχείριση Περιβάλλοντος», στο Εργαστήριο Ζιζανιολογίας της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Για την πραγματοποίηση και τη συγγραφή της παρούσας εργασίας βοήθησαν, με τον τρόπο τους, αρκετοί άνθρωποι τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας μου, την καθηγήτρια Ευθυμία Λεβίζου για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να συνεργαστούμε με στόχο την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης. Οι συμβουλές και η καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια του πειράματος και της συγγραφής της παρούσας εργασίας ήταν πολύ χρήσιμες. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τους καθηγητές Νικόλαο Κατσούλα και Έλενα Μεντέ, για το κλίμα συνεργασίας και τις χρήσιμες παρατηρήσεις.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τις υποψήφιες διδάκτωρ Εύα Τσουμαλάκου και Εύη Σταθοπούλου για τις συμβουλές, την καλή διάθεση και το όμορφο κλίμα στο εργαστήριο, καθώς και τους Νικόλαο Βλάχο, Παναγιώτη Βερίλλη και Παναγιώτη Καψή για τη πολύτιμη βοήθεια στο εργαστήριο.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια και τους φίλους μου, και πιο συγκεκριμένα στην Αγγέλα, για την αμέριστη συμπαράσταση, την υπομονή και αγάπη που μου έδειξαν καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

Περίληψη

Η ενυδραιοπονία (aquaponics) είναι ένα σύστημα παραγωγής που συνδυάζει υδατοκαλλιέργεια και υδροπονία, παράγοντας ταυτοχρόνως φυτά και ψάρια, λειτουργεί στο πλαίσιο της αειφορίας και έχει χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η παρούσα εργασία κατέγραψε βασικά αναπτυξιακά και λειτουργικά χαρακτηριστικά φυτών πλατύφυλλου βασιλικού (*Ocimum basilicum*) καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξής τους σε συστήματα ενυδραιοπονίας με την παράλληλη εκτροφή τιλάπιας (*Oreochromis niloticus*). Οι παρεμβάσεις στο σύστημα ήταν ελάχιστες ώστε να καταγραφεί η λειτουργία και να ανιχνευτούν πιθανές καταπονήσεις του φυτού κατά τα διάδοχα αναπτυξιακά στάδια. Παράλληλος στόχος ήταν να πραγματοποιηθεί και μία χαρτογράφηση πιθανών ενδογενών διαφορών στα τρία συστήματα που χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά. Κατά την διάρκεια του πειράματος που διήρκεσε 56 ημέρες παρακολουθούνταν το ύψος, η συγκέντρωση των ολικών χλωροφυλλών μέσω του δείκτη SPAD, ο φθορισμός της χλωροφύλλης *a in vivo* και η ανακλαστικότητα των φύλλων προκειμένου να εξαχθούν συγκεκριμένοι δείκτες που σχετίζονται με τη λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής και ανιχνεύουν πιθανές καταπονήσεις. Στη τελική συλλογή καταγράφηκαν αναπτυξιακά χαρακτηριστικά των φυτών και των ψαριών, ενώ μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών και ολικών φαινολικών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο βασιλικός αναπτύχθηκε πολύ καλά στα συστήματα ενυδραιοπονίας, με πενταπλασιασμό της υπέργειας και υπόγειας βιομάζας. Διαφορές παρουσιάστηκαν μεταξύ των συστημάτων I και III, με το τελευταίο να υπερέχει στατιστικώς σημαντικά ως προς την απόδοση του φυτού. Καθώς αντίστοιχα τα ψάρια στο σύστημα III κατανάλωσαν περισσότερη τροφή και εμφάνισαν τάση για καλύτερη ανάπτυξη, πιθανώς τα φυτά του βασιλικού του συστήματος III είχαν μεγαλύτερη διαθεσιμότητα θρεπτικών από τα φυτά στα συστήματα I και II. Τέλος, οι διάφοροι λειτουργικοί δείκτες που εξετάστηκαν δεν απέδωσαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων, ενώ μόνο ο δείκτης Fv/Fm που σχετίζεται με τη φωτοσυνθετική ικανότητα του φυτού παρουσίασε μία τάση για μείωση από τη μέση του πειράματος μέχρι το τέλος αυτού και οι μετρήσεις του μεσημεριού του δείκτη PRI είχαν χαμηλές τιμές που παραπέμπουν σε μεγάλη ανάγκη για φυτοπροστασία.

Λέξεις κλειδιά: Ενυδραιοπονία, βασιλικός, καταπόνηση, παράγοντες φθορισμού, δείκτες ανακλαστικότητας

Summary

Aquaponics is an innovative and sustainable farming system that combines aquaculture and hydroponics, coupling crop and fish production. In the present study, several growth and physiological characteristics of basil plants (*Ocimum basilicum*) were recorded throughout their growth period in aquaponics systems with the parallel Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) farming. External inputs to the system were kept to minimum so that the overall plant performance and the detection of any possible stress could be followed during the successive developmental stages. Additionally, we aimed at the extensive mapping of possible intrinsic differences among the three aquaponics units, which were used for the first time. During the 56-day trial the plant height, total chlorophyll concentration through SPAD, chlorophyll fluorescence in vivo, and leaf reflectance were recorded, in order to derive indices related to the functionality of the photosynthetic apparatus and possible stress. At the final harvest various growth characteristics of plants and fishes were measured and actual concentration of photosynthetic pigments and total phenolics were determined. Basil plants exhibited a 5-fold increase in both aerial and root part, denoting a good adaptation to the aquaponic systems. Nonetheless, there were differences between aquaponic units I and III, the later outperforming the former in respect to plant yield. This result could be attributed to the fact that fishes of unit III consumed significantly larger amount of food and showed a trend for better growth, thus an increased availability of nutrients for basil of this unit could be speculated. Finally, various physiological indices which were derived from fluorescence and reflectance data showed no significant differences among experimental units. Only the Fv/Fm factor which is correlated to the maximum photosynthetic efficiency of photosystem II per quantum exhibited a decreasing trend from the middle to the end of the experimental period and the PRI Index (light) decreased compared to PRI Index (dark) which refers to plant protection.

Εγώ, η Αλβάρντ Αναστασία Μουραντιάν, είμαι η συγγραφέας αυτής της Μ.Δ.Ε. Αυτή η Μ.Δ.Ε. αντικατοπτρίζει την έρευνα που έγινε από εμένα και δεν έχει υποβληθεί (εξ ολοκλήρου ή μέρος της) σαν προπτυχιακή διατριβή ή Μ.Δ.Ε. ή ως μέρος Διδακτορικής Διατριβής σε αυτό ή άλλο Προπτυχιακό ή Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Ιδρυμάτων Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης του εσωτερικού ή του εξωτερικού. Όποια συνεργασία καθώς και το μέγεθος αυτής δηλώνονται επακριβώς στο αντίστοιχο πεδίο αυτής της διατριβής. Επίσης έχω διαβάσει όλες τις βιβλιογραφικές αναφορές που παρατίθενται στο τέλος.

Η Συγγραφέας

Ως επιβλέπουσα της έρευνας που περιγράφεται σε αυτή τη διατριβή, δηλώνω ότι όλοι οι όροι του Εσωτερικού Κανονισμού του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος έχουν τηρηθεί από την κα Αλβάρντ Αναστασία Μουραντιάν.

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγικά Στοιχεία	1
1.2 Ιστορικά στοιχεία	2
1.3 Υδροπονία	3
1.4 Υδατοκαλλιέργειες.....	3
1.5 Ενυδραιοπονία	4
1.6 Περιγραφή Συστημάτων Ενυδραιοπονίας	6
1.7 Φυτά και ψάρια σε συστήματα Ενυδραιοπονίας	7
1.7.1 Επιλογή φυτών	7
1.7.2 Επιλογή ψαριών.....	8
1.8 Ενυδραιοπονία και καταπόνηση	8
1.9 Σκοπός.....	9
2. Υλικά και Μέθοδοι	10
2.1 Συστήματα ενυδραιοπονίας	10
2.1.1 Μηχανικό φίλτρο.....	11
2.1.2 Βιολογικό φίλτρο.....	11
2.1.3 Αντλία νερού	12
2.1.4. Κλίνη φυτών- Βασιλικός.....	12
2.1.5 Δεξαμενή ψαριών -Γιλάπια	14
2.1.6 Τροφή ψαριών	16
2.2 Φυσικοχημικοί παράμετροι νερού.....	16
2.3 Πειραματικό μέρος.....	16
2.3.1 Αναπτυξιακές μετρήσεις	17
2.3.2 Φθορισμός χλωροφύλλης a in vivo	18
2.3.3 Ανακλαστικότητα.....	19
2.3.4 SPAD.....	20
2.3.5 Ολικά Φαινολικά.....	20
2.3.6 Χλωροφύλλες	21
2.3.7 Στατιστική ανάλυση	22
3. Αποτελέσματα	23
3.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά νερού.....	23
3.1.1 Θερμοκρασία, pH, EC και διαλυμένο οξυγόνο	23

3.1.2 TAN, NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻	24
3.2 Μορφολογικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά βασιλικού.....	25
3.2.1 Ύψος βασιλικού	25
3.2.2 Νωπό και ξηρό βάρος βασιλικού	26
3.2.3 Ανάπτυξη ιχθύων.....	28
3.3 Φθορισμός χλωροφύλλης a in vivo	29
3.4 Ανακλαστικότητα.....	32
3.4.1 Δείκτης PRI	32
3.4.2 Δείκτης ΔPRI.....	33
3.4.3 Δείκτης NDI	34
3.5 Μετρήσεις SPAD	34
3.6 Βιοχημικές μετρήσεις.....	35
3.6.1 Προσδιορισμός ολικών φαινολικών	35
3.6.2 Προσδιορισμός χλωροφυλλών	36
4. Συζήτηση.....	37

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1: Ο κύκλος του αζώτου σε ένα σύστημα ενυδρείοπονίας.....	5
Εικόνα 1.2: Τεχνικές ενυδρείοπονίας	7
Εικόνα 2.1: Ενυδρείοπονικό σύστημα	10
Εικόνα 2.2: Μηχανικό φίλτρο.....	11
Εικόνα 2.3: Υλικά πλήρωσης K1 στο βιολογικό φίλτρο	12
Εικόνα 2.4: Διογκωμένη έργιλος	13
Εικόνα 2.5: <i>Ocimum Basilicum</i>	13
Εικόνα 2.6: Λάμπα HPS και ανακλαστήρας.....	14
Εικόνα 2.7: Θέσεις των φυτών και PAR κάθε δεξαμενής.....	14
Εικόνα 2.8: Τιλάπια	15
Εικόνα 2.9: Πέτρες αερισμού	15
Εικόνα 2.10: Τελική συλλογή βασιλικού	17
Εικόνα 2.11: Φθορισμόμετρο συνεχούς διέγερσης Handy-pea.....	18
Εικόνα 2.12: Φασματοραδιόμετρο Jaz, Ocean Optics.....	19
Εικόνα 2.13: Όργανο SPAD	20

Πίνακας Γραφημάτων

Γράφημα 1: Μετρήσεις θερμοκρασίας	23
Γράφημα 2: Μετρήσεις pH.....	24
Γράφημα 3: Τιμές νιτρικών αλάτων	25
Γράφημα 4: Ύψος φυτών ανά δεξαμενή.....	26
Γράφημα 5: Μέτρηση νωπού βάρους φυλλώματος, βλαστού και ρίζας	27
Γράφημα 6: Μέτρηση ξηρού βάρους φυλλώματος, βλαστού και ρίζας.....	27
Γράφημα 7: Αρχική και τελική βιομάζα.....	28
Γράφημα 8: Καταγραφή ποσότητας τροφής ψαριών.....	28
Γράφημα 9: Καταγραφή βάρους ψαριών στα τρία συστήματα	29
Γράφημα 10: Παράμετρος φθορισμού Fv/Fm των συστημάτων.....	30
Γράφημα 11: Παράμετρος φθορισμού ABS/RC των συστημάτων	30
Γράφημα 12: Παράμετρος φθορισμού PI Total των συστημάτων.	31
Γράφημα 13: Παράμετρος φθορισμού 1-VI των συστημάτων.....	31
Γράφημα 14: Αποτελέσματα δείκτη PRI πριν την έναρξη της φωτοσύνθεσης.....	32

Γράφημα 15: Αποτελέσματα δείκτη PRI μετά την έναρξη της φωτοσύνθεσης	33
Γράφημα 16: Αποτελέσματα δείκτη ΔPRI	33
Γράφημα 17: Ο δείκτη NDI στα φυτά των τριών συστημάτων.....	34
Γράφημα 18: Δείκτης SPAD στα φυτά του βασιλικού.....	35
Γράφημα 19: Συγκέντρωση ολικών φαινολικών	35
Γράφημα 20: Συγκέντρωση φωτοσυνθετικών χρωστικών	36
Γράφημα 21: Συγκέντρωση συνολικών χλωροφυλλών	36

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Ο γνωστός Αμερικανός οικολόγος Howard T. Odum είχε κάνει την εξής αναφορά: «Η φύση έχει όλες τις απαντήσεις. Ποια είναι η ερώτηση;». Πράγματι, τη σημερινή εποχή πολλές ερωτήσεις θα μπορούσαν να αιωρούνται σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιωσιμότητα. Ο κόσμος αντιμετωπίζει ορισμένα σοβαρά προβλήματα, από τα οποία η αύξηση του πληθυσμού, η μεταβολή του κλίματος, η υποβάθμιση του εδάφους, η έλλειψη νερού και η επισιτιστική ασφάλεια είναι από τα πιο σημαντικά (Goddek *et al.*, 2015).

Τα τελευταία χρόνια, το κλίμα της γης αλλάζει ταχύτερα απ' ό,τι προβλεπόταν και αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Η Gilbert (2012) αναφέρει ότι το ένα τρίτο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προέρχεται από τη γεωργία. Τα παραγόμενα αέρια του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τη γεωργία είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και το μεθάνιο (CH₄). Σύμφωνα με τα σενάρια του Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007), οι μεγάλες συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου θα αυξήσουν τη θερμοκρασία σε όλον τον πλανήτη και κυρίως στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη, θα προκαλέσουν άνοδο της στάθμης της θάλασσας και θα επηρεάσουν μετεωρολογικά φαινόμενα όπως οι βροχοπτώσεις και η χιονόπτωση. Επομένως γίνεται εύκολα αντιληπτό πως μια από τις πιο σημαντικές δραστηριότητες που θα επηρεαστεί λόγω της κλιματικής αλλαγής, είναι η γεωργία. Εκείνο που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι πως μια τέτοια αποσταθεροποίηση του κλίματος θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα σοβαρές και απρόβλεπτες περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες.

Οι πληθυσμοί σε ολόκληρο τον κόσμο αντιμετωπίζουν σήμερα ζητήματα επισιτιστικής ασφάλειας σε κλίμακα που δεν έχει παρατηρηθεί στην πρόσφατη ανθρώπινη ιστορία. Πολλοί παράγοντες συμβάλλουν στα συγκεκριμένα ζητήματα, όπως η φτώχεια, η κακή γεωργική υποδομή, η υπερβολική εκμετάλλευση του περιβάλλοντος και η αύξηση του πληθυσμού. Ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται με το πέρασμα των χρόνων, με αποτέλεσμα η αύξηση των αναγκών σε τρόφιμα να μην μπορεί να καλυφθεί με την υπερεκμετάλλευση των φυσικών πόρων και της γης, ενώ

από την πλευρά της κατανάλωσης απαιτούνται σημαντικοί μετασχηματισμοί για τη βελτίωση της επισιτιστικής ασφάλειας. Οπότε, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ζήτηση για τρόφιμα εντείνει τις πιέσεις στους φυσικούς πόρους και τα οικοσυστήματα.

Η παραγωγή τροφής στο πλαίσιο της αειφορίας απαιτεί καινοτόμες ιδέες και χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, στοιχεία που χαρακτηρίζουν το εναλλακτικό σύστημα παραγωγής που ονομάζεται ενυδραιοπονία (aquaponics). Ο όρος ενυδραιοπονία αναφέρεται σε ένα σύστημα που ενσωματώνει δύο καλλιέργειες, τις υδατοκαλλιέργειες και την υδροπονία (Love *et al.*, 2015). Οι δύο αυτές καλλιέργειες γνωρίζουν εκτεταμένη χρήση στον κόσμο όχι μόνο για τις υψηλές αποδόσεις τους, αλλά και για την καλύτερη χρήση της γης και του νερού. Ο συνδυασμός τους έχει την δυνατότητα να παράγει λαχανικά και ψάρια και να μεγιστοποιεί σημαντικά την ποσότητα τροφίμων σε τοποθεσίες όπου η γεωργία στο έδαφος είναι, για διάφορους λόγους, αδύνατη. Συνεπώς, η συνεργασία των υδατοκαλλιεργειών με την υδροπονία συμβάλλει στη βελτίωση της βιωσιμότητας και επισιτιστικής ασφάλειας (FAO, 2014).

1.2 Ιστορικά στοιχεία

Η ενυδραιοπονία δεν αποτελεί μια νέα τεχνολογία, μιας και υπάρχουν ιστορικές αναφορές ότι πρωτοπαρουσιάστηκε στην κεντρική Αμερική και χρησιμοποιήθηκε από τον πολιτισμό των Αζτέκων (Chinampas) που κατοικούσαν στο κεντρικό Μεξικό το 1150-1350 π.Χ. (Turcios and Papenbrock, 2014). Στη δεκαετία του '70, οι ερευνητές του New Alchemy Institute North Carolina State University (USA) ανέπτυξαν τη βάση της σύγχρονης ενυδραιοπονίας (Goddek *et al.*, 2015). Ο Dr. James Rakocy, ο οποίος ξεκίνησε την καριέρα του στο Πανεπιστήμιο των Παρθένων Νήσων (UVI) στις ΗΠΑ, αποτελεί ίσως το πιο γνωστό παράδειγμα ερευνητή που έθεσε ως στόχο τη δημιουργία τεχνολογιών ενυδραιοπονίας (Aquaponics Noma, 2015). Στον τομέα αυτό είναι σταθερά κυρίαρχοι οι Καναδοί και Αμερικάνοι, ενώ οι Ολλανδοί φαίνεται να πρωτοπορούν στην Ευρώπη.

1.3 Υδροπονία

Με τον όρο υδροπονία (Hydroponics), εννοούμε την καλλιέργεια των φυτών που αναπτύσσονται χωρίς την παρουσία εδάφους. Αντ' αυτού χρησιμοποιείται θρεπτικό διάλυμα το οποίο περιέχει όλα τα θρεπτικά που χρειάζονται τα φυτά για να αναπτυχθούν. Υπάρχουν ορισμένες τεχνικές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή του θρεπτικού διαλύματος στο φυτό, όπως η καλλιέργεια χωρίς στερεό υπόστρωμα, δηλαδή καλλιέργεια σε ρέον θρεπτικό υλικό ή στάγδην αεριζόμενο, σε ανόργανο αδρανές υπόστρωμα (π.χ. ορυκτά ή αδρανή υλικά) και σε οργανικό υπόστρωμα (Benton Jones Jr, 1982). Η υδροπονία είναι η πλέον κατάλληλη μέθοδος για την καλλιέργεια φυτών σε περιοχές όπου το χώμα δεν είναι ιδιαίτερα γόνιμο. Η υδροπονική παραγωγή έχει γίνει αξιοσημείωτη στον τομέα της παραγωγής λαχανικών καθώς το 2004 υπήρχαν πάνω από 20.000 εκτάρια υδροπονικής παραγωγής λαχανικών θερμοκηπίου παγκοσμίως, με περισσότερα από 404,7 εκτάρια στις Ηνωμένες Πολιτείες, με την παραγωγή κυρίως ντομάτας, αγγουριού και πιπεριάς (Benton Jones Jr, 2016).

1.4 Υδατοκαλλιέργειες

Οι υδατοκαλλιέργειες αναφέρονται στην εκτροφή ψαριών και άλλων υδρόβιων ζώων υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Ο βασικός στόχος της είναι η άμεση παραγωγή αλιευμάτων ευρείας κατανάλωσης. Θεωρείται ότι βρίσκεται ανάμεσα στους ταχύτερα αναπτυσσόμενους κλάδους παραγωγής τροφίμων από τη δεκαετία του 1980, με μέσο ρυθμό ανάπτυξης 8,5% ετησίως τα τελευταία χρόνια, παρέχοντας περίπου το 50% όλων των ψαριών και των αλιευτικών προϊόντων για ανθρώπινη κατανάλωση (FAO, 2014). Υπάρχουν τέσσερις κύριες κατηγορίες υδατοκαλλιέργειας που περιλαμβάνουν τα ανοιχτά συστήματα ύδατος, τις λιμνοδεξαμενές ή υδατοσυλλογές καλλιέργειας, τα συγκοινωνούντα συστήματα καλλιέργειας και τα συστήματα επανακυκλοφορίας νερού (RAS). Στα συστήματα επανακυκλοφορίας, το νερό που βγαίνει από τις δεξαμενές της καλλιέργειας επαναχρησιμοποιείται καθαρισμένο και φιλτραρισμένο αντί να απελευθερώνεται και να χάνεται στο περιβάλλον όπως συμβαίνει στα συστήματα ανοιχτής ροής. Αν και το RAS δεν είναι το φθηνότερο σύστημα παραγωγής, θεωρείται ως ένας από τους πιο

αιφόρους τρόπους καλλιέργειας, έχοντας την δυνατότητα να αυξήσει σημαντικά την παραγωγικότητα ανά μονάδα επιφάνειας γης (FAO, 2014).

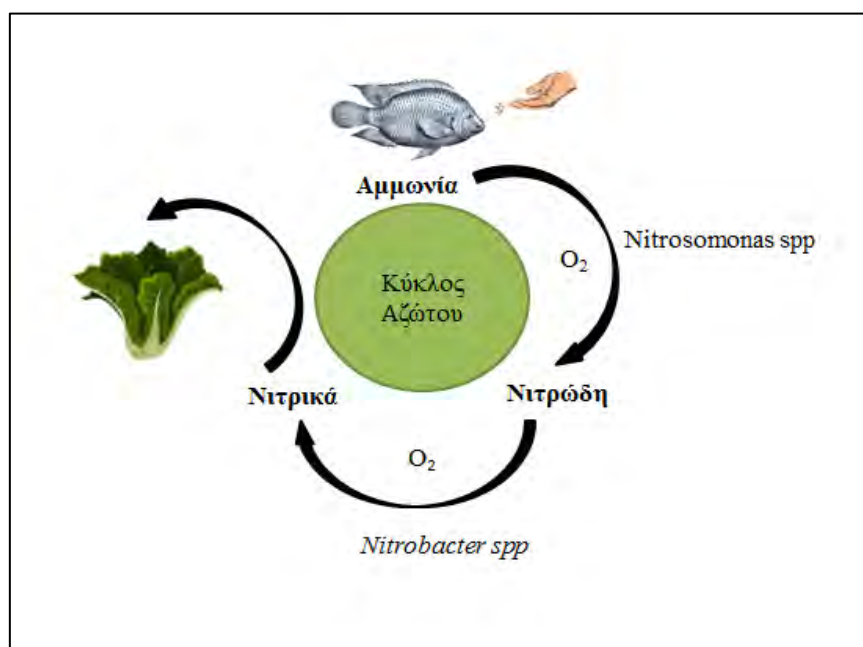
1.5 Ενυδραιοπονία

Η ενυδραιοπονία αναφέρεται σε συστήματα επανακυκλοφορίας νερού που εξασφαλίζουν την ταυτόχρονη καλλιέργεια φυτών και ψαριών (Rakocy, 1997). Ένα σύστημα ενυδραιοπονίας αποτελείται συνήθως από τη δεξαμενή των ψαριών, το υδροπονικό σύστημα, την αντλία, το μηχανικό και το βιολογικό φίλτρο (FAO, 2014). Ο βασικός σχεδιασμός του συστήματος στηρίζεται στην κυκλοφορία νερού από τη δεξαμενή των ψαριών διαμέσου ενός φίλτρου βακτηρίων προς το υδροπονικό τμήμα. Από τη δεξαμενή των ψαριών, το νερό με τα προϊόντα του μεταβολισμού τους ρέει προς το βιολογικό φίλτρο, όπου τα βακτήρια μετατρέπουν την τοξική για τα ψάρια αμμωνία σε νιτρικά ιόντα, τα οποία προωθούνται στη συνέχεια από τα φυτά καθαρίζοντας το νερό που καταλήγει στο ενυδρείο με τα ψάρια με σκοπό να επαναχρησιμοποιηθεί. Αν και το κόστος της ενυδραιοπονίας είναι 11,6% υψηλότερο - σε σχέση με την υδροπονία, υπόσχεται μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα καλλιέργειας (Delaide *et al.*, 2017).

Στην ενυδραιοπονία, δεν εμπλέκονται λιπάσματα ανάμειξης, ενώ το μόνο που θα πρέπει να πραγματοποιείται είναι το τάισμα των ψαριών. Σύμφωνα με τους Rakocy *et al.*, (2006) η φυσιολογία των ψαριών και η σύνθεση των ιχθυοτροφών από πρωτεΐνες είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών στο διάλυμα μέσα στο σύστημα. Οι ιχθυοτροφές πρέπει είναι πλούσιες σε πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, βιταμίνες και λιπίδια, γεγονός που καθιστά περιττή την προσθήκη υδροπονικών θρεπτικών διαλυμάτων (Aquaponics NOMA, 2015). Αντίθετα, παρέχουν τα περισσότερα από τα θρεπτικά συστατικά που απαιτούνται από τα φυτά, αν και απαιτείται κάποια συμπλήρωση με Ca, K και Fe (Rakocy *et al.*, 1997). Επομένως, τα περισσότερα θρεπτικά συστατικά μπορούν να προέρχονται από τη διατροφή των ψαριών μέσω των διαδικασιών της πέψης -και απέκκρισης (Tyson *et al.*, 2011). Τα ψάρια εκκρίνουν οργανικά απόβλητα με τη μορφή αμμωνίας στη δεξαμενή ψαριών. Ρόλο από εκεί και πέρα αναλαμβάνουν κοινότητες μικροοργανισμών που φιλοξενούνται στο βιολογικό φίλτρο και εμπλέκονται στην επεξεργασία και τη διαλυτοποίηση των αποβλήτων των ψαριών. Η

βιολογική διεργασία που πραγματοποιείται ονομάζεται νιτροποίηση και αποτελεί τη βασική διαδικασία για την απομάκρυνση της αμμωνίας, μέσω της μετατροπής της νιτρώδης και στη συνέχεια σε νιτρικό άλας (Rakocy *et al.*, 2006).

Οι μικροοργανισμοί του συστήματος είναι μια ομάδα αυτότροφων βακτηρίων (*Nitrosomonas*) που μετατρέπουν την αμμωνία (NH_3) σε νιτρώδη (NO_2^-) και στη συνέχεια ένα άλλο γένος νιτροποιητικών βακτηρίων (*Nitrobacter*) μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά (NO_3^-) (Rakocy *et al.*, 2006). Η αμμωνία και τα νιτρώδη θεωρούνται τοξικά για το σύστημα (Goddek *et al.*, 2015), ενώ τα νιτρικά είναι σχετικά ακίνδυνα και αποτελούν την εύκολα αφομοιώσιμη μορφή αζώτου για τα φυτά. Ο αερισμός είναι σημαντικός για την αποφυγή δημιουργίας αναερόβιων συνθηκών στο βιολογικό φίλτρο. Συνεπώς ο κύκλος του αζώτου σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας πραγματοποιείται με παρουσία οξυγόνου (Εικόνα 1.1). Η αποτελεσματικότητα της νιτροποίησης είναι υψηλότερη σε αλκαλικό διάλυμα, pH 7,5-8,0 αλλά χρησιμοποιείται ευρέως ένα εύρος pH 6,5-7 όπου και αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ των βακτηρίων και των φυτών (Savidon *et al.*, 2007).



Εικόνα 1.1: Ο κύκλος του αζώτου σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας

1.6 Περιγραφή Συστημάτων Ενυδρειοπονίας

Τα βασικά στοιχεία ενός ενυδρειοπονικού συστήματος είναι η δεξαμενή των ιχθύων, οι μονάδες φιλτραρίσματος, ένα υδροπονικό συστατικό και οι σωληνώσεις παροχής νερού (Rakocy *et al.*, 2006). Οι μονάδες φιλτραρίσματος αποτελούνται από μηχανικά φίλτρα για την απομάκρυνση στερεών σωματιδίων και από βιολογικά φίλτρα για τις προαναφερθείσες διεργασίες νιτροποίησης (FAO, 2014). Το μηχανικό φίλτρο απομακρύνει τα στερεά και αιωρούμενα απόβλητα και βοηθά στη διατήρηση της καλής ποιότητας του νερού ενώ το βιολογικό φίλτρο αποτελεί έναν χώρο που παρέχει στα βακτήρια που ζουν εκεί μεγάλες επιφάνειες, κατάλληλη θερμοκρασία, pH και επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου (Nelson, 2008) για να επεξεργαστούν τα μικροσκοπικά απόβλητα που δεν αφαιρέθηκαν από το μηχανικό φίλτρο. Για τη σωστή λειτουργία του βιολογικού φίλτρο χρειάζεται μια περίοδος εγκλιματισμού έτσι ώστε η νιτροποίηση να πραγματοποιείται αυτόματα. Συνήθως η εκκίνηση ενός νέου βιολογικού φίλτρου μπορεί να διαρκέσει έξι εβδομάδες ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία, διαλυμένο οξυγόνο, pH ή αλατότητα). Στη συνέχεια το νερό ρέει στη δεξαμενή της αντλίας και καταλήγει στην υδροπονική δεξαμενή.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές συστημάτων για την ενυδρειοπονία, τα οποία βασίζονται στα υδροπονικά συστήματα, με τη διαφορά ότι η πηγή ύδατος στην ενυδρειοπονία προέρχεται από τη δεξαμενή ψαριών και τελικά επιστρέφει σε αυτήν. Οι τρεις συνήθεις τύποι είναι το Media Filled Bed Systems (MFBS), Raft System (RAFT) ή Deep Water Culture (DWC) και Nutrient Film Technique (NFT) (Εικόνα 1.2). Η τεχνική MFBS αναφέρεται σε συστήματα που έχουν ένα μέσο καλλιέργειας ή αλλιώς ‘κλίνες’ όπου αναπτύσσονται μέσα τα φυτά (FAO, 2014). Η αναπτυσσόμενη κλίνη είναι ένας χώρος γεμάτος με αδρανές υπόστρωμα -περλίτη, χαλίκι, άργιλος, κ.α.- που χρησιμεύει στην υποστήριξη των ριζών και του μικροβιακού υποστρώματος (Goddek *et al.*, 2015). Η τεχνική RAFT αποτελείται από σανίδες ή σχεδίες πολυστυρενίου, οι οποίες έχουν μικρές τρύπες, στις οποίες τοποθετούνται μικρά γλαστράκια με τα φυτά και τις ρίζες τους να κρέμονται από κάτω (FAO, 2014). Οι σανίδες προστατεύουν το νερό από το ηλιακό φως, με αποτέλεσμα να υπάρχει ελάχιστη απώλεια νερού από την εξάτμιση, έχοντας σαν κέρδος τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Τέλος, η τεχνική NFT έχει να κάνει με την ανάπτυξη των φυτών σε στενά κανάλια όπου από κάτω οι ρίζες των φυτών έρχονται σε επαφή με μια λεπτή

μεμβράνη νερού που περιέχει όλα τα θρεπτικά που έχει ανάγκη. Επίσης, το σύστημα αυτό δεν είναι σταθερό λόγω της μικρής ποσότητας νερού και θεωρείται αναγκαία η παρουσία βιολογικού φίλτρου, μιας και δεν υπάρχει μεγάλη επιφάνεια όπου να αναπτύσσονται οι κοινότητες των ευεργετικών βακτηρίων (Nelson, 2008; Goddek et al., 2015).



Εικόνα 1.2: Τεχνικές ενυδρειοπονίας
1) Media Filled Bed Systems 2) Raft System 3) Nutrient Film Technique
Φωτογραφίες από: George Brooks, Mesa Community College, Mesa Arizona

1.7 Φυτά και ψάρια σε συστήματα Ενυδρειοπονίας

1.7.1 Επιλογή φυτών

Τα φυτά σε συστήματα ενυδρειοπονίας, έχει αποδειχθεί, ότι λύνουν πολλά προβλήματα σε σχέση με τις καλλιέργειες στην συμβατή γεωργία (Jones, 2002). Με την εξασφάλιση καλών περιβαλλοντικών συνθηκών όπως η θερμοκρασία, το pH, το φως και η σχετική υγρασία, η ενυδρειοπονία ως σύστημα μπορεί να υποστηρίξει ταχύτερη ανάπτυξη ενός φυτού. Μέχρι στιγμής περισσότερα από 150 είδη λαχανικών, αρωματικών φυτών, ανθοκομικών φυτών και μικρών δένδρων έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε συστήματα ενυδρειοπονίας και χρησιμοποιούνται. Οι πλέον αναπτυσσόμενες καλλιέργειες φυτών παγκοσμίως είναι αυτές του βασιλικού, της

μέντας, της ντομάτας, του μαρουλιού, του αγγουριού και της πιπεριάς και του σχοινόπρασου (Love *et al.*, 2015).

1.7.2 Επιλογή ψαριών

Το είδος των ψαριών που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα ενυδρειοπονίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, κυρίως τη θερμοκρασία, τα είδη των ψαριών στη συγκεκριμένη περιοχή, την ζήτηση από την αγορά και τον τύπο τροφής ψαριών που είναι διαθέσιμο στον καλλιεργητή (Nelson, 2008). Υπάρχουν διάφορα είδη ψαριών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ενυδρειοπονίας όπως είναι η τιλάπια, ο κυπρίνος, τα ψάρια ενυδρείου, η πέρκα, το λαβράκι, η πέστροφα, το γατόψαρο αλλά και οι γαρίδες και οι караβίδες (FAO, 2014; Love *et al.*, 2015). Ωστόσο στα περισσότερα συστήματα εκτρέφεται η τιλάπια. Η τιλάπια είναι ένα τροπικό ψάρι που προέρχεται από την Εγγύς Ανατολή και την Αφρική (Nelson, 2008) και είναι ικανό να προσαρμόζεται σε δεξαμενές, εμφανίζει δε υψηλή ανεκτικότητα σε διακυμάνσεις στα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου, τη θερμοκρασία, το pH και των διαλυμένων στερεών (Diver, 2006).

1.8 Ενυδρειοπονία και καταπόνηση

Η καταπόνηση στα φυτά ορίζεται ως ένας οποιοσδήποτε εξωτερικός παράγοντας. Έχει την ικανότητα να επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη, την παραγωγικότητα, την αναπαραγωγική ικανότητα και την επιβίωση του φυτού. Οι καταπονήσεις που δέχονται τα φυτά από το περιβάλλον διακρίνονται σε βιοτικές και αβιοτικές. Οι βιοτικές αναφέρονται σε καταπονήσεις από άλλους οργανισμούς όπως για παράδειγμα οι διάφοροι εχθροί (έντομα, ζώα, κ.α.) και ασθένειες (μύκητες, βακτήρια, ιοί κ.α.), ο ανταγωνισμός από παράσιτα και ζιζάνια. Οι αβιοτικές καταπονήσεις προκύπτουν από την αλληλεπίδραση του φυτού με το φυσικό ή χημικό περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται, με βασικότερες τις ακραίες θερμοκρασίες, την υπερβολική ή ανεπαρκή ακτινοβολία, την ξηρασία, την αλατότητα αλλά και από μηχανικούς παράγοντες όπως είναι οι άνεμοι, το χαλάζι κ.α.

Στον τομέα της υδροπονίας έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες καταπονήσεων σε φυτά. Σε κάποιες από αυτές έχουν διερευνηθεί οι επιδράσεις της θερμοκρασίας στην ρίζα του μαρουλιού (Sakamoto and Suzuki, 2015), στο σπανάκι (Chadirin *et al.*, 2011), οι επιδράσεις της αλατότητας στη φυσιολογία των φυτών (Negrao *et al.*,

2017). Αντίθετα στην ενυδραιοπονία, έχουν δημοσιευθεί έως τώρα ελάχιστες εργασίες για την φυσιολογία των φυτών ύστερα από κάποιου είδους καταπόνηση. Σε ένα σύστημα ενυδραιοπονίας, οι Mangmang *et al.* (2015) μελέτησαν την επίδραση του *Azospirillum brasilense* σε βασιλικό, οι Geisenhoff *et al.* (2016) αξιολόγησαν την επίδραση δύο διαφορετικών υποστρωμάτων στο μαρούλι και οι Beauchamp *et al.* (2018) προσδιόρισαν την ανεκτικότητα του μαρουλιού σε διάφορα επίπεδα αλατότητας.

1.9 Σκοπός

Με βάση τις παραπάνω μελέτες διαφαίνεται η αναγκαιότητα για περαιτέρω έρευνα γύρω από την φυσιολογική κατάσταση ενός φυτού σε συστήματα ενυδραιοπονίας. Ο σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η εκτίμηση των πιθανών καταπονήσεων που εμφανίζονται σε φυτά βασιλικού κατά τα διάδοχα αναπτυξιακά τους στάδια σε σύστημα ενυδραιοπονίας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη καλλιέργεια πλατύφυλλου βασιλικού με τιλάπια σε πλήρως ελεγχόμενες-μη καταπονητικές- περιβαλλοντικές συνθήκες στους εργαστηριακούς χώρους ενυδραιοπονίας της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

2. Υλικά και Μέθοδοι

Το πείραμα διεξήχθη στους εργαστηριακούς χώρους ενυδρειοπονίας της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και διήρκεσε 56 ημέρες, από τις 3 Ιουλίου μέχρι τις 28 Αυγούστου 2018.

2.1 Συστήματα ενυδρειοπονίας

Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τρία συστήματα ενυδρειοπονίας. Το κάθε σύστημα αποτελούνταν από μια δεξαμενή ψαριών χωρητικότητας 400 L, μια δεξαμενή ή κλίνη φυτών 200 L που βρισκόταν στο πάνω μέρος της δεξαμενής των ψαριών και τρεις κυλινδρικές δεξαμενές χωρητικότητας 60 L, όπου αποτέλεσαν το μηχανικό και βιολογικό φίλτρο, και την αντλία νερού (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: α) Δεξαμενή φυτών β) Δεξαμενή ψαριών γ) Μηχανικό φίλτρο
δ) Βιολογικό φίλτρο ε) Αντλία νερού

2.1.1 Μηχανικό φίλτρο

Η πρώτη στάση του νερού που απορρέει από τη δεξαμενή των ψαριών είναι το μηχανικό φίλτρο. Το μηχανικό φίλτρο ή φίλτρο καθίζησης (Εικόνα 2.2) έχει ως στόχο την αφαίρεση των στερεών αποβλήτων (Goddek *et al.*, 2015). Στο εσωτερικό τους βρίσκονται σφουγγάρια (υαλοβάμβακας και μηχανικό φίλτρο EHEIM) που συγκρατούν τα σωματίδια. Όσο πιο γρήγορα απομακρύνονται τα στερεά από το κύριο σύστημα, τόσο λιγότερες οι πιθανότητες να διασπώνται σε μικρότερα σωματίδια, που είναι πιο δύσκολα διαχειρίσιμα. Για αυτό το λόγο, τα μηχανικά φίλτρα γενικά τοποθετούνται μετά τις δεξαμενές ψαριών και πριν από το βιολογικό φίλτρο, ώστε να απομακρύνουν τα στερεά που προέρχονται από περιττώματα ψαριών ή ιχθυοτροφές που δεν καταναλώθηκαν από τα ψάρια (FAO, 2014).



Εικόνα 2.2: Μηχανικό φίλτρο

2.1.2 Βιολογικό φίλτρο

Το νερό, απαλλαγμένο από τα στερεά απόβλητα, καταλήγει στη συνέχεια στο βιολογικό φίλτρο. Στο χώρο αυτό πραγματοποιείται διεργασία μετατροπής της διαλυμένης αμμωνίας, ενός τοξικού μεταβολίτη που εκκρίνεται από τα ψάρια, σε μια αβλαβή νιτρική ένωση. Η επεξεργασία αυτή πραγματοποιείται από βακτήρια που προστίθενται στο βιολογικό φίλτρο και αποικούν σε υλικά πλήρωσης K1 (Εικόνα 2.3). Τα συστήματα ήταν ήδη ενεργά και δεν χρειάστηκε χρόνο προσαρμογής για τα

βακτήρια όπως συνήθως γίνεται, παρόλα αυτά προστέθηκε, δυο φορές κατά την διάρκεια του πειράματος (76 mL συνολικά), ποσότητα από το προϊόν API STRESS ZYME που διαθέτει εκατομμύρια ζωντανά βακτήρια που καταναλώνουν οργανική ύλη. Τα ευεργετικά βακτήρια βασίζονται σε μια σταθερή παροχή οξυγόνου για να λειτουργούν αποτελεσματικά, για αυτό το λόγο τοποθετήθηκαν δύο πέτρες αερισμού.



Εικόνα 2.3: Υλικά πλήρωσης K1 στο βιολογικό φίλτρο

2.1.3 Αντλία νερού

Ολοκληρώνοντας την ανακύκλωση του το νερό, καταλήγει στη δεξαμενή με την αντλία του νερού, εμπλουτισμένο πια με νιτρικά, τα οποία τροφοδοτούν την ανάπτυξη των φυτών. Το νερό από τη δεξαμενή της αντλίας καταλήγει στην υδροπονική κλίση που βρίσκονται τα φυτά, και στη δεξαμενή των ψαριών.

2.1.4. Κλίση φυτών - Βασιλικός

Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε στην κλίση των φυτών ήταν η διογκωμένη άργιλος (Εικόνα 2.4), η οποία έχει στρογγυλό σχήμα και είναι αρκετά ελαφριά σε σχέση με άλλα υποστρώματα, έχοντας διάμετρο 8-20 mm (FAO, 2014).

Για την πραγματοποίηση του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε ο πλατύφυλλος βασιλικός (*Ocimum basilicum*) (Εικόνα 2.5). Τα ομοιόμορφα αρτίβλαστα αγοράστηκαν από τοπικό φυτώριο και μεταφέρθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου στις

28 Ιουνίου 2018. Παρέμειναν εκεί για 3 μέρες μέσα στα γλαστράκια τους, ώσπου ξεπλύθηκαν οι ρίζες προσεκτικά από το χώμα και στη συνέχεια μεταφυτεύτηκαν στο σύστημα της ενυδρειοπονίας στις 3 Ιουλίου 2018. Σε κάθε σύστημα τοποθετήθηκαν επτά φυτά βασιλικού.



Εικόνα 2.4: Διογκωμένη άργιλος



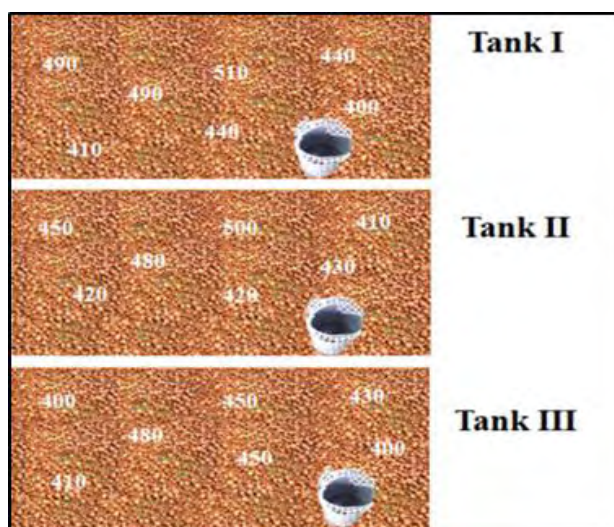
Εικόνα 2.5: *Ocimum basilicum*

Πάνω από την υδροπονική κλίνη των φυτών ήταν κρεμασμένη μια λάμπα HPS (High Pressure Sodium) των 400W, μαζί με έναν ανακλαστήρα (Εικόνα 2.6). Η φωτοπερίοδος ορίστηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φυτού και της εποχής, δηλαδή 14,5 ώρες πλήρους φωτισμού και 9,5 ώρες σκοτάδι.



Εικόνα 2.6: Λάμπα HPS και ανακλαστήρας

Οι θέσεις των φυτών καθορίστηκαν από την μέτρηση της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας PAR (Photosynthetically Active Radiation), το οποίο είχε εύρος 400-500 nm εξασφαλίζοντας βέλτιστες συνθήκες φωτός για τη φωτοσύνθεση των φυτών (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Θέσεις των φυτών και PAR κάθε δεξαμενής

2.1.5 Δεξαμενή ψαριών -Τιλάπια

Στο πείραμα, χρησιμοποιήθηκαν τιλάπιες του είδους *Oreochromis niloticus* (Εικόνα 2.8) ηλικίας τριών ετών. Τα ψάρια αυτά πριν χρησιμοποιηθούν για το

πείραμα, αναισθητοποιήθηκαν με φαινοξυαιθανόλη 0,5-0,8 mL σε 5 L νερό και ζυγίστηκαν. Τα ψάρια μοιράστηκαν με τυχαία κατανομή στις δεξαμενές.



Εικόνα 2.8: Τιλάπια

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 23 ψάρια (16 αρσενικά, 7 θηλυκά), τα οποία μοιράστηκαν στις δεξαμενές I, II και III από 8, 7 και 8 αντίστοιχα. Τα βάρη των ψαριών που μοιράστηκαν στις δεξαμενές I, II και III ήταν 363 ± 124 g, 379 ± 126 g και 411 ± 149 g αντίστοιχα. Τέλος, σε κάθε δεξαμενή ψαριών τοποθετήθηκαν τέσσερις πέτρες αερισμού (Εικόνα 2.9) κατά μήκος όλης της δεξαμενής των ψαριών.



Εικόνα 2.9: Πέτρες αερισμού

2.1.6 Τροφή ψαριών

Τα ψάρια ταΐζονταν δύο φορές την ημέρα, μέχρι κορεσμού. Η διαδικασία του ταΐσματος κρατούσε μισή ώρα, μιας και η τροφή δινόταν σε μικρές ποσότητες και πολλές φορές. Τις Κυριακές πραγματοποιούνταν ασιτία. Η κοκκομετρική (3 mm) σύσταση της τροφής αποτελούταν από 44,0 % από ολικές αζωτούχες ενώσεις, 17,8 % ολικές λιπαρές ουσίες, 3,2 % ολικές ινώδεις ουσίες, 8,0 % ολική τέφρα, 1,18% φώσφορο, 1,23 % ασβέστιο και 0,23% νάτριο.

2.2 Φυσικοχημικοί παράμετροι νερού

Όλες οι παρακάτω καταγραφές φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού πραγματοποιήθηκαν με δειγματοληψία από τις δεξαμενές των ψαριών. Καθημερινά καταγράφονταν η θερμοκρασία, το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) με πεχάμετρο και αγωγιγόμετρο (HM DIGITAL), όπου το όργανο βυθιζόταν περίπου τρία εκατοστά για 5-10 δευτερόλεπτα μέχρι να σταθεροποιηθεί η τιμή. Μια φορά τη βδομάδα γινόταν καταγραφή της συγκέντρωσης του οξυγόνου (O_2) και του κορεσμού (O_2 %) με ψηφιακό οξυγονόμετρο (HACH, HQ40d). Επίσης μια φορά την εβδομάδα μετρούταν η ολική αμμώνια (TAN), η συγκέντρωση νιτρωδών (NO_2^-) και νιτρικών ιόντων (NO_3^-), καθώς και η συγκέντρωση σιδήρου (Fe) και φωσφορικών (PO_4). Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των χρωματομετρικών τεστ της εταιρίας API.

2.3 Πειραματικό μέρος

Την Τρίτη 3 Ιουλίου, οι βασιλικοί μπάχαν στο σύστημα καταγράφοντας την ημέρα 0 του πειράματος. Στο χώρο του εργαστηρίου λειτουργούσαν τρία κλιματιστικά εικοσιτέσσερις ώρες το εικοσιτετράωρο στους 25 °C. Στο σύστημα προστέθηκε KH_2PO_4 για τη μείωση του pH και την προσθήκη καλίου. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 10 g ανά σύστημα KH_2PO_4 σε 1,5 L νερό από την αντλία του συστήματος και αναδεύτηκε όπου στη συνέχεια προστέθηκε σε όλο την υδροπονική κλίνη γύρω από τη κόμη του κάθε φυτού. Επίσης προστέθηκε Fe DTPA 7%, όπου χρησιμοποιήθηκαν 9 g ανά σύστημα Fe DTPA 7% σε 1 L νερό και αναδεύτηκε. Στη συνέχεια προστέθηκε στην υδροπονική κλίνη με τον ίδιο τρόπο

όπως στο KH_2PO_4 . Η προσθήκη των θρεπτικών πραγματοποιήθηκε τρεις φορές για το σίδηρο και δυο φορές για το κάλιο. Επίσης, πραγματοποιήθηκε μια φορά αλλαγή νερού στα συστήματα γύρω στο 12% του συνολικού όγκου της δεξαμενής την ημέρα 28 του πειράματος.

2.3.1 Αναπτυξιακές μετρήσεις

Κατά την έναρξη του πειράματος πραγματοποιήθηκαν αρχικές μετρήσεις νωπού και ξηρού βάρους στα φυτά δεν συμμετείχαν στο πείραμα. Επίσης, μετρήθηκαν τα αρχικά βάρη των ψαριών από κάθε δεξαμενή. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, μετρήθηκε το ύψος των βασιλικών τρεις φορές συνολικά.

Κατά την τελική συλλογή, κόπηκε το υπέργειο μέρος του βασιλικού με τη ρίζα να παραμένει στο εσωτερικό της κλίνης με την διογκωμένη άργιλο. Στη συνέχεια, το φυτό, διαχωρίστηκε σε δύο ίσα μέρη κατά τον κάθετο άξονα. Μετρήθηκε αμέσως το νωπό βάρος και των δύο πλευρών του φυτού, και μετέπειτα το ένα μέρος αποθηκεύτηκε στους $-20\text{ }^\circ\text{C}$, και το άλλο μέρος κατευθύνθηκε στο φούρνο για να εκτιμηθεί η τελική βιομάζα. Οι βασιλικοί παρέμειναν στον φούρνο στους $80\text{ }^\circ\text{C}$ για τρεις μέρες και στη συνέχεια ζυγίστηκαν για να βρεθεί η τελική βιομάζα (Εικόνα 2.10). Τέλος μετρήθηκαν τα τελικά βάρη των ψαριών όπου στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε δύο κιβώτια από διογκωμένη πολυστερίνη (φελιζόλ) με πάγο.



Εικόνα 2.10: 1) Κοπή υπέργειου μέρους 2) Ζύγισμα βασιλικού 3) Τοποθέτηση στο φούρνο

2.3.2 Φθορισμός χλωροφύλλης a in vivo

Ο φθορισμός χλωροφύλλης a in vivo είναι μια μη επεμβατική μέτρηση της δραστηριότητας του φωτοσυστήματος II (PSII) και είναι μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές στη φυσιολογία των φυτών λόγω της ευκολίας με την οποία ο χρήστης μπορεί να αποκτήσει λεπτομερείς πληροφορίες (Murchie and Lawson, 2013). Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με το φθορισμόμετρο συνεχούς διέγερσης Handy-PEA (Hansatech Instruments Ltd, King's Lynn, Norfolk, UK) (Εικόνα 2.11). Το όργανο αυτό, αποτελείται από την κεντρική μονάδα και μια κεφαλή με τρεις λαμπτήρες τύπου LED που προσαρμόζεται σε ειδικούς υποδοχείς (leaf clips). Ο υποδοχέας τοποθετείται στο φύλλο που θα μετρηθεί και στη συνέχεια η κεφαλή τοποθετείται στον υποδοχέα.



Εικόνα 2.11: Φθορισμόμετρο συνεχούς διέγερσης Handy-Pea

Απαραίτητη προϋπόθεση αυτής της αρχής λειτουργίας είναι ο φωτοσυνθετικός ιστός να μη δέχεται ακτινοβολία, για αυτό το λόγο οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τις πρωινές ώρες, πριν ανοίξουν οι λαμπτήρες. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε πέντε φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος, σε δύο φύλλα ανά φυτό (ώριμο και νεαρό), συνολικά σε επτά φυτά να σύστημα.

Οι παράμετροι που καταγράφονταν ήταν:

- Fv/Fm: μέγιστη φωτοχημική απόδοση του PSII
- ABS/RC: απορροφούμενη ροή φωτονίων ανά δραστικό ενεργό κέντρο στο PSII
- PI total: δείκτης απόδοσης της μετατροπής ενέργειας από τα φωτόνια που απορροφώνται από τη φωτοσυλλεκτική κεραία του PSII έως την αναγωγή των τελικών αποδεκτών του φωτοσυστήματος I (PSI)
- 1-VI: συνολικό απόθεμα ενεργών κέντρων του PSI

2.3.3 Ανακλαστικότητα

Η μέτρηση της ανακλαστικότητας έγινε με τη χρήση φορητού φασματοραδιόμετρου (JAZ, Ocean Optics), που παρέχει τη δυνατότητα πολλαπλών μετρήσεων σε μικρές επιφάνειες του προς μελέτη φυτικού ιστού (Εικόνα 2.12). Το φασματοραδιόμετρο αποτελείται από την κεντρική μονάδα και ένα μεγάλο υποδοχέα που μοιάζει σα ‘μανταλάκι’ όπου συγκρατεί το φύλλο για τη μέτρηση. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε πέντε φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος, μία το πρωί πριν ξεκινήσει η φωτοσύνθεση, και μια το μεσημέρι, σε ένα φύλλο ανά φυτό, και συνολικά σε επτά φυτά ανά σύστημα.



Εικόνα 2.12: Φασματοραδιόμετρο JAZ, Ocean Optics

Οι παράμετροι που μετρήθηκαν ήταν:

- PRI : Photochemical Reflectance Index, $PRI = (R531-R570) / (R531+R570)$
Δείκτης φωτοσυνθετικής απόδοσης (Penueles *et al.*, 1995)
- ΔPRI: PRI(μεσημέρι) - PRI(πρωί) (Κονάκ *et al.*, 2018)
- NDI: Normalised Difference Index, $NDI = (R750-R705) / (R750+R705)$
Δείκτης συνολικής συγκέντρωσης χλωροφυλλών (Gitelson & Merzlyak, 1994).

2.3.4 SPAD

Τα επίπεδα της χλωροφύλλης μετρήθηκαν από το όργανο SPAD (Εικόνα 2.13), δηλαδή ένα φορητό χλωροφυλλόμετρο (SPAD-502, Minolta Co Ltd), όπου οι προκύπτουσες τιμές είναι ανάλογες της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης στα φύλλα. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε πέντε φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος σε πέντε φύλλα ανά φυτό, σε επτά φυτά ανά σύστημα.



Εικόνα 2.13: Όργανο SPAD

2.3.5 Ολικά Φαινολικά

Τα ολικά φαινολικά είναι αμυντικές ουσίες που συνθέτει το φυτό όταν καταπονείται. Για τη μέτρηση των φαινολικών κατά την τελική συλλογή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Folin-Ciocalteu (Waterman and Mole, 1994). Μετρήθηκαν δείγματα από περίπου 2 φύλλα ανά φυτό, επτά φυτά ανά σύστημα. Για την πραγματοποίηση της χρειάστηκε μεθανόλη 50% (6 mL / δείγμα), αντιδραστήριο Folin-Ciocalteu (0,25 mL / δείγμα) και διάλυμα Na_2CO_3 (20 g σε 100 mL νερού).

Κατά την εκχύλιση τοποθετήθηκε 50 mg κονιορτοποιημένου ξηρού δείγματος σε πλαστικούς δοκιμαστικούς σωλήνες και προστέθηκε 6 mL υδατικού διαλύματος μεθανόλης 50%. Στη συνέχεια επώαστηκαν στο υδρόλουτρο στους 40 °C για 1 ώρα, υπό ήπια ανάδευση. Τα δείγματα μετά από μία ώρα τοποθετήθηκαν σε νέους μικρούς δοκιμαστικούς σωλήνες αφού πρώτα αναδεύτηκαν στο Vortex.

Επόμενο βήμα, ήταν η προσθήκη 3,95 mL απιονισμένου νερού, 0,05 mL υπερκείμενου και 0,25 mL αντιδραστηρίου Folin-Ciocalteu με πιπέτες σε μεγάλους δοκιμαστικούς σωλήνες. Στη φάση αυτή, φτιάχτηκε σε ένα δοκιμαστικό σωλήνα και το τυφλό, το οποίο είχε τις παραπάνω ουσίες εκτός από το υπερκείμενο, και στη θέση του προστέθηκε 0,05 mL υδατικού διαλύματος μεθανόλης 50%. Οι δοκιμαστικοί σωλήνες αναδεύτηκαν στο Vortex και στη συνέχεια προστέθηκαν 0,75 mL ανθρακικού νατρίου (Na_2CO_3). Πραγματοποιήθηκε ανάδευση στο Vortex και στη συνέχεια τα δείγματα επώαστηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για 2 ώρες με συνεχές αναδεύσεις στο Vortex. Μετά την ολοκλήρωση των 2 ωρών, σε 1-8 λεπτά πρέπει να καταγραφεί η απορρόφηση των δειγμάτων στα 760 nm φασματοφωτόμετρο Optizen Pop.

2.3.6 Χλωροφύλλες

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των φωτοσυνθετικών χρωστικών κατά την τελική συλλογή χρησιμοποιήθηκαν δείγματα φύλλων που φυλάσσονταν στην κατάψυξη (-20 °C). Μετρήθηκαν δείγματα από ένα φύλλο ανά φυτό, και συνολικά από επτά φυτά ανά σύστημα. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ακετόνη 80% (6 mL ανά δείγμα). Η διαδικασία ξεκίνησε με την εκχύλιση όπου προστέθηκε ακετόνη 80% και απιονισμένο νερό σε ένα ποτήρι ζέσεως και σφραγίστηκε με παραφίλμ για να μην εξατμιστεί. Αμέσως, ένα φύλλο από ένα δείγμα, από την κατάψυξη, μεταφέρθηκε στον πάγκο, και με ένα φελλοτρυπητήρα N° 5 με επιφάνεια 0,64 cm², κόπηκαν δύο τμήματα του φύλλου, μια από την αριστερή και μια από τη δεξιά πλευρά της κεντρικής νεύρωσης και τοποθετήθηκαν σε ένα γουδί πορσελάνης. Στο γουδί επίσης προστέθηκαν CaCO_3 , άμμο (ελάχιστες ποσότητες με το κουτάλι), 0,5 mL ακετόνης και χτυπήθηκαν με το γουδοχέρι με γρήγορες περιστροφικές κινήσεις. Προστέθηκε ξανά ακετόνη σε μικρές ποσότητες μέχρι να φτάσουν τα 6 mL και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν σε σωλήνες φυγόκεντρο. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε για κάθε δείγμα ξεχωριστά. Το επόμενο βήμα ήταν η τοποθέτηση τους στη φυγόκεντρο για 10 λεπτά στις 4000 στροφές. Η καταγραφή των

απορροφήσεων των δειγμάτων στα 470, 646, 663, 720 nm πραγματοποιήθηκε στο φασματοφωτόμετρο Optizen Pop του εργαστηρίου της Αναλυτικής Χημείας και Γεωργικής Φαρμακολογίας.

2.3.7 Στατιστική ανάλυση

Οι φυσιολογικές και αναπτυξιακές παράμετροι των φυτών ελέγχθηκαν για στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ συστημάτων ($p < 0.05$) με One-way ANOVA, ακολουθούμενη από Tukey Post Hoc test. Η στατιστική ανάλυση έγινε με την χρήση του στατιστικού πακέτου IBM SPSS Statistics, v.24 (IBM corp.).

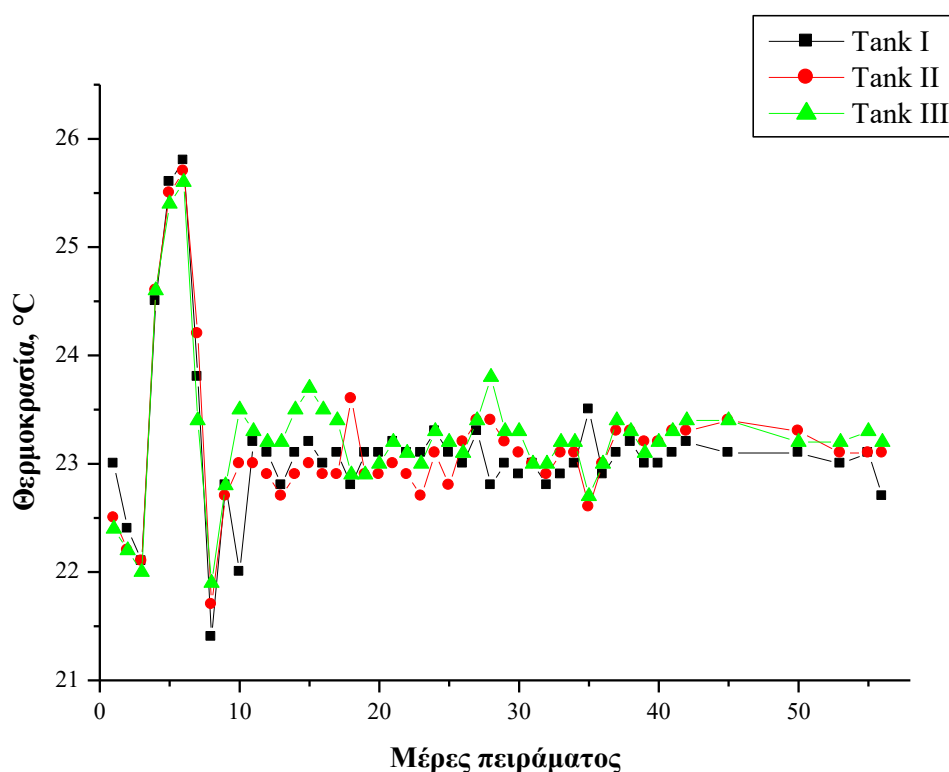
3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως διαφορές μεταξύ των δεξαμενών του πειράματος, εξυπηρετώντας παράλληλα με τους σκοπούς του πειράματος και την χαρτογράφηση πιθανών διαφορών στις αποκρίσεις των φυτών που αναπτύσσονται στα τρία διαφορετικά συστήματα.

3.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά νερού

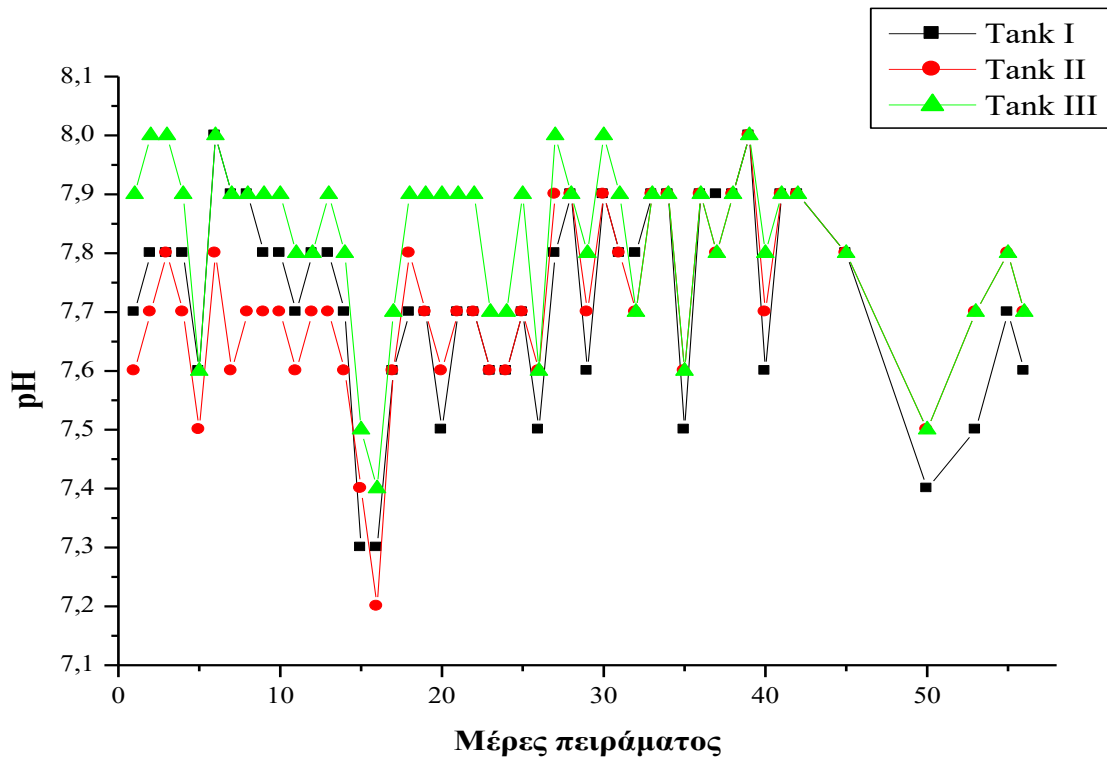
3.1.1 Θερμοκρασία, pH, EC και διαλυμένο οξυγόνο

Η θερμοκρασία του νερού κυμάνθηκε στους $23,1\pm 0,68$ °C. Πιο συγκεκριμένα στο Γράφημα 1 φαίνεται η θερμοκρασία και στις τρεις δεξαμενές.



Γράφημα 1: Η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του πειράματος στα τρία συστήματα

Το pH κυμάνθηκε στα τρία συστήματα στο $7,7\pm 0,1$. Δεν υπήρξαν έντονες μεταβολές μετά την προσθήκη του KH_2PO_4 σε αντίθεση με την ανανέωση του νερού (καθαρισμός συστημάτων), όπου βοήθησε παροδικά για τη μείωση του. Στο Γράφημα 2 φαίνεται το pH και στις τρεις δεξαμενές αναλυτικά.

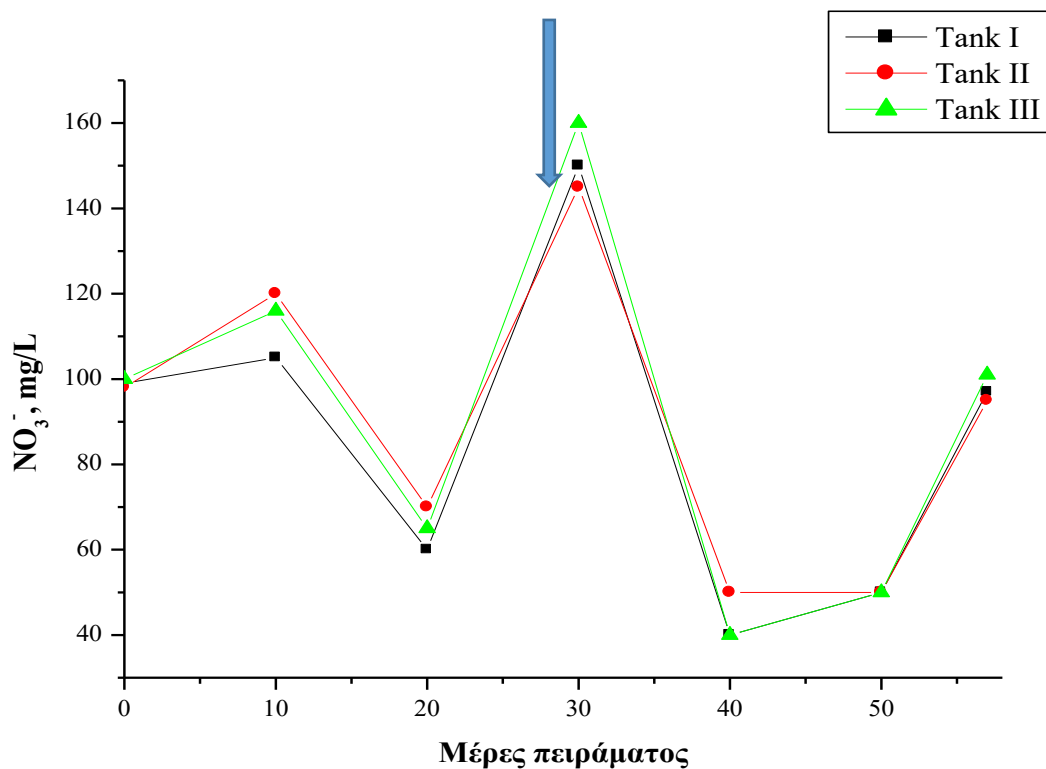


Γράφημα 2: Μετρήσεις pH κατά τη διάρκεια του πειράματος στα τρία συστήματα

Τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου καθώς και τα ποσοστά κορεσμού του διατηρήθηκαν στα $6,76 \pm 0,18$ mg/L και $79,7 \pm 1,28$ % αντίστοιχα καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Τέλος, η ηλεκτρική αγωγιμότητα κυμάνθηκε στα συστήματα $1,13 \pm 0,07$ mS/cm.

3.1.2 TAN, NO_2^- , NO_3^-

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, μετρήθηκαν η ολική αμμωνία (TAN), τα νιτρώδη άλατα (NO_2^-) και τα νιτρικά άλατα (NO_3^-). Από την πρώτη μέρα η TAN ($\text{NH}_3^-/\text{NH}_4^+$) ήταν σταθερή στους 0,25 mg/L. Οι τιμές των NO_2^- στα συστήματα παρέμειναν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος με τις τιμές να είναι κοντά στο 0 mg/L. Οι τιμές NO_3^- δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα συστήματα (Γράφημα 3). Υπήρχαν κάποιες διακυμάνσεις στις τιμές των νιτρικών όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, καθώς μετά την 30ή μέρα του πειράματος μειώθηκαν δραματικά και στα τρία συστήματα. Στο γράφημα φαίνεται ότι λίγες μέρες πριν τη πτώση των νιτρικών είχε πραγματοποιηθεί αλλαγή νερού στα συστήματα.

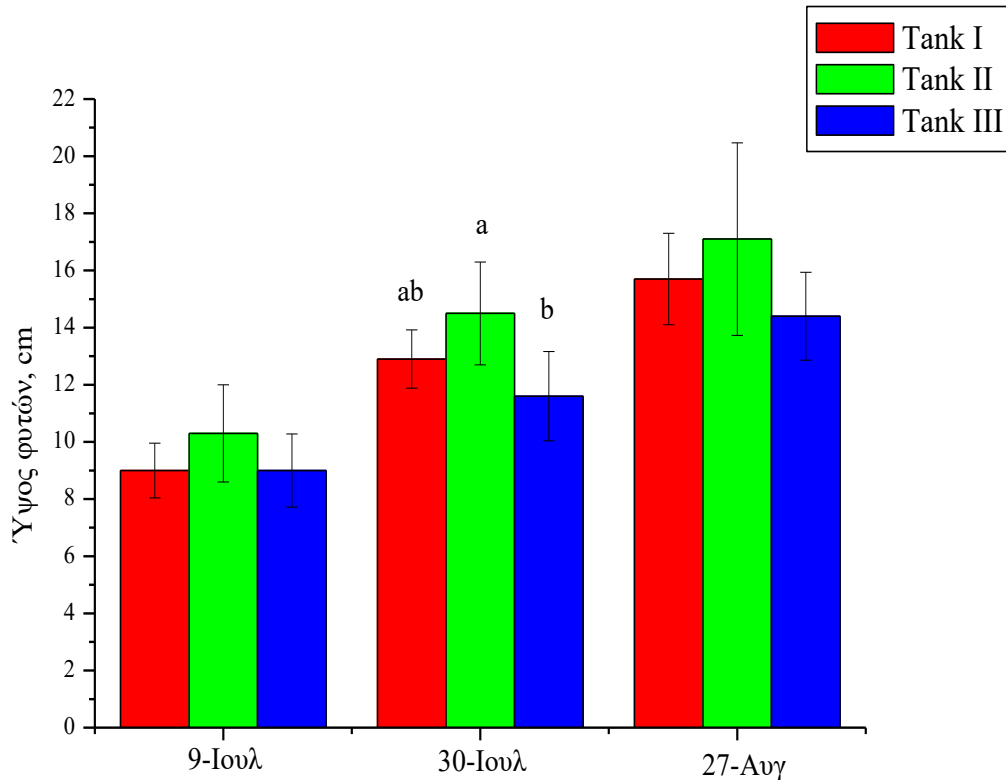


Γράφημα 3: Τιμές νιτρικών αλάτων κατά τη διάρκεια του πειράματος στα τρία συστήματα. Το βελάκι στο σημείο εκείνο δείχνει τη μέρα που πραγματοποιήθηκε η αλλαγή νερού στα τρία συστήματα.

3.2 Μορφολογικά και αναπτυξιακά χαρακτηριστικά βασιλικού

3.2.1 Ύψος βασιλικού

Το ύψος των φυτών ανά δεξαμενή μετρήθηκε τρεις φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος τις μέρες 6, 27 και 55 αντίστοιχα, παρακολουθώντας την αύξηση του φυτού. Η τάση που υπήρχε από την αρχή του πειράματος διατηρήθηκε μέχρι την τελική συλλογή, με τα φυτά στη δεξαμενή II να είναι τα πιο ψηλά. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές εμφανίστηκαν στην ενδιάμεση μέτρηση, όχι όμως και στην τελική. (Γράφημα 4).

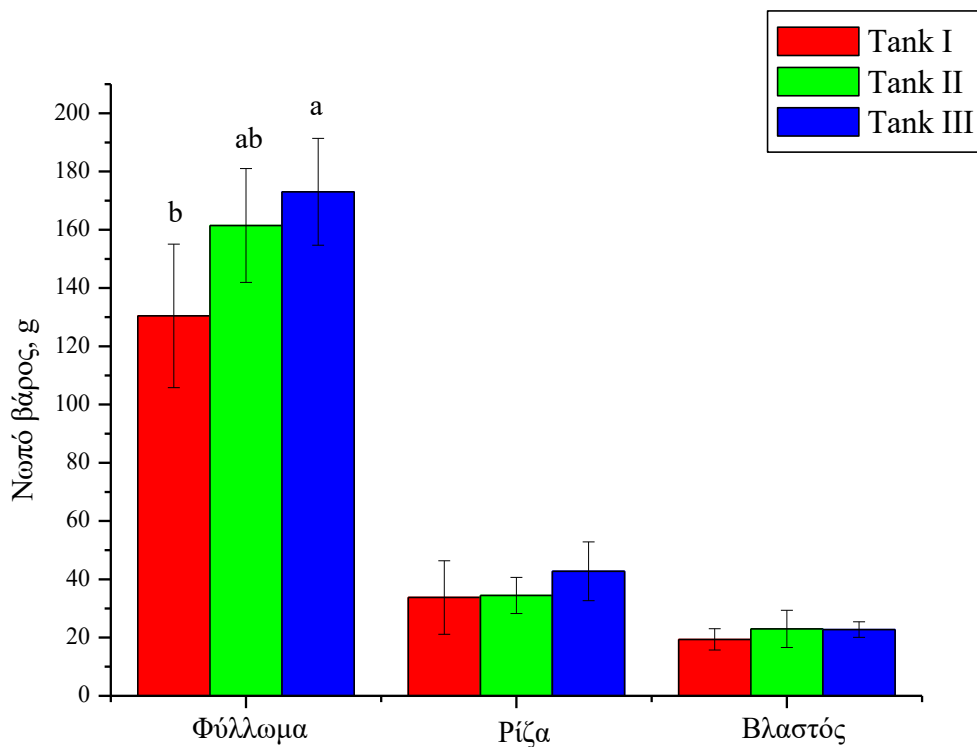


Γράφημα 4: Ύψος φυτών ανά δεξαμενή σε τρεις διαφορετικές μετρήσεις (Μ.Ο.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0,05$.

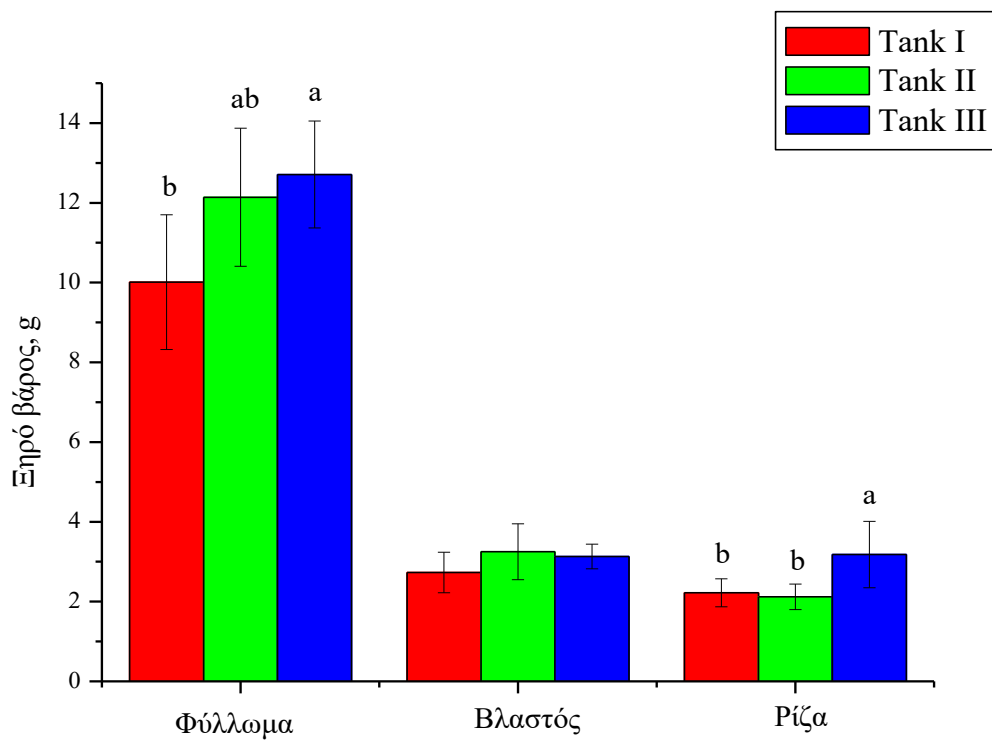
3.2.2 Νωπό και ξηρό βάρος βασιλικού

Κατά τη τελική συλλογή των φυτών ζυγιστήκαν τα νωπά βάρη του φυλλώματος, του βλαστού και της ρίζας. Το νωπό βάρος του φυλλώματος στο σύστημα III είχε βάρος $173 \pm 18,34$ g και είχε στατιστικώς σημαντική διαφορά με το νωπό βάρος της δεξαμενής I που είχε βάρος $130,43 \pm 24,65$ g. Η ρίζα και ο βλαστός δεν είχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους στα τρία συστήματα (Γράφημα 5).

Στην αρχή του πειράματος 8 φυτά βασιλικού τοποθετήθηκαν στον φούρνο για τη μέτρηση της ξηρής μάζας τους. Η ίδια μέτρηση έγινε και στο τέλος του πειράματος όπου τα φυτά χωρίστηκαν σε φύλλωμα, βλαστό και ρίζα αντίστοιχα. Το ξηρό βάρος του φυλλώματος του βασιλικού στη δεξαμενή III υπερέχει σημαντικά σε σχέση με τη δεξαμενή I. Αντίστοιχα και η ξηρή μάζα της ρίζας στη δεξαμενή III είχε στατιστικώς σημαντική διαφορά έναντι των άλλων δύο δεξαμενών (Γράφημα 6).

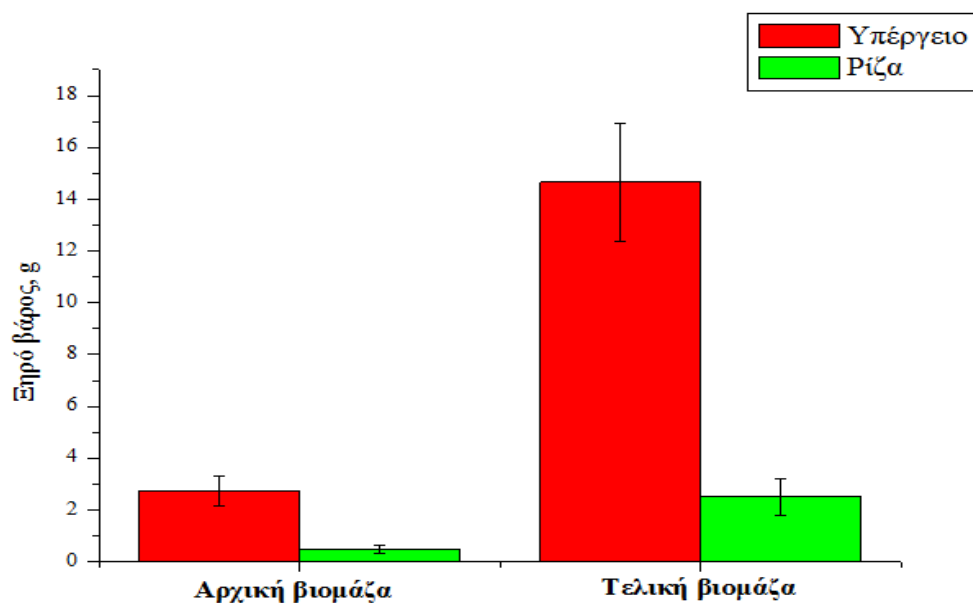


Γράφημα 5: Μέτρηση νωπού βάρους φυλλώματος, βλαστού και ρίζας βασιλικού ανά δεξαμενή (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0,05$.



Γράφημα 6: Μέτρηση ξηρού βάρους φυλλώματος, βλαστού και ρίζας βασιλικού ανά δεξαμενή (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0,05$.

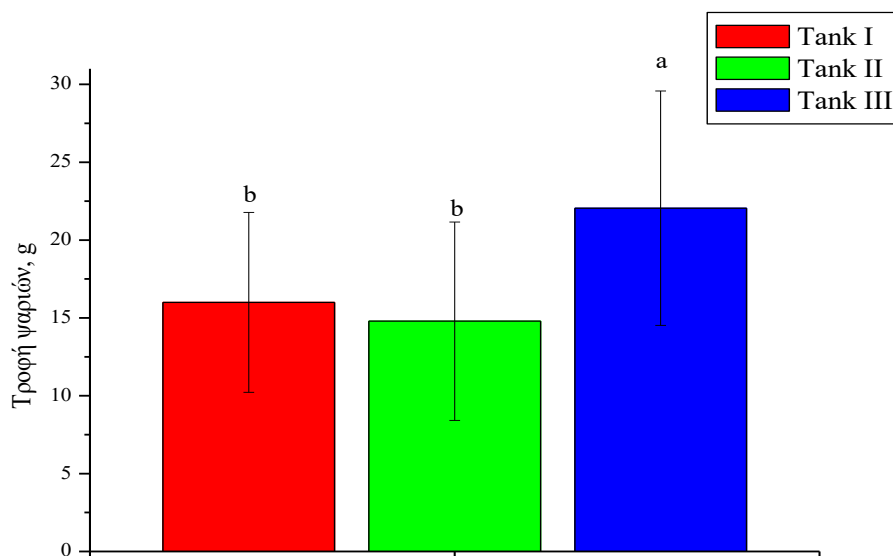
Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η διαφορά των αρχικών και των τελικών μετρήσεων του ξηρού βάρους.



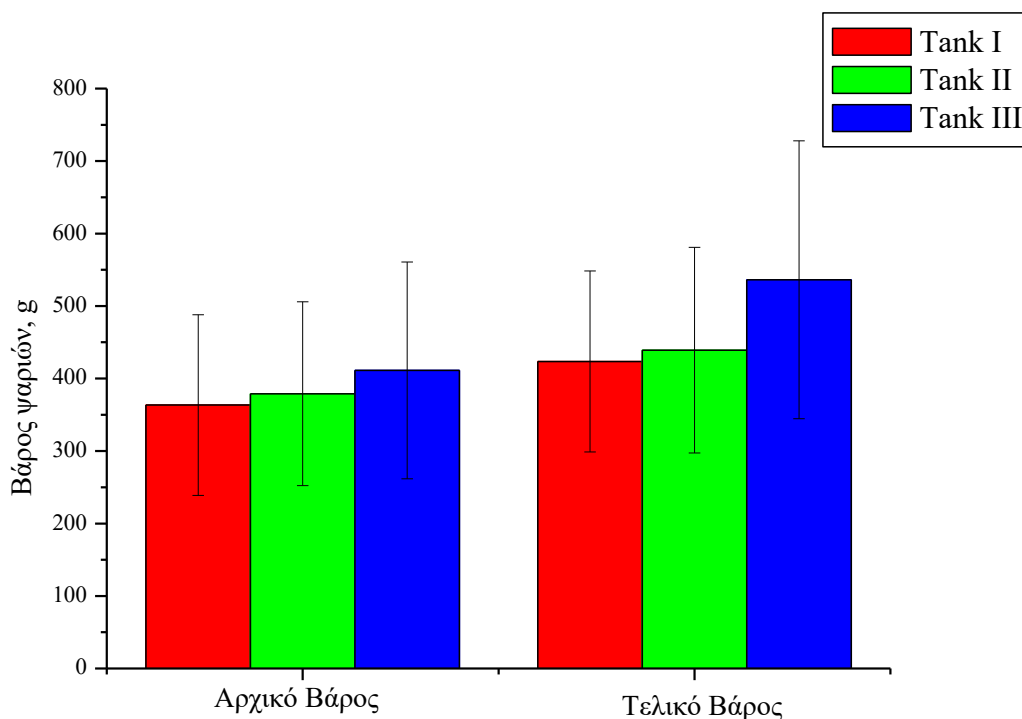
Γράφημα 7: Αρχική και τελική βιομάζα στο υπέργειο τμήμα και στη ρίζα των φυτών.

3.2.3 Ανάπτυξη ιχθύων

Τα ψάρια του συστήματος III φαίνεται πως κατανάλωσαν την περισσότερη τροφή σε σχέση με τα άλλα δύο (Γράφημα 8), κάτι που αποτυπώθηκε ως τάση και όχι στατιστικώς σημαντική διαφορά στο βάρος των ψαριών αυτού του συστήματος (Γράφημα 9).



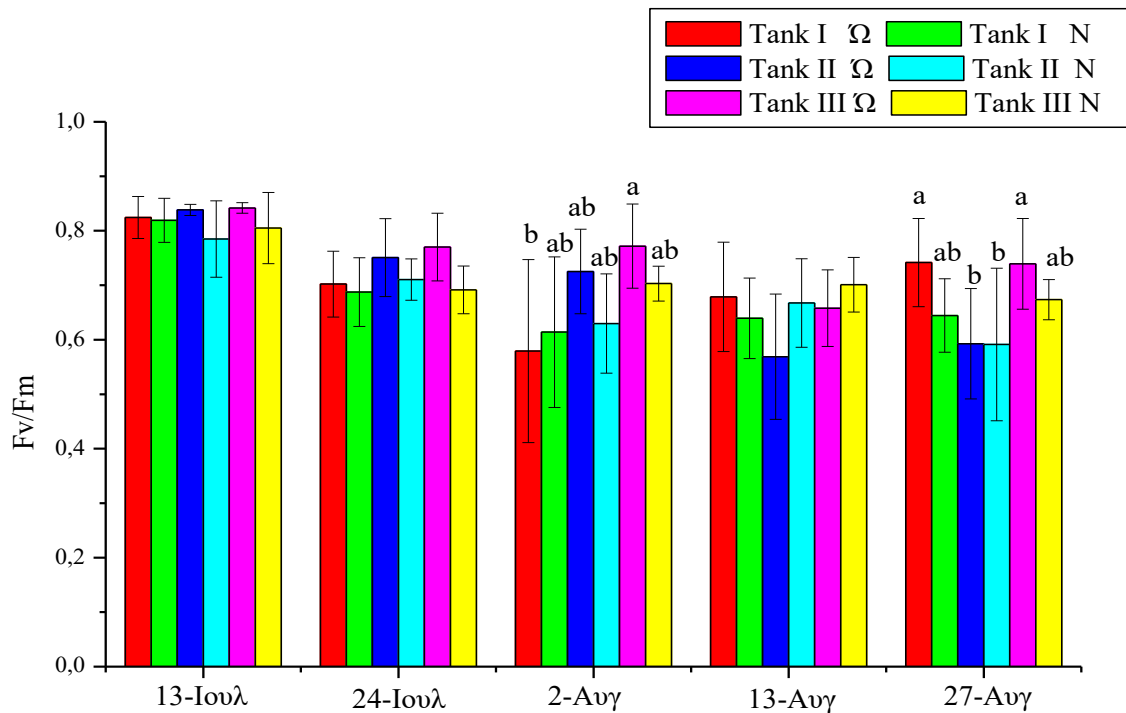
Γράφημα 8: Καταγραφή ποσότητας τροφής ψαριών στα τρία συστήματα (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0,05$.



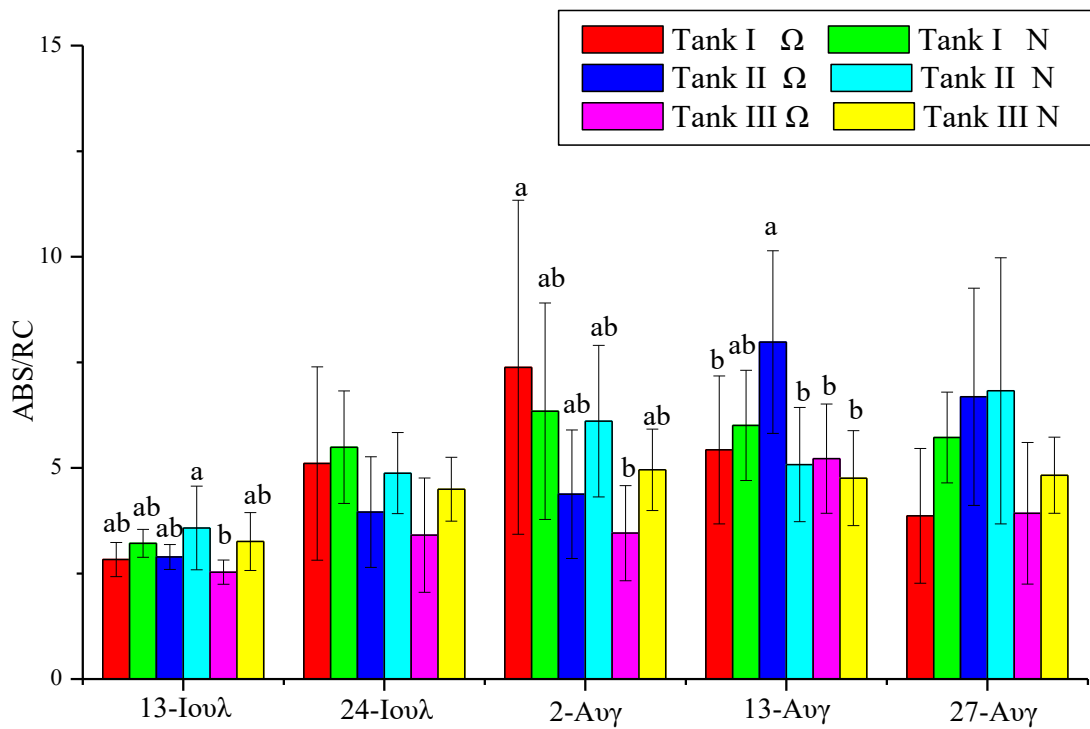
Γράφημα 9: Καταγραφή βάρους ψαριών στα τρία συστήματα στην αρχή και στο τέλος του πειράματος (Μ.Ο.±Sd).

3.3 Φθορισμός χλωροφύλλης a *in vivo*

Τα φύλλα του βασιλικού που ελέγχθηκαν για πιθανές καταπονήσεις κατά τα διάδοχα αναπτυξιακά τους στάδια εμφάνισαν διαφορετικούς βαθμούς αλλαγής στις παραμέτρους φθορισμού χλωροφύλλης. Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι μετρήσεις φθορισμού για τα νεαρά (N) και ώριμα (Ω) φύλλα. Ο παράγοντας Fv/Fm φαίνεται να μειώνεται μετά και τη δεύτερη μέτρηση (21^η μέρα του πειράματος). Στην 3^η και 5^η μέτρηση φαίνεται πως τα συστήματα αποκτούν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους (Γράφημα 10). Ο παράγοντας που αναφέρεται στην ροή απορροφούμενων φωτονίων ABS/RC έδειξε μια ανοδική πορεία από την πρώτη μέτρηση και έπειτα έχοντας στατιστικώς σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα τρία συστήματα. Στο Γράφημα 11 φαίνεται ότι οι τιμές στα συστήματα αυξάνονται μέχρι την 3^η μέτρηση (30^η μέρα πειράματος) και στη συνέχεια διατηρείται μια σταθερή απόδοση. Σε κάποιες από τις μετρήσεις παρατηρήθηκε στατιστικώς σημαντική διαφορά ανάμεσα στα διαφορετικά συστήματα, όπως και επίσης ανάμεσα στο ίδιο σύστημα αλλά σε διαφορετικού τύπου φύλλου, όπως φαίνεται στην μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στις 13 Αυγούστου στο σύστημα II.

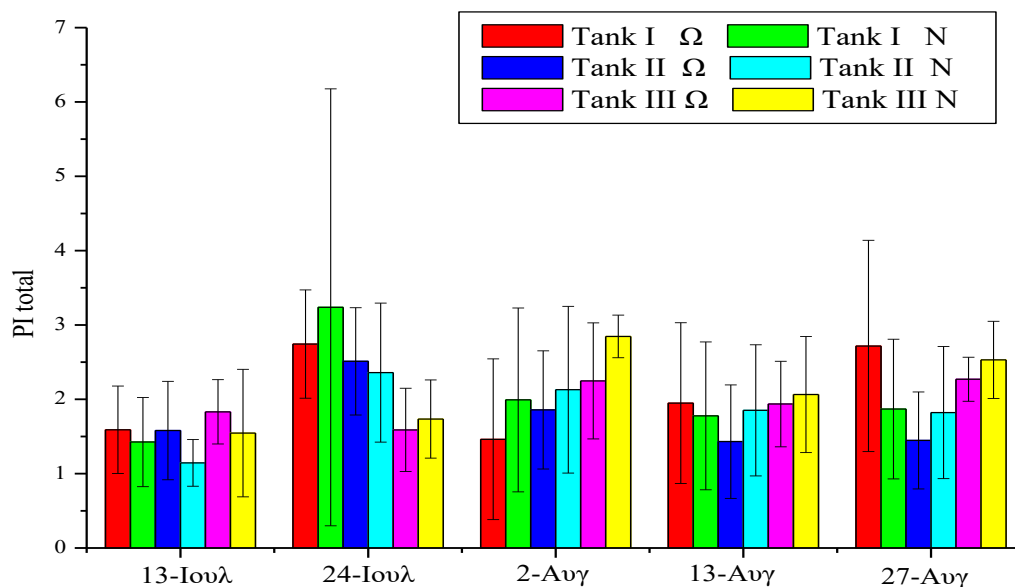


Γράφημα 10: Η παράμετρος φθορισμού Fv/Fm των συστημάτων σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0,05$.

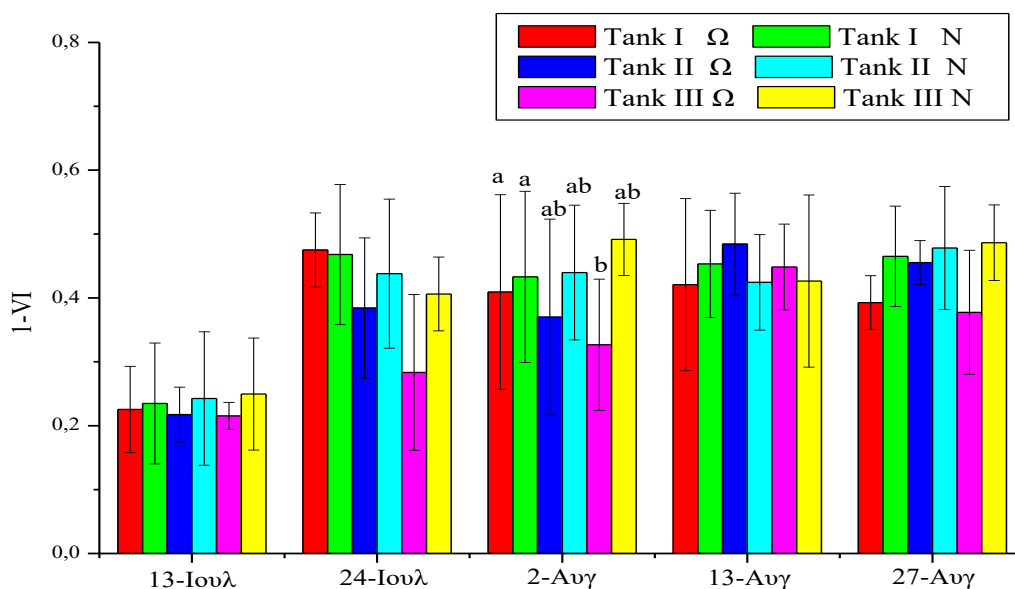


Γράφημα 11: Η παράμετρος φθορισμού ABS/RC των συστημάτων σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0,05$.

Ο παράγοντας PI Total όπως φαίνεται και στο Γράφημα 12, δεν φαίνεται να έχει στατιστικώς σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα συστήματα, ενώ ο παράγοντας 1-VI φαίνεται (Γράφημα 13) πως μετά την 1^η μέτρηση (10^η μέρα), αυξάνεται και στη συνέχεια έχει σχεδόν σταθερή τιμή.



Γράφημα 12: Η παράμετρος φθορισμού PI Total των συστημάτων σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd).

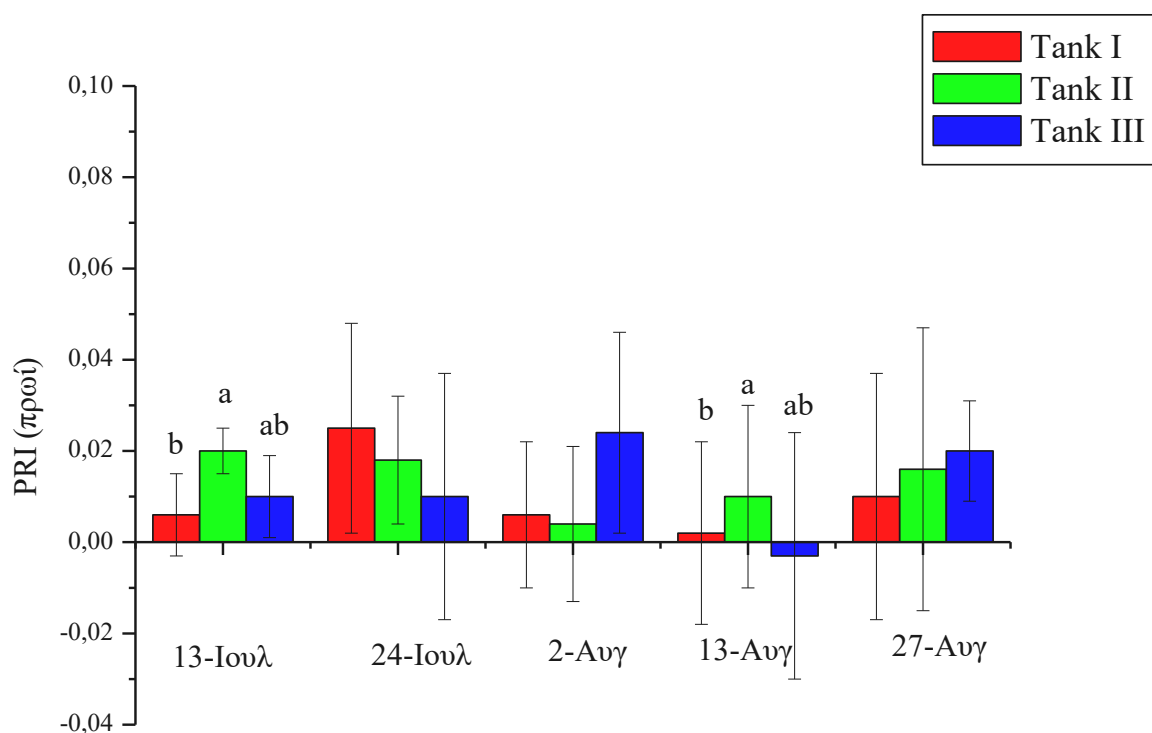


Γράφημα 13: Η παράμετρος φθορισμού 1-VI των συστημάτων σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0,05$.

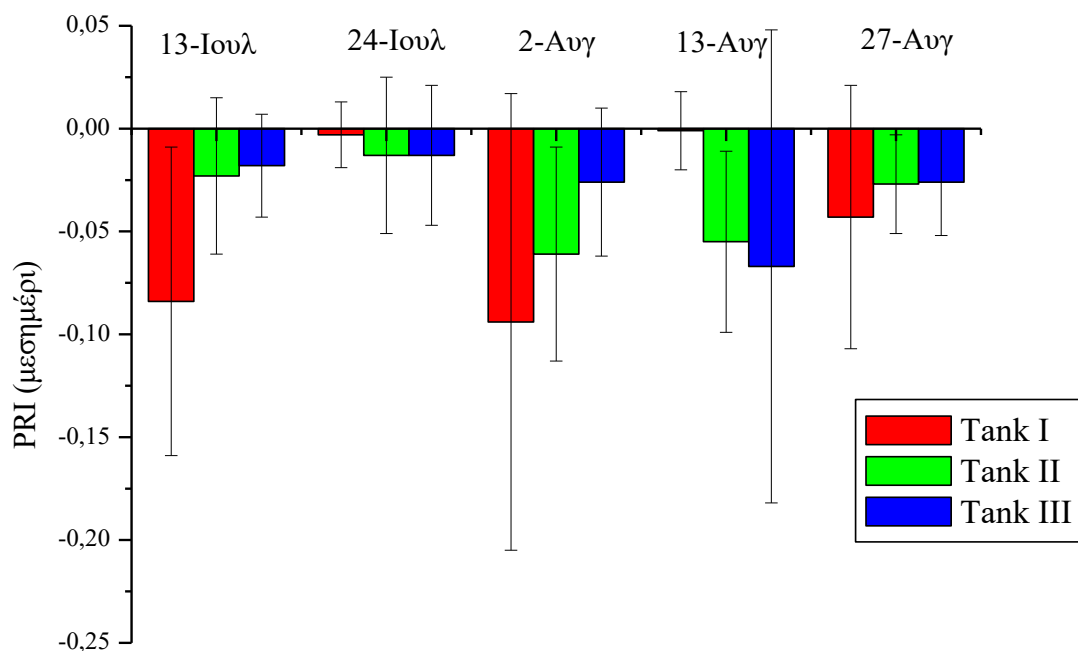
3.4 Ανακλαστικότητα

3.4.1 Δείκτης PRI

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα φύλλα του βασιλικού ως προς το δείκτη PRI, όπου παρέχει μια εκτίμηση της φωτοσυνθετικής απόδοσης, έδειξαν πως οι τιμές με παρουσία φωτός (μεσημέρι) είναι πολύ χαμηλές και πιο συγκεκριμένα πιο χαμηλές από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε πλήρες σκοτάδι (πρωί) με αποτέλεσμα η φωτοσυνθετική συσκευή να ανακάμπτει το πρωί. Επίσης, σε κάποιες από τις πρωινές μετρήσεις παρατηρούνται στατιστικώς σημαντικές διαφορές του συστήματος II με το σύστημα I (Γράφημα 14), κάτι που δεν ισχύει για τις μεσημεριανές μετρήσεις (Γράφημα 15).



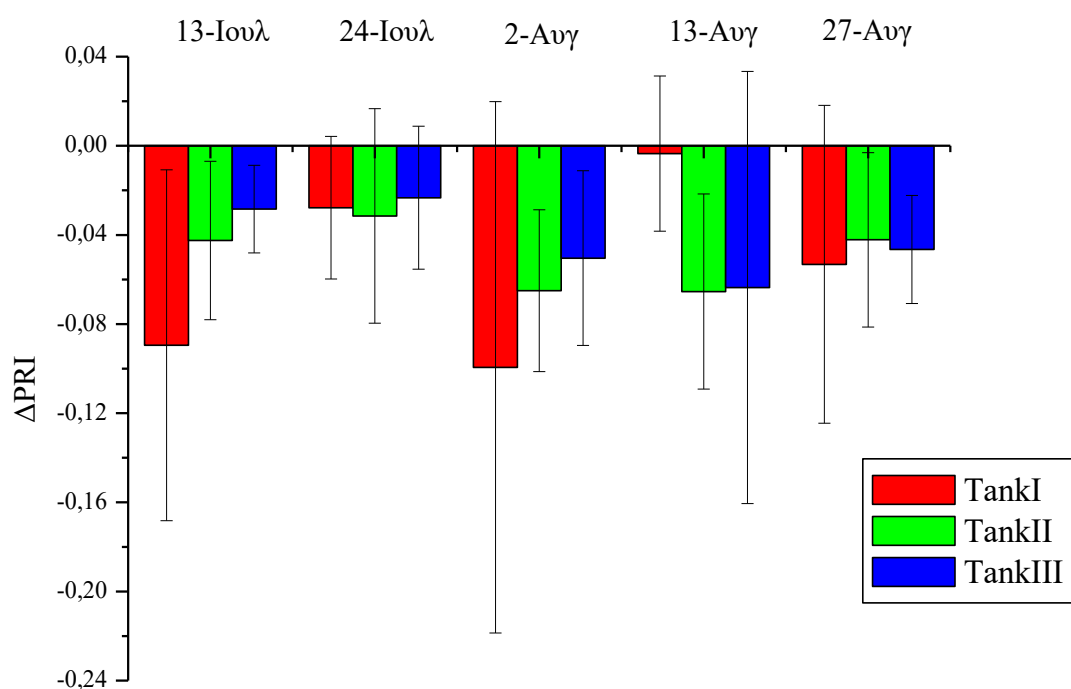
Γράφημα 14: Αποτελέσματα δείκτη PRI πριν την έναρξη της φωτοσύνθεσης σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (Μ.Ο.±Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p < 0,05$.



Γράφημα 15: Αποτελέσματα δείκτη PRI μετά την έναρξη της φωτοσύνθεσης σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd).

3.4.2 Δείκτης ΔPRI

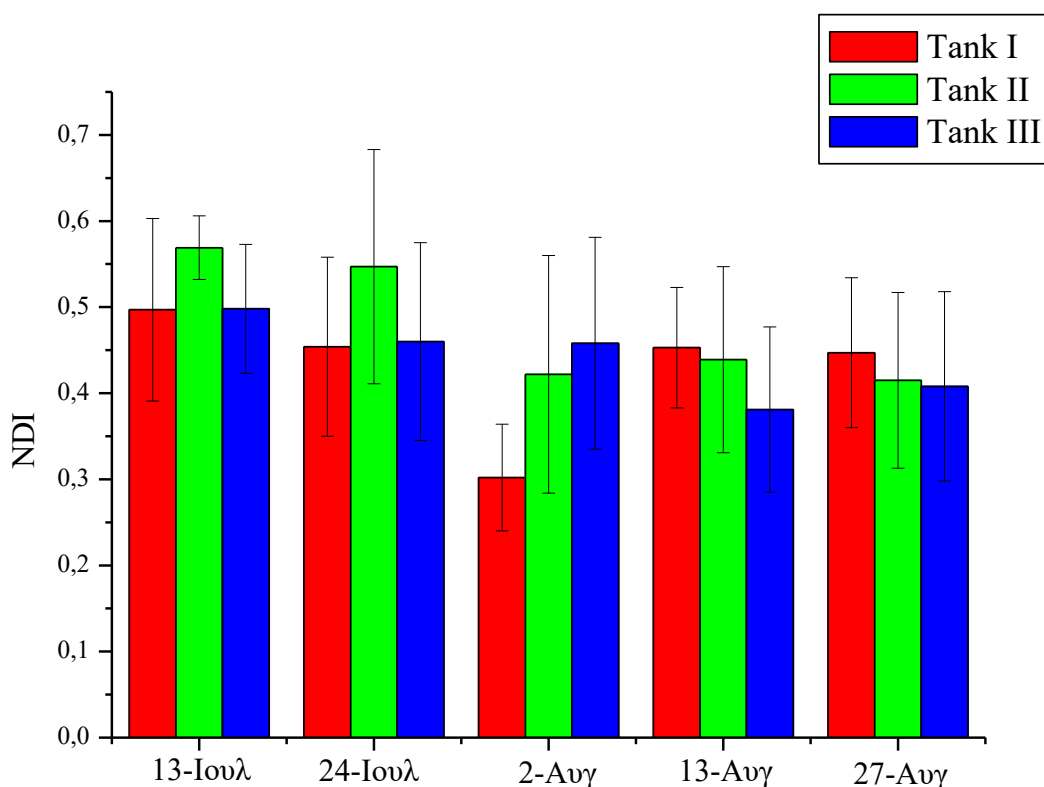
Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ως προς το δείκτη ΔPRI, δηλαδή τη διαφορά του δείκτη PRI της μεσημεριανής από την πρωινή μέτρηση, είχαν αρνητικές τιμές (Γράφημα 16), ενώ δεν είχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους τα τρία συστήματα.



Γράφημα 16: Αποτελέσματα δείκτη ΔPRI σε πέντε διαφορετικές μετρήσεις (M.O.±Sd).

3.4.3 Δείκτης NDI

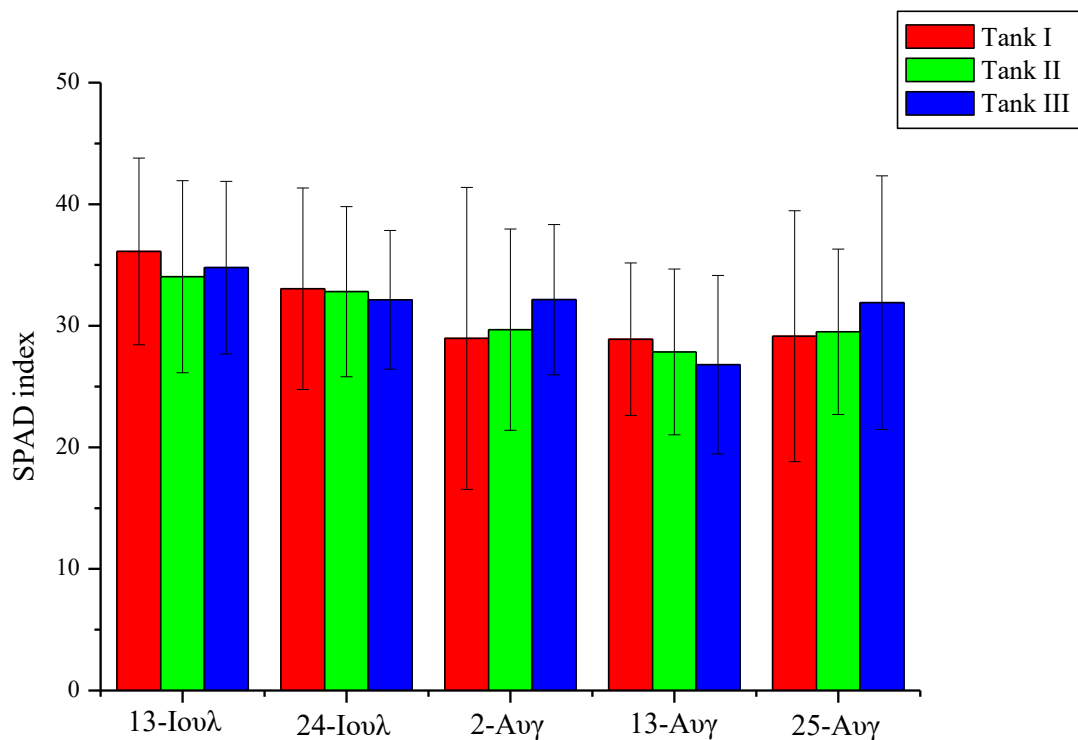
Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα φύλλα του βασιλικού με σκοπό τον έλεγχο του προτύπου της συγκέντρωσης των συνολικών χλωροφυλλών δεν έδειξαν κάποιες στατιστικώς σημαντικές διαφορές στις μετρήσεις, παρά μόνο μια τάση για μείωση στις τιμές των συνολικών χλωροφυλλών από τη 2^η μέτρηση και έπειτα (Γράφημα 17).



Γράφημα 17: Ο δείκτης NDI στα φυτά των τριών συστημάτων σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες (Μ.Ο.±Sd).

3.5 Μετρήσεις SPAD

Η τιμή SPAD, η οποία συσχετίζεται με την περιεχόμενη στο φύλλο χλωροφύλλη δεν εμφάνισε σημαντικές διαφορές καθ' όλη την πειραματική περίοδο (Γράφημα 18).

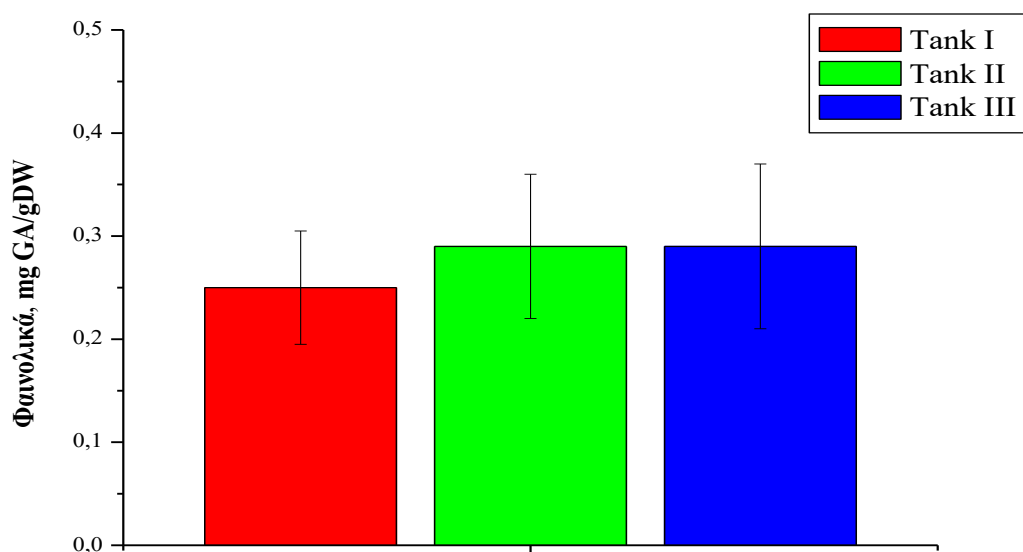


Γράφημα 18: Δείκτης Spad στα φυτά του βασιλικού

3.6 Βιοχημικές μετρήσεις

3.6.1 Προσδιορισμός ολικών φαινολικών

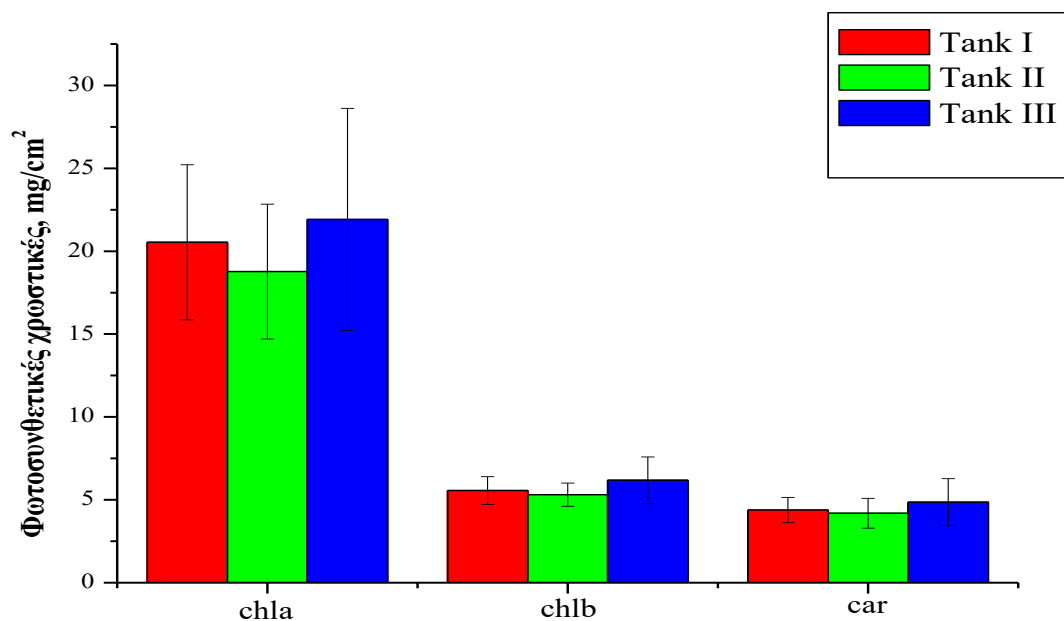
Τα αποτελέσματα από την μέτρηση των ολικών φαινολικών, απεικονίζονται στο Γράφημα 19, όπου φαίνεται πως δεν υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών συστημάτων.



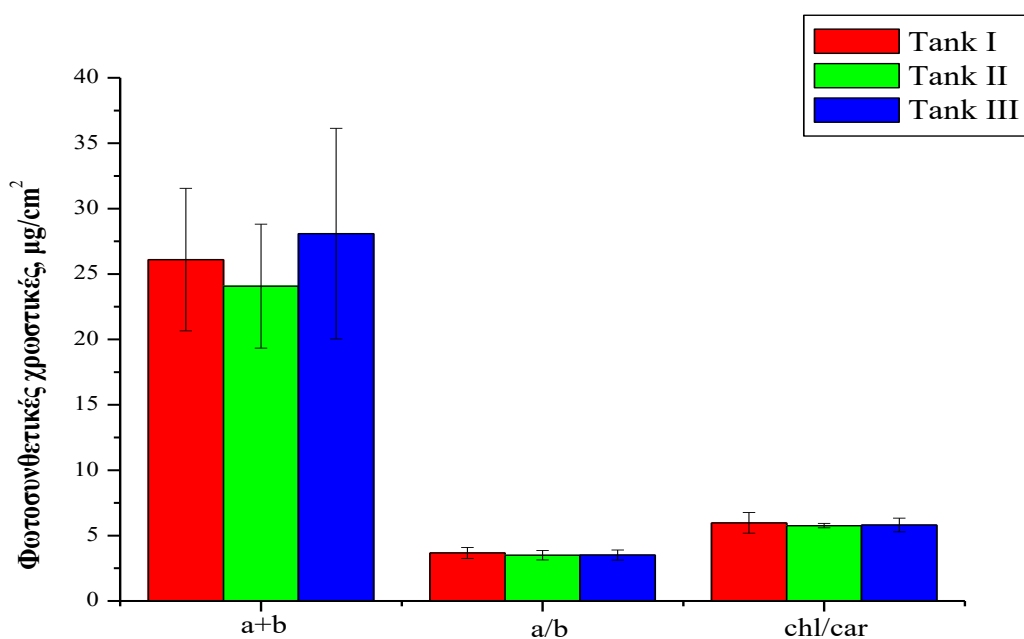
Γράφημα 19: Συγκέντρωση ολικών φαινολικών σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος (mg GA / g DW) των φυτών κατά την τελική συλλογή στα τρία συστήματα (M.O±SD).

3.6.2 Προσδιορισμός χλωροφυλλών

Οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών δεν έδειξαν κάποιες στατιστικώς σημαντικές διαφορές στα τρία συστήματα. Τόσο στο Γράφημα 20 όπου παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των φωτοσυνθετικών χρωστικών, όσο και στο Γράφημα 21 που παρουσιάζεται η συγκέντρωση συνολικών χλωροφυλλών, καταγράφεται μία ελαφριά τάση για αυξημένες τιμές στο σύστημα III έναντι των υπολοίπων, ενώ οι λόγοι a/b και χλωροφύλλες/καροτενοειδή είναι πανομοιότυποι.



Γράφημα 20: Συγκέντρωση φωτοσυνθετικών χρωστικών στα τρία συστήματα (M.O±SD).



Γράφημα 21: Συγκέντρωση συνολικών χλωροφυλλών και λόγοι μεταξύ φωτοσυνθετικών χρωστικών στα τρία συστήματα (M.O±SD).

4. Συζήτηση

Στην παρούσα έρευνα αναπτύχθηκαν φυτά βασιλικού σε συστήματα ενυδρειοπονίας, με την ταυτόχρονη εκτροφή τιλάπιας. Εκτός από τον κεντρικό στόχο της διατριβής που ήταν η παρακολούθηση της ανάπτυξης του φυτού και η καταγραφή πιθανών καταπονήσεων, παράλληλο στόχο αποτέλεσε και η χαρτογράφηση των διαθέσιμων 3 συστημάτων ενυδρειοπονίας ως προς πιθανές μεταξύ τους διαφορές.

Ο βασιλικός είναι ένα φυτό που αναπτύσσεται πολύ καλύτερα σε συστήματα ενυδρειοπονίας παρά στη συμβατική γεωργία (Delaide *et al.*, 2017). Ωστόσο εντός 10 ημερών φάνηκαν κάποια μαραμμένα φύλλα και στα τρία συστήματα που δημιούργησαν υποψίες τροφοπενίας, ενώ στο σύστημα II εμφανίστηκαν φύλλα με μικρές τρύπες, όπου στη συνέχεια ανακαλύφθηκε ένα πράσινο σκουλήκι, κρυμμένο στην κάτω πλευρά ενός φύλλου.

Η θερμοκρασία του νερού και στα τρία συστήματα διατηρήθηκε στους $23,2\pm 0,69$ °C, το pH στο $7,7\pm 0,1$ και το διαλυμένο οξυγόνο στα 6,8 mg/L. Σύμφωνα με το FAO (2011), σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα, η ιδανική θερμοκρασία κυμαίνεται από 18-30°C (εξαρτώμενη από τα είδη φυτών και ψαριών), το pH 6-7 και το διαλυμένο οξυγόνο >5 mg/L. Πιο συγκεκριμένα, σε συστήματα με τιλάπια και βασιλικό η ιδανική θερμοκρασία κυμαίνεται από 21,1- 26,1 °C (Moya *et al.*, 2016), το ιδανικό pH έχει εύρος 7-7,6 και το διαλυμένο οξυγόνο 4-5 mg/L (Rakocy *et al.*, 2004). Το πιο σημαντικό είναι το pH να διατηρείται σε επίπεδα πάνω από 7 για την πραγματοποίηση της νιτροποίησης (Rakocy *et al.*, 2004). Ωστόσο ο λόγος που το pH κυμάνθηκε στο $7,7\pm 0,1$ στα συστήματα είναι πιθανά η υψηλή αλκαλικότητα (CaCO_3) του νερού. Ανάλογη περίπτωση αναφέρουν και οι Roosta και Mohsenian (2012).

Ο βασιλικός αναπτύχθηκε πολύ καλά στα συστήματα ενυδρειοπονίας. Κατά τα διάδοχα αναπτυξιακά στάδια, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στο ύψος των φυτών του βασιλικού. Μεταξύ της πρώτης μέτρησης (ημέρα 6 του πειράματος) και της τελικής μέτρησης καταγράφηκε σχεδόν διπλασιασμός του ύψους των φυτών. Επίσης, η βιομάζα των φυτών είχε σημαντική διαφορά από την πρώτη μέχρι την τελευταία μέτρηση, με πενταπλασιασμό τόσο της υπέργειας όσο και της υπόγειας βιομάζας. Σημαντικές διαφορές καταγράφηκαν μεταξύ των φυτών των συστημάτων I και III, με τα τελευταία να υπερτερούν τόσο σε νωπό, όσο και σε ξηρό βάρος. Κατά την πορεία του πειράματος φάνηκε πως τα φυτά παρουσίασαν σημάδια μάρανσης,

κύρτωσης και μωβ κηλίδες. Η κύρτωση και τα επάρματα στο φύλλο παρέπεμπαν σε τροφοπενία καλίου. Θρεπτικά όπως ο σίδηρος, το κάλιο, το ασβέστιο, και ίσως σε κάποιες περιπτώσεις ο φώσφορος, είναι συνήθως σε ανεπάρκεια στην ενυδραιοπενία και πρέπει να προστεθούν (Goddek et al., 2015; Rakocy et al., 2004, 2006). Στην παρούσα έρευνα προστέθηκαν Fe DTPA και KH_2PO_4 με σκοπό τα φυτά να παραμείνουν σε καλή κατάσταση μέχρι το τέλος του πειράματος μιας και χαμηλές συγκεντρώσεις K και Fe στο υδατικό διάλυμα μπορεί να προκαλέσουν τη μείωση ανάπτυξης των βλαστών και των ριζών (Roosta, 2014). Η προσθήκη του KH_2PO_4 αποσκοπούσε και στη μείωση του pH.

Τα επίπεδα χλωροφύλλης φάνηκαν να μειώνονται ελαφρώς μετά την πρώτη βδομάδα του πειράματος, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις SPAD σε κάθε σύστημα. Ανάλογα αποτελέσματα που μάλλον σχετίζονται με αναπτυξιακές αλλαγές στο φυτό αναφέρθηκαν και από τους Saha *et al.* (2016). Τα φυτά στο σύστημα III είχαν τα υψηλότερα επίπεδα χλωροφύλλης σε σχέση με τα άλλα δύο συστήματα και αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός πως τα ψάρια στο σύστημα III κατανάλωναν την μεγαλύτερη ποσότητα ξηρής τροφής με αποτέλεσμα τα φυτά στο σύστημα III να απορροφούν περισσότερα νιτρικά.

Οι τεχνικές ανακλαστικότητας (Carter and Knapp, 2001) και φθορισμού (Lazár *et al.*, 2006) έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την μη καταστροφική παρακολούθηση και ανίχνευση καταπόνησης στα φυτά. Η βασική και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη παράμετρος φθορισμού Fv/Fm που περιγράφει τη μέγιστη ανά φωτόνιο φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II και σχετίζεται ευθέως με την κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής (Gallé *et al.*, 2007). Υψηλές τιμές του δείκτη αυτού (0,85-0,75) υποδεικνύουν μία λειτουργική και σε καλή κατάσταση φωτοσυνθετική συσκευή, με υψηλή ικανότητα παραγωγής φωτοχημικού έργου. Οι μειώσεις του δείκτη κάτω από το 0,75 παραπέμπουν σε καταπόνηση, άρα μειωμένη φωτοχημική δραστηριότητα. Η μείωση των τιμών Fv/Fm έχει συσχετιστεί με ανεπάρκεια θρεπτικών, όπως τα Mn και Fe (Roosta, 2014) και με διάφορες αβιοτικές καταπονήσεις, όπως η έλλειψη νερού (Gallé *et al.*, 2007). Στη παρούσα εργασία οι τιμές Fv/Fm στα νεαρά και ώριμα φύλλα του βασιλικού ξεκίνησαν να μειώνονται από την μέρα 20 του πειράματος έχοντας τιμές μικρότερες από 0,75 και στα τρία συστήματα. Παρόλα αυτά, τα φυτά του συστήματος III φαίνεται να είχαν τη μικρότερη καταπόνηση, λόγω του ότι οι τιμές Fv/Fm ήταν σχεδόν πάντα μεγαλύτερες

από τα άλλα συστήματα. Ο λόγος ABS/RC είναι ένας χρήσιμος δείκτης που προκύπτει από τις μετρήσεις του φθορισμού της χλωροφύλλης *a in vivo* και περιγράφει τις ενεργειακές ροές ανά κέντρο αντίδρασης και πιο συγκεκριμένα την απορροφώμενη ενέργεια (ABS) ομαλοποιημένη ανά λειτουργικό κέντρο αντίδρασης (RC) του PSII. Το πρότυπο των διαφορών μεταξύ των συστημάτων δεν ήταν σαφές, αντιθέτως σαφής ήταν η σταδιακή αύξησή του κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το αποτέλεσμα αυτό πιθανώς παραπέμπει είτε σε αύξηση του μεγέθους της φωτοσυλλεκτικής κεραίας που παρέχει ενέργεια στα ενεργά κέντρα είτε σε μείωση των ενεργών κέντρων του φωτοσυστήματος II (Gomes *et al.*, 2012). Ο δείκτης PI total είναι μία συνδυαστική παράμετρος που περιλαμβάνει πληροφορία για τρεις επιμέρους διεργασίες: α) 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. Συνδυάζοντας τις προαναφερθείσες πληροφορίες ο PI total θεωρείται δείκτης συνολικής απόδοσης της φωτοσύνθεσης. Η συγκεκριμένη παράμετρος δεν διέφερε ανά σύστημα, ενώ σημαντικό είναι ότι παρουσίασε μία σταθερότητα καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Τέλος, η παράμετρος I-VI, η οποία συνδέεται με το συνολικό απόθεμα των ενεργών κέντρων του φωτοσυστήματος I, ήταν σχετικά σταθερή και στα τρία συστήματα, έχοντας αυξημένες τιμές μετά τις πρώτες 10 μέρες του πειράματος.

Οι δείκτες της *in vivo* ανακλαστικότητας NDI και PRI είναι χρήσιμοι για την εκτίμηση του περιεχομένου των φωτοσυνθετικών χρωστικών και της ανάγκης προστασίας της φωτοσυνθετικής συσκευής αντίστοιχα (Sims & Gamon, 2002). Ο δείκτης NDI χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των συνολικών χλωροφυλλών μέσω ανακλαστικότητας και φαίνεται στο βασιλικό να συμβαδίζει με τις αντίστοιχες τιμές SPAD. Ο δείκτης PRI είναι ενδεικτικός της λειτουργικότητας του κύκλου των ξανθοφυλλών, άρα της μη φωτοχημικής απόσβεσης της περίσσειας ενέργειας. Μείωση του PRI παραπέμπει σε ανάγκη προστασίας της φωτοσυνθετικής συσκευής λόγω καταπόνησης (Sims & Gamon, 2002). Αρκετές έρευνες έχουν αποδείξει μία σημαντική συσχέτιση του PRI με τη φωτοσυνθετική απόδοση ορισμένων φυτικών ειδών (Κονιάč *et al.* 2018). Οι πρωινές τιμές του δείκτη στην παρούσα εργασία παρουσίασαν μικρές αυξομειώσεις καταλήγοντας σε χαμηλές τιμές γύρω στο 0,01 και με τις μεσημεριανές τιμές να έχουν αρνητικό πρόσημο με τιμές γύρω στο -0,04. Οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη κατά το μεσημέρι, μερικές ώρες μετά την έναρξη της

λειτουργίας της φωτοσυνθετικής συσκευής είναι σύνηθες εύρημα στη σχετική βιβλιογραφία (Κονιάτ *et al.* 2018). Παράλληλα αυτό σημαίνει πως την ώρα που οι τιμές του δείκτη PRI (μεσημέρι) είναι χαμηλές, ο κύκλος των ξανθοφυλλών είναι περισσότερο λειτουργικός με αποτέλεσμα τα συστατικά του κύκλου των ξανθοφυλλών να αυξάνονται ($\uparrow \frac{AZ}{VAZ}$) στα φύλλα και να υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη για φυτοπροστασία. Τέλος, δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών συστημάτων κατά την μεσημεριανή μέτρηση του PRI, παρά μόνο μία σταθερή τάση για χαμηλότερες τιμές στο σύστημα I.

Συμπερασματικά λοιπόν, η παρούσα εργασία κατέγραψε βασικά αναπτυξιακά και λειτουργικά χαρακτηριστικά φυτών βασιλικού καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξής τους σε συστήματα ενυδραιοπονίας με την παράλληλη εκτροφή τιλάπιας. Οι παρεμβάσεις στο σύστημα ήταν ελάχιστες ώστε να καταγραφεί η λειτουργία του φυτού κατά τα διάδοχα αναπτυξιακά στάδια, αλλά ταυτοχρόνως να πραγματοποιηθεί και μία χαρτογράφηση πιθανών ενδογενών διαφορών στα τρία συστήματα που χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά. Οι διαφορές εστιάστηκαν στα συστήματα I και III, με το τελευταίο να υπερέχει στατιστικώς σημαντικά ως προς την απόδοση του φυτού. Καθώς στην ενυδραιοπονία υπάρχει ισχυρή αλληλεξάρτηση των δύο ζωντανών οργανισμών, φυτών και ψαριών, το παραπάνω αποτέλεσμα πιθανώς να σχετίζεται σε μία καλύτερη θρεπτική κατάσταση των φυτών του συγκεκριμένου συστήματος. Όπως αναφέρθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο, τα ψάρια στο σύστημα III κατανάλωσαν περισσότερη τροφή και εμφάνισαν τάση για καλύτερη ανάπτυξη. Αυτό μας οδηγεί να υποθέσουμε ότι τα φυτά του βασιλικού του συστήματος III πιθανώς είχαν μεγαλύτερη διαθεσιμότητα θρεπτικών από τα φυτά στα συστήματα I και II. Τέλος, οι διάφοροι λειτουργικοί δείκτες που εξετάστηκαν δεν απέδωσαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων, ενώ μόνο ο δείκτης F_v/F_m που σχετίζεται με την μέγιστη ανά φωτόνιο απόδοση του φωτοσυστήματος II παρουσίασε μία τάση για μείωση από τη μέση του πειράματος μέχρι το τέλος αυτού και ο δείκτης PRI που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ταχέων αλλαγών στα σχετικά επίπεδα των συστατικών του κύκλου των ξανθοφυλλών εμφάνισε μειωμένες τιμές με παρουσία φωτός σε σχέση με το πλήρες σκοτάδι.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aquaponics NOMA (Nordic Marine), (2015). New Innovations for Sustainable Aquaculture in the Nordic Countries, Nordic Innovation Publication, [Online]. Available at <<http://www.nordicinnovation.org/Publications>> [Accessed 13 June 2018]

Beauchamp, W. R., Pickens, J. M., Sibley, J. L., Chappell, J. A., Martin, N. R., and Newby, A. F. (2018). Salt Level in a Simulated Aquaponic System and Effects on Bibb Lettuce. *International Journal of Vegetable Science* 24(2), 122-136.

Carter, G. A., and Knapp, A. K. (2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American journal of botany* 88(4), 677-684.

Chadirin, Y., Hidaka, K., Takahashi, T., Sago, Y., Wajima, T., and Kitano, M. (2011). Application of Temperature Stress to Roots of Spinach I. Effect of the Low Temperature Stress on Quality. *Environmental Control in Biology* 49(3), 133-139.

Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H., and Jijakli, M. H. (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering* 78, 130-139.

Diver, S., 2006. Aquaponics- Integration of Hydroponics with Aquaculture. ATTRA - National Sustainable Agriculture Information Service. [online]. Available at <<https://backyardaquaponics.com/Travis/aquaponic.pdf>> [Accessed on 10/8/2018]

Espinosa Moya, E. A., Angel Sahagún, C. A., Mendoza Carrillo, J. M., Albertos Alpuche, P. J., Álvarez-González, C. A., & Martínez-Yáñez, R. (2016). Herbaceous plants as part of biological filter for aquaponics system. *Aquaculture research* 47(6), 1716-1726.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, Rome, Italy.

Gallé, A., Haldimann, P., & Feller, U. (2007). Photosynthetic performance and water relations in young pubescent oak (*Quercus pubescens*) trees during drought stress and recovery. *New Phytologist*, 174(4), 799-810.

Geisenhoff, L. O., Jordan, R. A., Santos, R. C., Oliveira, F. C. D., and Gomes, E. P. (2016). Effect of different substrates in aquaponic lettuce production associated with intensive tilapia farming with water recirculation systems. *Engenharia Agrícola* 36(2), 291-299.

Gilbert, N. (2012). One-third of our greenhouse gas emissions come from agriculture. *Nature* [Online]. Available at < <https://www.nature.com/news> > [Accessed 2 June 2018]

Gitelson, A. and Merzlyak, M.N. (1994). Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. *Journal of Plant Physiology* 143, 286-292.

Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., Jijakli, H., and Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability* 7(4), 4199–4224.

Gomes, M. T. G., Da Luz, A. C., Dos Santos, M. R., Batitucci, M. D. C. P., Silva, D. M., & Falqueto, A. R. (2012). Drought tolerance of passion fruit plants assessed by the OJIP chlorophyll a fluorescence transient. *Scientia horticultrae* 142, 49-56.

IPCC, (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri & A. Reisinger. Eds. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 104.

Jones, S. (2002). Evolution of aquaponics. *Aquaponics J*, 6(1).

Jones Jr, J.B. (1982). Hydroponics: Its history and use in plant nutrition studies. *Journal of Plant Nutrition* 5(8), 1003-1030.

Jones Jr, J. B. (2016). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. CRC press, Boca Raton

- Kováč, D., Veselovská, P., Klem, K., Večeřová, K., Ač, A., Peñuelas, J., & Urban, O. (2018). Potential of Photochemical Reflectance Index for Indicating Photochemistry and Light Use Efficiency in Leaves of European Beech and Norway Spruce Trees. *Remote Sensing* 10, 1202.
- Lazár, D., Sušila, P., and Nauš, J. (2006). Early detection of plant stress from changes in distributions of chlorophyll a fluorescence parameters measured with fluorescence imaging. *Journal of Fluorescence* 16, 173-176.
- Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K., and Thompson, R.E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* 435, 67-74.
- Mangmang, J. S., Deaker, R., and Rogers, G. (2015). Inoculation effect of *Azospirillum brasilense* on basil grown under aquaponics production system. *Organic agriculture* 6(1), 65-74.
- Mole, S. and Waterman, P. G. (1994). *Analysis of Phenolic Plant Metabolites*. Blackwell Scientific Publications, Oxford
- Murchie, E. H., and Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany* 64(13), 3983–3998.
- Negrao, S., Schmockel, S. M. and Tester, M. (2017). Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany* 119, 1–11.
- Nelson, R.L. (2008). Aquaponic Equipment - The Bio Filter. *Aquaponic Journal* 48, 22-23.
- Penuelas, J., Filella, I., and Gamon, J. A. (1995). Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytologist* 131(3), 291-296.
- Rakocy, J.E., Bailey, D.S., Shultz, K.A., and Cole, W.M. (1997). Development of an aquaponic system for the intensive production of tilapia and hydroponic vegetables. *Aquaponics Journal*, 12-13.

Rakocy, J.E., Shultz, R.C., Bailey, D.S., and Thoman, E.S. (2004). Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. *Acta Horticulturae* 648, 63–69.

Rakocy, J.E., Masser, M.P., and Losordo, T.M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics—integrating fish and plant culture. *Southern Regional Aquaculture Center* 454, 1-16.

Roosta, H.R., and Mohsenian, Y. (2012). Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annum* L.) plants in aquaponic system. *Scientia Horticulturae* 146, 182–191.

Roosta, H.R. (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), 1782-1803.

Sakamoto, M. and Suzuki, T. (2015). Effect of Root-Zone Temperature on Growth and Quality of Hydroponically Grown Red Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Red Wave). *American Journal of Plant Sciences* 6, 2350-2360.

Savidov, N.A., Hutchings, E., and Rakocy, J.E., (2007). Fish and plant production in a recirculating aquaponic system: a new approach to sustainable agriculture in Canada. *Acta Hort* 742, 209–222.

Sims, D. A., and Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote sensing of environment*, 81(2-3), 337-354.

Turcios, A.E. and Papenbrock, J. (2014). Sustainable treatment of aquaculture effluents—What Can We Learn from the Past for the Future? *Sustainability* 6, 836-856.

Tyson, R. V., Treadwell, D. D., and Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology* 21(1), 6-13.