



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

**«Λειτουργικές αποκρίσεις τομάτας που αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδρείοπονίας  
και υδροπονίας»**

**ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ: Αργύριος Κολορίζος**



**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Ευθυμία Λεβίζου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια**  
**Φυσιολογίας Φυτών**

**Βόλος, 2022**

**«Λειτουργικές αποκρίσεις τομάτας που αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδρειοπονίας και υδροπονίας»**

**“Functional responses of tomato grown in aquaponic and hydroponic systems”**

**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. Πετρόπουλος Σπυρίδων**, Αναπληρωτής Καθηγητής Λαχανοκομίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**

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

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ όλους όσους με υποστήριξαν και πίστεψαν στην προσπάθεια μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κα Λεβίζου Ε., καθώς και την υποψήφια Διδάκτωρ Μουραντιάν Α. για την διαρκή καθοδήγηση τους.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	7
Εισαγωγή.....	9
Ιστορική αναδρομή.....	10
Υδροπονία.....	10
Υδατοκαλλιέργεια.....	11
Ενυδραιοπονία.....	12
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στην εφαρμογή των ενυδραιοπονικών συστημάτων.....	14
Είδη ψαριών και φυτών στα ενυδραιοπονικά συστήματα.....	15
Τομάτα.....	16
Ενυδραιοπονικές έρευνες με φυτά τομάτας.....	17
Σκοπός της εργασίας.....	18
Υλικά και μέθοδοι.....	19
Καλλιέργεια φυτών-Τομάτα.....	19
Τιλάπια.....	21
Μεταχειρίσεις.....	21
Μετρήσεις.....	23
Μέτρηση φθορισμού χλωροφύλλης <i>a in vivo</i> .....	23
Μέτρηση περιεχομένου του φύλλου σε χλωροφύλλη.....	24
Μέτρηση PRI.....	25
Υπολογισμοί φυλλικής επιφάνειας, ύψος φυτού και συνολικό ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος..	25
Πάχος φύλλου.....	27
Μέτρηση Ειδικής μάζας φύλλου (LSM, Leaf Specific Mass).....	27
Στατιστική ανάλυση.....	27
Αποτελέσματα.....	28
Μετρήσεις φυσιολογίας φυτών.....	28
Καταγραφή τιμών SPAD σε κατακόρυφη διαστρωμάτωση.....	29
Δείκτης PRI.....	32
Φθορισμός Χλωροφύλλης <i>in vivo</i> .....	33
Μετρήσεις ανάπτυξης.....	35
Μέτρηση φυλλικής επιφάνειας.....	37
Πάχος φύλλων.....	38
Μέτρηση LSM.....	39

<b>Συζήτηση .....</b>	<b>40</b>
<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>46</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>47</b>

## Περίληψη

Η ενυδραιοπονία αποτελεί ένα συνδυαστικό σύστημα παραγωγής τροφής, φυτών και ιχθύων, με κύριο χαρακτηριστικό την επανακυκλοφορία του νερού μεταξύ των υπο-συστημάτων του. Το νερό αποτελεί το μέσο που μεταφέρει τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών αλλά και το περιβάλλον διαβίωσης των εκτρεφόμενων ιχθύων. Όπως έχει αποδειχθεί, ορισμένα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία για τα καλλιεργούμενα φυτά βρίσκονται σε επίπεδα χαμηλότερα από τα βέλτιστα στο νερό των συζευγμένων συστημάτων ενυδραιοπονίας (AQ). Επομένως έχει αναπτυχθεί ένα νέο σύστημα ενυδραιοπονίας, το αποξευγμένο (CAP), στο οποίο προστίθενται συμπληρωματικά τα θρεπτικά που έχει ανάγκη η καλλιέργεια. Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, καλλιεργήθηκαν φυτά τομάτας (*Lycopersicon esculentum*), με παράλληλη εκτροφή ιχθύων τιλάπιας (*Oreochromis sp.*). Ο σκοπός του πειράματος ήταν να μελετηθούν οι αναπτυξιακές και φυσιολογικές αποκρίσεις των φυτών που αναπτύσσονταν στα δύο διαφορετικά συστήματα ενυδραιοπονίας συγκριτικά με φυτά υδροπονίας (HP) που αποτελούσαν τον μάρτυρα. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου (116 ημέρες) αφορούσαν το περιεχόμενο των φύλλων σε ολική χλωροφύλλη (SPAD), με ανάλυση αυτού σε διαστρωμάτωση κατά τον κατακόρυφο άξονα του φυτού, μετρήσεις ανακλαστικότητας φύλλου (δείκτης PRI) και φθορισμού της χλωροφύλλης *in vivo* -με έμφαση στους δείκτες  $F_v/F_m$  και PI Total, καθώς και μετρήσεις ύψους φυτών, ξηρής βιομάζας υπέργειου τμήματος, πάχους φύλλου, ειδικής μάζας φύλλου (LSM) και φυλλικής επιφάνειας. Οι περισσότερες διαφορές στις μετρηθείσες παραμέτρους εντοπίστηκαν στα φυτά της AQ, ενώ HP και CAP παρουσίασαν παρόμοιες αποκρίσεις. Το περιεχόμενο των φύλλων σε ολική χλωροφύλλη (τιμές SPAD) ήταν σημαντικά χαμηλότερο στην AQ συγκριτικά με τις CAP και HP που εμφάνισαν παρόμοια επίπεδα, καθ' όλη την αναπτυξιακή περίοδο. Το αποτέλεσμα αυτό παρατηρήθηκε σε όλες τις ομάδες φύλλων που μελετήθηκαν στον κατακόρυφο άξονα του φυτού, με τα ανώτερα φύλλα που είναι και νεαρότερα να εμφανίζουν τις μικρότερες διαφορές. Ο παράγοντας φθορισμού  $F_v/F_m$  ήταν υψηλότερος στην AQ μεταχείριση, υποδεικνύοντας ότι δεν υπήρξε καταπόνηση και προβληματική λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής. Εντούτοις, η AQ είχε την χαμηλότερη φωτοσυνθετική απόδοση με βάση τον δείκτη PI Total, ενώ η CAP παρουσίασε σημαντικά υψηλές τιμές σε αρκετές μετρήσεις. Το τελευταίο σχετίζεται με βελτιωμένη αποδοτικότητα χρήσης φωτός.

Σε ότι αφορά τις αναπτυξιακές παραμέτρους, η AQ μεταχείριση εμφάνισε τις χαμηλότερες τιμές ξηρού βάρους φυτού και ύψος βλαστού, ενώ CAP και HP δεν διέφεραν μεταξύ τους, σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Τα HP φυτά ανέπτυξαν σημαντικά μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια, εμφανίζοντας διαφορές τόσο με την AQ, όσο και με την CAP ήδη από το μέσον του πειράματος. Η AQ μεταχείριση παρουσίασε σημαντικά υψηλότερες τιμές πάχους φύλλων και LSM. Συμπερασματικά η AQ μεταχείριση μπορεί να συμβάλει θετικά στην καλλιέργεια τομάτας μέσα από μια αειφόρο διαδικασία που στοχεύει στην εξοικονόμηση πόρων και την μηδενική χρήση λιπασμάτων. Εντούτοις, το μειονέκτημα της χαμηλής παραγωγικότητας είναι σημαντικό. Αντίθετα, η CAP μεταχείριση έχοντας παρόμοια αποτελέσματα με την HP μπορεί να καταστεί ένα αξιόπιστο σύστημα παραγωγής υψηλής ποιότητας προϊόντων που θα χαρακτηρίζεται από μειωμένες εισροές χημικών λιπασμάτων, επομένως θα έχει σημαντικά οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά οφέλη.



## Εισαγωγή

Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα στον 21ο αιώνα είναι η αύξηση του πληθυσμού της γης. Εκτιμάται ότι μέχρι το 2040 ο πλανήτης θα κατοικείται από περίπου 9 δισεκατομμύρια ανθρώπους (Godfray 2010) κι επομένως το ερώτημα που εγείρεται είναι αν θα μπορέσει η παγκόσμια παραγωγή τροφής να ανταπεξέλθει στην κάλυψη των διατροφικών αναγκών του ανθρώπινου πληθυσμού. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί πως η μέχρι τώρα εκθετική αύξηση του πληθυσμού είναι στενά συνδεδεμένη με υψηλές απαιτήσεις σε ζωική πρωτεΐνη ανά κεφαλή, γεγονός που δημιουργεί επιπλέον πιέσεις στους σχετικούς κλάδους παραγωγής για υψηλές αποδόσεις (Klinger and Naylor 2012).

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι εντατικές πρακτικές παραγωγής που εφαρμόζουν οι πρωτογενείς κλάδοι, ενώ οδήγησαν σε πλεονάσματα τροφής, η άμεση εξάρτησή τους σε πόρους είχε αρνητικό αντίκτυπο στα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα (Troell 2014). Συγκεκριμένα, η εντατική γεωργία, βασίζεται για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, στην εκμετάλλευση των φυσικών αποθεμάτων γλυκού νερού, θρεπτικών στοιχείων και ορυκτών σε τέτοιο ρυθμό που η ανανέωση τους καθίσταται αδύνατη (Van Vuuren 2010). Επομένως, για να υπάρξει μια βιώσιμη λύση στις επερχόμενες διατροφικές απαιτήσεις, θα πρέπει να υπάρξει μια άμεση μετάβαση, από τις στρατηγικές παραγωγής υψηλών αποδόσεων με βάση την αλόγιστη χρήση πόρων, προς ένα αειφόρο σύστημα παραγωγής που θα αναπτύσσεται με γνώμονα τις ανθρώπινες ανάγκες, χωρίς να αποτελεί απειλή για το περιβάλλον (Goddek 2018). Με δεδομένα πλέον τα προβλήματα που απειλούν την ισορροπία της βιόσφαιρας και μπροστά στην δυσοίωση κλιματική αλλαγή, η αναζήτηση και η εφαρμογή αειφόρων συστημάτων παραγωγής τροφίμων είναι πλέον απαραίτητες για να αντιμετωπιστούν οι επικείμενες προκλήσεις.

Η ενυδραιοπονία είναι ένα καινοτόμο σύστημα ταυτόχρονης παραγωγής ψαριών και καλλιεργούμενων φυτών με επίκεντρο την αειφορία, καθώς για την λειτουργία του εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα τις διαθέσιμες εκτάσεις και το νερό με τα θρεπτικά στοιχεία που κυκλοφορούν μέσα σε αυτό, ελαχιστοποιώντας την απώλεια του (Somerville 2014). Πιο συγκεκριμένα η ενυδραιοπονία είναι ένα σύστημα παραγωγής που βασίζεται στην εκμετάλλευση των θρεπτικών στοιχείων που βρίσκονται στις εκκρίσεις και περιττώματα των ψαριών, χρησιμοποιώντας τα ως πηγή λιπασμάτων για τα φυτά, ενώ παράλληλα

το νερό ανακυκλώνεται μεταξύ των δύο συστημάτων, εξυπηρετώντας τις ανάγκες των ψαριών και των φυτών, χωρίς να αποβάλλεται στον υδροφόρο ορίζοντα (Suhl 2016).

### **Ιστορική αναδρομή**

Η ενυδρείοπονία αν και μελετάται εντατικά τις τελευταίες δεκαετίες, οι πρώτες μορφές της εντοπίζονται στους αρχαίους Ασιατικούς πολιτισμούς (5-10 μ.χ.), όπου οι αγρότες διατηρούσαν ορυζώνες με την παράλληλη εκτροφή ψαριών (FAO 2004). Σχεδόν μια χιλιετία αργότερα, η φυλή των Αζτέκων άρχισε να χρησιμοποιεί για την καλλιέργεια φυτών, πλωτά τμήματα που προσομοίωναν κλίνες λαχανικών και κινούνταν ελεύθερα μέσα σε λίμνες, απορροφώντας τα θρεπτικά στοιχεία που βρίσκονταν στο υδάτινο περιβάλλον (Crossley 2004). Ωστόσο, οι πιο σημαντικές έρευνες στην ιστορία της ενυδρείοπονίας που βοήθησαν στην μετέπειτα εξέλιξη της πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των δεκαετιών του 1970 και 1980 από πολλούς ερευνητές (Lennard 2017). Μια από αυτές τις προσπάθειες ήταν αυτή του Dr. Naegel το 1977 που πειραματίστηκε σε εκτροφές ψαριών τιλάπια (*Tilapia mossambica*) και κυπρίνων (*Cyprinus carpio*) με την ταυτόχρονη καλλιέργεια μαρουλιού και τομάτας, στο πρώτο σύστημα που διέθετε βιοφίλτρα νιτροποίησης (Palm 2018).

### **Υδροπονία**

Η υδροπονία ορίζεται ως μια μέθοδος καλλιέργειας φυτών τα οποία δεν αναπτύσσονται σε έδαφος όπως συνηθίζεται στην κλασσική γεωργία, αλλά σε διάφορους τύπους υποστρωμάτων (πετροβάμβακας, περλίτης, βερμικουλίτης, κ.α), ή και απευθείας μέσα σε υδατικό μέσο όπου οι ρίζες των φυτών έρχονται σε άμεση επαφή με το θρεπτικό διάλυμα (Somerville 2014). Οι ανάγκες των φυτών ελέγχονται και ικανοποιούνται πλήρως σε αυτό το περιβάλλον ανάπτυξης, η χρήση των υποστρωμάτων προσφέρει παράλληλα ιδανικές συνθήκες υγρασίας και οξυγόνου στο ριζικό σύστημα με αποτέλεσμα οι αποδόσεις και η ποιότητα παραγωγής να είναι ανταγωνιστικές (Μαυρογιαννόπουλος 2006). Η υδροπονία δίνει λύσεις σε προβλήματα που αντιμετωπίζει η σύγχρονη γεωργία. Για παράδειγμα, η αυξημένη χρήση φυτοφαρμάκων για την αντιμετώπιση παθογόνων εδάφους, η έλλειψη αρδευτικού νερού και η υποβάθμιση του εδάφους από την εντατική εκμετάλλευση, σε πολλές εκτάσεις παγκοσμίως, μπορούν να ξεπεραστούν με την εφαρμογή υδροπονικών συστημάτων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της υδροπονικής μεθόδου,

είναι η δυνατότητα αποστείρωσης και επαναχρησιμοποίησης των υποστρωμάτων. Με αυτό τον τρόπο αποτρέπεται η ανάπτυξη παθογόνων με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες προσβολής στα φυτά της καλλιέργειας (Goddek 2018). Επιπλέον, η υδροπονία μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχημένα εκεί που το αρδευτικό νερό είναι περιορισμένο και το έδαφος έχει υποβαθμιστεί σημαντικά. Η ισορροπημένη χρήση νερού και θρεπτικών για την ανάπτυξη της καλλιέργειας, χωρίς άσκοπες δαπάνες, αποτελεί ένα ακόμη θετικό χαρακτηριστικό του συστήματος αυτού.

Ωστόσο, εκτός από το υψηλό κόστος εγκατάστασης ενός υδροπονικού συστήματος, για την ορθή λειτουργία του απαιτείται καταρτισμένο προσωπικό καθώς το περιθώριο λαθών είναι μικρό, ιδιαίτερα σε αστοχίες που αφορούν την προετοιμασία του θρεπτικού διαλύματος (Μαυρογιαννόπουλος 2006). Επιπλέον, θα πρέπει να δίνεται προσοχή στο μικροβιακό φορτίο του νερού της καλλιέργειας καθώς υπάρχει κίνδυνος να εξαπλωθούν τάχιστα μέσω του υδατικού μέσου τυχόν παθογόνα που θα εισέλθουν σε αυτό (Goddek 2018).

### **Υδατοκαλλιέργεια**

Η υδατοκαλλιέργεια αποτελεί σύστημα εκτροφής ιχθύων και άλλων υδρόβιων οργανισμών όπως μαλάκια και καρκινοειδή αλλά και υδρόφυτων, σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα γλυκού, θαλάσσιου και υφάλμυρου νερού. Το μεγαλύτερο ποσοστό των υδατοκαλλιεργειών παγκοσμίως βρίσκεται στην Ασία και συγκεκριμένα στην Κίνα, όπου εκτρέφονται κυρίως ψάρια γλυκού νερού όπως οι κυπρίνοι (Klinger and Naylor 2012). Οι τύποι υδατοκαλλιέργειας που χρησιμοποιούνται, είναι τα ανοιχτά συστήματα ύδατος, οι λιμνοδεξαμενές ή υδατοσυλλογές καλλιέργειας, τα συγκοινωνούντα συστήματα καλλιέργειας και τα συστήματα επανακυκλοφορίας του νερού (recirculating aquaculture systems, RAS). Σύμφωνα με έρευνες, ο κλάδος της υδατοκαλλιέργειας θεωρείται από τους πλέον κρίσιμους στην παγκόσμια παραγωγή τροφής καλύπτοντας πάνω από το 50% των διατροφικών αναγκών σε ψάρι (FAO 2014). Η αναμενόμενη αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού τις επόμενες δεκαετίες θα ασκήσει περαιτέρω πιέσεις για εντατική παραγωγή. Επίσης, οι ποσότητες τροφής που προέρχονται από τα φυσικά υδάτινα οικοσυστήματα του πλανήτη μειώνονται λόγω της υπεραλίευσης, επομένως οι υδατοκαλλιέργειες θα κληθούν να αυξήσουν ακόμη περισσότερο τον ρυθμό παραγωγής τους (Troell 2014). Όμως η αύξηση αυτή, μεγιστοποιεί παράλληλα και τις αρνητικές επιπτώσεις που δημιουργούν αυτά τα συστήματα στο περιβάλλον. Έχει αποδειχθεί πως μεγάλες ποσότητες αντιβιοτικών και χημικών ουσιών που εφαρμόζονται στις υδατοκαλλιέργειες, διαρρέουν στα υδάτινα οικοσυστήματα ρυπαίνοντας τα σημαντικά (Klinger

and Naylor 2012). Ένα ακόμη ανησυχητικό επακόλουθο της εφαρμογής εντατικών υδατοκαλλιέργειών είναι η μείωση των άγριων πληθυσμών ψαριών, είτε για την αναπαραγωγή νέων πληθυσμών στις εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας, είτε για την δημιουργία τροφών για την κάλυψη των αναγκών των σαρκοφάγων καλλιεργούμενων ψαριών (Somerville 2014). Επιπλέον, η τροφή των ψαριών περιέχει σημαντικά στοιχεία όπως άζωτο και φώσφορο. Ένα ποσοστό αυτών καταναλώνεται από τα εκτρεφόμενα ψάρια για την αύξηση της βιομάζας τους, ενώ το υπόλοιπο αποβάλλεται στο υδάτινο περιβάλλον (Schneider et al., 2004). Επομένως, τα απόβλητα που συσσωρεύονται, δημιουργούν τοξικότητες στους υδρόβιους οργανισμούς αν παραμείνουν στο υδατικό μέσο, ενώ αν απορριφθούν στο υδάτινο περιβάλλον προκαλούν προβλήματα ευτροφισμού απειλώντας την ισορροπία των οικοσυστημάτων (Helfman G 2009, Amirkolaie AK. 2011). Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα σχεδιάστηκε ένα νέο σύστημα υδατοκαλλιέργειας, με ανακυκλοφορία νερού (RAS), όπου το νερό της καλλιέργειας, φιλτράρεται και επανακυκλοφορεί, αφού απομακρύνονται από αυτό τα απόβλητα των ψαριών, διάφοροι μικροοργανισμοί και υπολείμματα τροφής (Summerfelt 2003).

Μερικά από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των RAS συστημάτων είναι οι υψηλές απαιτήσεις τους σε ενέργεια. Επιπλέον η χρήση συστημάτων τέτοιου τύπου, λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης και παραγωγής, δεν προτιμάται, διότι για να καταστούν κερδοφόρα θα πρέπει να παράξουν προϊόντα υψηλής αξίας που θα προορίζονται για αγορές με υψηλό οικονομικό ενδιαφέρον (Timmons and Ebeling 2010).

### **Ενυδραιοπονία**

Η συγχώνευση ενός συστήματος υδατοκαλλιέργειας επανακυκλοφορίας νερού (RAS) με την υδροπονική μέθοδο, οδηγεί σε ένα νέο σύστημα παραγωγής τροφής το ενυδραιοπονικό (aquaponics, Lennard 2017). Η εγκατάσταση, περιλαμβάνει την δεξαμενή εκτροφής, τους υδρόβιους οργανισμούς, ένα βιολογικό φίλτρο, ένα μηχανικό φίλτρο, τα φυτά και το είδος υποστρώματος που θα χρησιμοποιηθεί, και το σύστημα σωληνώσεων για την κυκλοφορία του νερού (Rakocy 2012). Το σύστημα αυτό εκμεταλλεύεται τις απεκκρίσεις των υδρόβιων οργανισμών που είναι πλούσιες σε αζωτούχες ενώσεις και με την εφαρμογή βιο-φίλτρων που περιέχουν αποικίες βακτηριών, μετατρέπει τα απόβλητα αυτά σε θρεπτικό μέσο για τα καλλιεργούμενα φυτά (Turcios and Papenbrock 2014). Η διαδικασία λειτουργίας ενός ενυδραιοπονικού συστήματος έχει ως εξής: τα ψάρια εκτροφής ταΐζονται με τροφές, και τα προϊόντα του μεταβολισμού τους που εκκρίνονται στο νερό περιέχουν, μεταξύ άλλων

μορίων/ιόντων και αμμωνία. Για να αποφευχθεί η συσσώρευση της αμμωνίας στο υδατικό μέσο και γίνει τοξική για τα ψάρια, το νερό αφού περαστεί από ένα μηχανικό φίλτρο που απομακρύνει τα στερεά υπολείμματα, καταλήγει σε ένα βιολογικό φίλτρο με αποικίες νιτροποιητικών βακτηρίων (*Nitrobacter spp.*, *Nitrobacter spp.*) που μετατρέπουν την αμμωνία σε νιτρώδη ( $\text{NO}^{-2}$ ) και στην συνέχεια σε νιτρικά ( $\text{NO}^{-3}$ ) ιόντα. Το θρεπτικό διάλυμα που προκύπτει, οδηγείται έπειτα στο υδροπονικό σύστημα για να καλύψει τις ανάγκες των φυτών και αφού οι ρίζες απορροφήσουν τα θρεπτικά στοιχεία που χρειάζονται, το νερό μέσω των σωληνώσεων απορροής επιστρέφει πάλι στις δεξαμενές των ψαριών. Σύμφωνα με τον Lennard 2017 θα πρέπει να υπάρχει μια δυναμική αναλογία μεταξύ ψαριών και φυτών για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα ενυδρειοπονικό και πως τα θρεπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των φυτών θα πρέπει να προέρχονται κατά ένα μεγάλο ποσοστό (>50%) από τις απεκκρίσεις των ψαριών του συστήματος.

Ωστόσο, το θρεπτικό διάλυμα που προέρχεται από τις δεξαμενές των ψαριών στο κλειστό κύκλωμα ενυδρειοπονίας (coupled), δεν περιέχει σε επάρκεια όλα τα θρεπτικά στοιχεία που χρειάζονται τα φυτά για να αναπτυχθούν ικανοποιητικά κι έτσι εφαρμόζεται πλέον ένα διαφορετικό μοντέλο αποζευγμένης μεθόδου ενυδρειοπονίας (decoupled). Σε αυτή την τεχνική υπάρχει η δυνατότητα παρέμβασης και ρύθμισης του υδατικού μέσου (προσθήκη στοιχείων, ρύθμιση pH) ώστε να ικανοποιούνται και οι θρεπτικές ανάγκες των φυτών, ενώ παράλληλα να εξασφαλίζονται οι βέλτιστες συνθήκες διαβίωσης των ψαριών (Palm et al., 2018). Τα δύο συστήματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και το νερό πλέον δεν επανακυκλοφορεί από την υδροπονία στις δεξαμενές των ιχθύων, ενώ όποια απώλεια σε νερό (πχ. από την εξατμισοδιαπνοή των φυτών), συμπληρώνεται (Monsees et al., 2017).

### **Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στην εφαρμογή των ενυδρειοπονικών συστημάτων**

Με δεδομένα την φθίνουσα πορεία των φυσικών πόρων και την υποβάθμιση των καλλιεργούμενων εκτάσεων, η ενυδρειοπονία έχει αποδειχθεί πως μπορεί να συμβάλει αποτελεσματικά στην λύση αυτών των προκλήσεων. Το αειφόρο μοντέλο παραγωγής τροφής που ακολουθείται, με την ελάχιστη χρήση χημικών και φυτοφαρμάκων, συμβάλλει στις προσπάθειες για την εξασφάλιση τροφής, ενώ προστατεύει παράλληλα το περιβάλλον.

Αρχικά, τα εκτρεφόμενα ψάρια που μπορούν να παρέχουν την απαραίτητη πρωτεΐνη που χρειάζεται ο ανθρώπινος οργανισμός, αφενός απαιτούν την μικρότερη ποσότητα τροφής ανά κιλό ανάπτυξης σε σχέση με τα κτηνοτροφικά ζώα κι αφετέρου, τα απόβλητα τους μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμη διατροφική πηγή για τα καλλιεργούμενα φυτά (Graber and Junge 2009). Η μετατροπή των αζωτούχων εκκρίμάτων των ψαριών σε πολύτιμα θρεπτικά για την ανάπτυξη των φυτών αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της ενυδρειοπονικής μεθόδου. Επιπρόσθετα, το νερό μέσα σε ένα συζευγμένο σύστημα (coupled), με το φιλτράρισμα που δέχεται αρχικά αλλά και την απορρόφηση των θρεπτικών του από τις ρίζες των φυτών, καθαρίζεται και χρησιμοποιείται και πάλι, ελαχιστοποιώντας την προσθήκη νέου (Suhl et al., 2016). Για παράδειγμα, σε έρευνες που έγιναν από τους Knaus & Palm 2017, η καθημερινή προσθήκη φρέσκου νερού σε καλλιέργεια βοτάνων και εκτροφής ψαριών τιλάπια και γατόψαρων, ήταν μόλις 1.48%, διατηρώντας έτσι έναν από τους πιο σημαντικούς πόρους, χωρίς να δαπανώνται σημαντικές ποσότητες του. Επίσης, ένα ακόμη θετικό χαρακτηριστικό της ενυδρειοπονικής καλλιέργειας είναι το εξής: σε σημεία εντός του αστικού ιστού των πόλεων όπου η παραδοσιακή υπαίθρια καλλιέργεια θα ήταν αδύνατη, ή σε περιοχές όπου τα εδάφη έχουν επηρεαστεί αρνητικά από την εντατική γεωργία, τα ενυδρειοπονικά συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά αφού δεν απαιτούν καλλιεργήσιμο έδαφος, συμβάλλοντας θετικά στην οικονομία των τοπικών κοινοτήτων (Goddek 2018).

Ωστόσο η ενυδρειοπονία συνοδεύεται από ιδιαίτερες προκλήσεις οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη κατά την εφαρμογή της. Αρχικά το υψηλό κόστος εγκατάστασης είναι ένας αποτρεπτικός παράγοντας και ο συνδυασμός φυτικού και ζωικού κεφαλαίου αυξάνει το ρίσκο της επένδυσης. Επιπρόσθετα, για να είναι προσοδοφόρα μια τέτοια προσπάθεια, θα πρέπει να κινείται σε υψηλές αποδόσεις τόσο στην παραγωγή ψαριών όσο και φυτών. Επίσης, η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος βασίζεται διαρκώς στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, επομένως προβλήματα με την ποιότητα παροχής, τα οποία θα θέσουν σε κίνδυνο το ζωικό και φυτικό

κεφάλαιο, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν εκ των προτέρων με κατάλληλο εξοπλισμό (γεννήτριες), ο οποίος αυξάνει περαιτέρω το κόστος της αρχικής εγκατάστασης.

Στα συζευγμένα συστήματα δεν αναπτύσσονται ικανοποιητικά πολλά είδη καλλιεργούμενων φυτών, διότι το διάλυμα που προέρχεται από τα απόβλητα των ψαριών δεν περιέχει σε επαρκή επίπεδα όλα τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία (μερικά από αυτά συσσωρεύονται στα μηχανικά φίλτρα), που έχουν ανάγκη τα φυτά, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η απόδοση τους (Goddek 2015). Επιπλέον, συχνά παρατηρείται το υδατικό μέσο που επιστρέφει στις δεξαμενές των ιχθύων, να συγκεντρώνει σταδιακά χημικές ουσίες που γίνονται τοξικές για τα ψάρια. Γι' αυτό τον λόγο δεν μπορούν να καλλιεργηθούν ευρέως όλα τα είδη ψαριών, μόνο εκείνα που παρουσιάζουν μια σχετική ανθεκτικότητα σε επιβαρυνμένες υδατικές συνθήκες (Yavuzcan Yildiz et al., 2017). Τέλος, μια ενυδρειοπονική εγκατάσταση, εξαιτίας της πολυπλοκότητας της και για την εύρυθμη λειτουργία της, χρειάζεται προσωπικό με υψηλό γνωστικό υπόβαθρο του αντικείμενου (Somerville 2014).

### **Είδη ψαριών και φυτών στα ενυδρειοπονικά συστήματα**

Πολυάριθμοι συνδυασμοί φυτών και ψαριών έχουν δοκιμαστεί στα ενυδρειοπονικά συστήματα. Η επιλογή των ειδών αφενός βασίζεται σε οικονομικούς παράγοντες, ώστε να μπορέσει να επιφέρει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κέρδος στην αγορά που απευθύνεται ο παραγωγός κι αφετέρου στην φυσιολογία του κάθε είδους και το πως αυτό ανταποκρίνεται στις χημικές ουσίες που συγκεντρώνονται στο υδατικό μέσο (Goddek 2018). Μερικά από τα πιο κοινά είδη ψαριών που χρησιμοποιούνται στην ενυδρειοπονία είναι οι τιλάπιες, οι πέστροφες, οι κυπρίνοι, οι πέρκες, τα γατόψαρα (Rakocy 2012, Klinger 2012).

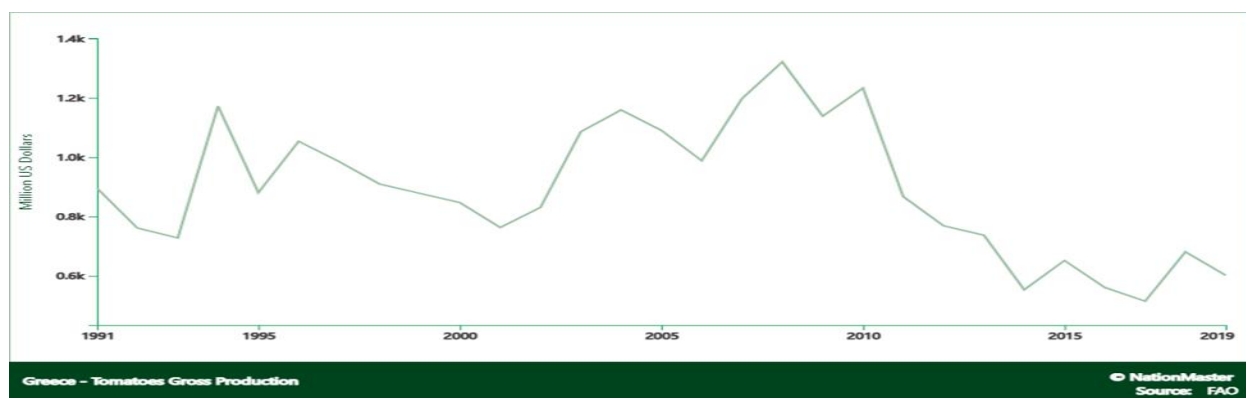
Τα καλλιεργούμενα φυτά που συναντώνται συχνότερα στα ενυδρειοπονικά συστήματα, εξαιτίας του σύντομου χρόνου συγκομιδής και των υψηλών τιμών που πετυχαίνουν στην αγορά, είναι τα αρωματικά βότανα. Ο βασιλικός, το κόλιαντρο, ο μαϊντανός, η μέντα, η γλυστρίδα, είναι μερικά από αυτά (Rakocy 2012). Επίσης, άλλα φυτά που επιλέγονται καθώς δεν απαιτούν μεγάλες ποσότητες θρεπτικών για την ανάπτυξη τους είναι το σπανάκι, το μαρούλι, το σέσκουλο, το σχοινόπρασο, κ.α. (Diver 2006). Η τομάτα σύμφωνα με τον Somerville 2014, είναι ένα φυτό κατάλληλο για την ενυδρειοπονία, που μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών κι έντονης ηλιοφάνειας.

## Τομάτα

Φυτό της οικογένειας Solanaceae, η τομάτα (*Lycopersicon esculentum*), ετήσιο ποώδες λαχανικό, αποτελεί μαζί με την πατάτα μια από τις πιο δημοφιλείς καλλιέργειες παγκοσμίως (Ολύμπιος 2001). Για να ευδοκιμήσει απαιτεί θερμό κλίμα μεταξύ 18-25 °C, εδάφη αμμοπηλώδη, pH μεταξύ 6-7.5, ενώ είναι φυτό μέτρια ανθεκτικό στην αλατότητα (Χα και Πετρόπουλος 2014). Η καλλιέργεια της τομάτας γίνεται για τον καρπό της ο οποίος είναι πλούσιος σε βιταμίνη C και άλλα αντιοξειδωτικά, με ιδιαίτερο άρωμα, γευστικός και καταναλώνεται νωπός ή σε διάφορες μορφές μετά από μεταποιητικές διαδικασίες (Χα και Πετρόπουλος 2014).

Η τομάτα καλλιεργείται σε υπαίθριες εκτάσεις αλλά είναι και φυτό που συναντάται συχνά σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις. Σε διεθνές επίπεδο η συνολική παραγωγή τομάτας για το 2020 ανήλθε σε 186.821.216 τόνους και η καλλιέργεια της πραγματοποιήθηκε σε εκτάσεις ύψους 5.051.983 εκταρίων (FAOSTAT 2020). Στην Ασία παράγεται το 54,5% της παγκόσμιας παραγωγής, ενώ η Αμερική και η Ευρώπη συμμετέχουν με 17,5% και 15,7% αντίστοιχα. Οι χώρες που πρωτοστατούν στην παραγωγή τομάτας είναι η Κίνα, η Ινδία, η Τουρκία και οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.

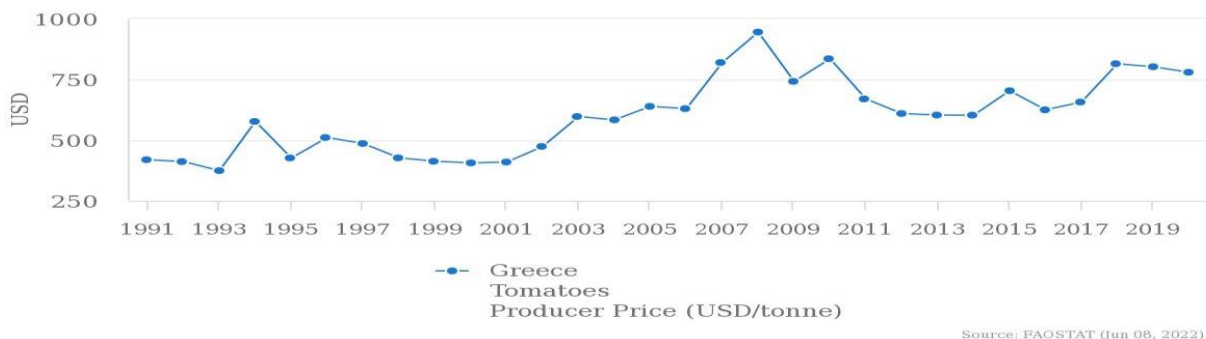
Στον ελληνικό χώρο η επιτραπέζια τομάτα καταλαμβάνει την δεύτερη θέση πίσω από την καλλιέργεια πατάτας σε καλλιεργούμενες συνολικά εκτάσεις. Το 2019, η συνολική παραγωγή έφτασε τους 808.670 τόνους με ακαθάριστη αξία 601,75 εκατομμύρια δολάρια (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Ακαθάριστη αξία τομάτας 2019. ΠΗΓΗ: FAOSTAT 2019.



Η καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας σύμφωνα με τα στοιχεία του ΕΛΣΤΑΤ για το 2019 έφτασε τους 354.747 τόνους σε έκταση 50.678 στρεμμάτων, ενώ η παραγωγή επιτραπέζιας τους 162.934 τόνους σε 57.000 στρέμματα έκτασης στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις, ενώ στις θερμοκηπιακές 235.598 τόνοι σε 24.457 στρέμματα αντίστοιχα. Από το 2012 η τιμή της τομάτας έχει διαρκώς ανοδικές τάσεις, το 2019 η τιμή ενός τόνου προϊόντος ανήλθε στα 779,8 δολάρια (Εικόνα 2) (ΕΛΣΤΑΤ, 2019).



Εικόνα 2: Τιμή τόνου εγχώριας τομάτας. ΠΗΓΗ:ΕΛΣΤΑΤ 2019.

Η τομάτα είναι ένα κατάλληλο λαχανικό για την ενυδρειοπονική καλλιέργεια που ανταποκρίνεται θετικά, ενώ έχει αυξημένες ανάγκες υποστήλωσης καθώς ξεπερνά σε μήκος τα 180 cm. Επιπρόσθετα, λόγω των υψηλότερων απαιτήσεων που έχει σε θρεπτικά στοιχεία, η τομάτα ανταποκρίνεται καλύτερα σε μεγαλύτερης κλίμακας ενυδρειοπονικά συστήματα με υψηλή πυκνότητα εκτρεφόμενων ψαριών ή σε συστήματα αποζευγμένης μεθόδου όπου είναι δυνατή η προσθήκη θρεπτικών στοιχείων, όπως το κάλιο το οποίο είναι απαραίτητο σε όλες τις φάσεις ανάπτυξης του φυτού ( Nicoletto et al., 2018).

### Ενυδρειοπονικές έρευνες με φυτά τομάτας

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί τις τελευταίες δεκαετίες με την καλλιέργεια τομάτας και την παράλληλη εκτροφή ψαριών. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν το 1978 από τον Lewis όπου σε καλλιέργεια τομάτας και εκτροφής γατόψαρων, σημειώθηκε αύξηση στην παραγόμενη ποσότητα καρπών, συγκριτικά με τις αποδόσεις της συμβατικής καλλιέργεια τομάτας στο έδαφος. Επίσης, θετικά αποτελέσματα είχαν κι οι μελέτες, άλλων ερευνητών (Mc Murtry et al., 1997), όπου με τροποποιήσεις στην πυκνότητα των ψαριών και με την αύξηση του μεγέθους των βιοφίλτρων, ανέβασαν την μέση παραγωγή καρπών ανά φυτό τομάτας. Το 2016 στο Abtshagen της Γερμανίας, οι Suhl et al, σε πειραματική αξιολόγηση ποικιλιών τομάτας που αναπτύσσονταν σε ενυδρειοπονικό και υδροπονικό σύστημα, με συγκαλλιέργεια ψαριών τιλápια, παρατήρησαν τα

εξής. Οι αποδόσεις σε καρπό ήταν παρόμοιες στα δύο συστήματα και οι συγκεντρώσεις των καρπών σε λυκοπένιο και β-καροτένιων ήταν εφάμιλλες, ωστόσο η εξοικονόμηση νερού και συμπληρωματικών θρεπτικών ήταν μεγαλύτερες στο ενυδρειοπονικό σύστημα. Την ίδια περίοδο στο Auburn University της Alabama ο Pickens 2015 , μελετώντας μεταχειρίσεις ενυδρειοπονικής καλλιέργειας (τιλάπια και τομάτα τύπου cherry) και υδροπονικού συστήματος, συμπέρανε πως οι δύο μεταχειρίσεις ήταν εξίσου αποδοτικές. Το 2020 οι Yang and Kim σε συγκριτικά πειράματα (τομάτα – τιλάπια), μεταξύ ενυδρειοπονικής και υδροπονικής καλλιέργειας, διαπίστωσαν μειωμένη βιομάζα στα φυτά της πρώτης, ωστόσο οι αποδόσεις σε ποσότητα καρπού δεν διέφεραν μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων. Επιπλέον, η μεταχείριση ενυδρειοπονίας παρουσίασε ελλείψεις σε Mg και Ca καθώς τα στοιχεία αυτά δεν βρίσκονται στην τροφή των ψαριών, με αποτέλεσμα να παρατηρείται χαμηλότερο επίπεδο χλωροφυλλών στα φύλλα (SPAD). Μια ακόμη έρευνα των Roosta & Hamidpour 2011 σε καλλιέργεια τομάτας και κυπρίνων, έδειξε πως διαφυλλικές λιπάνσεις με στοιχεία (K, Fe, Mn) τα οποία βρίσκονταν σε έλλειψη στα φυτά της ενυδρειοπονίας, βελτίωσαν αισθητά την συνολική παραγωγή, η οποία δεν διέφερε από αυτήν της υδροπονίας. Επομένως, αποδεικνύεται πως η συμπληρωματική εφαρμογή των στοιχείων που βρίσκονται σε έλλειψη στο υδατικό μέσο, βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα και την απόδοση της καλλιέργειας.

### **Σκοπός της εργασίας**

Το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για τις ενυδρειοπονικές μεταχειρίσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένο, με πλήθος ερευνών να παρουσιάζονται τα τελευταία χρόνια. Η τομάτα, από τις πιο δημοφιλείς καλλιέργειες παγκοσμίως, με τις διαφορετικές θρεπτικές ανάγκες που έχει ανά στάδιο ανάπτυξης και την μεγάλη χρονική διάρκεια της ως καλλιέργεια, κεντρίζει το ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνες στο ενυδρειοπονικό περιβάλλον. Το πείραμα που έγινε στην πρότυπη εγκατάσταση ενυδρειοπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας είχε ως σκοπό την σύγκριση των φυσιολογικών αποκρίσεων φυτών τομάτας (παράμετροι φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, δείκτες καταπόνησης, αναπτυξιακά χαρακτηριστικά) μεταξύ των συστημάτων συζευγμένης και αποζευγμένης ενυδρειοπονίας και της υδροπονικής μεθόδου.

## Υλικά και μέθοδοι

Το πείραμα έλαβε χώρα στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις ενυδρειοπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Ερευνητικό αγρόκτημα του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής παραγωγής και Αγροτικού περιβάλλοντος, στο Βελεστίνο. Ξεκίνησε στις 15 Μαρτίου 2021 και τερματίστηκε στις 12 Ιουλίου 2021, επομένως η διάρκεια του πειράματος ήταν 116 ημέρες. Ο θερμοκηπιακός χώρος που πραγματοποιήθηκε το πείραμα έχει έκταση 440m<sup>2</sup> εκ των οποίων τα 360m<sup>2</sup> ανήκουν στο υδροπονικό σύστημα και τις θέσεις ανάπτυξης των φυτών, ενώ οι δεξαμενές των ιχθύων, τα παρελκόμενα συστήματα της ενυδρειοπονίας και ο κεντρικός υπολογιστής, στεγάζονται σε χώρο ελεγχόμενων συνθηκών με έκταση 80m<sup>2</sup>.

### Καλλιέργεια φυτών-Τομάτα

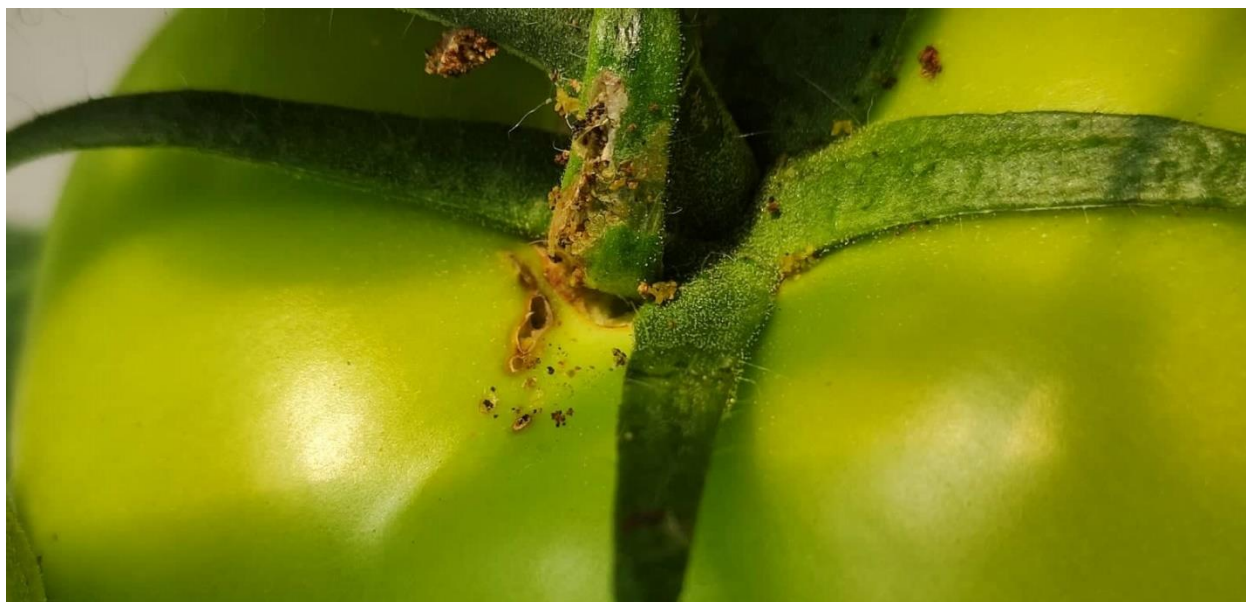
Τα φυτά που επιλέχθηκαν για την πειραματική καλλιέργεια ήταν τοματιές του είδους *Lycopersicon esculentum*, ποικιλίας CABRERA, ζωηρής ανάπτυξης και υψηλής παραγωγικότητας. Τα σπορόφυτα μεταφυτεύτηκαν σε σάκους με υπόστρωμα περλίτη.



Εικόνα 3: Άποψη της εγκατάστασης κατά την μεταφύτευση των φυτών.

Εκτός από τις μετρήσεις που έγιναν στο πλαίσιο του πειράματος και περιγράφονται παρακάτω, απαραίτητες ήταν και οι σχετικές φροντίδες των φυτών. Η υποστύλωσή τους κατά την αύξηση, το κόψιμο των πλάγιων “λαίμαργων” βλαστών, η αφαίρεση των γερασμένων φύλλων και ο έλεγχος για παθογόνα και έντομα-εχθρούς της καλλιέργειας, γίνονταν σε εβδομαδιαία βάση.

Επίσης, εφαρμόστηκαν στην καλλιέργεια αποικίες ωφέλιμων αρπακτικών εντόμων και κολλητικές ταινίες-παγίδες μπλε και κίτρινου χρώματος σε διαφορετικά σημεία του χώρου για τον έλεγχο βλαβερών εντόμων. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν ψεκασμοί με Βάκιλο Θουριγγίας (Lerinox Plus 15g/10L), για την αντιμετώπιση λεπιδόπτερων όπως της τούτας (*Tuta absoluta*) που αποτελεί κύριο εχθρό της τομάτας, ενώ παράλληλα τοποθετήθηκαν και στικς φερομόνης τα οποία αποτελούν μέθοδο παρεμπόδισης σύζευξης των ενήλικων ατόμων. Τέλος, για την πρόληψη μυκητολογικών ασθενειών εφαρμόστηκαν ψεκασμοί χαλκού (Disper CU 15g/10L) ανά 15 ημέρες.



Εικόνα 4: Προσβολή καρπού από προνύμφη τούτας.

Κατά την περίοδο άνθησης, για την αύξηση της καρπόδεσης των φυτών, τοποθετήθηκε στο θερμοκήπιο μια αποικία βομβίνων (*Bombus terrestris*), ώστε να βοηθήσει στην γονιμοποίηση των ανθών.

Η θερμοκρασία και η υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου κυμαίνονταν σε βέλτιστα για την καλλιέργεια επίπεδα, με την χρήση ειδικών αισθητήρων στο χώρο. Όταν η θερμοκρασία έφτανε τους 26 °C, λειτουργούσαν αυτόματα οι ανεμιστήρες παροχής αέρα, ή ακόμη και το πάνελ υγρής παρειάς, διατηρώντας έτσι τις επιθυμητές συνθήκες για τα φυτά.

## Τιλάπια

Για την εκτροφή ιχθύων επιλέχθηκε το είδος τιλάπια του Νείλου (*Oreochromis niloticus*), ψάρια γλυκού νερού τα οποία προήλθαν από εκτροφές του εργαστήριου ενυδρειοπονίας του Τμήματος. Τα ψάρια χωρίστηκαν σε τρεις δεξαμενές με βάση το μέγεθος τους. Συνολικά η εκτροφή περιλάμβανε 430 ψάρια με συνολική βιομάζα 34,24 kg τα οποία τοποθετήθηκαν ώστε κάθε δεξαμενή να περιέχει συνολικά 10 kg βιομάζας. Έτσι, η πρώτη δεξαμενή περιείχε 227 ψάρια με μέγεθος 20-75g, η δεύτερη δεξαμενή 117 μεγέθους 75-120g, ενώ η τρίτη 86 ψάρια με μέγεθος 120-150g. Καθημερινά τα ψάρια τρέφονταν με ειδική τροφή σε τρεις δόσεις, ενώ πριν από κάθε τάισμα, οι ποσότητες της τροφής ζυγίζονταν και καταγράφονταν ώστε να αποτυπώνονται οι εισροές στην υδατοκαλλιέργεια. Κατά την έναρξη, στο μέσο και κατά την λήξη του πειράματος, πραγματοποιήθηκε ζύγισμα όλων των ψαριών των δεξαμενών ώστε να παρακολουθείται η ανάπτυξη της βιομάζας τους.



Εικόνα 5: Δεξαμενή εκτροφής ψαριών τιλάπια.

## Μεταχειρίσεις

Οι τρεις μεταχειρίσεις του πειράματος ήταν οι εξής: α) υδροπονία (HP), β) συζευγμένη μέθοδος ενυδρειοπονίας (AQ) και η αποζευγμένη μέθοδος (CAP). Τα φυτά μεταφυτεύτηκαν σε σάκους περλίτη όπου φέρανε 2 έως 3 σταλάκτες (σύστημα στάγδην άρδευσης) για την άρδευση τους (2 φυτά/σάκο), πάνω σε συνολικά 18 υδροπονικά κανάλια. Με τυχαία κατανομή των μεταχειρίσεων στο χώρο, χρησιμοποιήθηκαν 6 κανάλια ανά μεταχείριση και συνολικά 100 φυτά ανά μεταχείριση.



Στην HP, η καλλιέργεια λάμβανε όλα τα απαραίτητα υδατοδιαλυτά λιπάσματα και η προετοιμασία του θρεπτικού διαλύματος λάμβανε χώρα μέσα στην κεφαλή υδρολίπανσης, η οποία ελεγχόταν πλήρως από τον κεντρικό υπολογιστή. Κάθε φορά που το επίπεδο του θρεπτικού διαλύματος μειωνόταν σημαντικά, δίνονταν αυτομάτως η εντολή από το πρόγραμμα του υπολογιστή να παρασκευαστεί νέο.

Στην AQ, τα φυτά αρδεύονταν με το ενυδρειοπονικό διάλυμα, το υδατικό διάλυμα δηλαδή που προέρχονταν από τις δεξαμενές των ψαριών. Έπειτα από την νιτροποίηση στο βιοφίλτρο της εγκατάστασης, το θρεπτικό διάλυμα κατευθυνόταν προς τα υδροπονικά κανάλια χωρίς να προστίθενται σε αυτό επιπλέον θρεπτικά στοιχεία. Μετά την άρδευση των φυτών, το νερό κατέληγε στο σύστημα απορροών και από εκεί επέστρεφε πίσω στις δεξαμενές εκτροφής (κλειστό σύστημα).

Στην τρίτη μεταχείριση, την CAP, τα φυτά αρδεύονταν με το ενυδρειοπονικό διάλυμα των δεξαμενών εκτροφής, στο οποίο όμως παράλληλα προστίθονταν και τα θρεπτικά στοιχεία που ήταν σε έλλειψη, ώστε η τελική τους συγκέντρωση να φτάνει στα επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν στην μεταχείριση HP. Σε εβδομαδιαία βάση πραγματοποιούνταν αναλύσεις νερού και συμπληρωνόταν όποιο απαραίτητο στοιχείο για την καλλιέργεια ήταν σε έλλειψη (K,P,Ca κ.α). Ουσιαστικά η μεταχείριση αυτή ήταν ένας συνδυασμός την υδροπονικής και της συζευγμένης μεθόδου.

Στις μεταχειρίσεις που λάμβαναν λιπάσματα για την πλήρη θρέψη των φυτών (HP και CAP), το νερό της απορροής περιείχε σημαντικές συγκεντρώσεις χημικών ουσιών που θα προκαλούσαν προβλήματα στα ψάρια αν αυτό επέστρεφε πάλι στις δεξαμενές εκτροφής τους. Επομένως, σε αυτές τις περιπτώσεις το νερό που συλλέγονταν μετά την άρδευση των φυτών, αποβάλλονταν.

## Μετρήσεις

### Μέτρηση φθορισμού χλωροφύλλης *a in vivo*

Η μέτρηση φθορισμού της χλωροφύλλης μας δίνει την δυνατότητα να αξιολογήσουμε με ακρίβεια την κατάσταση της φωτοσυνθετικής συσκευής (φωτοσύστημα PSII), καθώς και τις αποκρίσεις της απέναντι σε βιοτικές και αβιοτικές καταπονήσεις (Zhang et al., 2020). Για την μέτρηση της έγινε χρήση φθορισμόμετρου συνεχούς διέγερσης, Handy-PEA (Plant Efficiency Analyser, Hansatech Instruments, Ltd., Norfolk, England).



Εικόνα 6: Μέτρηση φθορισμού χλωροφύλλης με την συσκευή HANDY PEA.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, αποτελείται από την φορητή συσκευή μέτρησης, μια κεφαλή LED, η οποία συνδέεται στην συσκευή και τα ειδικά κλιπς. Τα κλιπς εφαρμόζονταν στα φύλλα των φυτών τουλάχιστον 30 λεπτά πριν την μέτρηση. Με το κλείστρο που διαθέτουν απομονώνουν μια συγκεκριμένη επιφάνεια του φύλλου ώστε αυτή να μην δέχεται το ηλιακό φως και να βρίσκεται σε πλήρης συσκότιση. Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση, η κεφαλή LED της συσκευής εφαρμόζει στην ειδική υποδοχή πάνω στο κλιπ και με το πάτημα ενός κουμπιού, το τμήμα του φύλλου ακτινοβολείται με ερυθρό φως ( $3500\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) και η συσκευή δίνει μια τιμή μέτρησης. Συνολικά, κατά την διάρκεια του πειράματος έγιναν 8 μετρήσεις, περίπου ανά 15 ημέρες. Οι μετρήσεις λάμβαναν χώρα στις 11:00-12:00 το μεσημέρι, σε 18 φύλλα ανά μεταχείριση. Από τις πολυάριθμες παραμέτρους που μπορεί κανείς να μελετήσει κατά την

μέτρηση φθορισμού, στο συγκεκριμένο εγχείρημα δόθηκε έμφαση στον λόγο  $F_v/F_m$  που εκτιμά τη μέγιστη φωτοχημική απόδοση του PSII (Stirbet 2018). Παράλληλα, υπολογίστηκε μια ακόμη παράμετρος που ονομάζεται  $P_i$  Total, η οποία αποτελεί δείκτη της συνολικής φωτοσυνθετικής απόδοσης του φύλλου.

#### **Μέτρηση περιεχομένου του φύλλου σε χλωροφύλλη**

Η χρήση του φορητού χλωροφυλλόμετρου SPAD 502 (Minolta LTD) δίνει γρήγορα και αποτελεσματικά τιμές, χωρίς να τραυματίζει τους ιστούς των φύλλων. Κατά την διάρκεια του πειράματος, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 9 μετρήσεις οι οποίες απείχαν μεταξύ τους 15 ημέρες. Η διαδικασία περιλάμβανε την λήψη τιμών σε ζεύγη φύλλων που βρίσκονταν σε διαφορετική θέση στον κατακόρυφο άξονα του φυτού (κατώτερα, μεσαία και ανώτερα), σε 30 φυτά ανά μεταχείριση.



*Εικόνα 7: Μέτρηση με την συσκευή SPAD.*



### Μέτρηση PRI

Η μέτρηση της ανακλαστικότητας του φύλλου πραγματοποιήθηκε με την φορητή συσκευή PLANT PEN PRI 210 (PSI, Photon Systems Instruments, Brno, Czech Republic). Οι μετρήσεις έγιναν σε 6 τυχαία φύλλα από 6 διαφορετικά φυτά ανά κανάλι, επομένως σε 36 επαναλήψεις ανά μεταχείριση. Συνολικά έγιναν 8 μετρήσεις κατά την διάρκεια της πειραματικής περιόδου ανά διαστήματα 15 ημερών και κυρίως πρωινές ώρες (11:00).



Εικόνα 8: Μέτρηση ανακλαστικότητας (PRI) σε φύλλο.

### Υπολογισμοί φυλλικής επιφάνειας, ύψος φυτού και συνολικό ξηρό βάρος υπέργειου τμήματος

Κάθε περίπου 15 ημέρες κατά την διάρκεια του πειράματος πραγματοποιούνταν καταστροφικές δειγματοληψίες ολόκληρων φυτών προκειμένου να εκτιμηθούν παράμετροι σχετικά με την αναπτυξιακή τους πρόοδο. Κάθε καταστροφική δειγματοληψία αφορούσε 6 φυτά/μεταχείριση και πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 κατά την αναπτυξιακή περίοδο. Αφού επιλέγονταν τα φυτά από κάθε κανάλι και κόβονταν σε όσο το δυνατόν χαμηλότερο σημείο του κεντρικού στελέχους, έπειτα μεταφέρονταν στον εσωτερικό χώρο της εγκατάστασης. Για τον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας κάθε φυτού, οι πλευρικοί βλαστοί του κόβονταν και τα φύλλα τους αφαιρούνταν και

τοποθετούνταν επάνω σε μια σταθερή επιφάνεια λευκού φόντου. Στην συνέχεια, η επιφάνεια αυτή φωτογραφίζονταν από ένα σταθερό σημείο ώστε να μην υπάρχουν αποκλίσεις στις μετρήσεις, ενώ καταγραφόταν παράλληλα η μεταχείριση και ο αριθμός του φυτού. Στο τέλος κάθε καταστροφικής μέτρησης, με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και ειδικού προγράμματος (ImageJ), οι φωτογραφίες επεξεργάζονταν και υπολογιζόταν η συνολική φυλλική επιφάνεια των φυτών. Από τα ίδια φυτά που επιλέχθηκαν, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ύψους του κεντρικού στελέχους, ενώ παράλληλα υπολογίστηκε και η συνολική ξηρή βιομάζα τους (βλαστοί και φύλλα). Για τον υπολογισμό του ξηρού βάρους τα φύλλα και οι βλαστοί των φυτών τοποθετούνταν μέσα σε δίσκους αλουμινίου και στην συνέχεια στον φούρνο του εργαστηρίου για 3 τουλάχιστον ημέρες σε θερμοκρασία 70 °C. Αφού έφταναν σε σταθερό ξηρό βάρος, ζυγίζονταν σε ζυγαριά ακριβείας για την λήψη των τιμών της συνολικής ξηρής βιομάζας.



Εικόνα 9: Διαχωρισμός των φυτών ανά μεταχείριση για την καταγραφή αναπτυξιακών τους χαρακτηριστικών (αριστερά και η διαδικασία κατά τον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας (δεξιά).

### Πάχος φύλλου

Για την μέτρηση του πάχους των φύλλων χρησιμοποιήθηκε φορητό παχύμετρο ακριβείας 0,01 mm αναλογικού τύπου (Mitutoyo, Japan). Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 36 τυχαία φυτά (1 φύλλο /φυτό) ανά μεταχείριση. Συνολικά έγιναν 9 μετρήσεις ανά διαστήματα 15 ημερών.



Εικόνα 10: Μέτρηση πάχους φύλλων με παχύμετρο.

### Μέτρηση Ειδικής μάζας φύλλου (LSM, Leaf Specific Mass)

Σε κάθε καταστροφική μέτρηση με την βοήθεια φελλοτρυπητήρα λαμβάνονταν 2 δίσκοι/φύλλο από 12 φύλλα/μεταχείριση, οι οποίοι τοποθετούνταν σε φούρνο για 4 ημέρες και σε θερμοκρασία 70 °C ώστε να χάσουν την υγρασία τους. Στη συνέχεια ζυγίζονταν σε ψηφιακή ζυγαριά ακριβείας για τον υπολογισμό του ξηρού βάρους τους και υπολογίζονταν ο LSM σε g/dm<sup>2</sup>. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 μετρήσεις σε διαστήματα που απείχαν μεταξύ τους 15 ημέρες.

### Στατιστική ανάλυση

Οι τιμές των προαναφερθέντων μετρήσεων αναλύθηκαν στατιστικά μέσω του λογισμικού JASP v.0.16 (JASP Team 2021, Computer Software). Σε κάθε ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν One Way ANOVA και Post Hoc tests ώστε να μελετηθούν οι στατιστικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ( $p < 0.05$ ).

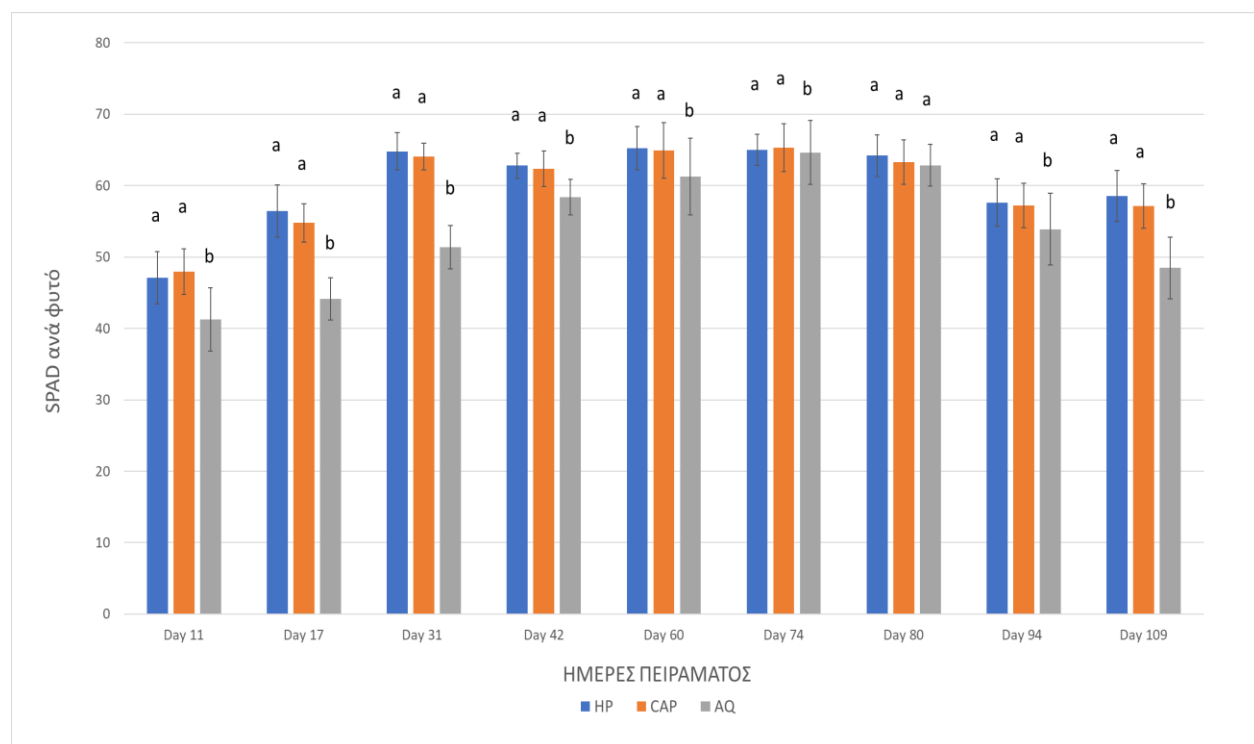
## Αποτελέσματα

Παρακάτω, εξετάζονται τα αποτελέσματα κάθε μέτρησης υπό την μορφή γραφημάτων, καθώς και η στατιστική ανάλυση τους για κάθε μεταχείριση.

### Μετρήσεις φυσιολογίας φυτών

#### Μέτρηση του περιεχομένου των φύλλων σε ολική χλωροφύλλη

##### Δείκτης SPAD ανά φυτό

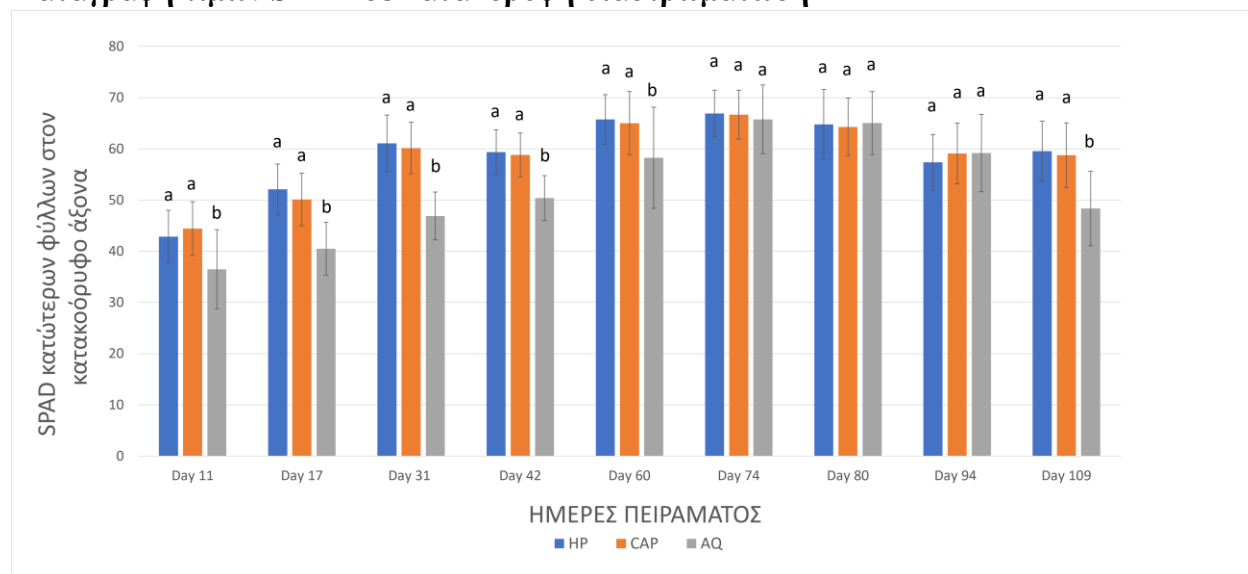


Γράφημα 1. Δείκτης SPAD ανά φυτό τομάτας για τις τρεις μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Η τιμή SPAD ανά φυτό, σύμφωνα με το γράφημα 1, παρουσίασε στατιστικές σημαντικές διαφορές στην AQ μεταχείριση συγκριτικά με τις άλλες δύο ομάδες, σχεδόν καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Γενικά οι τιμές του δείκτη παρέμειναν υψηλότερες στις μεταχειρίσεις CAP και HP σε σχέση με αυτές της AQ ομάδας. Ωστόσο παρατηρείται από την ημέρα 42 κι έπειτα οι τιμές της AQ να αυξάνονται και να προσεγγίζουν αυτές των υπόλοιπων μεταχειρίσεων με αποτέλεσμα την ημέρα 80 να μην παρατηρείται καμία στατιστική σημαντική διαφορά μεταξύ των ομάδων.

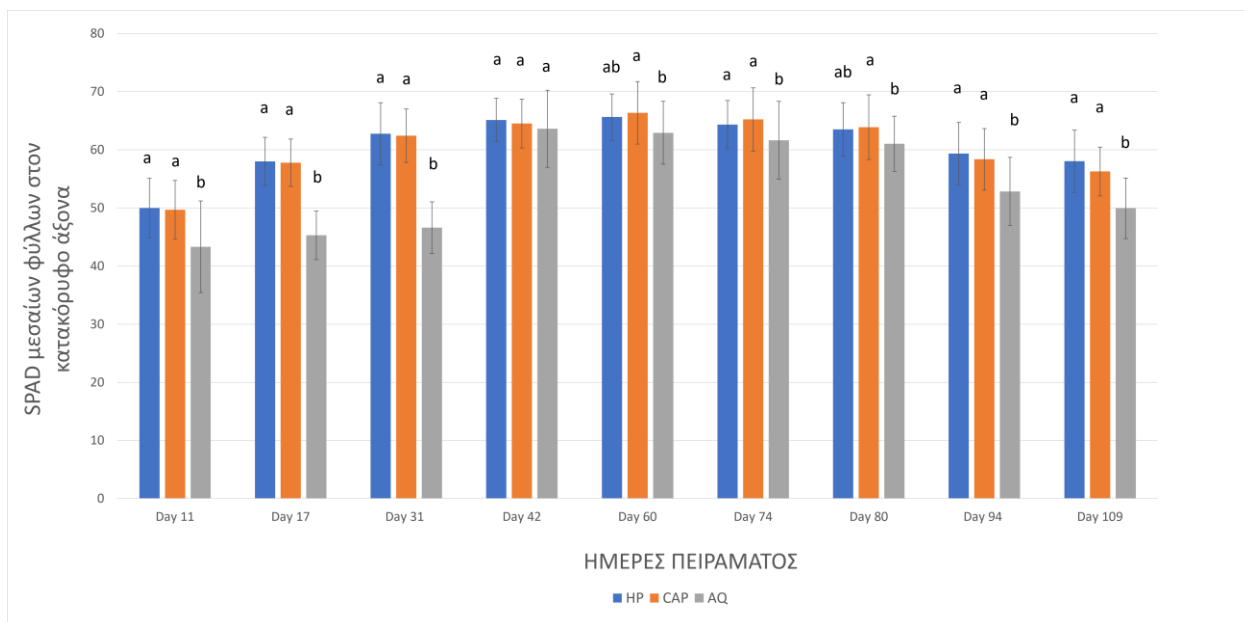
Εντούτοις στη συνέχεια, με τη σταδιακή γήρανση των φυτών, η AQ αρχίζει και πάλι να υπολείπεται σημαντικά των άλλων δύο μεταχειρίσεων.

### Καταγραφή τιμών SPAD σε κατακόρυφη διαστρωμάτωση



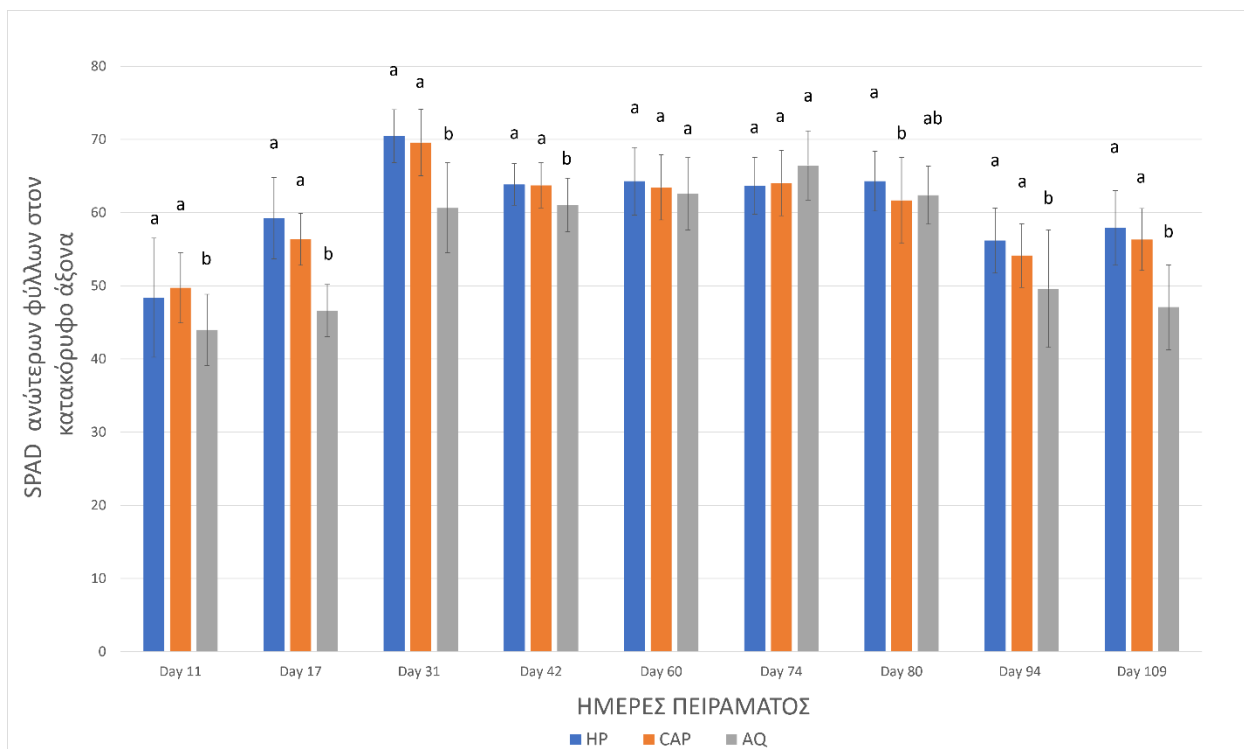
Γράφημα 2 Δείκτης SPAD των κατώτερων φύλλων του φυτού ως προς τον κατακόρυφο άξονα, για τις τρεις μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Οι τιμές SPAD στα κατώτερα φύλλα του φυτού παρουσίασαν έντονη αύξηση σε όλες τις ομάδες από την 17<sup>η</sup> έως την 74<sup>η</sup>, ενώ άρχισαν να μειώνονται κατά την 80<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης. Οι μεταχειρίσεις CAP και HP είχαν τις μεγαλύτερες τιμές SPAD σχεδόν σε όλη την διάρκεια του πειράματος, με εξαίρεση τις ημέρες 80 και 94 όπου παρατηρείται πτώση τους, ενώ παράλληλα οι τιμές της AQ διατηρούνται υψηλότερες. Επομένως, τις ημέρες αυτές δεν υπήρχαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων ενώ τις υπόλοιπες ημέρες του πειράματος παρουσιάστηκαν διαφορές κυρίως στην AQ συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις.



Γράφημα 3. Δείκτης SPAD φύλλων σε μεσαία θέση στον κατακόρυφο άξονα για τις τρεις μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου (Μ.Ο. ± Sd). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

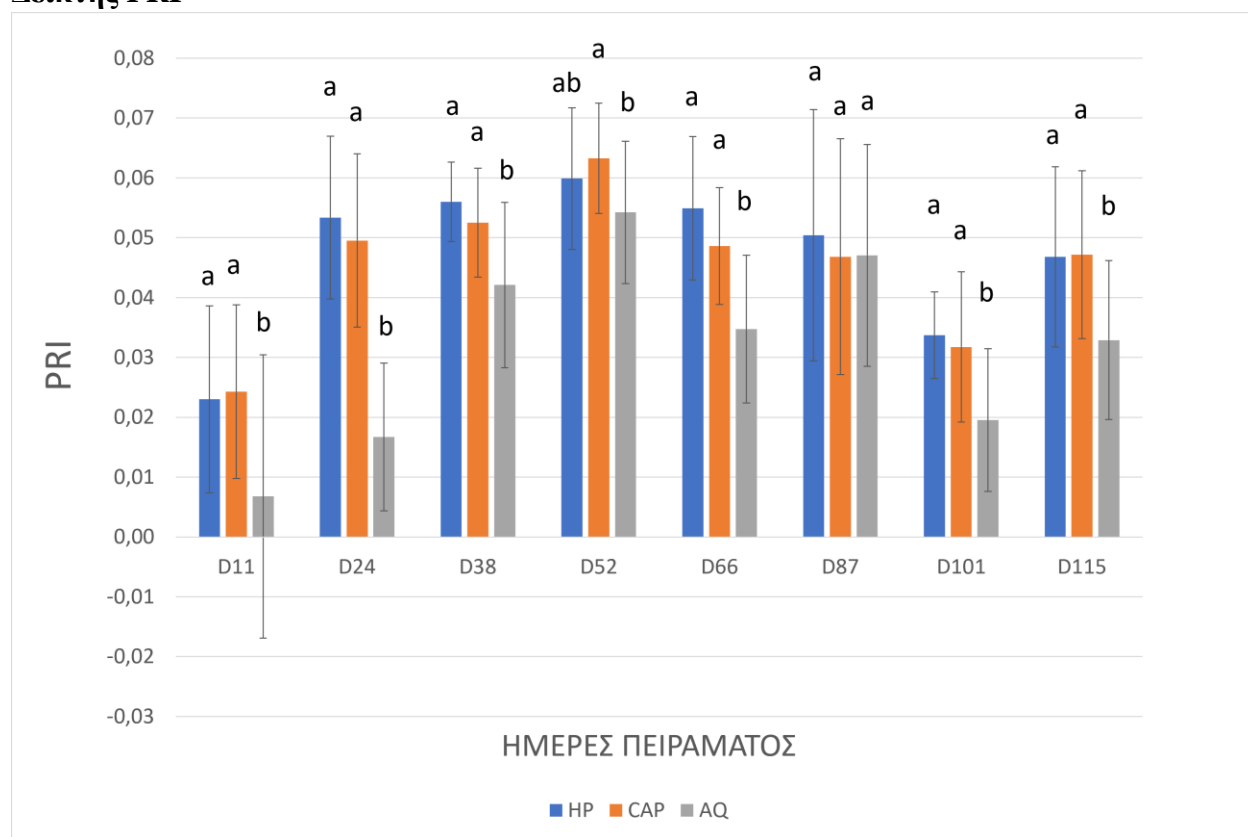
Σύμφωνα με το γράφημα 3 του δείκτη SPAD για τα ώριμα φύλλα που βρίσκονταν στο μέσο του φυτού κατά τον κατακόρυφο άξονα, παρατηρείται σταδιακή αύξηση των τιμών και στις τρεις μεταχειρίσεις μέχρι το μέσο των πειραματικών μετρήσεων (ημέρα 60), στην συνέχεια παραμένουν σταθερές και μειώνονται ελαφρώς στις τελευταίες 30 ημέρες του πειράματος. Επιπρόσθετα, την ημέρα 42 παρατηρείται σημαντική αύξηση της τιμής SPAD για την μεταχείριση AQ με αποτέλεσμα να προσεγγίζει αρκετά τις υψηλές τιμές των άλλων δύο ομάδων. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρατηρούνται κυρίως στην AQ μεταχείριση σχετικά με τις άλλες δύο. Εξάιρεση αποτελούν οι ημέρες 60 και 80 όπου εκεί παρατηρείται στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ της AQ και της CAP μεταχείρισης ενώ η HP δεν διαφέρει από αυτές. Οι μεταχειρίσεις CAP και HP δεν διαφέρουν στατιστικά μεταξύ τους σε όλες τις πειραματικές μετρήσεις.



Γράφημα 4 . Δείκτης SPAD φύλλων στην ανώτερη θέση του κατακόρυφου άξονα του φυτού για τις τρεις μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Στο γράφημα 4 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη SPAD σε νεαρά φύλλα που βρίσκονταν στις κορυφαίες θέσεις του κατακόρυφου άξονα του φυτού. Παρατηρείται έντονη αύξηση και στις τρεις μεταχειρίσεις για τις ημέρες 17 και 31. Κατά τις επόμενες μετρήσεις και συγκεκριμένα από την 42<sup>η</sup> ημέρα οι τιμές των HP και CAP μειώνονται ελαφρώς και σταθεροποιούνται μέχρι την μέτρηση της 94<sup>ης</sup> ημέρας όπου εμφανίζουν πτώση μέχρι το τέλος του πειράματος. Όπως και στην περίπτωση των ώριμων και γηρασμένων φύλλων, στατιστικές σημαντικές διαφορές σημειώνονται κυρίως μεταξύ της AQ και των άλλων δύο μεταχειρίσεων.

## Δείκτης PRI



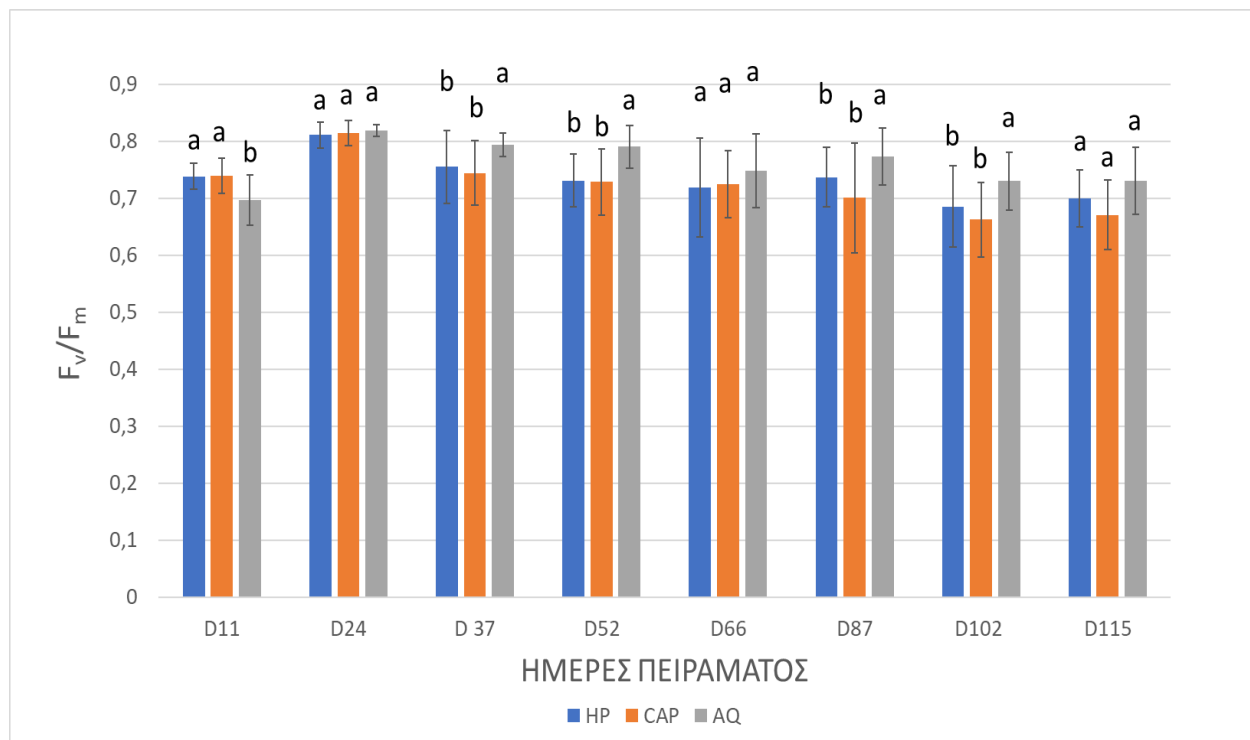
Γράφημα 5. Τιμές δείκτη PRI κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Σύμφωνα με το γράφημα 5, παρουσιάζεται απότομη αύξηση των τιμών PRI κατά τις πρώτες μετρήσεις, σε όλες τις μεταχειρίσεις και ιδιαίτερα στις CAP και AQ, ενώ στη συνέχεια του πειράματος οι τιμές όλων των ομάδων χαρακτηρίζονται από διακυμάνσεις. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρατηρούνται στην πλειοψηφία των ημέρων μεταξύ της AQ μεταχείρισης και των υπολοίπων (HP, CAP). Εξαιρέση αποτελεί η μέτρηση της 52<sup>ης</sup> ημέρας όπου υπήρξε στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων της AQ και της CAP, ενώ η HP δεν διέφερε σημαντικά από τις άλλες δύο ομάδες. Επιπρόσθετα, την ημέρα 87 παρατηρείται μια σημαντική αύξηση της τιμής PRI στην AQ μεταχείριση με αποτέλεσμα σε εκείνη την μέτρηση να μην παρατηρούνται στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών ομάδων.



## Φθορισμός Χλωροφύλλης *in vivo*

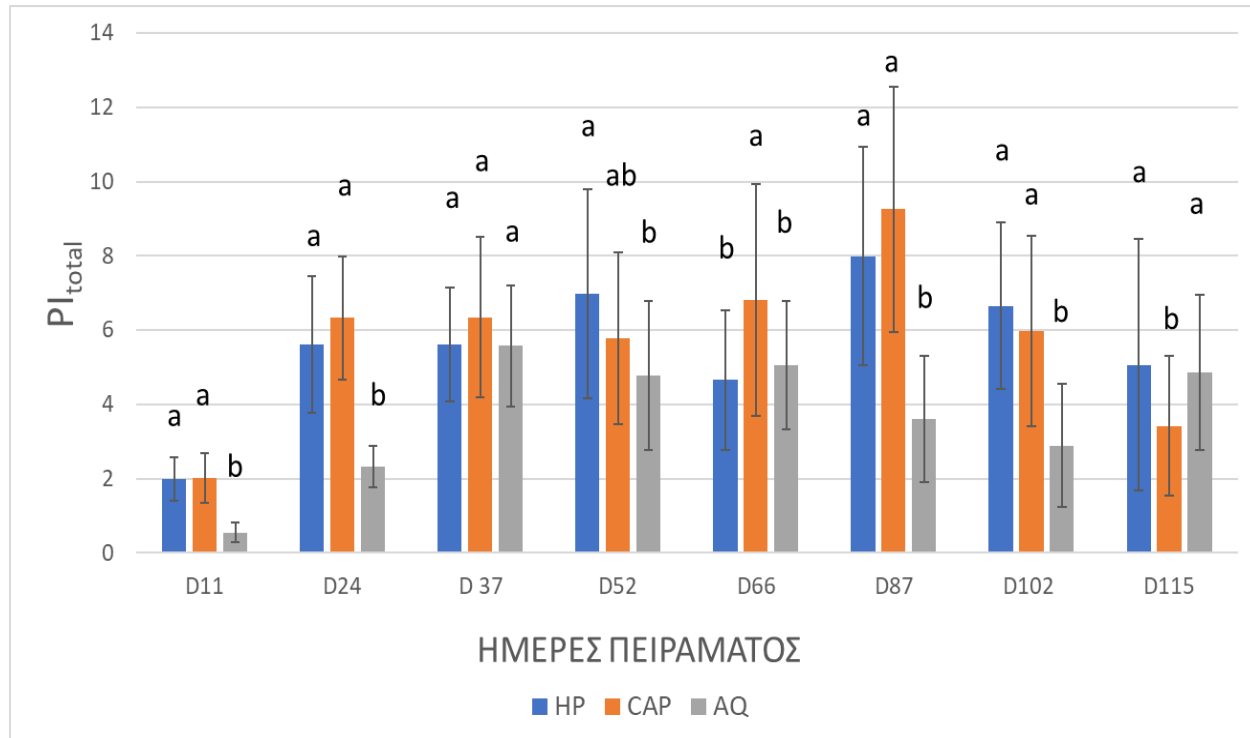
### Παράμετρος $F_v/F_m$



Γράφημα 6. Η παράμετρος φθορισμού  $F_v/F_m$  των διάφορων μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Ο δείκτης  $F_v/F_m$  για την AQ μεταχείριση αυξάνεται σημαντικά την 24<sup>η</sup> ημέρα ενώ στην συνέχεια των μετρήσεων παρουσιάζει διακυμάνσεις μέχρι και την τελευταία ημέρα. Ωστόσο όπως φαίνεται στο γράφημα, διατηρεί τις υψηλότερες τιμές συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Η AQ μεταχείριση παρουσιάζει στατιστικές σημαντικές διαφορές στην πλειοψηφία των μετρήσεων απέναντι στις CAP και HP, ενώ σε τρεις μετρήσεις (D24, D66, D115) δεν εμφανίζονται στατιστικές σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων.

## Δείκτης Pi Total

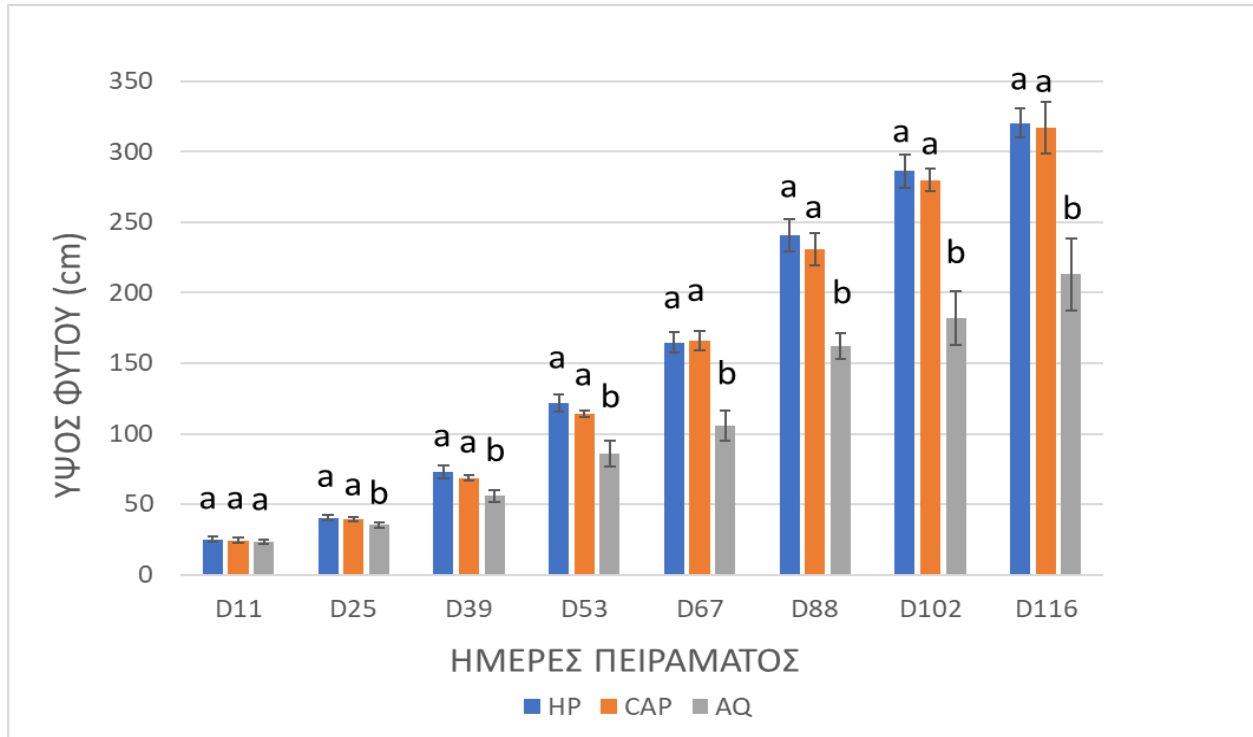


Γράφημα 7. Η παράμετρος φθορισμού  $PI_{total}$  των τριών μεταχειρίσεων, κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Στο γράφημα του δείκτη  $PI_{Total}$  την 24<sup>η</sup> ημέρα παρατηρείται έντονη αύξηση των τιμών που σχεδόν τριπλασιάζονται σε όλες τις μεταχειρίσεις. Στην συνέχεια ωστόσο, παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις στις τιμές τους. Την 87<sup>η</sup> ημέρα οι HP και CAP μεταχειρίσεις εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους κι έπειτα μειώνονται σταδιακά μέχρι το τέλος. Αντιθέτως, οι τιμές της AQ ομάδας διατηρούνται χαμηλότερες καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων, συγκριτικά με τις τιμές των υπόλοιπων μεταχειρίσεων, με την μέγιστη τιμή της να σημειώνεται την 37<sup>η</sup> ημέρα. Η CAP διέφερε στατιστικά σημαντικά από τις άλλες δύο μεταχειρίσεις την 66<sup>η</sup> και 115<sup>η</sup> ημέρα. Την 52<sup>η</sup> ημέρα παρατηρείται επίσης στατιστική σημαντική διαφορά μεταξύ της ενυδρείογονικής μεταχείρισης CAP και της συζευγμένης ενυδρείογονίας AQ. Στις υπόλοιπες μετρήσεις, HP και CAP δεν διέφεραν στατιστικά σημαντικά μεταξύ τους ενώ υπήρχαν στατιστικές σημαντικές διαφορές μόνο στην AQ μεταχείριση.

## Μετρήσεις ανάπτυξης

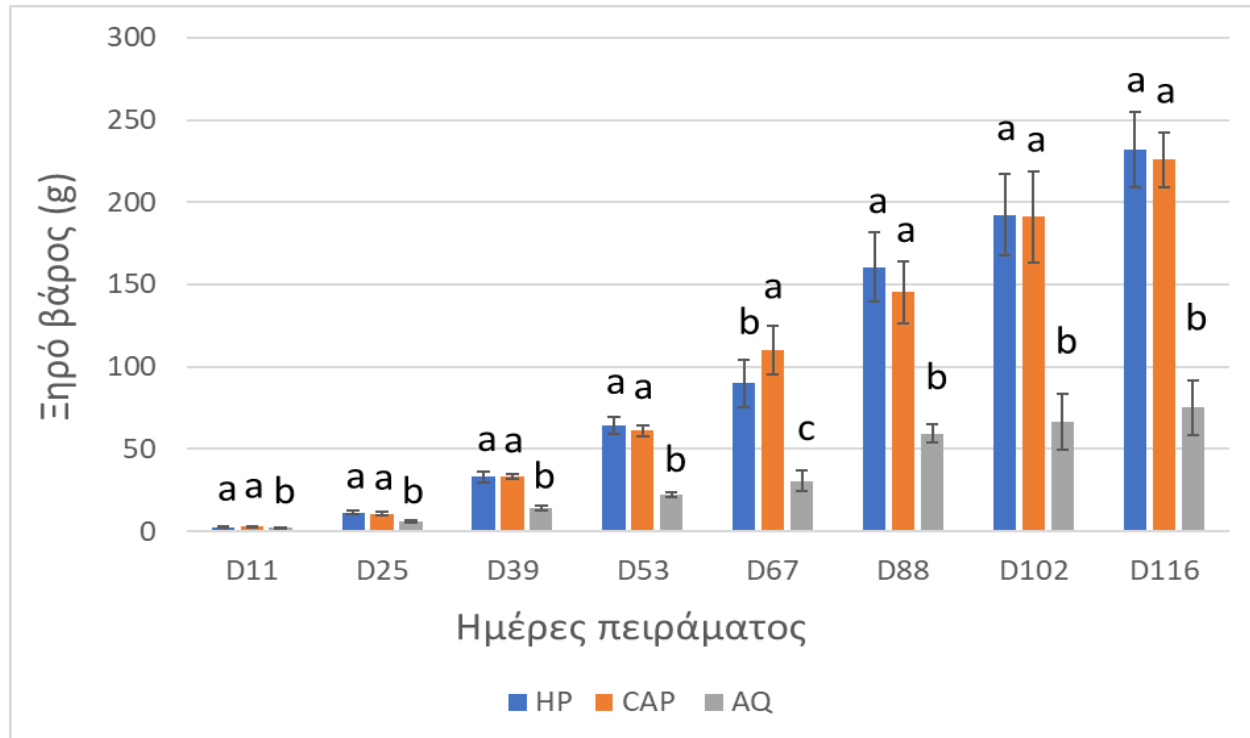
### Ύψος Βλαστού



Γράφημα 8. Το ύψος του βλαστού των τριών μεταχειρίσεων στις μετρήσεις ανάπτυξης κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Σύμφωνα με το γράφημα 8, η AQ προκάλεσε σημαντικά μειωμένο ύψος φυτών σε όλη την διάρκεια του πειράματος συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις, ενώ οι CAP και HP δεν εμφάνισαν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε καμία ημέρα πειράματος.

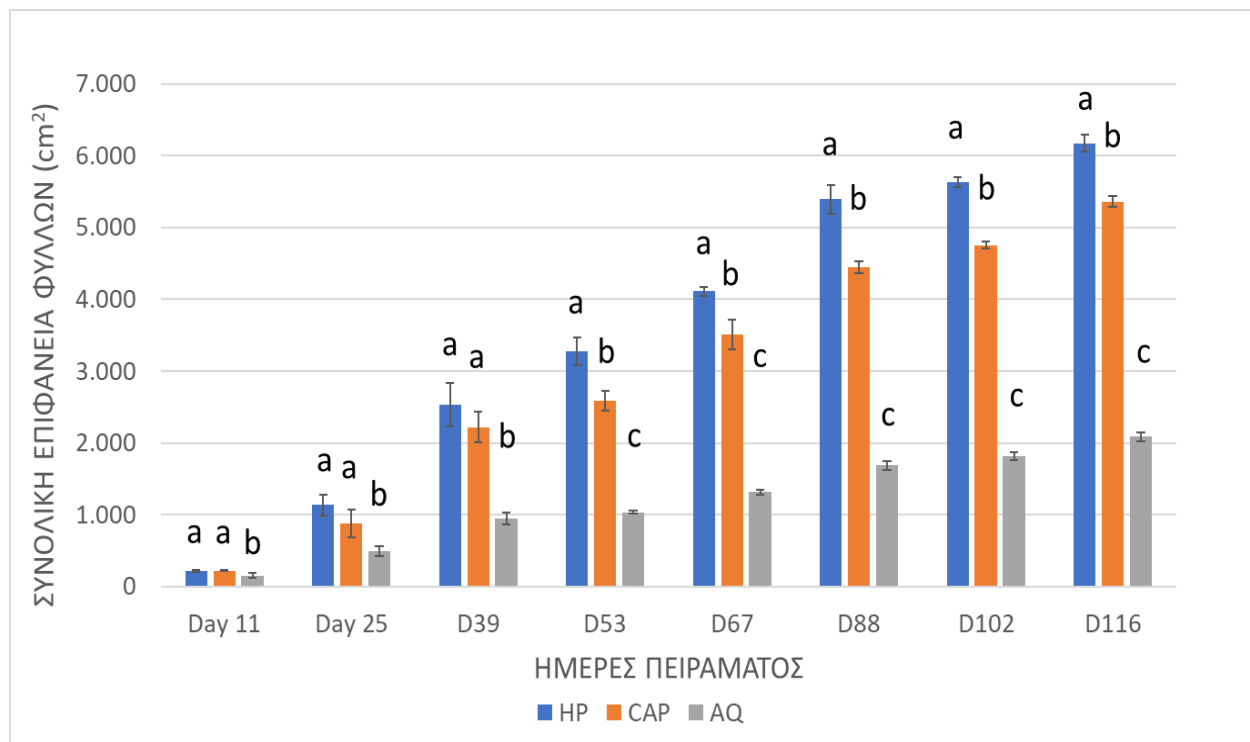
## Ξηρό βάρος υπέργειου μέρους



Γράφημα 9. Τιμές ξηρής βιομάζας υπέργειου τμήματος των τριών μεταχειρίσεων στις μετρήσεις ανάπτυξης κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Η συζευγμένη ενυδρειοπονία παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές ξηρού βάρους καθ'όλη την διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου, σε αντίθεση με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Ωστόσο, την ημέρα 67 οι τιμές ξηρού βάρους της CAP είναι ανώτερες συγκριτικά με αυτές της υδροπονικής μεθόδου. Είναι όμως αξιοσημείωτο αυτό που παρατηρείται στην επόμενη μέτρηση καθώς οι τιμές της HP σχεδόν διπλασιάζονται και οριακά ξεπερνούν αυτές της αποζευγμένης ενυδρειοπονίας. Τέλος, σύμφωνα με την στατιστική ανάλυση, σημαντικές διαφορές εντοπίζονται μεταξύ της AQ και των άλλων δύο μεταχειρίσεων, σχεδόν σε όλες τις πειραματικές μετρήσεις, με μοναδική εξαίρεση την ημέρα 67 όπου παρατηρούνται στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε όλες τις ομάδες μεταξύ τους.

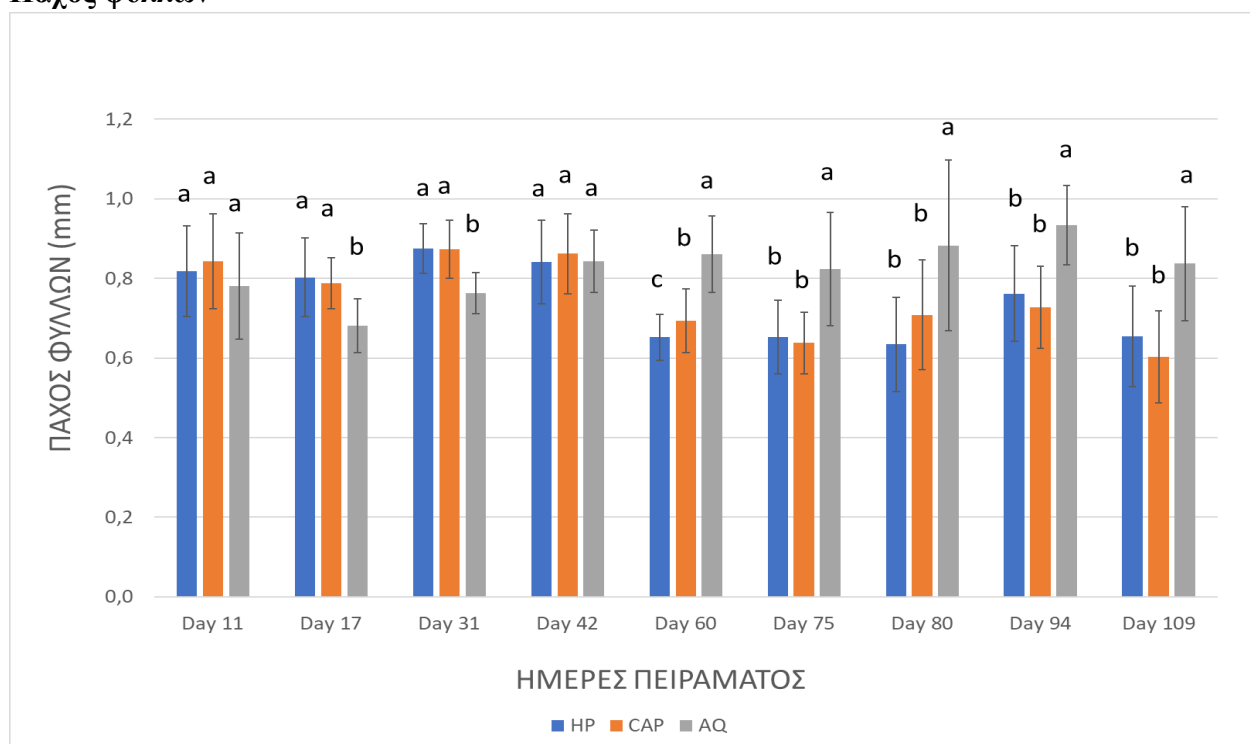
## Μέτρηση φυλλικής επιφάνειας



Γράφημα 10. Τιμές φυλλικής επιφάνειας των τριών μεταχειρίσεων στις μετρήσεις ανάπτυξης κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Οι τιμές της φυλλικής επιφάνειας ήταν υψηλότερες για τις CAP και HP μεταχειρίσεις ενώ η AQ είχε σημαντικά χαμηλότερες τιμές σε όλες τις μετρήσεις του πειράματος. Σύμφωνα με την στατιστική ανάλυση, από το μέσο του πειράματος (ημέρα 53) και ως την τελική μέτρηση, παρουσιάζονται στατιστικές σημαντικές διαφορές μεταξύ όλων των μεταχειρίσεων, με την HP να υπερτερεί.

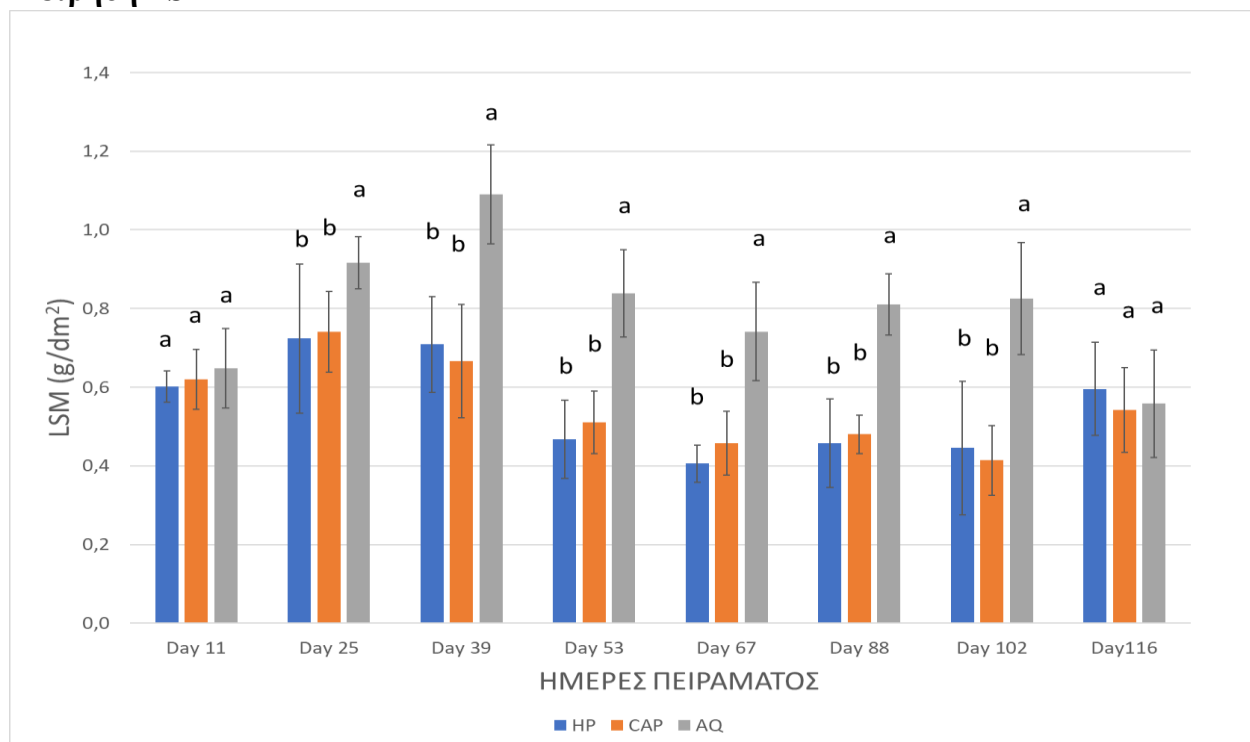
## Πάχος φύλλων



Γράφημα 11. Πάχος φύλλων για τις τρεις μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου ( $M.O. \pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Στις πρώτες μετρήσεις παρατηρούνται παρόμοια πάχη στα φύλλα των τριών μεταχειρίσεων. Ενδιαφέρον έχει η διακύμανση του πάχους φύλλων της AQ, καθώς ενώ κατά τη μέτρηση της 17<sup>ης</sup> και 31<sup>ης</sup> ημέρας φαίνεται σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τις HP και CAP, στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνεται για να εμφανίσει στατιστικώς σημαντικές αυξημένες τιμές μέχρι το τέλος του πειράματος. Αντιθέτως, από το μέσον του πειράματος (ημέρα 60) μειώνονται τα πάχη φύλλων των άλλων δύο μεταχειρίσεων. Σύμφωνα με την στατιστική σήμανση του γραφήματος, σημαντικές διαφορές παρατηρούνται κυρίως στην AQ σε σχέση με τις υπόλοιπες ομάδες. Ωστόσο, εξαίρεση αποτελεί η 60<sup>η</sup> ημέρα μέτρησης όπου και οι τρεις μεταχειρίσεις διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους.

## Μέτρηση LSM



Γράφημα 12. Ο Δείκτης LSM των φύλλων των τριών μεταχειρίσεων κατά τη διάρκεια του πειράματος ( $M.O.$ ,  $\pm Sd$ ). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο  $p < 0,05$ .

Οι τιμές LSM της AQ παρέμειναν υψηλότερες συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις σχεδόν σε όλες τις μετρήσεις του πειράματος, με εξαίρεση την τελευταία. Επιπρόσθετα, παρατηρούνται αυξομειώσεις στις τιμές των CAP και HP, οι οποίες ενώ στις πρώτες μετρήσεις παρουσιάζουν υψηλές τιμές, από την 53<sup>η</sup> ημέρα και ως και την 102<sup>η</sup>, παρουσιάζουν σημαντική μείωση. Ωστόσο στην τελευταία μέτρηση παρατηρείται μια ξαφνική αύξηση των τιμών τους. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές παρουσιάζονται κυρίως μεταξύ της AQ μεταχείρισης και των υπόλοιπων, ενώ τις ημέρες 11 και 116 δεν παρατηρείται κάποια στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των ομάδων.

## Συζήτηση

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην μελέτη και σύγκριση των αναπτυξιακών και φυσιολογικών χαρακτηριστικών που παρουσίασαν τα φυτά στις τρεις μεταχειρίσεις (HP, CAP, AQ). Κατά την διάρκεια του πειράματος η AQ μεταχείριση παρουσίασε σημαντικές διαφορές στις αποκρίσεις της σε όλες τις μετρηθείσες παραμέτρους συγκριτικά με τις άλλες δύο ομάδες, ενώ HP και CAP είχαν σχεδόν παρόμοιες αποκρίσεις.

Ο δείκτης SPAD σχετίζεται με το περιεχόμενο ολικής χλωροφύλλης στα φύλλα των φυτών, η οποία, μεταξύ άλλων παραγόντων, καθορίζει την φωτοσυνθετική ικανότητά τους (Ling 2010). Μειωμένες τιμές SPAD υποδεικνύουν διαταραχές της φυσιολογικής λειτουργίας που προκαλούνται από ανεπάρκεια θρεπτικών στοιχείων (έλλειψη N, Mg), υδατική καταπόνηση, υψηλή ακτινοβολία (Pinkard et al., 2006) κ.α. Στο συγκεκριμένο πείραμα, οι τιμές SPAD της AQ μεταχείρισης ανά φυτό, ήταν σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με τα φυτά της υδροπονίας και της CAP σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου. Το αποτέλεσμα αυτό παρατηρήθηκε σε όλες τις ομάδες φύλλων που μελετήθηκαν στο κατακόρυφο άξονα του φυτού, με τα ανώτερα φύλλα που είναι και νεαρότερα να εμφανίζουν τις μικρότερες διαφορές. Οι Yang and Kim 2020 σε καλλιέργεια τομάτας σε AQ και HP συστήματα, διαπίστωσαν χαμηλότερες τιμές SPAD στα φύλλα των φυτών της AQ. Ωστόσο, συμπέραναν πως οι χαμηλές αυτές τιμές σχετίζονται με αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών (N, Mg, Ca) τόσο στο νερό όσο και στα φύλλα των φυτών. Ένα ακόμη στοιχείο της έρευνας τους ήταν η διαπίστωση υψηλής συγκέντρωσης Na στο υδατικό μέσο η οποία μπορεί να εμποδίσει σημαντικά την απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων ιδιαίτερα των Mg, Ca, K. Το μαγνήσιο, σύμφωνα με τον Goddek 2018, είναι ένα σημαντικό στοιχείο που πρωταγωνιστεί στην σύνθεση των μορίων χλωροφύλλης και έχει παρατηρηθεί πως στα φυτά με έλλειψη μαγνησίου, το στοιχείο αυτό μεταφέρεται από τα γηρασμένα φύλλα στα νεαρά φύλλα. Ευκίνητο θρεπτικό είναι άλλωστε και το άζωτο που ακολουθεί το ίδιο πρότυπο μεταφοράς με το μαγνήσιο σε καταστάσεις έλλειψης. Ίσως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά να σχετίζονται με το αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας με την σχετικά καλύτερη εικόνα που παρουσίασαν ως προς τις τιμές SPAD τα ανώτερα φύλλα στον κατακόρυφο άξονα των φυτών AQ συγκριτικά με τις άλλες δύο μεταχειρίσεις. Αντιθέτως, δεν ήταν ανάλογα καλή η εικόνα των μεσαίων και κατώτερων φύλλων, που αφορούν φύλλα μεγαλύτερης ηλικίας.



Σχετικά με το πρότυπο αλλαγής κατά την διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου, οι τιμές SPAD φάνηκε σταδιακά να μειώνονται, ιδιαίτερα στην AQ μεταχείριση, από το μέσον του πειράματος κι έπειτα. Αυτό πιθανόν να σχετίζεται με τις αναπτυξιακές αλλαγές καθώς το φυτό περνάει από τη βλαστητική ανάπτυξης στη φάση της καρπόδεσης, επομένως αλλάζουν οι απαιτήσεις σε θρεπτικά και η κατανομή τους στο φυτικό σώμα. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη των φύλλων αρχίζει να μειώνεται με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απαιτήσεις σε N, ενώ το Ca καταναλώνεται για την ανάπτυξη των καρπών (Zekki et al., 1996; Silber, Bar-Tal 2008).

Η μέτρηση του φθορισμού χλωροφύλλης είναι μια σημαντική τεχνική η οποία συμβάλει στη μελέτη των φυσιολογικών αποκρίσεων των φυτών απέναντι στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Τα μόρια χλωροφύλλης όταν απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία φτάνουν σε μια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση η οποία είναι εξαιρετικά ασταθής. Επομένως για να επιστρέψουν στην βασική τους κατάσταση, διαθέτουν διαφορετικούς μηχανισμούς απομάκρυνσης της ενέργειας αυτής, εκτός από τη διαδικασία της απώλειας μέρους αυτής ως θερμότητα στο περιβάλλον. Μπορούν να παράξουν φωτοχημικό έργο με την μεταφορά ηλεκτρονίου στο σχήμα Z της φωτοσύνθεσης, να την μεταδώσουν σε ένα γειτονικό μόριο χλωροφύλλης, ή να εκπέμψουν ακτινοβολία δηλαδή να πραγματοποιηθεί φθορισμός. Όλες αυτές οι διαδικασίες σχετίζονται μεταξύ τους, επομένως εκτιμώντας την απόδοση του φθορισμού μπορούμε να έχουμε σημαντικές πληροφορίες και για την απόδοση των υπολοίπων και γενικότερα για την απόδοση του φωτοσυστήματος PSII.

Ο λόγος  $F_v/F_m$  αποτελεί μια από τις πολλές παραμέτρους που μπορούν να εξαχθούν κατά την μέτρηση του φθορισμού των φυτών και δίνει πληροφορίες για την μέγιστη φωτοχημική απόδοση του φωτοσυστήματος II. Ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες σε μια καλλιέργεια, όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία, ένα ποσοστό των κέντρων αντιδράσεων μπορεί να καταπονηθεί και να μην λειτουργεί αποτελεσματικά. Επομένως χαμηλές τιμές  $F_v / F_m$  σηματοδοτούν καταπόνηση της φωτοσυνθετικής συσκευής (Demmig-Adams and Adams, 2006) στα φύλλα των φυτών. Σύμφωνα με τους Murchie and Lawson 2013, τιμές  $F_v/F_m$  περίπου στο 0.83 μαρτυρούν μη καταπονημένα φύλλα ενώ τιμές μικρότερες από αυτές υποδηλώνουν σχετική καταπόνηση. Στο συγκεκριμένο πείραμα οι μέσες τιμές  $F_v/F_m$  στην AQ μεταχείριση, ήταν υψηλότερες σχεδόν σε όλη την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (0.76), ενώ HP και CAP φέραν τις χαμηλότερες τιμές (0,73 και 0,72 αντίστοιχα) που είναι, ωστόσο, μέσα

στο πλαίσιο των φυσιολογικών τιμών για μία φωτοσυνθετική συσκευή σε καλή λειτουργία. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και στην έρευνα της Κολλύβα 2021 όπου διαπιστώθηκαν σταθερά υψηλότερες τιμές  $F_v/F_m$  σε φύλλα αγγουριάς που αναπτύσσονταν σε AQ σύστημα συγκριτικά με αυτά των φυτών HP και CAP. Οι χαμηλές τιμές στα φύλλα των φυτών ωστόσο δεν μπορούν να μας δώσουν μια σαφή πληροφορία σχετικά με το είδος της καταπόνησης που υφίστανται τα φυτά. Οι Raja et al., 2020, μελετώντας τις φυσιολογικές αποκρίσεις φυτών τομάτας απέναντι σε διαφορετικές καταπονήσεις όπως η υψηλή θερμοκρασία, η υδατική καταπόνηση και ο συνδυασμός αυτών, διαπίστωσαν χαμηλότερες τιμές  $F_v/F_m$  σε σχέση με αυτές του μάρτυρα. Συγκεκριμένα, στα φύλλα των φυτών που είχαν υποστεί συνδυαστικές καταπονήσεις οι τιμές μειώθηκαν κατά 41.66%, ενώ στην υδατική καταπόνηση κατά 12,5 % και στην καταπόνηση από υψηλές θερμοκρασίες 6,94%. Αντίθετα, σε άλλο πείραμα με υψηλή θερμοκρασία σε τομάτα (Camejo et al., 2010) αναφέρεται πως η αύξηση της θερμοκρασίας από 25 στους 35 °C δεν επέφερε αλλαγές στις τιμές  $F_v/F_m$ .

Ο παράγοντας Pi Total παρέχει πληροφορίες για την συνολική απόδοση των δύο φωτοσυστημάτων PSII και PSI, δηλαδή από την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ροής των ηλεκτρονίων στο PSII, μέχρι τους τελικούς αποδέκτες ηλεκτρονίων στο σύστημα των σκοτεινών αντιδράσεων PSI (Strasser et al., 2010). Χαμηλές τιμές Pi Total μαρτυρούν διαταραχές στην φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών και πιθανόν καταπόνηση τους. Στην παρούσα εργασία, οι υψηλότερες τιμές Pi Total εντοπίστηκαν στα φύλλα των φυτών της HP και της CAP, ενώ αυτά των φυτών της AQ είχαν τις χαμηλότερες, με στατιστικώς σημαντικές διαφορές καθόλη την αναπτυξιακή περίοδο. Ωστόσο, και οι τρεις μεταχειρίσεις παρουσίασαν έντονες διακυμάνσεις στις τιμές τους κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Στο μέσο του πειράματος στην μέτρηση την 66<sup>η</sup> ημέρας παρατηρείται υψηλή απόδοση της CAP μεταχείρισης, με στατιστικώς σημαντική διαφορά από τις άλλες δύο ομάδες, ενώ σε αρκετές μετρήσεις φαίνεται να έχει τις υψηλότερες τιμές. Επομένως CAP και HP φαίνεται πως προσαρμόστηκαν καλύτερα στις περιβαλλοντικές συνθήκες συγκριτικά με την AQ. Σε έρευνα των Zushi et al., 2012, σε καλλιέργεια τομάτας όπου μελετήθηκε η απόκριση των φυτών σε υψηλές θερμοκρασίες 40 °C και σε χαμηλές 4 °C για 1 ώρα και για 24 ώρες, παρατηρήθηκε το εξής: οι τιμές PI Total ήταν σημαντικά χαμηλότερες στην καταπόνηση των υψηλών θερμοκρασιών και στα δύο χρονικά πλαίσια ενώ στην μεταχείριση των 24 ωρών σημειώθηκε ακόμα μεγαλύτερη πτώση του PI total σε σχέση με την καταπόνηση ψύχους. Επομένως στην μελέτη τους συμπέραναν πως ο δείκτης PI total μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως

δείκτης καταπόνησης της φωτοσυνθετικής συσκευής από τις υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες. Παρόμοια συμπεράσματα είχαν και οι Stefanov et al., 2011, όπου σε μελέτη ποικιλιών φασολιού που αναπτύσσονταν σε θερμοκήπιο και εκτίθονταν για 2 ώρες σε θερμοκρασίες 45 °C, παρατήρησαν σημαντική μείωση των τιμών Pi Total.

Ο δείκτης PRI (Photochemical Reflectance Index) βασίζεται στην ανακλαστικότητα των φύλλων, η οποία επηρεάζεται από ανατομικούς και βιοχημικούς παράγοντες. Συνδέεται με τη φωτοσυνθετική λειτουργία των φύλλων που επηρεάζεται από παράγοντες όπως η υδατική καταπόνηση, η υψηλή ακτινοβολία, τροφοπενίες, ασθένειες κ.α. Όταν το φυτό καταπονείται από διάφορους παράγοντες τότε η φωτοσυνθετική λειτουργία μειώνεται και επομένως η περίσσεια ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να απομακρυνθεί πριν αρχίσει να δημιουργεί βλάβες. Σε αυτό το στάδιο ενεργοποιείται ο κύκλος των ξανθοφυλλών. Η βιολαξανθίνη μετατρέπεται σε ανθεραξανθίνη και έπειτα σε ζεαξανθίνη η οποία λειτουργεί φωτοπροστατευτικά απομακρύνοντας την πλεονάζουσα ενέργεια υπό την μορφή θερμότητας (Nonphotochemical quenching), αποτρέποντας με αυτό τον τρόπο την αντίδραση των διεγερμένων χλωροφυλλών με το οξυγόνο, που θα οδηγούσε σε παραγωγή ενεργών μορφών οξυγόνου (ROS) (Latowski et al., 2011, Zhang et al., 2018). Επειδή ο κύκλος των ξανθοφυλλών ρυθμίζει την κατανομή της ενέργειας στο PS II σύστημα, μπορεί να αποτελέσει δείκτης της αποδοτικότητας χρήσης του φωτός (Light Use Efficiency). Στην παρούσα εργασία, οι τιμές PRI ήταν χαμηλότερες στην μεταχείριση της συζευγμένης ενυδρειοπονίας συγκριτικά με αυτές των HP και CAP, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στην έλλειψη θρεπτικών στοιχείων που αντιμετώπιζε η AQ σε σχέση με τις άλλες δύο ομάδες. Σύμφωνα και με τους Gamon et al., 1997, σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα είδη φυτών, τα φυτά που αναπτύσσονταν με ελλείψεις θρεπτικών στοιχείων, οι τιμές τους στον δείκτη PRI ήταν χαμηλότερες από εκείνες των φυτών μάρτυρες που λιπαίνονταν επαρκώς. Επίσης, οι τιμές PRI του πειράματος φαίνεται πως συμφωνούν και με αυτές των αποτελεσμάτων της Κολλύβα 2021, σε εργασία που αφορούσε φυτά αγγουριάς σε ενυδρειοπονικό σύστημα, στην οποία τα φυτά της AQ ομάδας έφεραν τις χαμηλότερες τιμές.

Σε όλες τις αναπτυξιακές παραμέτρους που καταγράφηκαν στην παρούσα μελέτη, η AQ εμφάνισε σημαντικά χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις CAP και HP καθόλη τη διάρκεια του πειράματος, συγκεκριμένα ως προς το ύψος του βλαστού, την φυλλική επιφάνεια και την συσσώρευση ξηρής βιομάζας. Μια πειραματική καλλιέργεια τομάτας από την Suhl et al., 2016

έρχεται να επιβεβαιώσει την διαπίστωση μικρότερης φυλλικής επιφάνειας της AQ μεταχείρισης στο πείραμα μας σε σχέση με τις άλλες δυο μεταχειρίσεις. Ωστόσο έρχεται σε αντίθεση με την παρούσα εργασία σχετικά με το ύψος των βλαστών μεταξύ AQ και HP όπου στο πείραμα τους δεν σημειώθηκαν σημαντικές διαφορές. Επίσης, χαμηλότερο ύψος βλαστού και μικρότερη φυλλική επιφάνεια σε φυτά τομάτας που καλλιεργήθηκαν σε συζευγμένο AQ σύστημα συγκριτικά με την HP, αναφέρουν και οι Yang and Kim 2020. Ωστόσο στο ίδιο πείραμα, σε αντίθεση με την παρούσα εργασία αναφέρει πως δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές σχετικά με το ποσοστό ξηρής βιομάζας των AQ φυτών συγκριτικά με αυτών της HP. Σε πειραματική καλλιέργεια τομάτας που πραγματοποίησαν οι Schmautz et al., 2016, το μέσο ύψος των φυτών της AQ έφτασε τα 6,7 m, ενώ στην παρούσα εργασία, το μέσο ύψος των φυτών του πειράματος ήταν για την HP 3,2 m, για την CAP 3,17 m, ενώ για την AQ 2,13 m. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει και η έρευνα του Khater 2015 σε ενυδρειοπονικά συστήματα καλλιέργειας τομάτας, σχετικά με παραμέτρους ανάπτυξης, όπου μετά από αύξηση της ροής νερού (από 4 στα 6 L/h) προς τα καλλιεργούμενα φυτά, διαπιστώθηκε μεγαλύτερη απορρόφηση θρεπτικών με αποτέλεσμα να αυξηθεί το ύψος και το ξηρό βάρος στο τέλος του πειράματος. Σύμφωνα με την έρευνα των Roosta & Hamidpour 2011, οι διαφυλλικοί ψεκασμοί με K, Mg, Fe, Mn, B σε φυτά τομάτας σε AQ σύστημα οδήγησαν σε σημαντική αύξηση στην βλαστική ανάπτυξη των φυτών.

Τα παραπάνω αποτελέσματα, τόσο φυσιολογικά, όσο και αναπτυξιακά, που υποδηλώνουν την κατωτερότητα των AQ φυτών σε σχέση με τις CAP και HP, πιθανώς σχετίζονται άμεσα με τη θρεπτική κατάσταση των φυτών των διαφόρων μεταχειρίσεων, θέμα το οποίο δεν μελετήθηκε στην συγκεκριμένη διατριβή, επομένως μόνο υποθέσεις μπορεί να γίνουν και να συνδυαστούν με δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία. Πολλοί ερευνητές μελετώντας τα κλειστά ενυδρειοπονικά συστήματα (συζευγμένα) παρατήρησαν πως οι συγκεντρώσεις κάποιων θρεπτικών στοιχείων στο υδατικό διάλυμα είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές των υδροπονικών (Nicoletto et al., 2018). Επίσης, έφτασαν στο συμπέρασμα πως ενώ η εκτροφή μεγάλου πληθυσμού ψαριών μπορεί να εφοδιάσει επαρκώς το υδατικό διάλυμα με νιτρικά, τα επίπεδα P και K όμως παρέμεναν χαμηλά για την άριστη ανάπτυξη των φυτών. Οι Graber and Junge 2009 παρατήρησαν επίσης πως το υδατικό διάλυμα σε AQ σύστημα με καλλιέργεια τομάτας περιείχε τρεις φορές χαμηλότερη συγκέντρωση αζώτου, δέκα φορές λιγότερο φώσφορο ενώ το κάλιο ήταν δεκάδες φορές χαμηλότερο σε συγκέντρωση σε σχέση με το υδατικό διάλυμα της υδροπονικής μεθόδου. Έτσι, εγείρεται το ερώτημα αν είναι απαραίτητη η προσθήκη θρεπτικών στις καλλιέργειες φυτών

τομάτας που αναπτύσσονται σε ενυδρειοπονικό περιβάλλον. Οι Bittsanzky et al., 2016 αναφέρουν πως η αναγκαιότητα προσθήκης θρεπτικών εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας και το στάδιο ανάπτυξης. Σε αντίθεση με λαχανικά όπως το μαρούλι, συμπληρώνουν, η τομάτα για να έχει θετικά αποτελέσματα σε ένα κλειστό AQ σύστημα απαιτεί την συμπλήρωση θρεπτικών στοιχείων. Παρόμοιες διαπιστώσεις γίνονται από τον Palm et al., 2018 ο οποίος θεωρεί απαραίτητη για την καλλιέργεια της τομάτας την προσθήκη στοιχείων όπως K, P, Mg.

Η επένδυση βιομάζας στη μονάδα της επιφάνειας φύλλου, που εκφράζεται από τον δείκτη LSM είναι μια δομική παράμετρος, η οποία σχετίζεται έμμεσα με την φωτοσυνθετική απόδοση. Μεγάλες τιμές του LSM υποδεικνύουν συμπαγές μεσόφυλλο και δυσκολία στην ανταλλαγή αερίων. Από την άλλη, ένα σχετικά παχύ φύλλο επιτρέπει υψηλότερο φωτοσυνθετικό ρυθμό όταν επικρατούν συνθήκες υψηλής έντασης ακτινοβολίας, ενώ εμποδίζει την απώλεια νερού από τα στόματα του, μειώνοντας έτσι την διαπνοή του (Ogburn & Edwards 2010). Για τους λόγους αυτούς ο LSM ονομάζεται και δείκτης ξηροφυλλίας. Στο παρόν πείραμα δεν υπήρχαν συνθήκες υδατικής καταπόνησης, ενώ τα επίπεδα της ακτινοβολίας ήταν ίδια για όλες τις μεταχειρίσεις. Τα φύλλα των φυτών της συζευγμένης ενυδρειοπονίας παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές LSM καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος, με εξαίρεση την τελευταία μέτρηση, ενώ HP και CAP είχαν σχεδόν τις ίδιες τιμές. Οι Muir et al., 2014, αναφέρουν πως υψηλές τιμές LSM στα φύλλα συνδέονται με φυτά που έχουν εγκλιματιστεί σε καταπόνηση, ωστόσο παρουσιάζουν μειωμένη φυτική ανάπτυξη. Αντιθέτως, φύλλα που έχουν χαμηλό LSM χρησιμοποιούν πιο αποτελεσματικά την προσπίπτουσα ακτινοβολία και αναπτύσσονται ταχύτερα, όταν οι συνθήκες, και ιδιαίτερα η υδατική κατάσταση, είναι ιδανικές. Αντίστοιχη εικόνα παρουσίασε και το πάχος των φύλλων που εμφανίστηκε σημαντικά αυξημένο στην AQ ομάδα συγκριτικά με την HP και CAP. Αυτό είναι ένα αποτέλεσμα που έχει ξαναβρεθεί σε αντίστοιχες μεταχειρίσεις στο αγγουράκι (Κολλύβα 2021), και πιθανώς έχει κάποια συσχέτιση με την μειωμένη φυλλική επιφάνεια των AQ, τα οποία συνολικά εμφανίζουν ένα πιο συμπαγές φυτικό σώμα.

## Συμπεράσματα

- Οι περισσότερες διαφορές στις μετρηθείσες παραμέτρους εντοπίζονται στα φυτά της συζευγμένης ενυδρείοπονίας, ενώ HP και CAP παρουσιάζουν παρόμοιες αποκρίσεις.
- Το περιεχόμενο των φύλλων σε ολική χλωροφύλλη (τιμές SPAD) ήταν σημαντικά χαμηλότερο στην AQ συγκριτικά με τις CAP και HP που εμφάνισαν παρόμοια επίπεδα, καθόλη την αναπτυξιακή περίοδο. Το αποτέλεσμα αυτό παρατηρήθηκε σε όλες τις ομάδες φύλλων που μελετήθηκαν στον κατακόρυφο άξονα του φυτού, με τα ανώτερα φύλλα που είναι και νεαρότερα να εμφανίζουν τις μικρότερες διαφορές.
- Ο παράγοντας φθορισμού Fv/Fm ήταν υψηλότερος στην AQ μεταχείριση, υποδεικνύοντας ότι δεν υπήρξε καταπόνηση και προβληματική λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής. Εντούτοις, η AQ είχε την χαμηλότερη φωτοσυνθετική απόδοση με βάση τον δείκτη Pi Total, ενώ η CAP παρουσίασε σημαντικά υψηλές τιμές σε αρκετές μετρήσεις. Το τελευταίο σχετίζεται με βελτιωμένη αποδοτικότητα χρήσης φωτός.
- Σε ότι αφορά τις αναπτυξιακές παραμέτρους, η AQ μεταχείριση εμφάνισε τις χαμηλότερες τιμές ξηρού βάρους φυτού και ύψος βλαστού, ενώ CAP και HP δεν διέφεραν μεταξύ τους, σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Τα HP φυτά ανέπτυξαν σημαντικά μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια, εμφανίζοντας διαφορές τόσο με την AQ, όσο και με την CAP ήδη από το μέσον του πειράματος.
- Η AQ μεταχείριση παρουσίασε σημαντικά υψηλότερες τιμές πάχους φύλλων και LSM.
- Η AQ μεταχείριση μπορεί να συμβάλει θετικά στην καλλιέργεια τομάτας μέσα από μια αειφόρο διαδικασία που στοχεύει στην εξοικονόμηση πόρων και την μηδενική χρήση λιπασμάτων. Εντούτοις, το μειονέκτημα της χαμηλής παραγωγικότητας είναι σημαντικό.
- Η CAP μεταχείριση έχοντας παρόμοια αποτελέσματα με την HP μπορεί να καταστεί ένα αξιόπιστο σύστημα παραγωγής υψηλής ποιότητας προϊόντων που θα χαρακτηρίζεται από μειωμένες εισροές χημικών λιπασμάτων, επομένως θα έχει σημαντικά οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά οφέλη.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ξένη Βιβλιογραφία**

Amirkolaie AK. 2011. Reduction in the environmental impact of waste discharged by fish farms through feed and feeding. *Rev. Aquacult.* 3:19–26

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

Crossley PL (2004) Sub-irrigation in wetland agriculture. *Agric Hum Values* 21(2/3):191–205. <https://doi.org/10.1023/B:AHUM.0000029395.84972.5e>. Accessed 18 Dec 2017

Camejo, D., Nicolás, E., Torres, W., Alarcón, J.J., 2010. Differential heat-induced changes in the CO<sub>2</sub> assimilation rate and electron transport in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 85, 137–14

Demmig-Adams B, William W. Adams I. 2006. Photoprotection in an ecological context: the remarkable complexity of thermal energy dissipation. *New Phytologist* 172, 11–21.

Diver, S., 2006. Aquaponics—Integration of Hydroponic with Aquaculture. National Sustainable Agriculture Information Service.

Goddek, S., Joyce A., Kotzen B., Burnell G. 2018. Aquaponics Food Production Systems. Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future.

Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K.V., Jijakli, H., Thorarinsdottir, R., 2015. Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability* 7, 4199–4224.

Graber, A., Junge, R., 2009. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246:147–156

Helfman G, Collette BB, Facey DE, Bowen BW. 2009. *The Diversity of Fishes: Biology, Evolution, and Ecology*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.

Klinger, D., Naylor, R., 2012. Searching for solutions in aquaculture: charting a sustainable course. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 37, 247–276.

Knaus U, Palm HW 2017. Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture* 466:51–63. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.025>.

Khater E.-S.G. et al., 2015. Utilization of effluent fish farms in tomato cultivation. *Ecological Engineering* 83 (2015) 199–207 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.010>

Latowski D. et al., 2011. Xanthophyll cycle – a mechanism protecting plants against oxidative stress. *Redox Report* 2011 VOL. 16 NO. 2. DOI 10.1179/174329211X13020951739938

Lennard W (2017) Commercial aquaponic systems: integrating recirculating fish culture with hydroponic plant production.

Lewis WM, Yopp JH, Schramm HL Jr, Brandenburg AM (1978) Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. *Trans Am Fish Soc* 107(1):92–99. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1978\)1072.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1978)1072.0.CO;2)

Ling Q., Huang W., Jarvis P., 2010. Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana*. *Photosynth Res* (2011) 107:209–214.

Liebisch F. et al., 2009 Blossom-end rot and fruit cracking of tomato grown in net-covered greenhouses in Central Thailand can partly be corrected by calcium and boron sprays. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2009, 172, 140–150. DOI: 10.1002/jpln.200800180

Mc Murtry MR, Sanders DC, Cure JD, Hodson RG, Haning BC, Amand PCS (1997) Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. *J World Aquacult Soc* 28 (4):420–428. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1997.tb00290.x>

Monsees H, Keitel J, Paul M, Kloas W, Wuertz S (2017). Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Aquac Environ Interact* 9:9–18. <https://doi.org/10.3354/aei00205>



- Muir C.D. et al., 2014. Morphological and anatomical determinants of mesophyll conductance in wild relatives of tomato (*Solanum* sect. *Lycopersicon*, sect. *Lycopersicoides*; Solanaceae). *Plant, Cell and Environment* (2014) 37, 1415–1426 doi: 10.1111/pce.12245
- Murchie H.E. and Lawson T. 2013. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 64, No. 13, pp. 3983–3998, 2013 doi:10.1093/jxb/ert208
- Nicoletto C, Maucieri C, Mathis A, Schmautz Z, Komives T, Sambo P, Junge R (2018) Extension of aquaponic water use for NFT baby-leaf production: mizuna and rocket salad. *Agronomy* 8:75
- Ogburn R.M. & Edwards E.J. (2010) The ecological water-use strategies of succulent plants. *Advances in Botanical Research* 55, 179–225.
- Palm HW et al., 2018. Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquac Int* 26(3):813–842
- Pickens J.M. 2015. Integrating Effluent from Recirculating Aquaculture Systems with Greenhouse Cucumber and Tomato Production
- Pinkard, E.E., Patel, V., Mohammed, C. 2006: Chlorophyll and nitrogen determination for plantation-grown *Eucalyptus nitens* and *E. globulus* using a non-destructive meter. – *Forest. Ecol. Manage.* 223: 211-217.
- Raja V. et al., 2020. Impact of drought and heat stress individually and in combination on physio-biochemical parameters, antioxidant responses, and gene expression in *Solanum lycopersicum*. *3 Biotech* (2020) 10:208 <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02206-4>
- Rakocy J.E 2012. Chapter 14 Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture. *Aquaculture Production Systems*, First Edition. Edited by James Tidwell. C 2012 John Wiley & Sons, Inc. Published 2012 by John Wiley & Sons, Inc.
- Roosta HR, Hamidpour M (2011) Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Sci Hortic* 129:396–402
- Silber A, Bar-Tal A (2008) Nutrition of substrate-grown plants. In: Raviv, Lieth (eds) *Soilless culture, theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, pp 292–342

Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589

Suhl J, Dannehl D, Kloas W, Baganz D, Jobs S, Schiebe G, Schmidt U (2016) Advanced Aquaponics: evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs conventional hydroponics. *Agric Water Manag* 178:335–344

Summerfelt ST (2003) Ozonation and UV irradiation – An introduction and examples of current applications. *Aquac Eng* 28:21–36. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(02\)00069-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00069-9)

Stirbet A, Lazár D, Kromdijk J (2018) Chlorophyll a fluorescence induction: can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses. *Photosynthetica* 56:86–104

Schmautz Z. et al., 2016. Tomato Productivity and Quality in Aquaponics: Comparison of Three Hydroponic Methods *Water* 2016, 8, 533; doi:10.3390/w8110533

Strasser, R.J., Tsimilli-Michael, M., Qiang, S., Goltsev, V., 2010. Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis*. *Biochim. Biophys. Acta* 1797, 1313–1326.

Stefanov, D., Petkova, V., Denev, I.D., 2011. Screening for heat tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines and cultivars using JIP-test. *Sci. Hortic.* 128, 1–6.

Troell M. et al., 2014. Does aquaculture add resilience to the global food system? *PNAS Early Edition* [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1404067111](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1404067111)

Timmons MB, Ebeling JM (2010) *Recirculating aquaculture*, 2nd edn. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca

Turcios AE, Papenbrock J (2014) Sustainable treatment of aquaculture effluents—what can we learn from the past for the future? *Sustainability* 6:836–856. <https://doi.org/10.3390/su6020836>

- Van Vuuren DP, Bouwman AF, Beusen AHW (2010) Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion. *Glob Environ Chang* 20:428–439. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2010.04.004>
- Yavuzcan Yildiz H, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G (2017) Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-a review. *Water* 9(1):13
- Yang T. and Kim H.-J. 2020. Characterizing Nutrient Composition and Concentration in Tomato-, Basil-, and Lettuce-Based Aquaponic and Hydroponic Systems. *Water* 2020, 12, 1259; doi:10.3390/w12051259
- Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. *Water* 8. <https://doi.org/10.3390/w8120589>
- Zhang P. et al., 2020. Photosynthetic rate prediction model of newborn leaves verified by core fluorescence parameters. *Scientific Reports* | (2020) 10:3013 | <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59741-6>
- Zhang, Y., Guanter, L., Joiner, J., Song, L. & Guan, K. Spatially-explicit monitoring of crop photosynthetic capacity through the use of space-based chlorophyll fluorescence data. *Remote Sensing of Environment* 210, 362–374 (2018).
- Zekki H, Gauthier L, Gosselin A (1996) Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *J Am Soc Hortic Sci* 121:1082–1088.
- Zushi K. et al., 2012. Chlorophyll a fluorescence OJIP transient as a tool to characterize and evaluate response to heat and chilling stress in tomato leaf and fruit. 0304-4238/\$ – see front matter © 2012 Elsevier B.V. All rights reserved. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2012.09.022>

## Ελληνική Βιβλιογραφία

Ελληνική Στατιστική Αρχή, Πίνακας 03α. Λαχανικά. Εκτάσεις και παραγωγή κατά Περιφέρεια και Περιφερειακή Ενότητα, <https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SPG06/->

Ολύμπιος Χ.Μ. (2001). «Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια» Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα σελ.

Καραμπουρνιώτης Γ. 2012. Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών Οι λειτουργίες των φυτών κάτω από αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος. Αθήνα, Έμβρυο, 3η έκδοση, 2012.

Κολλύβα Σ. 2021. «Φυσιολογικές αποκρίσεις αγγουριού που αναπτύσσεται σε σύστημα ενυδρειοπονίας»

Κυζερίδου Α. 2009. Εκτίμηση του ποσού των περιεχόμενων φωτοσυνθετικών χρωστικών σε καρπούς με τη χρήση φασμάτων της IN VIVO ανακλαστικότητας. Μεταπτυχιακό Δίπλωμα ειδίκευσης Οικολογία-Διαχείριση & Προστασία Φυσικού Περιβάλλοντος.

Μαυρογιαννόπουλος Γ. Ν. 2007. Υδροπονικές εγκαταστάσεις. Εκδόσεις Σταμούλη.

Τσιρογιάννης Ι.Α 2011. Προσδιορισμός δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για τη διαχείριση του μικροκλίματος και της άρδευσης στο θερμοκήπιο Διδακτορική διατριβή.

Χα Ιμπραχίμ-Αβραάμ, Πετρόπουλος Σπύρος. (2014). «Γενική Λαχανοκομία & Υπαίθρια Καλλιέργεια Λαχανικών» Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος