

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



Σχολή γεωπονικών Επιστημών

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Τεχνολογίες και Διαχείριση Θερμοκηπίων και Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών»

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΖΙΖΑΝΙΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

«Εφαρμογή βιοδιεγερτών και βιολιπάσματος σε καλλιέργεια αγγουριού που αναπτύσσεται σε συστήματα αποζευγμένης ενυδρειοπονίας και υδροπονίας: επιδράσεις σε αναπτυξιακά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά».



ΧΑΤΖΗΝΙΚΟΛΑΟΥ ΜΙΧΑΛΗΣ

Βόλος, Φεβρουάριος 2024

«Εφαρμογή βιοδιεγερτών και βιολιπάσματος σε καλλιέργεια αγγουριού που αναπτύσσεται σε συστήματα αποζευγμένης ενυδριοπονίας και υδροπονίας: επιδράσεις σε αναπτυξιακά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά».

Χατζηνικολάου Μιχάλης

Τριμελής Συμβουλευτική-Εξεταστική Επιτροπή:

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

Κατσούλας Νικόλαος, Καθηγητής Γεωργικών Κατασκευών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**

Πετρόπουλος Σπυρίδωνας, Αναπληρωτής καθηγητής Λαχανοκομίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, **Μέλος**

Copyright © ΧΑΤΖΗΝΙΚΟΛΑΟΥ ΜΙΧΑΛΗΣ, 2024.

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 «Εφαρμογή βιοδιεγερτών και βιολιπάσματος σε καλλιέργεια αγγουριού που αναπτύσσεται σε συστήματα αποζευγμένης ενυδρειοπονίας και υδροπονίας: επιδράσεις σε αναπτυξιακά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά» εκπονήθηκε στα πλαίσια του Π.Μ.Σ. «Τεχνολογίες και Διαχείριση Θερμοκηπίων και Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών» στο εργαστήριο ζιζανιολογίας του τμήματος Γεωπονίας Φυτικής παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Για τη ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας συνέβαλαν αρκετά άτομα στα οποία οφείλω τις ευχαριστίες μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια Ευθυμία Λεβίζου για την αгаστή συνεργασία και τη συμβουλευτική καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια του πειράματος και κατά τη συγγραφή της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα δυο υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, τον καθηγητή Νικόλαο Κατσούλα και τον αναπληρωτή καθηγητή Σπυρίδωνα Πετρόπουλο για τη συμμετοχή τους στην αξιολόγηση της εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να δώσω τις ευχαριστίες μου στην υποψήφια διδάκτορα Αλβάρντ Αναστασία Μουραντιάν για τη βοήθεια και τις χρήσιμες συμβουλές που προσέφερε κατά τη πειραματική διαδικασία.

Επίσης νιώθω την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και τον κοντινό μου κύκλο για τη συμπαράσταση και την υποστήριξη που συνέβαλε στην επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου.

Περίληψη

Η ενυδρειοπονία είναι ένα αειφόρο σύστημα παραγωγής ζωικών και φυτικών προϊόντων που συνδυάζει τα υποσυστήματα της υδροπονίας και της υδατοκαλλιέργειας και προτείνεται ως εναλλακτικό σύστημα καλλιέργειας με σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Παρόλα αυτά στο ενυδρειοπονικό διάλυμα παρουσιάζονται συχνά ελλείψεις βασικών θρεπτικών στοιχείων. Το εμπόδιο μπορεί να ξεπεραστεί με την υιοθέτηση του αποζευγμένου ενυδρειοπονικού συστήματος, στο οποίο δίνεται η δυνατότητα προσθήκης θρεπτικών και ρύθμισης του pH ή με τη χρήση βιοδιεγερτών και βιολιπασμάτων. Στο παρόν πείραμα μελετήθηκαν αναπτυξιακά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας αγγουριού στο πιλοτικό ενυδρειοπονικό θερμοκήπιο του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με ταυτόχρονη εκτροφή τιλάπιας. Σκοπός της έρευνας ήταν η σύγκριση του υδροπονικού και του αποζευγμένου συστήματος ενυδρειοπονίας με και χωρίς τη χρήση δυο βιοδιεγερτών και ενός βιολιπάσματος εστιάζοντας σε αναπτυξιακές και λειτουργικές παραμέτρους των φυτών. Κατά την διάρκεια του πειράματος που διήρκεσε 107 ημέρες εκτιμήθηκαν σε μετρήσεις ανά τακτά διαστήματα οι συγκεντρώσεις φωτοσυνθετικών χρωστικών φασματοφωτομετρικά και μέσω του δείκτη SPAD, διάφορες παράμετροι του *in vivo* φθορισμού της χλωροφύλλης *a* και ο δείκτης ανακλαστικότητας φύλλου PRI -ως ένδειξη της αποδοτικότητας χρήσης φωτός από τη φωτοσυνθετική συσκευή. Επίσης σε τρεις καταστροφικές συγκομιδές καταγράφηκε η συσσώρευση βιομάζας στα διάφορα μέρη του φυτού (φύλλα, βλαστό και καρπούς), το πάχος φύλλου, η ειδική μάζα φύλλου και ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού, όπως σκληρότητα, χρώμα, περιεχόμενο σε ολικά διαλυτά στερεά και pH. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αποζευγμένη ενυδρειοπονία συναγωνίζεται επιτυχώς την υδροπονία καθώς όλες οι αναπτυξιακές και φυσιολογικές αποκρίσεις των φυτών στα δυο συστήματα καλλιέργειας κυμαίνονταν στα ίδια επίπεδα. Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα των βιοδιεγερτών και του βιολιπάσματος οι μόνες μεμονωμένες αξιόλογες διαφορές αφορούσαν στο δείκτη PRI όπου οι τιμές των μεταχειρίσεων Bio ήταν υψηλότερες αυτές των φυτών-μαρτύρων στο μέσον του πειράματος, διαφορές που εξισώθηκαν στη συνέχεια. Η μη συνεισφορά των βιοδιεγερτών πιθανώς σχετίζεται με την ισορροπημένη θρεπτική κατάσταση στα δυο συστήματα και την απουσία καταπόνησης στα φυτά αγγουριού. Συνολικά λοιπόν συμπεραίνεται ότι η προσθήκη των συγκεκριμένων βιοδιεγερτών και του βιολιπάσματος δεν επέδρασε στα αναπτυξιακά και φυσιολογικά

χαρακτηριστικά του αγγουριού, είτε αυτό αναπτύχθηκε σε υδροπονικό ή σε ενυδρειοπονικό σύστημα.

Summary

Aquaponics is a sustainable production system of animal and plant products that combines hydroponics and aquaculture and it is considered a promising, alternative and environmentally friendly cultivation system. However, the main limitation of aquaponics is that essential nutrients for plant growth are often present in sub-optimal concentrations. The use of a decoupled aquaponic system with the possibility of adding nutrients and adjusting the pH, or the use of biostimulants and biofertilisers, overcomes this obstacle. In the present experiment, the growth and physiological characteristics of cucumbers grown in hydroponic and aquaponic systems in the presence of two biostimulants and a biofertiliser were studied. The experiment was conducted in the pilot-scale aquaponics greenhouse of the University of Thessaly, located in Velestino (Central Greece). During the 107-day experiment, we assessed at regular intervals the concentrations of photosynthetic pigments by spectrophotometry and the SPAD index, various parameters of *in vivo* chlorophyll a fluorescence as well as the leaf reflectance index PRI, which is an indicator of light use efficiency by the photosynthetic apparatus. In three destructive harvests, we recorded biomass accumulation in different parts of the plant (leaves, stem, and fruit), leaf thickness, specific leaf mass, and fruit quality characteristics, such as hardness, color, total soluble solids content, and pH. The study found that decoupled aquaculture is a viable competitor to hydroponics, with similar growth and physiological responses being observed in both growing systems. In terms of the efficacy of biostimulants and biofertilizer, the only notable difference was related to the PRI index. During the middle of the experiment, the values of the Bio treatments exceeded those of the Control plant treatments. However, the PRI values were later equalised. The lack of contribution from biostimulants may be attributed to the balanced nutrient status in both systems and the absence of stress in cucumber plants. It is concluded that the addition of the studied biostimulants and biofertilizer did not affect the growth and physiological characteristics of cucumber, whether cultivated in hydroponic or aquaculture systems.

Εγώ, ο Μιχάλης Χατζηνικολάου, είμαι ο 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.

Ο 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 τον Μιχάλη Χατζηνικολάου.

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	1
1.2 Υδροπονία.....	2
1.3 Υδατοκαλλιέργεια.....	3
1.4 Ενυδρειοπονικό σύστημα.....	4
1.4.1 Νιτροποιητικά Βακτήρια.....	5
1.4.2 Επιλογή ψαριών και φυτών.....	6
1.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενυδρειοπονίας.....	6
1.4.4 Συζευγμένο και αποζευγμένο σύστημα ενυδρειοπονίας.....	8
1.5 Βιοδιεγέρτες.....	9
1.6 Αγγούρι και η καλλιέργεια του	10
1.7 Σκοπός εργασίας.....	11
2. Υλικά και μέθοδοι.....	12
2.1 Εγκαταστάσεις.....	12
2.2 Φυτικό υλικό και καλλιεργητικές φροντίδες.....	14
2.3 Είδος ψαριών και βιοδιεγέρτες/βιολίπασμα.....	14
2.4 Πειραματικός σχεδιασμός.....	16
2.5 Μετρήσεις.....	17
2.5.1 Χλωροφύλλη SPAD.....	18
2.5.2 Φωτοσυνθετικές χρωστικές.....	18
2.5.3 Πάχος φύλλου.....	19
2.5.4 Δείκτης ξηροφιλίας (LSM).....	19
2.5.5 Δείκτης Physiological Reflectance Index (PRI).....	20
2.5.6 Φθορισμός χλωροφύλλης a (OJIP).....	20
2.5.7 Καταστροφική συγκομιδή.....	21
2.5.8 Ποιότητα καρπού.....	21
2.5.9 Στατιστική ανάλυση.....	22
3. Αποτελέσματα.....	22

3.1 Δείκτης SPAD.....	23
3.2 Δείκτης ξηροφιλίας (LSM).....	27
3.3 Πάχος φύλλου.....	39
3.4 Δείκτης PRI.....	31
3.5 Φθορισμός χλωροφύλλης a (OJIP).....	34
3.6 Φωτοσυνθετικές χρωστικές.....	40
3.7 Ξηρό Βάρος Βλαστού.....	43
3.8 Ξηρό Βάρος Φύλλων.....	45
3.9 Μέσο ξηρό βάρος καρπού	47
3.10 Ποιότητα καρπού.....	50
4. Συζήτηση.....	51
5. Συμπεράσματα.....	55
6. Βιβλιογραφία.....	58
6.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.....	58
6.2 Ελληνική βιβλιογραφία.....	67

Περιεχόμενες εικόνες

Εικόνα 1: Υδροπονικός χώρος καλλιέργειας.....	13
Εικόνα 2: Σύστημα RAS του πειράματος.....	13
Εικόνα 3: Δεξαμενή εκτροφής κόκκινης Τιλάπια.....	15
Εικόνα 4: Όργανο μέτρησης χλωροφύλλης.....	18
Εικόνα 5: Διαδικασία μέτρησης του φθορισμού της χλωροφύλλης a (OJIP).....	21

Περιεχόμενα σχεδιαγράμματα

Σχεδιάγραμμα 1: : Διάταξη των μεταχειρίσεων στο χώρο του θερμοκηπίου.....	17
---	----

Περιεχόμενοι πίνακες

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των βιοδιεγερτών 1 και 2 και του βιολιπάσματος 3.....	16
Πίνακας 2: Πίνακας 2: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a (OJIP) την Ημέρα 23.....	35
Πίνακας 3: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a (OJIP) την Ημέρα 43.....	36
Πίνακας 4: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a (OJIP) την Ημέρα 64.....	37
Πίνακας 5: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a (OJIP) την Ημέρα 86.....	38
Πίνακας 6: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a (OJIP) την ημέρα 106.....	39
Πίνακας 7: Ποιοτικά χαρακτηριστικά συγκομισμένων καρπών την Ημέρα 71.....	49
Πίνακας 8: Ποιοτικά χαρακτηριστικά συγκομισμένων καρπών την Ημέρα 104.....	50

Περιεχόμενα διαγράμματα

Διάγραμμα 1: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 20 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	24
Διάγραμμα 2: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	24
Διάγραμμα 3: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 62 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$	25
Διάγραμμα 4: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 85 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$	26
Διάγραμμα 5: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 105 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$	26
Διάγραμμα 6: Δείκτης ξηροφιλίας (g/dm ²) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 20 (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	27
Διάγραμμα 7: Δείκτης ξηροφιλίας (g/dm ²) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 64 (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$	28
Διάγραμμα 8: Δείκτης ξηροφυλλίας (g/dm ²) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 105 (M.O. $\pm$ Sd, n=10) Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	28
Διάγραμμα 9: Πάχος φύλλου (mm) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 20 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$	29
Διάγραμμα 10: Πάχος φύλλου (mm) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 64. (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	30
Διάγραμμα 11: Πάχος φύλλου (mm) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 105 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$	30

Διάγραμμα 12: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 20 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	31
Διάγραμμα 13: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	32
Διάγραμμα 14: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 62 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	32
Διάγραμμα 15: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 85 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	33
Διάγραμμα 16: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 105 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$	33
Διάγραμμα 17: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 23 (M.O. $\pm$ Sd, n=15).....	35
Διάγραμμα 18: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 43 (M.O. $\pm$ Sd, n=15).....	36
Διάγραμμα 19: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 64 (M.O. $\pm$ Sd, n=15).....	37
Διάγραμμα 20: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 86 (M.O. $\pm$ Sd, n=15).....	38
Διάγραμμα 21: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης a όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 106 (M.O. $\pm$ Sd, n=15).....	39
Διάγραμμα 22: Αθροιστική συγκέντρωση χλωροφύλλης a και b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 23 (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$	40
Διάγραμμα 23: Λόγος συγκέντρωσης χλωροφυλλών προς καροτενοειδή ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 23 (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Τα διαφορετικά γράμματα	

υποδεικνύουν	στατιστικώς	σημαντικές	διαφορές	σε	επίπεδο	
$p \leq 0,05$						41
Διάγραμμα 24: Αθροιστική συγκέντρωση χλωροφύλλης a και b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 66 (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 41						
Διάγραμμα 25: Λόγος συγκέντρωσης χλωροφυλλών προς καροτενοειδή ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 66 (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 42						
Διάγραμμα 26: Αθροιστική συγκέντρωση χλωροφύλλης a και b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 107 (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 42						
Διάγραμμα 27: Λόγος συγκέντρωσης χλωροφυλλών προς καροτενοειδή ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 107. (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 43						
Διάγραμμα 28: Ξηρό βάρος βλαστού (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 44						
Διάγραμμα 29: Ξηρό βάρος βλαστού (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 77 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 44						
Διάγραμμα 30: Ξηρό βάρος βλαστού (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 108 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 45						
Διάγραμμα 31: Ξηρό βάρος φύλλων (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (M.O. $\pm$ Sd, n=4) Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 46						
Διάγραμμα 32: Ξηρό βάρος φύλλων (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 77 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 46						
Διάγραμμα 33: Ξηρό βάρος φύλλων (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 108 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 47						

Διάγραμμα 34: Ξηρό βάρος καρπών (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 48

Διάγραμμα 35: Ξηρό βάρος καρπών (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 77 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 48

Διάγραμμα 36: Ξηρό βάρος καρπών (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 108 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 49

Διάγραμμα 37: Ξηρό βάρος εμπορεύσιμων καρπών (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 77. (M.O. $\pm$ Sd, n=6) Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$ 49

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η εκθετική αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού είναι πλέον ένα θεμελιωμένο χαρακτηριστικό της εποχής που διανύουμε (Baddadi et al, 2018). Η κάλυψη των διατροφικών αναγκών αποτελεί διαχρονικά μια πρόκληση που όμως σήμερα έρχεται αντιμέτωπη με τα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής και της αλόγιστης χρήσης των φυσικών πόρων (Goddek et al, 2019). Η εντατική γεωργική παραγωγή εξασφαλίζει επαρκή παραγωγή αλλά χωρίς την ενσωμάτωση στοιχείων αειφόρου ανάπτυξης οδηγεί σε εξάντληση των διαθέσιμων πόρων αλλά και υποβάθμιση του περιβάλλοντος λόγω έκπλυσης των χημικών λιπασμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα (Stanghellini et al, 2005). Τα κλειστά συστήματα υδροπονίας μέσω και της τεχνολογικής αναβάθμισης έχουν την δυνατότητα να μετριάσουν περιβαλλοντικά πρόβληματα αφού πραγματοποιείται ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος που επαναχρησιμοποιείται στους επόμενους κύκλους άρδευσης (Elvanidi et al, 2020). Στην υδροπονία όμως η επίτευξη ικανοποιητικής παραγωγής προϋποθέτει μεγάλες εισροές νερού και χημικών λιπασμάτων, γεγονός που αποτελεί τροχοπέδη στην επίλυση των προαναφερθέντων προβλημάτων (Mourantian et al, 2023).

Η ταχέως αναπτυσσόμενη ενυδρείοπονία αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο καλλιέργειας που δύναται να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της παραγωγής και της βιωσιμότητας (Verma et al, 2023). Η εν λόγω τεχνική συνδυάζει την εκτροφή ψαριών και την υδροπονική καλλιέργεια φυτών σε ένα εναρμονισμένο περιβάλλον συμβίωσης (Mahmoud et al, 2023). Τα προϊόντα της πέψης των ψαριών που διαλύονται στο νερό με τη βοήθεια συγκεκριμένων βακτηρίων συνθέτουν το θρεπτικό διάλυμα που διοχετεύεται στον υδροπονικό κύκλο άρδευσης για να καλύψει τις ανάγκες των καλλιεργούμενων φυτών (Love et al, 2014). Τα φυτά με τη σειρά τους δεσμεύουν τα διαλυμένα θρεπτικά βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του νερού που ενδείκνυται να ανατροφοδοτηθεί στις δεξαμενές ιχθυοκαλλιέργειας (Buzby and Lin, 2014). Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται ένα τεχνητό οικοσύστημα μικρής κλίμακας που αποδίδει αυξημένη ζωική και φυτική

παραγωγή επενδύοντας ταυτόχρονα στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μέσω της ανακύκλωσης θρεπτικών και νερού και μείωσης των λιπασμάτων χημικής σύστασης (Krastanova et al, 2022).

1.2 Υδροπονία

Ετυμολογικά η λέξη υδροπονία αποτελείται από τα συνθετικά ύδωρ (νερό) και πόνημα (εργασία) με τον Gerick (1937) να είναι ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο για να περιγράψει «κάθε μέθοδο ανάπτυξης φυτών σε θρεπτικό διάλυμα για εμπορικούς σκοπούς» ενώ μελέτησε και την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος (Savvas, 2002; Benton, 2005). Σήμερα πολλοί ταυτίζουν την υδροπονία με την διευρυμένη έννοια της εκτός εδάφους καλλιέργειας η οποία συμπεριλαμβάνει και τη χρήση ανόργανου ή οργανικού στερεού υποστρώματος ως μέσο εγκατάστασης και στήριξης των φυτών (Park and Williams, 2024; Μαυρογιαννόπουλος, 2017). Σε όλα τα υδροπονικά συστήματα τα φυτά αναπτύσσονται σε ελεγχόμενες συνθήκες και λαμβάνουν με την άρδευση όλα τα απαραίτητα ιόντα μέσω του θρεπτικού διαλύματος το οποίο αποτελεί ένα μείγμα νερού και θρεπτικών στοιχείων. Ενδεικτικά μερικά από τα κυριότερα συστήματα υδροπονίας είναι το NFT (nutrient film technique) στο οποίο μέρος της ρίζας του φυτού διαβρέχεται από θρεπτικό διάλυμα συνεχούς ροής σε αντίθεση με το DWC (Deepwater Culture) όπου η ρίζα βρίσκεται εξ'ολοκλήρου βυθισμένη εντός θρεπτικού διαλύματος που οξυγονώνεται για την αποτροπή ασφυκτικών συνθηκών. Στο σύστημα της αεροπονίας η ρίζα του φυτού αιωρείται εντός κιβωτίων και λαμβάνει το διάλυμα θρέψης μέσω απευθείας ψεκασμού. Όταν η ρίζα του φυτού αναπτύσσεται σε στερεό υπόστρωμα το θρεπτικό διάλυμα τροφοδοτείται σε μικρές και συχνές δόσεις με στάγδην άρδευση μέσω ενσωματωμένων σταλακτών (Aires et al, 2018).

Όταν το θρεπτικό διάλυμα έχει την δυνατότητα ανακύκλωσης, διόρθωσης του Ph, της περιεκτικότητας σε θρεπτικά και ανατροφοδότησης τότε το σύστημα θεωρείται κλειστού τύπου. Στην περίπτωση του ανοιχτού συστήματος μετά την ολοκλήρωση της άρδευσης το αναξιοποίητο από τα φυτά θρεπτικό διάλυμα απορρέει και καταλήγει στο περιβάλλον εξωτερικά της μονάδας καλλιέργειας (Hosseinzadeh et al, 2017). Στο κλειστό

υδροπονικό σύστημα τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας λόγω των αυτοματισμών είναι υψηλότερα συγκριτικά με το ανοικτό σύστημα (Munoz et al, 2012), υπάρχουν όμως πλεονεκτήματα που αποζημιώνουν αυτή την επιλογή. Αρχικά με την ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος συνεπάγεται εξοικονόμηση νερού και λιπασμάτων χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η παραγωγή (Neocleous and Savvas, 2016). Η διατήρηση του περισσευούμενου θρεπτικού διαλύματος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα έχει και ωφέλιμες περιβαλλοντικές επεκτάσεις αφού μειώνεται η ποσότητα των ρυπογόνων στοιχείων και ιδιαίτερα των νιτρικών και φωσφορικών που καταλήγουν στον υδροφόρο ορίζοντα (Katsoulas et al, 2015). Γενικότερα η υδροπονία είναι μια αναβαθμισμένη μέθοδος καλλιέργειας όσον αφορά την παραγωγική δυναμικότητα σε σύγκριση με τη συμβατική καλλιέργεια στο χώμα. Είναι όμως μια δαπανηρή σε πόρους παραγωγική διαδικασία γεγονός που σήμερα με τις τωρινές συνθήκες έλλειψης την καθιστά εμπόδιο στην αναγκαία αειφόρο ανάπτυξη (Mourantian et al, 2023).

1.3 Υδατοκαλλιέργεια

Ο κλάδος της υδατοκαλλιέργειας αναπτύσσεται με εκθετικούς ρυθμούς με σκοπό την κάλυψη των διατροφικών αναγκών που σχετίζονται με την κατανάλωση υδρόβιων οργανισμών και κυρίως ψαριών που ολοένα και αυξάνεται (Bjørndal et al, 2023). Η εκτροφή υδρόβιων οργανισμών αναπόφευκτα έρχεται ως μια εναλλακτική και πιο βιώσιμη επιλογή έναντι του ψαρέματος αφού η υπεραλίευση έχει καταδυναστεύσει τα φυσικά υδρόβια αποθέματα (Md Noor and Harun, 2022). Τροχοπέδη στην περαιτέρω αύξηση της υδατοκαλλιέργειας είναι η ανεπιθύμητη παραγωγή βλαβερών λυμάτων ως αποτέλεσμα της εντατικής παραγωγικής διαδικασίας. Αυτά τα λύματα προέρχονται από την συσσώρευση νεκρής ύλης, υπολείμματα τροφών που δεν καταναλώθηκαν και διάφορων χημικών ουσιών εκ των οποίων κυριότερες είναι οι αζωτούχες ενώσεις που αποτελούν προϊόντα της πέψης των ψαριών (Taufik et al, 2023). Η απόρριψη αυτών των τοξικών λυμάτων εγκυμονεί κινδύνους υποβάθμισης του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας και γίνονται προσπάθειες περιορισμού από διάφορους οργανισμούς και κυβερνήσεις (Drizo and Shaikh, 2023). Εκτός από το πρόβλημα της ρύπανσης όμως, ακόμα ένα εμπόδιο στην επέκταση των συμβατικών μεθόδων υδατοκαλλιέργειας ιδιαίτερα

των ανοιχτών συστημάτων είναι η έλλειψη χώρου και πόρων όπως το καθαρό νερό (Badiola et al, 2012). Η ανάπτυξη του επανακυκλοφορούμενου συστήματος ιχθυοκαλλιέργειας (RAS) αποσκοπεί στη μετρίαση των προαναφερθέντων προβλημάτων. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία σχεδιασμών σε αυτό το σύστημα που όμως η λειτουργία τους ακολουθεί την αρχή του καθαρισμού και επαναχρησιμοποίησης του νερού που δραστηριοποιούνται τα ψάρια από την οποία πηγάζουν και τα πλεονεκτήματα της (Klinger and Naylor, 2012).

1.4 Ενυδρειοπονικό σύστημα

Ο συνδυασμός εκτροφής ψαριών ή άλλων υδρόβιων οργανισμών μέσω του επανακυκλοφορούμενου συστήματος ιχθυοκαλλιέργειας (RAS) και η υδροπονική καλλιέργεια φυτικών ειδών συνθέτουν το καινοτόμο σύστημα πολυκαλλιέργειας που ονομάζεται ενυδρειοπονία (Rodgers et al, 2022). Το εν λόγω σύστημα παραγωγής συνιστά ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας στο οποίο πραγματοποιείται ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του νερού και των διαλυμένων θρεπτικών στοιχείων μεταξύ των δυο υποσυστημάτων (Tsoumalakou et al, 2022). Η λειτουργία αυτού του συστήματος βασίζεται στην συνεργασία υδρόβιων οργανισμών, φυτών και βακτηρίων σε ένα εναρμονισμένο περιβάλλον συμβιωτικών σχέσεων (Goddek et al, 2015).

Σε μια τυπική ενυδρειοπονική μονάδα το νερό κινείται κυκλικά ξεκινώντας από τις δεξαμενές εκτροφής των υδρόβιων οργανισμών. Εκεί πραγματοποιείται η θρέψη των εκτρεφόμενων ειδών και το νερό αναμειγνύεται με προϊόντα μεταβολισμού από την πέψη των ψαριών και αναξιοποίητης τροφής. Από αυτό το μείγμα νερού προκύπτουν αργότερα τα θρεπτικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη των φυτών (Τσουμαλάκου, 2023). Μετά τις δεξαμενές εκτροφής το νερό περνά μέσα από ένα μηχανικό φίλτρο που συγκρατεί και απομακρύνει τα στερεά υπολείμματα τα οποία αυξάνουν την πιθανότητα ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών και μειώνουν τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (Krastanova et al, 2022). Το φιλτράρισμα του νερού συνεχίζεται σε ένα βιολογικό φίλτρο με αποικούντα βακτήρια που έχουν το ρόλο αποικοδομητών ώστε τελικά τα στοιχεία από το θρεπτικό διάλυμα που θα προκύψει και

θα διοχετευθεί στα φυτά της υδροπονικής καλλιέργειας να είναι αφομοιώσιμα (Yer and Zheng, 2019). Τελικά τα φυτά απορροφώντας τα διαλυμένα θρεπτικά στοιχεία από το νερό το καθιστούν βιώσιμο και κατάλληλο για την επιστροφή του στις αρχικές δεξαμενές για τη συνέχιση της εκτροφής των υδρόβιων οργανισμών (Colt et al, 2021).

1.4.1 Νιτροποιητικά βακτήρια

Για τη θρέψη των υδρόβιων οργανισμών επιλέγονται τροφές πλούσιες σε άζωτο το οποίο αποτελεί δομικό λίθο των πρωτεϊνών και κύριο συντελεστή τόσο στην αύξηση της βιομάζας των εκτρεφόμενων ειδών όσο και στην ανάπτυξη των φυτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στις απεκκρίσεις των ψαριών να υπερισχύουν ποσοτικά αζωτούχες ενώσεις όπως η αμμωνία (Schmautz et al, 2021). Η συσσώρευση όμως της αμμωνίας δημιουργεί τοξικές συνθήκες και καθιστά το νερό εκτροφής ακατάλληλο για τη διαβίωση των υδρόβιων οργανισμών επηρεάζοντας το νευρικό τους σύστημα (Derikvand et al, 2021). Ο συνδετικός κρίκος μεταξύ των δυο υποσυστημάτων που μετατρέπει το πρόβλημα της αμμωνίας σε θρεπτικά είναι τα νιτροποιητικά βακτήρια (Tsoumalakou et al, 2023) που μέσα από τη μικροβιακή αποικοδόμηση επενδύουν στην ολοκλήρωση του κύκλου του αζώτου (Tsoumalakou et al, 2022). Αυτού του είδους οι αυτότροφοι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται στις ελεύθερες επιφάνειες των δεξαμενών και στο βιολογικό φίλτρο και μέσα από οξειδωτικές διεργασίες μετατρέπουν το αμμώνιο σε νιτρώδη (*Nitrosomonas* spp., *Nitrovibrio* spp., *Nitrosospora* spp., etc.) και τα νιτρώδη σε νιτρικά (*Nitrobacter* spp., *Nitrospira* spp., *Nitrosomonas*) τα οποία αποτελούν αφομοιώσιμη μορφή αζώτου για τα φυτά και η συγκέντρωσή τους στο νερό μειώνει το ρίσκο τοξικότητας στα ψάρια σε σύγκριση με τα αμμωνιακά (Omar et al, 2023).

1.4.2 Επιλογή ψαριών και φυτών

Στο ενυδρειοπονικό σύστημα υπάρχει ποικιλομορφία στην επιλογή υδρόβιων οργανισμών και φυτικών ειδών που μπορεί να καλύψει τις ανάγκες από ένα μεγάλο ποσοστό του καταναλωτικού κοινού (Stathopoulou et al, 2021). Σύμφωνα με έρευνα της ομάδας της Love (2015) πιο ψηλά σε ποσοστά προτίμησης στην επιλογή εκτροφής στο ενυδρειοπονικό σύστημα βρίσκονται υδρόβιοι οργανισμοί γλυκού νερού όπως η τιλάπια (*Tilapia* spp.), είδη της τάξης των σιλουρόμορφων (Catfish), η πέρκα (*Perch* spp.), το γαλαζολιόψαρο (*Lepomis macrochirus*), το λαβράκι (*Micropterus* spp., *Morone* spp.) και διάφορα καλλωπιστικά είδη. Πιο συγκεκριμένα το υβρίδιο της κόκκινης τιλάπιας αποτελεί το πιο διαδεδομένο είδος εκτρεφόμενου ψαριού στο συγκεκριμένο σύστημα διότι παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε συνθήκες αλατότητας και έχει μεγάλο ποσοστό γέννησης αρσενικών ατόμων που συγκριτικά με τα θηλυκά έχουν μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης (Nakphet et al, 2016). Η επιλογή φυτών σε ένα ενυδρειοπονικό σύστημα εξαρτάται από την καλλιεργητική εμπειρία και τη δυναμική της ιχθυοπυκνότητας η οποία επηρεάζει τη σύσταση του ενυδρειοπονικού θρεπτικού διαλύματος (Hu et al, 2015). Στην ίδια έρευνα με παραπάνω η ομάδα της Love (2015) έδειξε ότι τα πιο δημοφιλή φυτά είναι τα αρωματικά με κυριότερο το βασιλικό, τα φυλλώδη λαχανικά για σαλάτα με βασικότερο το μαρούλι, το λάχανο και το σέσκουλο ενώ από τα καρπώδη λαχανικά επιλέγεται η ντομάτα, το αγγούρι και η πιπεριά.

1.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενυδρειοπονίας

Η διαρκής μείωση των διαθέσιμων φυσικών πόρων, η έλλειψη και υποβάθμιση των καλλιεργούμενων εκτάσεων αποτελούν εμπόδιο στην περαιτέρω αύξηση της παραγωγής για την κάλυψη των διατροφικών αναγκών που ολοένα και αυξάνεται. Το σύστημα της ενυδρειοπονίας έχει προταθεί ως ένα αναβαθμισμένο μοντέλο παραγωγής που πλεονεκτεί έναντι άλλων συστημάτων αφού δύναται να εξασφαλίσει επάρκεια τροφής μετριάζοντας ταυτόχρονα τα προβλήματα του ήδη επιβαρυσμένου οικοσυστήματος (Joyce et al, 2019). Αρχικά το οικονομικό κέρδος σε αυτό το σύστημα πολυκαλλιέργειας προκύπτει από το συνδυασμό της πώλησης ζωικού και φυτικού προϊόντος (Colt and

Schuur, 2021). Στην ενυδραιοπονία το ποσοστό ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης του νερού μπορεί ιδανικά να φτάσει 95-99% ενώ η ποσοτική εισροή νερού στα ψάρια θεωρείται ελαχιστοποιημένη συγκριτικά με τις ανάγκες άλλων εκτρεφόμενων ειδών (Joyce et al, 2019). Ακόμα το νερό εκτροφής των ψαριών που στη περίπτωση της ανοιχτής ιχθυοκαλλιέργειας θα αποβαλλόταν σε μορφή λυμάτων, στην ενυδραιοπονία αποτελεί πηγή θρεπτικών για τα φυτά με τη βοήθεια των φίλτρων και των νιτροποιητικών βακτηρίων. Τα πλεονεκτήματα που πηγάζουν από αυτή τη διαδικασία σχετίζονται αφενός με την εξοικονόμηση πόρων αφού ελαχιστοποιείται η χρήση πρόσθετων χημικών λιπασμάτων και νερού και αφετέρου με τη προστασία του περιβάλλοντος αφού το ήδη φιλτραρισμένο νερό με την επιπρόσθετη δέσμευση στοιχείων από τα φυτά επαναχρησιμοποιείται για την συνέχιση της εκτροφής των υδρόβιων οργανισμών αντί να απορρίπτεται (Xia et al, 2023). Επιπλέον με τις σημερινές συνθήκες της ραγδαίας αστικοποίησης ένα ακόμα πλεονέκτημα που προκύπτει από την ενυδραιοπονία είναι ο συνδυασμός δυο συστημάτων καλλιέργειας (Υδροπονία και επακυκλοφορούμενης ιχθυοκαλλιέργειας) που δεν απαιτούν καλλιεργήσιμη έκταση αλλά έχουν την δυνατότητα εγκατάστασης σε εσωτερικούς χώρους ακόμα και εντός αστικού ιστού (David et al, 2022). Η περιαστική εγκατάσταση πλησίον των κέντρων πώλησης μειώνει τα έξοδα μεταφοράς και την παραγωγή ρύπων λόγω συντόμευσης των αποστάσεων στην αλυσίδα εφοδιασμού (Suárez-Cáceres et al, 2021).

Παρόλα αυτά για την απόφαση εγκατάστασης και λειτουργίας ενός ενυδραιοπονικού συστήματος πρέπει να συνυπολογιστούν και μερικές προκλήσεις που συνοδεύουν την υιοθέτηση ενός τέτοιου συστήματος. Αρχικά η λειτουργία αυτού του συστήματος λόγω της πολυπλοκότητας και της τεχνολογικής εξάρτησης έχει αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις που αυξάνουν το κόστος παραγωγής (Kalvakaalva et al, 2023). Η ενυδραιοπονία είναι ένα σύστημα που εμπεριέχει τεχνολογικούς αυτοματισμούς και απαιτεί ένα πολυδιάστατο γνωστικό επίπεδο σε τομείς της τεχνολογίας και της καλλιέργειας/εκτροφής που αλληλοεπηρεάζονται με μικρά περιθώρια σφάλματος. Για αυτό το λόγο η διαχείριση του συστήματος πρέπει να πραγματοποιείται από άτομα με υψηλή κατάρτιση στο αντικείμενο (Goddek et al, 2015). Επιπλέον υπάρχουν μερικοί περιοριστικοί παράγοντες όσον αφορά τη προστασία με χημικά μέσα σε ένα σύστημα που συνδυάζει φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς. Κύρια παραδείγματα αποτελούν η

φορμαδεύδη που χρησιμοποιείται κατά κόρων για την απολύμανση του νερού στις ιχθυοκαλλιέργειες αλλά έχει τοξική δράση στους φυτικούς οργανισμούς και τα αντιβιοτικά για τη θεραπεία των ψαριών που έχουν απαγορευτεί στη γεωργική παραγωγή (Yildiz et al, 2017).

1.4.4 Συζευγμένο και αποζευγμένο σύστημα ενυδρείοπονίας

Ένας κριτήριο κατηγοριοποίησης των ενυδρείοπονικών συστημάτων βασίζεται στη δυνατότητα επέμβασης στο κύκλο κυκλοφορίας του νερού ανάμεσα στα υποσυστήματα της υδροπονίας και του RAS. Όταν ο κύκλος του νερού είναι ενοποιημένος και απρόσκοπτος χωρίς τη δυνατότητα κάποιας παρέμβασης από τον καλλιεργητή τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται κλειστό ή συζευγμένο (Τσουμαλάκου, 2023). Στη περίπτωση του ανοιχτού ή αποζευγμένου συστήματος τα δυο υποσυστήματα λειτουργούν ως ξεχωριστές υπομονάδες με τη κυκλοφορία του νερού να είναι διαχειρίσιμη σε κάθε κύκλο μεμονωμένα (Delaide et al, 2016). Η αποθήκευση του νερού σε δεξαμενές πριν την διοχέτευση του στην υδροπονική καλλιέργεια δίνει τη δυνατότητα διόρθωσης των χημικών ιδιοτήτων του μείγματος νερού που περιλαμβάνει συνήθως τη προσθήκη θρεπτικών στοιχείων και τη ρύθμιση του pH (Mourantian et al, 2023)

Σε ένα συζευγμένο σύστημα ενυδρείοπονίας η μόνη πηγή θρεπτικών για την ολοκληρωμένη ανάπτυξη των φυτών προέρχεται εξ'ολοκλήρου από τη θρέψη των ψαριών. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει θετικές οικολογικές επιδράσεις λόγω της απουσίας χρήσης τεχνητών χημικών λιπασμάτων αλλά εμφανίζονται περιπτώσεις όπου η σύσταση των απεκκρίσεων των ψαριών αδυνατεί να ικανοποιήσει τις θρεπτικές ανάγκες των φυτών με τις πιο συχνές ελλείψεις να παρατηρούνται σε στοιχεία όπως Fe, Ca, K, Mg και B (Krastanova et al, 2022). Επίσης η επιθυμητή ανάπτυξη των φυτών, ζώων και βακτηρίων που συνυπάρχουν στο σύστημα συντελείται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών Ph το οποίο μπορεί να διαφέρει ανάλογα το είδος. Εάν δεν υπάρχει η δυνατότητα διόρθωσης αυτής της παραμέτρου τότε δημιουργείται η ανάγκη για μια κοινή και συμβιβαστική τιμή Ph που όμως είναι πιθανό να μην προωθεί την βέλτιστη ανάπτυξη όλων των οργανισμών ταυτόχρονα. Αυτά τα προβλήματα εξαλείφονται στο αποζευγμένο σύστημα όπου υπάρχει

η δυνατότητα προσθήκης θρεπτικών και διόρθωσης του Ph σε κάθε υπομονάδα ξεχωριστά. Ως εκ τούτου η εφαρμογή του αποζευγμένου συστήματος ενυδριοποίησης αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέσο επίλυσης των προαναφερθέντων ζητημάτων που προκύπτουν στη συζευγμένη μέθοδο, ρισκάροντας όμως στον αντίποδα το πλεονέκτημα της βιωσιμότητας του συστήματος (Yep & Zheng, 2019).

1.5 Βιοδιεγέρτες

Οι βιοδιεγέρτες είναι ένας ακμάζων κλάδος που στα πλαίσια οικονομικής αξιολόγησης από την EBIC υπολογίστηκε ότι κατέχει κεφάλαιο στην ευρωπαϊκή αγορά που ανέρχεται στα 1.5-2 δις (Baltazar et al, 2021). Ο ορισμός των βιοδιεγερτών έχει απασχολεί αρκετά την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. Ενδεικτικά μια από αυτές τις προσπάθειες είναι αυτή των Yakhin (et al, 2017) η οποία συνδυάζει προηγούμενες θεωρίες και ορίζει τους βιοδιεγέρτες ως “ένα διαμορφωμένο προϊόν βιολογικής προέλευσης που βελτιώνει την παραγωγικότητα των φυτών ως συνέπεια των νέων ή αναδυόμενων ιδιοτήτων του συμπλέγματος των συστατικών και όχι ως αποκλειστική συνέπεια της παρουσίας γνωστών βασικών θρεπτικών συστατικών, ρυθμιστών ανάπτυξης των φυτών ή φυτοπροστατευτικών ενώσεων”. Οι βιοδιεγέρτες προωθούν την φυτική ανάπτυξη αλλά όπως αναφέρουν οι Kauffman et al, (2007) διαχωρίζονται από τα λιπάσματα διότι σε αντίθεση με αυτά η δράση τους δεν εξαρτάται μόνο από θρεπτικά στοιχεία και χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρές ποσότητες (Du Jardin, 2015). Η χρήση των βιοδιεγερτών δεν έχει σκοπό την εξ’ολοκλήρου θρέψη ή την άμεση θεραπεία αλλά έχει βοηθητικό ρόλο ιδιαίτερα όταν επικρατούν αντίξοες συνθήκες για το φυτό (Bulgari et al, 2019).

Η κύρια κατηγοριοποίηση των βιοδιεγερτών σχετίζεται με την ύπαρξη ή όχι μικροοργανισμών όπως μύκητες και βακτήρια εντός του σκευάσματος και χωρίζονται σε μικροβιακούς και μη μικροβιακούς. (Sanchez-Quintero et al, 2023). Με τη σειρά τους οι μικροβιακοί βιοδιεγέρτες χωρίζονται στους PGPR (Plant growth-promoting rhizobacteria) και AMF (Arbuscular mycorrhizal fungi) η επίδραση των οποίων εστιάζει στην ενδυνάμωση της ρίζας. Οι μη μικροβιακοί βιοδιεγέρτες χωρίζονται στους HSs (Humic

substances) που στοχεύουν στην αύξηση απορρόφησης στοιχείων, τους SEWs (Seaweed extracts) που προωθούν την μεταφορά των μικροθρεπτικών και τους PHs (Protein hydrolysates) που σχετίζονται με την προστασία του φυτού σε συνθήκες αβιοτικής καταπόνησης (Mandal et al, 2023).

1.6 Αγγούρι και η καλλιέργεια του

Το φυτικό είδος *Cucumis sativus* με τη κοινή ονομασία αγγουριά ανήκει στην οικογένεια των Κολοκυνθοειδών (Cucurbitaceae) η οποία αριθμεί περισσότερα από 900 διαφορετικά είδη (Paris et al, 2017). Γεωγραφικά η πιθανή προέλευση του αγγουριού ανήκει στην νότια Ασία και συγκεκριμένα στην Ινδία ενώ η καλλιέργεια του χρονολογικά τοποθετείται περίπου πριν 3000 χρόνια (Mariod et al, 2017). Στις παρυφές των Ιμαλαίων έχει εντοπιστεί το *Cucumis hard-wickii* το οποίο αποτελεί ένα αυτοφυές προγονικό είδος της σημερινής αγγουριάς (Ολύμπιος, 2001).

Βοτανικά η αγγουριά χαρακτηρίζεται ως ετήσια, μόνοικη, δικλινής, έρπουσας ανάπτυξης πλά με τις εκφυόμενες έλικες να προσφέρουν την δυνατότητα αναρρίχησης. Το ριζικό του σύστημα καταλήγει θυσσανώδες, τα φύλλα του είναι ευμεγέθη, απλά, εναλλασσόμενα, καλυπτόμενα από τρίχες ενώ τα άνθη του είναι κίτρινου χρωματισμού και φύονται στις μασχάλες των φύλλων (Χα και Πετρόπουλος, 2014). Οι καρποί της αγγουριάς είναι πράσινου χρώματος και συγκομίζονται σε ανώριμο στάδιο προοριζόμενοι για νωπή κατανάλωση ή σε μορφή επεξεργασμένης πίκλας (Sharma et al, 2020). Εκτός από τους διατροφικούς του σκοπούς, εκχυλίσματα αγγουριού χρησιμοποιούνται σε πολλά προϊόντα περιποίησης αλλά και στη φαρμακευτική βιομηχανία λόγω των περιεχόμενων αντιοξειδωτικών ουσιών (Sotiroudis et al, 2010).

Το αγγούρι αποτελεί μια από τις δημοφιλέστερες επιλογές λαχανικού για θερμοκηπιακή καλλιέργεια καθώς οι συνθήκες συνεισφέρουν στην επίτευξη ενισχυμένης παραγωγής και ποιότητας (Ramírez-Pérez et al, 2018). Σε συστήματα εκτός εδάφους το αγγούρι καλλιεργείται κατά κόρον υδροπονικά. Με την ανάπτυξη του αποζευγμένου συστήματος όμως καθίσταται εφικτή η προοπτική της ενυδρειοπονικής καλλιέργειας

(Blanchard, 2019). Όσον αφορά τις βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης του αγγουριού σε εκτός εδάφους καλλιέργεια, μετά τη μεταφύτευση η θερμοκρασία πρέπει να κυμαίνεται από 20-23°C κατά τη διάρκεια της ημέρας και 18-20 °C τη νύχτα αντίστοιχα (Σάββας, 2012). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος που παρέχεται στο πρώιμο στάδιο ανάπτυξης πρέπει ιδανικά να διατηρείται στα 2.5 dS m⁻¹ και να αυξάνεται στα 2.7 dS m⁻¹ σε μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης (Savvas et al, 2013). Μια συμβιβαστική τιμή για την ενυδρειοπονική καλλιέργεια αγγουριού είναι περίπου 7 ώστε να προάγεται τόσο η ανάπτυξη του αγγουριού όσο και η σωστή λειτουργία της νιτροποίησης και διαβίωσης των ψαριών. Στο αποζευγμένο σύστημα βέβαια εξαλείφεται το πρόβλημα του συμβιβασμού και το Ph διατηρείται σε τιμές 5,5-6,5 (Blanchard et al, 2020).

1.7 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας πειραματικής μεταπτυχιακής διατριβής είναι η σύγκριση των συστημάτων της υδροπονίας και της αποζευγμένης ενυδρειοπονίας για τη καλλιέργεια αγγουριού ως προς αναπτυξιακά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά με και χωρίς τη χρήση βιοδιεγερτών και βιολιπάσματος. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις παραμέτρους που σχετίζονται με την φωτοσυνθετική ικανότητα του αγγουριού και την κατάσταση του φωτοσυστήματος με πρόθεση τον εμπλουτισμό της βιβλιογραφίας που παρουσιάζει ελλείψεις στο συγκεκριμένο τομέα.

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1 Εγκαταστάσεις

Η πειραματική διαδικασία της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής έλαβε χώρα στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που βρίσκεται στο Βελεστίνο (Συντεταγμένες: 39° 22', 22° 44', 85 m). Πιο συγκεκριμένα το θερμοκήπιο που φιλοξένησε το συγκεκριμένο πείραμα είναι μια πιλοτική ενυδρειοπονική μονάδα που αποτελείται από το χώρο υδροπονικής καλλιέργειας (360m²) και το θάλαμο που λειτουργεί η υπομονάδα RAS (80m²). Στον υδροπονικό χώρο ήταν εγκατεστημένα 18 κανάλια μήκους 8m το καθένα. Η άρδευση και η διαχείριση των κλιματικών συνθήκων εντός του θερμοκηπίου ρυθμίζονταν ηλεκτρονικά με αυτοματοποιημένο σύστημα PLC και με τη βοήθεια αισθητήρων. Ο αερισμός πραγματοποιούνταν από ανοίγματα οροφής έχοντας θέσει όριο της θερμοκρασίας: 21°C και σχετικής υγρασίας: 85% ενώ η ψύξη μέσω του συστήματος της υγρής παρειάς όταν η θερμοκρασία υπερέβαινε τους 26 °C. Το σύστημα RAS κατά σειρά τοποθέτησης και ροής του νερού αποτελούνταν αρχικά από 3 δεξαμενές ιχθυοκαλλιέργειας χωρητικότητας 1300L όπου γινόταν η εκτροφή των ψαριών. Το νερό από τις 3 δεξαμενές ενωνόταν με αγωγούς και οδηγούνταν σε μια δεξαμενή buffer 650L. Στη συνέχεια περνούσε από μηχανικό φίλτρο για τη συγκράτηση των αδιάλυτων στερεών υπολειμμάτων των ψαριών και της τροφής που δεν καταναλώθηκε. Έπειτα υπήρχε μια δεξαμενή βιοφίλτρου όπου μέσα δραστηριοποιούνται τα ωφέλιμα νιτροποιητικά βακτήρια και στο τέλος μια δεξαμενή 2500L όπου κατέληγε και συλλεγόταν το εμπλουτισμένο από τα ψάρια νερό που μαζί με την προσθήκη λιπασμάτων συνέθετε το θρεπτικό διάλυμα για την άρδευση μέρους της καλλιέργειας. Στις εικόνες 1 και 2 απεικονίζονται ο υδροπονικός χώρος καλλιέργειας και η διάταξη των στοιχείων στο θάλαμο του RAS αντίστοιχα.



Εικόνα 1: Υδροπονικός χώρος καλλιέργειας του πειράματος.



Εικόνα 2: Σύστημα RAS του πειράματος.

2.2 Φυτικό υλικό και καλλιεργητικές φροντίδες

Το φυτικό είδος που επιλέχθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα ήταν το αγγούρι (*Cucumis sativa* var. Columbia) το οποίο παραλήφθηκε σε μορφή σποροφύτων στο στάδιο περίπου των τεσσάρων πραγματικών φύλλων σε κύβους πετrobάμβακα. Σε κάθε κανάλι από τα συνολικά 18 τοποθετήθηκαν 8 σάκοι περιεχόμενου υποστρώματος περλίτη στους οποίους μεταφυτεύτηκαν συνολικά 256 φυτά (2 φυτά ανά σάκο). Για τις ανάγκες της άρδευσης σε κάθε σάκο τοποθετήθηκαν 5 σταλάκτες με παροχή 2L/h. Οι καλλιεργητικές περιποιήσεις του αγγουριού σε όλη τη διάρκεια του πειράματος περιλάμβαναν το δέσιμο του κεντρικού βλαστού με κλιπ σε πλαστικό σπάγκο που είχε στερεωθεί σε οριζόντιο σύρμα. Όταν η κορυφή του αγγουριού ξεπερνούσε το οριζόντιο σύρμα τότε με λύγισμα του κεντρικού βλαστού μειωνόταν το ύψος του φυτού για να μπορεί να δεθεί εκ νέου το αναπτυσσόμενο τμήμα. Λόγω της επιλογής του μονοστέλεχους συστήματος καλλιέργειας σε εβδομαδιαία βάση γινόταν η αφαίρεση των πλάγιων βλαστών. Όταν κρινόταν αναγκαίο πραγματοποιούνταν αποφύλλωση τόσο για τη αφαίρεση ασθενών και γερασμένων φύλλων αλλά και για τη δημιουργία αεριζόμενου μικροκλίματος για τα φυτά. Επίσης υπήρχε συνεχής παρατήρηση για συμπτώματα από παθογόνους μικροοργανισμούς και εντομολογικές προσβολές. Τέλος προληπτικά στην αρχή του πειράματος τοποθετήθηκαν εντός του θερμοκηπίου ωφέλιμα έντομα είδους *Aphidius colemani*.

2.3 Είδος ψαριών και βιοδιεγέρτες/βιολίπασμα

Το είδος των ψαριών που επιλέχθηκε για την εκτροφή στο ενυδρειοπονικό σύστημα ήταν η κόκκινη τιλάπια (*Oreochromis spp.*) με τον πληθυσμό τους να προϋπάρχει από προηγούμενα πειράματα όπως αυτά των Mourantian et al (2023) και Aslanidou et al, (2023). Τα ψάρια ταΐζονταν σε καθημερινή βάση με την 1^η δεξαμενή να λαμβάνει κατά μέσο όρο 298.9g τροφής, η 2^η δεξαμενή 359.3g και η 3^η δεξαμενή 370g αντίστοιχα χωρίς αυτό να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το συνολικό αρχικό βάρος των ψαριών ήταν 131,4 kg και το τελικό τους βάρος ήταν 169 kg.



Εικόνα 3: Δεξαμενή εκτροφής κόκκινης Τιλάπια.

Τέλος όσον αφορά τους βιοδιεγέρτες και το βιολίπασμα που χρησιμοποιήθηκαν, έγιναν συνολικά 4 ψεκασμοί οι οποίοι είχαν χρονική διαφορά μεταξύ τους περίπου 1 μήνα. Η δοσολογία του πρώτου ψεκασμού (D9) ήταν 3ml/2L για όλα τα σκευάσματα. Στους επόμενους 3 ψεκασμούς (D37, D68, D99) οι δόσεις για τους βιοδιεγέρτες 1 και 2 ήταν 7.5ml/5L ενώ για το βιολίπασμα 3 ήταν 53.3ml/5L. Το βιολίπασμα 3 προέρχεται από την επεξεργασία μικροφυκών και παρασκευάστηκε στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας σε παρακείμενη μονάδα.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι περιεκτικότητες των συστατικών των βιοδιεγερτών, και του βιολιπάσματος που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα:

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των βιοδιεγερτών 1 και 2 και του βιολιπάσματος 3.

Συστατικά	Bio 1	Bio 2	Bio 3
Ελεύθερα αμινοξέα	12.5% (p/v)	12% (p/p) - 14.4% (p/v)	0.604% (p/v)
Ολικό άζωτο	3.0% (p/v)	2.5% (p/p) - 3.0% (p/v)	0.233 % (p/v)
pH	5.8	5.5	3.8
Οξείδιο του καλίου	1.2% (p/v)	1% (p/p) - 1.2% (p/v)	0.328 % (p/v)
Ολικά αμινοξέα	14.5% (p/v)	14.0% (p/p) - 16.8% (p/v)	0.61 % (p/v)
Αζωτοβακτήρια	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΌΧΙ

2.4 Πειραματικός σχεδιασμός

Η φύτευση της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκε στις 15 Μαρτίου 2023 και σηματοδότησε την έναρξη του πειράματος το οποίο έλαβε τέλος στις 29 Ιουνίου 2023 με την ολοκλήρωση των απαιτούμενων μετρήσεων και την εκρίζωση του εναπομείναντα φυτικού υλικού και του περαιτέρω καθαρισμού. Η καλλιέργεια του αγγουριού διαχωρίστηκε συνολικά σε 8 μεταχειρίσεις. Το θερμοκήπιο χωρίστηκε σε 3 πανομοιότυπα block σε καθένα από τα οποία συνυπήρχαν όλες οι μεταχειρίσεις με διαφορετική σειρά τοποθέτησης επί των 6 καναλιών. Η διαφοροποίηση των μεταχειρίσεων έγκειται στη διαφορά του χορηγούμενου θρεπτικού διαλύματος και στη χρήση ή μη δυο διαφορετικών βιοδιεγερτών και ενός βιολιπάσματος. Για την εξυπηρέτηση της ανάγνωσης χρησιμοποιήθηκαν οι συντομογραφίες HP, DCAP, Bio και DAT που αντιστοιχούν στις έννοιες hydroponic, decoupled aquaponic, biostimulant/Biofertilizer και Day After Transplant αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά οι 8 διαφορετικές μεταχειρίσεις είναι οι εξής:

- **HP Control:** Χορήγηση υδροπονικής συνταγής θρέψης κατάλληλη για ανάπτυξη αγγουριού.
- **DCAP Control:** Χορήγηση νερού από την ιχθυοκαλλιέργεια με προσθήκη των θρεπτικών στοιχείων που λείπουν ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι συγκεντρώσεων της υδροπονικής συνταγής θρέψης.

- **HP Bio 1,2,3:** Χορήγηση της υδροπονικής συνταγής θρέψης του HP Control συνδυαζόμενο με τον φυλλικό ψεκασμό του βιοδιεγέρτη 1, βιοδιεγέρτη 2 και βιολιπάσματος 3 αντίστοιχα.
- **DCAP Bio 1,2,3:** Χορήγηση της ενυδρειοπονικής συνταγής θρέψης του DCAP Control μαζί με τον ψεκασμό του βιοδιεγέρτη 1, βιοδιεγέρτη 2 και βιολιπάσματος 3 αντίστοιχα.

Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα απεικονίζεται η διάταξη των μεταχειρίσεων που επιλέξαμε για τα 3 block που χωρίστηκε η έκταση του θερμοκηπίου.

BLOCK 1	HP	DCAP	HP	DCAP	HP	DCAP
	Control	Control	Biostimulant 1	Biostimulant 1	Biostimulant 2	Biostimulant 2
			Biostimulant 2	Biostimulant 2	Biostimulant 3	Biostimulant 3
BLOCK 2	HP	DCAP	HP	DCAP	HP	DCAP
	Biostimulant 1	Biostimulant 1	Control	Control	Biostimulant 2	Biostimulant 2
	Biostimulant 2	Biostimulant 2			Biostimulant 3	Biostimulant 3
BLOCK 3	HP	DCAP	HP	DCAP	HP	DCAP
	Control	Control	Biostimulant 1	Biostimulant 1	Biostimulant 2	Biostimulant 2
					Biostimulant 3	Biostimulant 3

Σχεδιάγραμμα 1: Διάταξη των μεταχειρίσεων στο χώρο του θερμοκηπίου.

2.5 Μετρήσεις

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος αφορούσαν αναπτυξιακές και φυσιολογικές παραμέτρους.

2.5.1 Χλωροφύλλη SPAD

Για τη μέτρηση της χλωροφύλλης χρησιμοποιήθηκε το όργανο SPAD-502Plus, KONICA MINOLTA OPTICS, INC με αισθητήρα διαμέτρου 2X3mm. Όπως και στις άλλες μετρήσεις τα φύλλα που επιλέχθηκαν ήταν υγιή και πλήρως ανεπτυγμένα ενώ η μέτρηση δεν επέφερε κάποια φθορά στον ιστό. Επιλέχθηκε ένα φύλλο από 15 τυχαία φυτά από κάθε μεταχείριση και καταγράφηκε ο μέσος όρος από συνολικά 3 μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία του. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 5 σετ μετρήσεων (D20, D42, D62, D85, D105) με τη πρώτη να λαμβάνει χώρα την 20^η ημέρα όπου κρίθηκε ότι τα φυτά είχαν προσαρμοστεί στις συνθήκες του θερμοκηπίου μετά τη μεταφύτευση.



Εικόνα 4: Όργανο μέτρησης χλωροφύλλης.

2.5.2 Φωτοσυνθετικές χρωστικές

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας των φωτοσυνθετικών χρωστικών ήταν σύμφωνα με τους Lichtenthaler & Wellburn (1983). Αρχικά αποκόπηκαν δυο κυκλικά κομμάτια από 1 φύλλο από 10 φυτά ανά μεταχείριση με τη χρήση φελλοτρυπητήρα διαμέτρου 0.64cm². Έπειτα αυτά τα κομμάτια ομοιογενοποιήθηκαν με ακετόνη 80% v/v και φυγοκεντρίθηκαν στις 4000 στροφές για 10

λεπτά με τη χρήση φυγόκεντρου MLW T54 (VEB MLW, Germany). Στη συνέχεια με τη βοήθεια του φασματοφωτόμετρου UV-1900 dual-beam (Shimadzu Corporation) μετρήθηκε η απορρόφηση των φωτοσυνθετικών χρωστικών σε 4 διαφορετικά μήκη κύματος (720, 663, 646 και 470nm) και με τη χρήση κατάλληλων εξισώσεων υπολογίστηκε η συγκέντρωση (mg/cm²) των χλωροφυλλών a και b, των καροτενοειδών καθώς και ο λόγος τους. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε 3 φορές μέσα στη διάρκεια του πειράματος (DAT23, DAT66 και DAT107).

2.5.3 Πάχος φύλλου

Για τη μέτρηση του πάχους φύλλου πραγματοποιήθηκαν 3 μετρήσεις (D20, D64, D105) σε ένα φύλλο από 15 φυτά ανά μεταχείριση με τη χρήση παχύμετρου 0.01mm (Mitutoyo, Japan). Η τοποθέτηση του παχυμέτρου γινόταν σε σημεία πέριξ των κεντρικών νεύρων του φύλλου.

2.5.4 Δείκτης ξηροφιλίας (LSM)

Ο δείκτης ξηροφιλίας ή αλλιώς ειδική μάζα φύλλου (LSM) ορίζεται ως ο λόγος του ξηρού βάρους (DW) ανά μονάδα επιφάνειας (A) του φύλλου: **LSM=DW/A (mg/dm²)**. Στο δικό μας πείραμα με τη χρήση φελλοτρυπητήρα 0.6cm αποκόπηκαν δυο κυκλικά κομμάτια φύλλου από 10 φυτά της κάθε μεταχείρισης. Στη συνέχεια τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε φούρνο στους 70οC. Μετά την ξήρανση μετρήθηκε το βάρος τους σε ζυγαριά ακριβείας. Αυτό πραγματοποιήθηκε συνολικά 3 φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος με διαφορά περίπου 40 ημερών (DAT 20, DAT 64, DAT 105).

2.5.5 Δείκτης Physiological Reflectance Index (PRI)

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα για την μέτρηση του PRI ήταν το PLANT PEN PRI 210 (PSI, Photon Systems Instruments, Czech Republic) ενώ ο υπολογισμός της τελικής τιμής βασίζεται στο τύπο των Gamon et al. (1992): $PRI = (R531 - R570) / (R531 + R570)$. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κατά τις πρωινές ώρες με την επαφή του αισθητήρα σε ένα υγιές φύλλο από 15 φυτά ανά μεταχείριση μετά το απαραίτητο calibrate. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 5 σετ μετρήσεων σε διάστημα περίπου 20 ημερών (DAT 20, DAT 42, DAT 62, DAT 85, DAT 105).

2.5.6 Φθορισμός χλωροφύλλης a (OJIP)

Ο φθορισμός της χλωροφύλλης a in vivo μετρήθηκε με το φθορισμόμετρο FluorPen FP 110 (PSI, Photon Systems Instruments, Czech Republic) μαζί με ειδικού τύπου μανταλάκια. Σε προσκοτεινισμένα φύλλα για (30 λεπτά) οι μετρήσεις γίνονταν κατά τις πρωινές ώρες σε ένα ώριμο φύλλο από 15 φυτά ανά μεταχείριση. Τα δεδομένα εξήχθηκαν στον υπολογιστή με τη βοήθεια του FluorPen 1.1 software. Οι παράμετροι του OJIP που αξιοποιήθηκαν καθώς και η επεξήγησή τους (Τσουμαλάκου, 2023) είναι οι εξής:

Fv/Fm: Μέγιστη φωτοχημική απόδοση ανά φωτόνιο του PSII

Sm: Ομαλοποιημένη επιφάνεια ως προς το μέγιστο μεταβαλλόμενο φθορισμό της OJIP καμπύλης μεταξύ των σημείων O και P

1/Vi: Σχετικό απόθεμα των τελικών υποδοχέων e^- του PSI

1-Vi: Απόθεμα δραστικών κέντρων του PSI

Pi_Abs: Δείκτης ενεργειακής απόδοσης των απορροφώμενων φωτονίων από την κεραία του PSII.

ABS/RC: Απορροφώμενη ενέργεια ανά κέντρο αντίδρασης του PSII

TRo/RC: Συλληφθείσα ενέργεια ανά λειτουργικό κέντρο αντίδρασης στο PSII

ETo/RC: Παγιδευμένη ενέργεια ανά κέντρο αντίδρασης

DIo/RC: Ενέργεια θερμικής απόσβεσης ανά λειτουργικό κέντρο αντίδρασης στο PSII



Εικόνα 5: Διαδικασία μέτρησης του φθορισμού της χλωροφύλλης a

2.5.7 Καταστροφική συγκομιδή

Κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκαν συνολικά 3 καταστροφικές συγκομιδές με διαφορά περίπου 30 ημερών (DAT42, DAT77, DAT108) για 4 φυτά ανά μεταχείριση. Μετά την κοπή του κεντρικού στελέχους των φυτών έγινε ο διαχωρισμός των υπέργειων οργάνων (φύλλα, βλαστοί και ανώριμοι καρποί) και τοποθετήθηκαν ξεχωριστά σε χάρτινα σακουλάκια. Τοποθετήθηκαν στους 70oC σε φούρνο με σκοπό την ξήρανση τους και στη συνέχεια μετρήθηκαν τα ξηρά βάρη σε ζυγαριά ακριβείας. Στις 30/5/2023 πραγματοποιήθηκε η συγκομιδή 6 τυχαίων πλήρως ανεπτυγμένων, άρα εμπορεύσιμων καρπών από κάθε μεταχείριση και ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για τη μέτρηση του ξηρού βάρους.

2.5.8 Ποιότητα καρπού

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού στο αγγούρι χωρίζονται στην εμπορική, θρεπτική και γευστική κατηγορία. Η εμπορική ποιότητα περιλαμβάνει στοιχεία όπως το μέγεθος, το σχήμα, η σκληρότητα, η ύπαρξη τριχιδίων ή κεριού και το χρώμα του καρπού.

Η θρεπτική αξία αφορά την περιεκτικότητα του καρπού σε όλα τα θρεπτικά στοιχεία, τις βιταμίνες και τα ολικά στερεά σάκχαρα ενώ η γευστική πτυχή περιέχει όλες της πτητικές και μη ενώσεις που επενδύουν τόσο στη γεύση όσο και στην οσμή του αγγουριού (Zhang et al, 2021). Στην δική μας περίπτωση στις 24/5/2023 (DAT71) και 26/6/2023 (DAT104) πραγματοποιήθηκε συγκομιδή 5 τυχαίων καρπών από κάθε μεταχείριση ώστε να μελετηθούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Οι ποιοτικοί παράμετροι που επιλέχθηκαν ήταν το χρώμα, η σκληρότητα, τα διαλυτά στερεά και το pH. Για τη μέτρηση του χρώματος χρησιμοποιήθηκε το χρωματόμετρο CR-400, KONICA MINOLTA OPTICS, INC που μετρείς επαφές σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας του καρπού εξαγόταν η τιμή των χρωματικών παραμέτρων L,a,b σύμφωνα με τη CIE 1976 (L^* a^* b^*) φόρμουλα διαφοροποίησης χρώματος (Ohno, 2000) Η σκληρότητα του καρπού υπολογίστηκε μέσα από τη καταστροφική μέτρηση του εισδυσιόμετρου ακίδας 6mm (Turoini, Italy). Μετά από τις δυο αυτές μετρήσεις τα αγγούρια πολτοποιήθηκαν και στραγγίστηκαν για τη συλλογή των εσωτερικών υγρών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του pH και των ολικών διαλυτών στερεών. Για τη μέτρηση του pH χρησιμοποιήθηκε το φορητό αδιάβροχο πεχάμετρο HI 9024, Hanna Instruments ενώ για τα ολικά διαλυτά στερεά (brix %) το διαθλασιόμετρο PAL-1, Atago.

2.5.9 Στατιστική ανάλυση

Όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τις προαναφερθέντες μετρήσεις εξετάστηκαν για στατιστικές διαφορές με τη σύγκριση όλων των μεταχειρίσεων μεταξύ τους. Για τη συγκεκριμένη ανάλυση είχαμε στη διάθεση μας το στατιστικό λογισμικό JASP 0.17.3 (JASP Team, 2023) με το οποίο πραγματοποιήθηκε σύγκριση two-way ANOVA ($p \leq 0.05$) σε συνδυασμό με Tukey's Post Hoc test, αφού έγινε έλεγχος ότι τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή και υπάρχει ομοιογένεια των διασπορών.

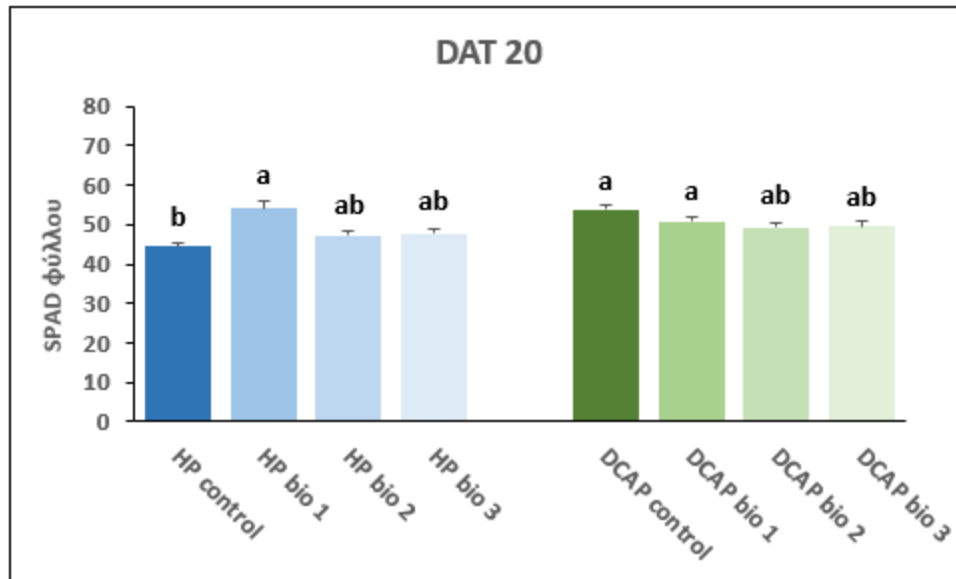
3. Αποτελέσματα

Παρακάτω γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Αυτό γίνεται με τη μορφή διαγραμμάτων και πινάκων με την κάθε

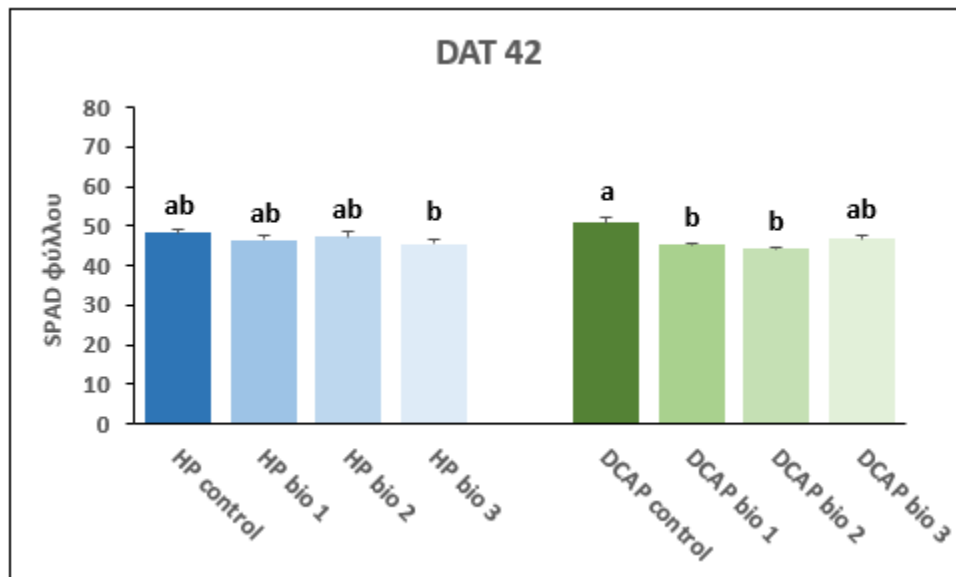
μεταχείριση να περιέχει τον μέσο όρο και το τυπικό σφάλμα από το σύνολο των μετρήσεων της κάθε παραμέτρου. Στα διαγράμματα είναι ενσωματωμένη η στατιστική ανάλυση με τη μορφή των εικονιζόμενων γραμμών. Λόγω του πλήθους των μεταχειρίσεων, κάθε διάγραμμα περιλαμβάνει μια συγκεκριμένη DAT.

3.1 Δείκτης SPAD

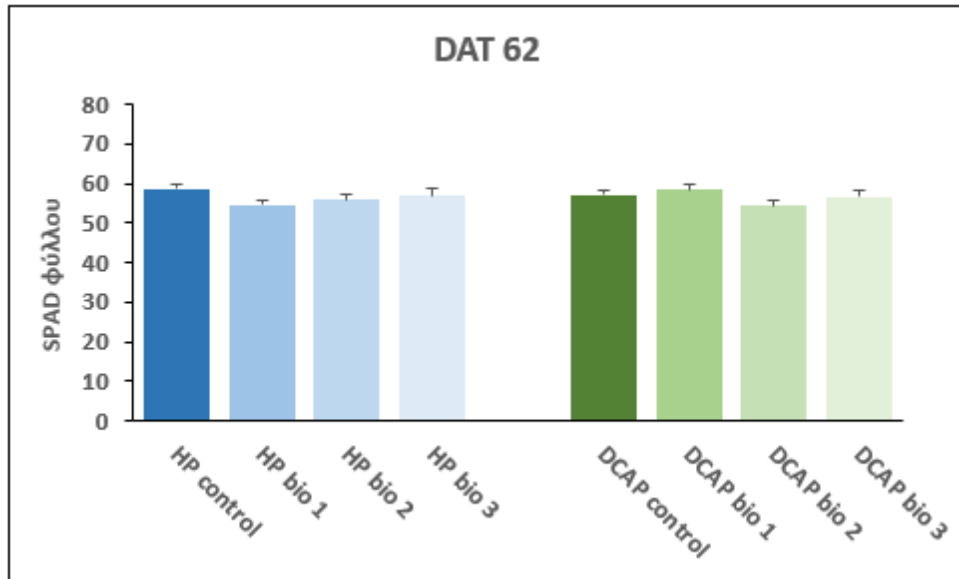
Εξετάζοντας συνολικά τα παρακάτω διαγράμματα (1,2,3,4,5) παρατηρείται ότι η χλωροφύλλη από τη μέτρηση του δείκτη SPAD δεν εμφανίζει ιδιαίτερες στατιστικές διαφορές σε όλη τη διάρκεια του πειράματος για όλες τις μεταχειρίσεις. Οι μόνες μικρές αλλά στατιστικώς σημαντικές διαφορές υπήρξαν κατά τις δυο πρώτες μετρήσεις (DAT 20 και DAT 42) όπως διακρίνεται στα διαγράμματα 1 και 2. Την ημέρα 20 υπήρξε η μόνη αλληλεπίδραση ανάμεσα στους συγκρινόμενους παράγοντες. Επίσης η μεταχείριση HP Control την ημέρα 20 είχε τη μικρότερη τιμή SPAD ενώ την ημέρα 42 οι χαμηλότερες τιμές μοιράζονταν ανάμεσα στις μεταχειρίσεις HP Bio 1, DCAP Bio 1 και DCAP Bio 2. Γενικότερα οι τιμές της χλωροφύλλης σε όλες τις μεταχειρίσεις είχαν αυξητική τάση με μεγαλύτερη τιμή χλωροφύλλης (63.9) να καταγράφεται την 105η ημέρα στη μεταχείριση DCAP Bio 2.



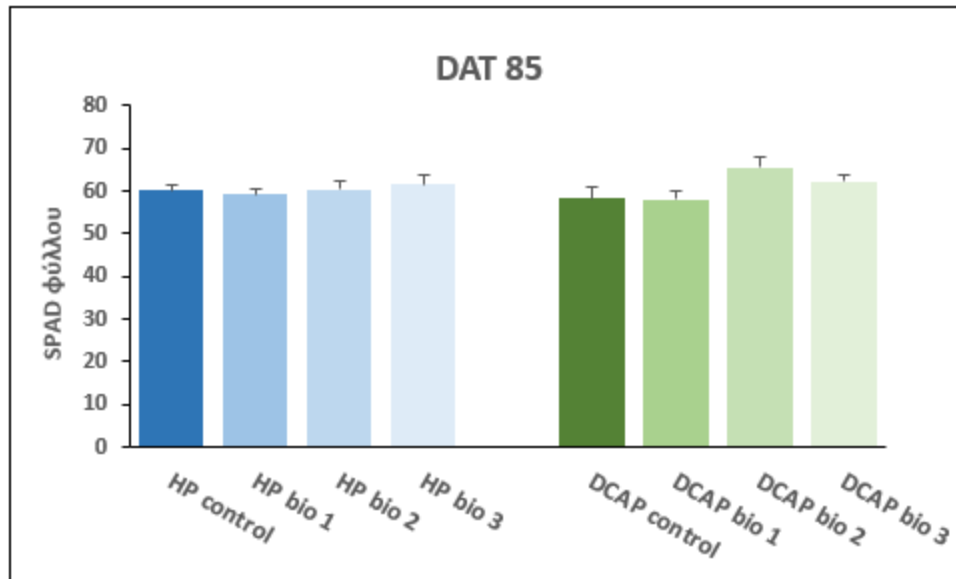
Διάγραμμα 1: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 20 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



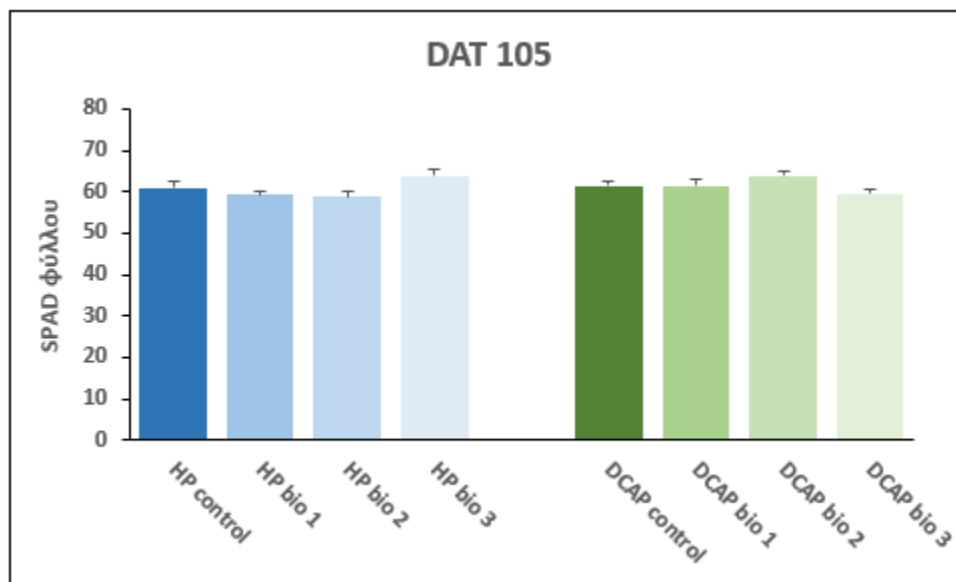
Διάγραμμα 2: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



Διάγραμμα 3: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 62 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, $n=15$). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



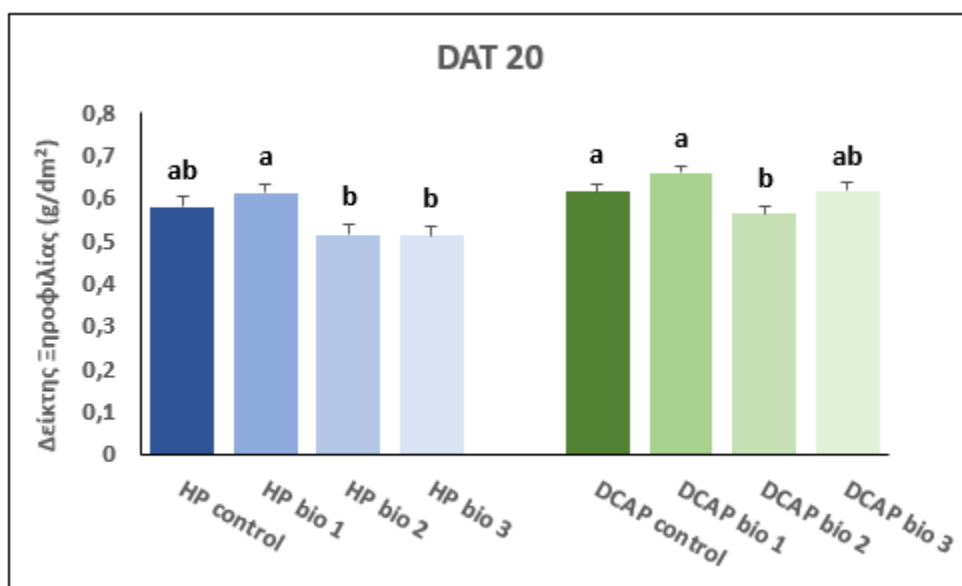
Διάγραμμα 4: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 85 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



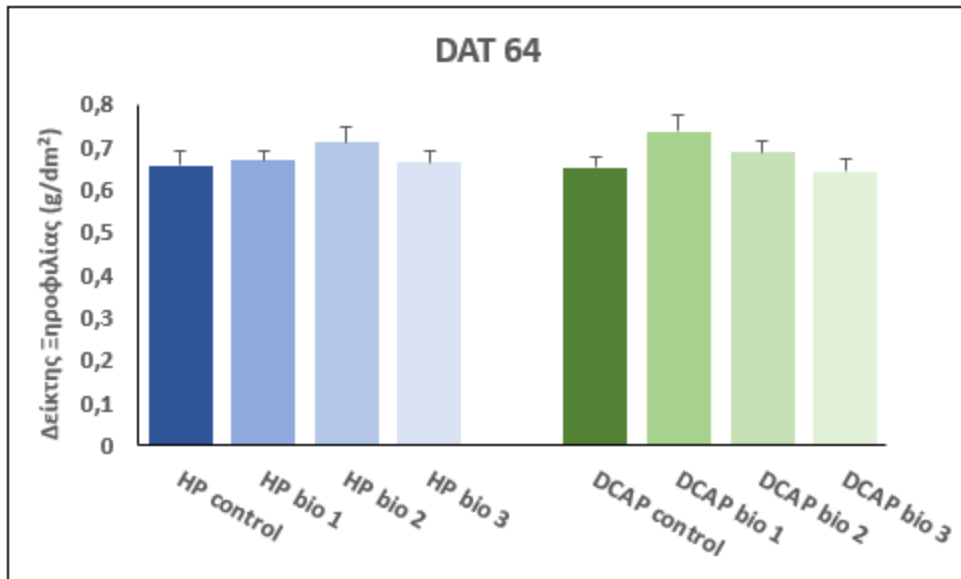
Διάγραμμα 5: Τιμές SPAD όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 105 (M.O. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.

3.2 Δείκτης Ξηροφιλίας (LSM)

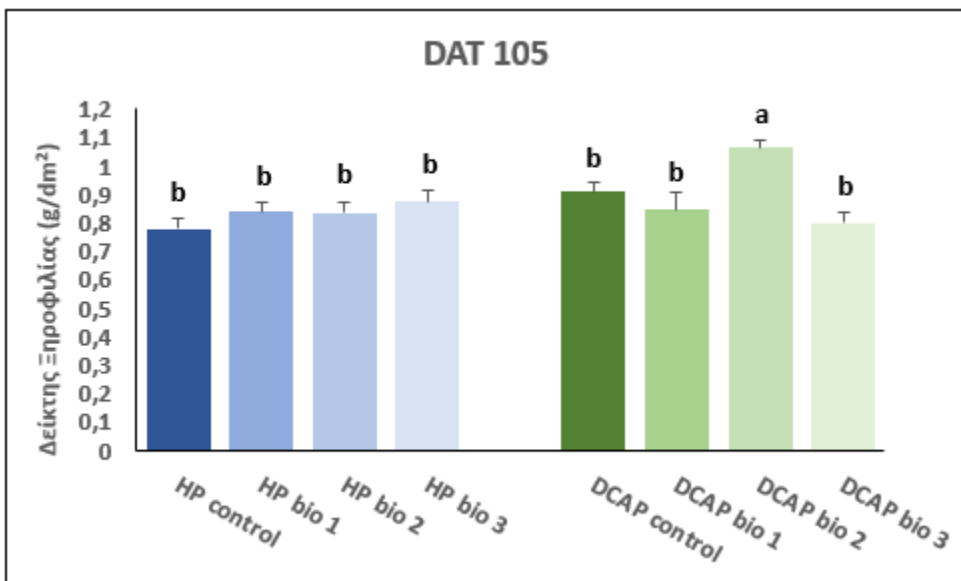
Όσον αφορά το δείκτη ξηροφιλίας αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων υπήρξε κατά τη τελευταία μέτρηση την ημέρα 105. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6 κατά τη πρώτη μέτρηση την ημέρα 20 υπήρξαν στατιστικές διαφορές με τις μικρότερες τιμές να καταγράφονται σε μεταχειρίσεις Bio και συγκεκριμένα στις HP Bio 2, HP Bio 3 και DCAP Bio 2 ενώ ψηλότερα ήταν η DCAP Bio 1. Αυτό αντιστράφηκε στις επόμενες δυο μετρήσεις και ιδιαίτερα στην 105η ημέρα όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 8 όπου η μεταχείριση DCAP Bio 2 υπερέιχε των υπολοίπων μεταχειρίσεων με τιμή που έφτασε 1.1 g/dm². Οι τιμές στο δείκτη ξηροφιλίας αυξάνονταν με τη πάροδο του χρόνου.



Διάγραμμα 6: Δείκτης ξηροφιλίας (g/dm²) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 20 (M.O. ± Sd, n=10). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



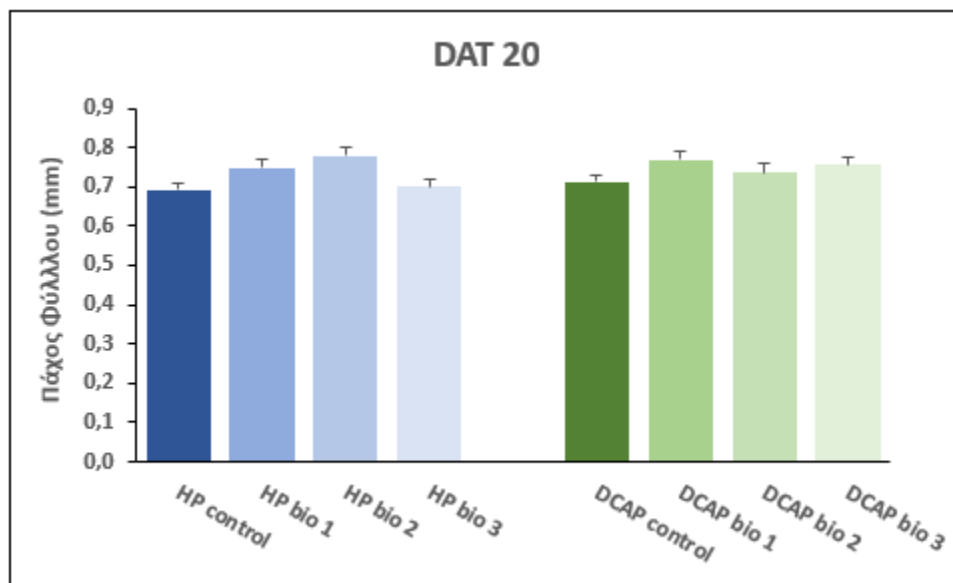
Διάγραμμα 7: Δείκτης ξηροφυλίας (g/dm²) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 64 (Μ.Ο. ± Sd, n=10). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



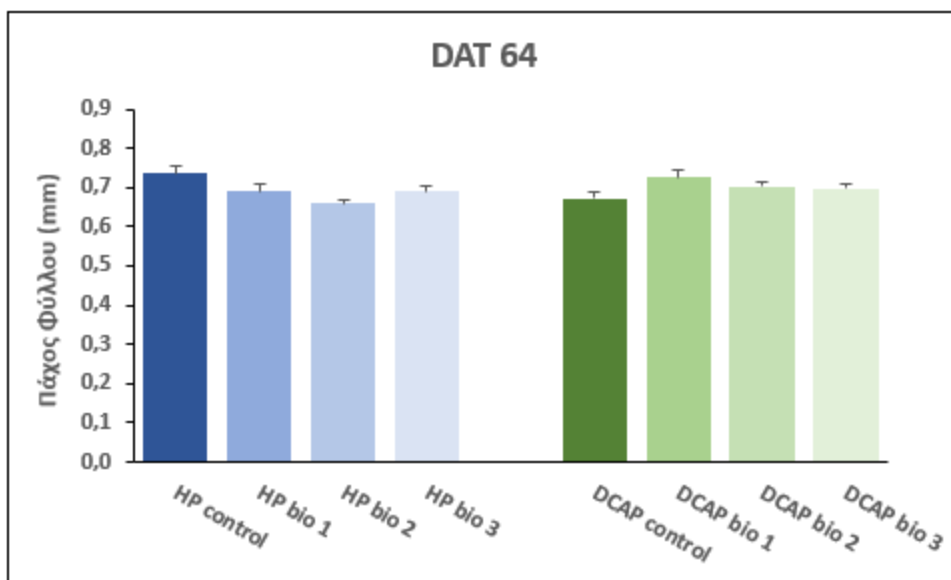
Διάγραμμα 8: Δείκτης ξηροφυλίας (g/dm²) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 105 (Μ.Ο. ± Sd, n=10). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.

3.3 Πάχος φύλλου

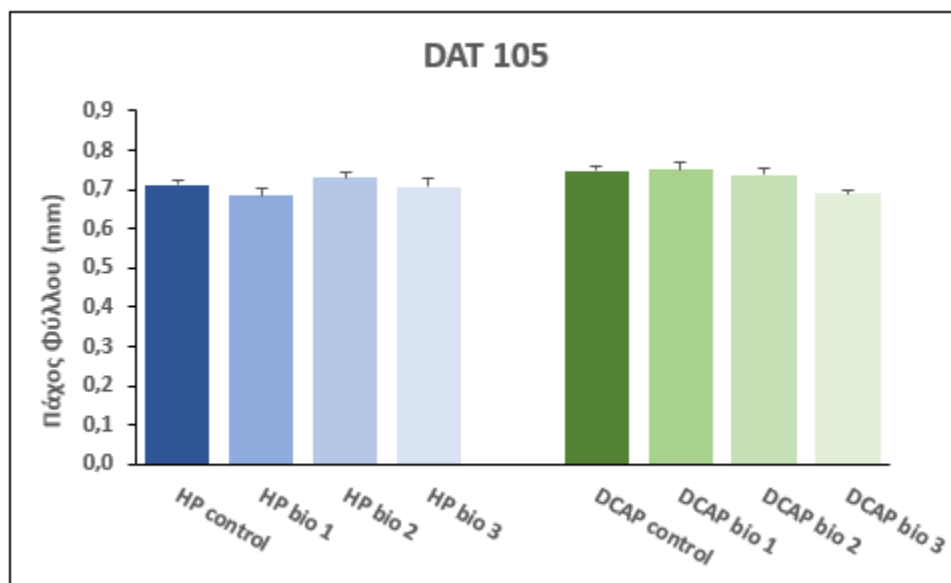
Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 9, 10 και 11 το πάχος φύλλου σε όλη τη διάρκεια του πειράματος είχε σχετικά ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ όλων των μεταχειρίσεων με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 0,65-0,75cm.



Διάγραμμα 9: Πάχος φύλλου (mm) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 20 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



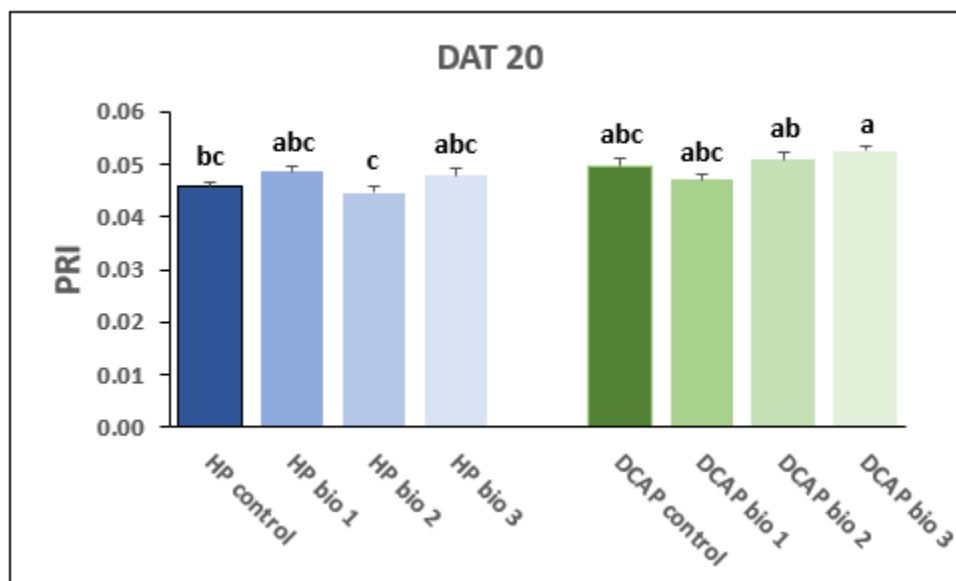
Διάγραμμα 10: Πάχος φύλλου (mm) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 64. (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



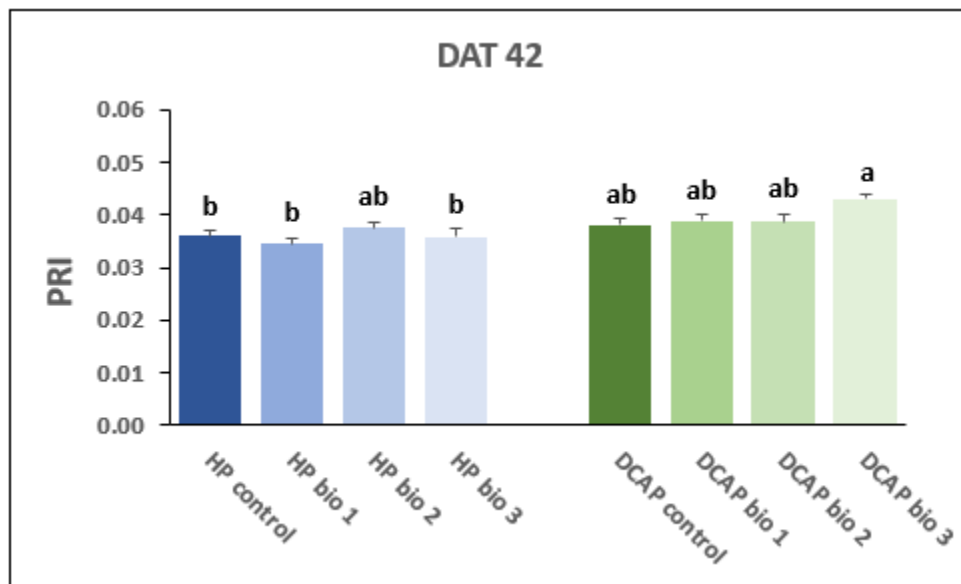
Διάγραμμα 11: Πάχος φύλλου (mm) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 105 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.

3.4 Δείκτης PRI

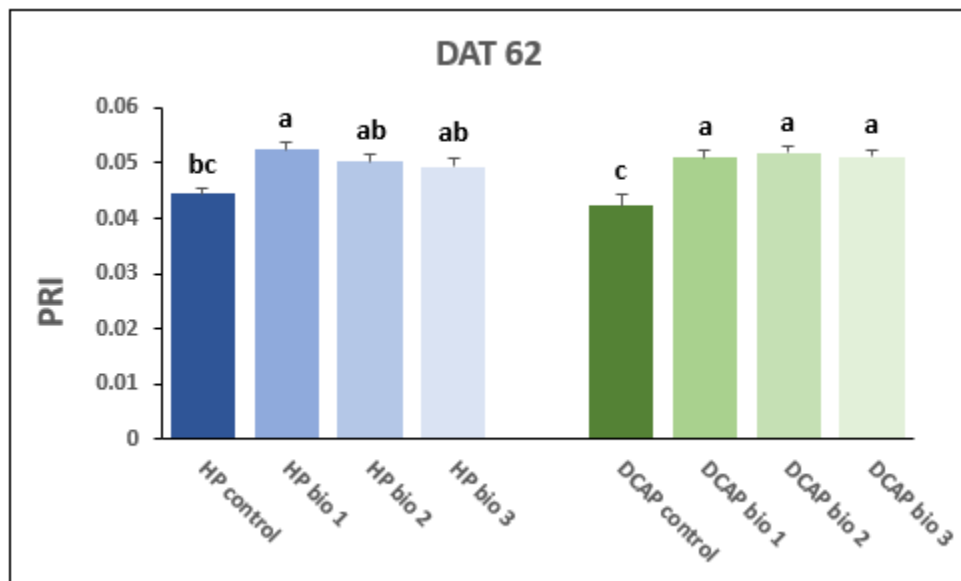
Όσον αφορά το δείκτη PRI παρατηρήθηκαν στατιστικές διαφορές σε όλες τις ημέρες των μετρήσεων με αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων να υπάρχει την ημέρα 20 και 85. Αρχικά όπως φαίνεται στα διαγράμματα 12 και 13 κατά τις δυο πρώτες μετρήσεις (DAT 20 και 42) ορισμένες μεταχειρίσεις της υδροπονίας βρίσκονταν χαμηλότερα σε τιμές PRI σε σύγκριση με τις μεταχειρίσεις της αποζευγμένης ενυδρεοπονίας με υψηλότερη τη DCAP Bio 3. Στις επόμενες δυο μετρήσεις στη μέση περίπου της διάρκειας του πειράματος (DAT 62 και DAT 85) σύμφωνα με τα διαγράμματα 14 και 15 οι μεταχειρίσεις control τόσο της υδροπονίας όσο και της αποζευγμένης ενυδρεοπονίας υστερούσαν συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις στις οποίες έγινε η εφαρμογή των βιοδιεγερτών και του βιολιπασμάτος αντίστοιχα. Στο διάγραμμα 16 κατά την τελευταία μέτρηση την ημέρα 105 οι μεταχειρίσεις δεν διέφεραν στατιστικά εκτός από τη DCAP Bio 2 που κατείχε και τη μικρότερη τιμή. Τέλος όπως φαίνεται στο διάγραμμα 14 οι μεγαλύτερες τιμές PRI με διαφορά παρατηρήθηκαν σε όλες τις μεταχειρίσεις Bio την 62^η ημέρα του πειράματος.



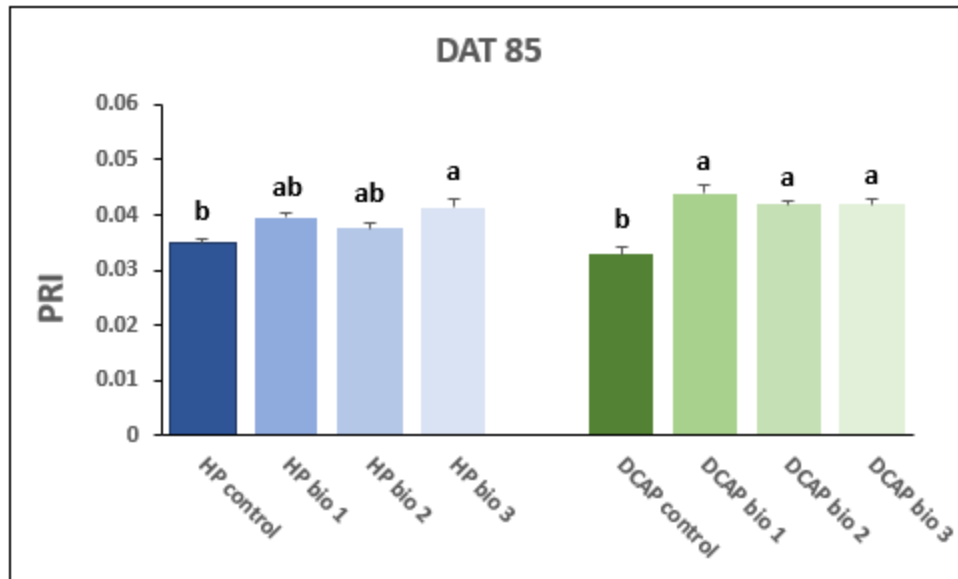
Διάγραμμα 12: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 20 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



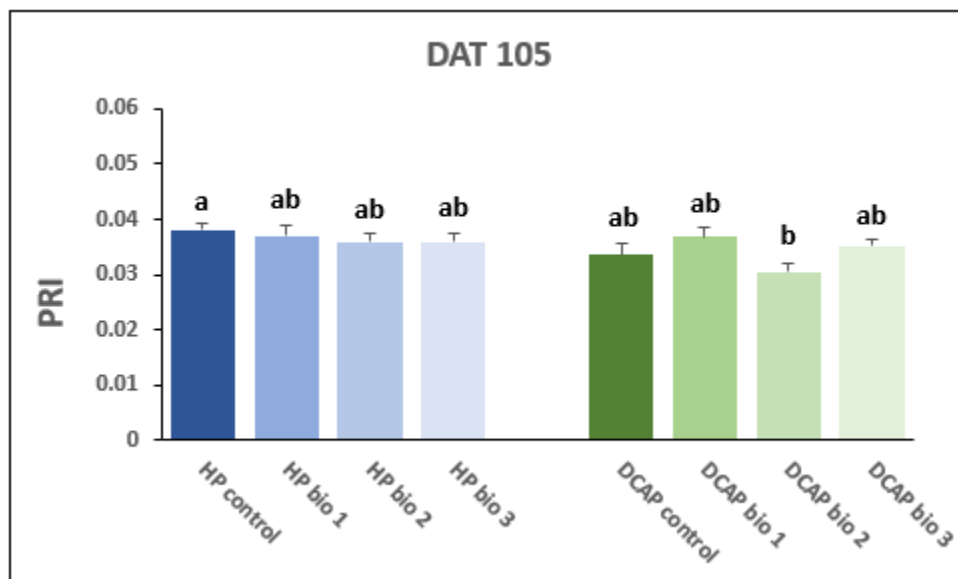
Διάγραμμα 13: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



Διάγραμμα 14: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 62 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



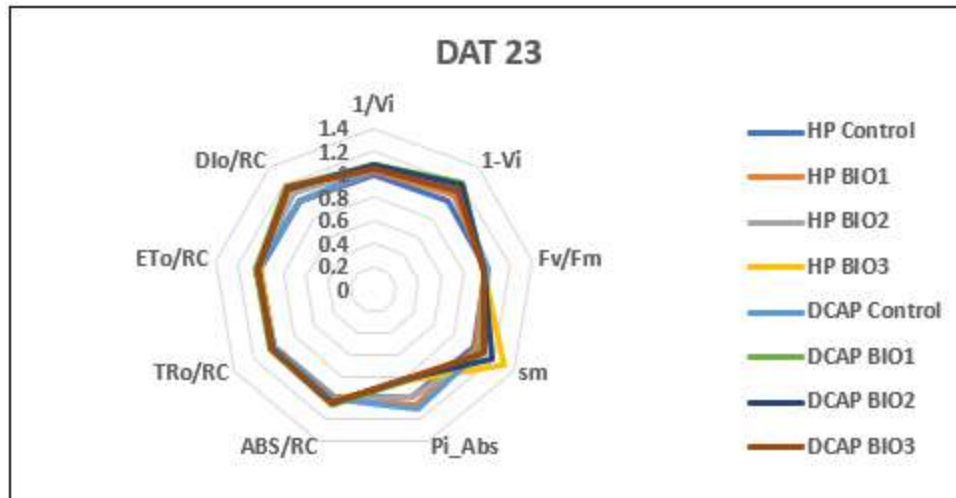
Διάγραμμα 15: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 85 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



Διάγραμμα 16: Τιμές του δείκτη PRI όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 105 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικές σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.

3.5 Φθορισμός χλωροφύλλης a (OJIP)

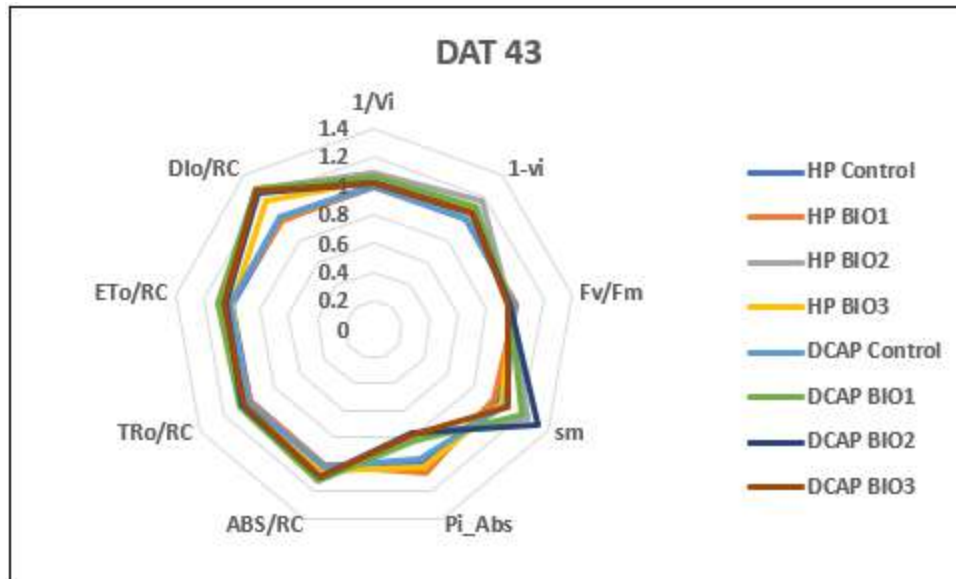
Λόγω του πλήθους των παραμέτρων και των μεταχειρίσεων η στατιστική ανάλυση τοποθετήθηκε σε πίνακες που βρίσκονται κάτω από κάθε διάγραμμα αντίστοιχα. Επίσης οι τιμές όλων των παραμέτρων στα διαγράμματα είναι ομαλοποιημένες ως προς τη μεταχείριση HP Control. Η στατιστική ανάλυση των παραμέτρων του φθορισμού εμφάνισε τις μεγαλύτερες στατιστικές διαφορές σε σύγκριση με κάθε άλλη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε. Αλληλεπίδραση ανάμεσα στους δυο παράγοντες υπήρξε όλες τις ημέρες εκτός από τη DAT 106 και για όλες τις παραμέτρους εκτός από την Sm. Η μόνη ημέρα που δεν υπήρξαν γενικότερα ιδιαίτερες διαφορές ήταν στη τελευταία μέτρηση (DAT 106) όπως διακρίνεται στο διάγραμμα 21 και στο πίνακα 6. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι σημαντικές στατιστικές διαφορές που υπήρξαν σε μια από τις κυριότερες παραμέτρους Fv/Fm με τις τιμές των μεταχειρίσεων Bio εκτός της HP Bio 1 να βρίσκονται χαμηλότερα από τις αντίστοιχες των μεταχειρίσεων Control σε όλες τις μετρήσεις με αποκορύφωμα την ημέρα 86. Συγκεκριμένα στο πίνακα 5 φαίνεται πως την ημέρα 86 για τη παράμετρο Fv/Fm η μεταχείριση DCAP Bio 3 μαζί με τη DCAP Bio 2 παρουσίασαν τη μεγαλύτερη στατιστική απόκλιση σε σχέση με τις άλλες μεταχειρίσεις. Επίσης την ίδια ημέρα η DCAP Bio 3 κατείχε με μεγάλη διαφορά τη μεγαλύτερη τιμή στη παράμετρο Dlo/RC. Με εξαίρεση τις Pi_Abs και Sm στις υπόλοιπες παραμέτρους οι μεγαλύτερες τιμές μοιράζονταν μεταξύ των μεταχειρίσεων Bio. Αξιοσημείωτες στατιστικές διαφορές για τις μεταχειρίσεις Control σε σύγκριση με τις Bio εκτός από τη HP Bio 1 υπήρξαν σύμφωνα με τον πίνακα 2 την ημέρα 23 στις παραμέτρους 1/Vi, 1-Vi και ABS/RC, σύμφωνα με το πίνακα 3 την ημέρα 43 στις ABS/RC, Dlo/RC και περισσότερο στη TRo/RC και την ημέρα 64 για την ABS/RC όπως διακρίνεται στο πίνακα 4.



Διάγραμμα 17: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης *a* όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 23 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15).

Πίνακας 2: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης *a* (OJIP) την Ημέρα 23.

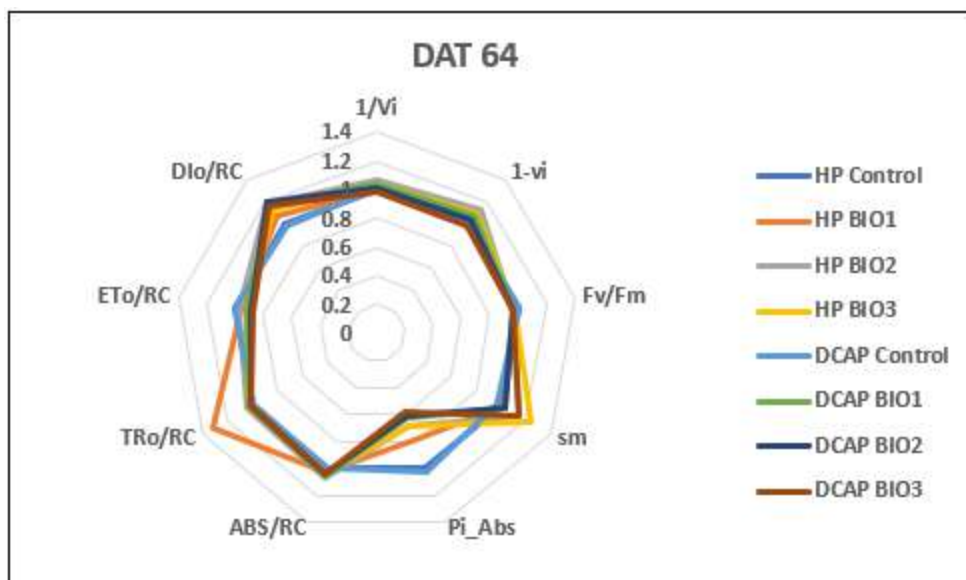
DAT 23	HP Control	HP BIO1	HP BIO2	HP BIO3	DCAP Control	DCAP BIO1	DCAP BIO2	DCAP BIO3
1/Vi	d	cd	ab	a	bc	a	ab	abc
1-vi	d	c	ab	a	bc	a	ab	abc
Fv/Fm	a	a	b	b	a	b	b	b
sm	b	b	ab	a	ab	ab	ab	ab
Pi_Abs	a	a	ab	bc	a	bc	c	c
ABS/RC	c	c	bc	abc	c	a	ab	ab
TRo/RC	a	a	a	a	a	a	a	a
ETo/RC	c	abc	abc	bc	a	ab	abc	abc
Dlo/RC	b	b	ab	a	b	a	a	a



Διάγραμμα 18: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης α όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 43 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15)

Πίνακας 3: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης α (OJIP) την Ημέρα 43.

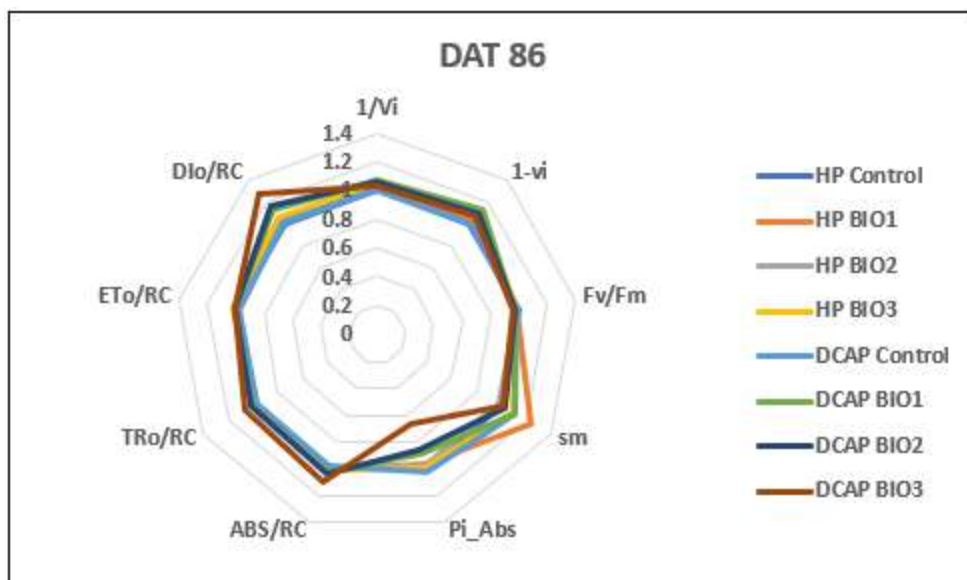
DAT 43	HP Control	HP BIO1	HP BIO2	HP BIO3	DCAP Control	DCAP BIO1	DCAP BIO2	DCAP BIO3
1/Vi	a	a	a	b	a	a	ab	a
1-vi	a	a	a	b	a	a	b	a
Fv/Fm	a	a	a	b	a	a	b	b
sm	c	bc	c	a	bc	c	ab	a
Pi_Abs	a	a	a	b	a	a	b	b
ABS/RC	c	c	a	b	c	a	b	b
TRo/RC	d	d	ab	c	d	a	c	bc
ETo/RC	a	a	ab	ab	a	a	b	ab
Dlo/RC	c	c	a	b	c	a	b	b



Διάγραμμα 19: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης *a* όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 64 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15).

Πίνακας 4: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης *a* (OJIP) την Ημέρα 64.

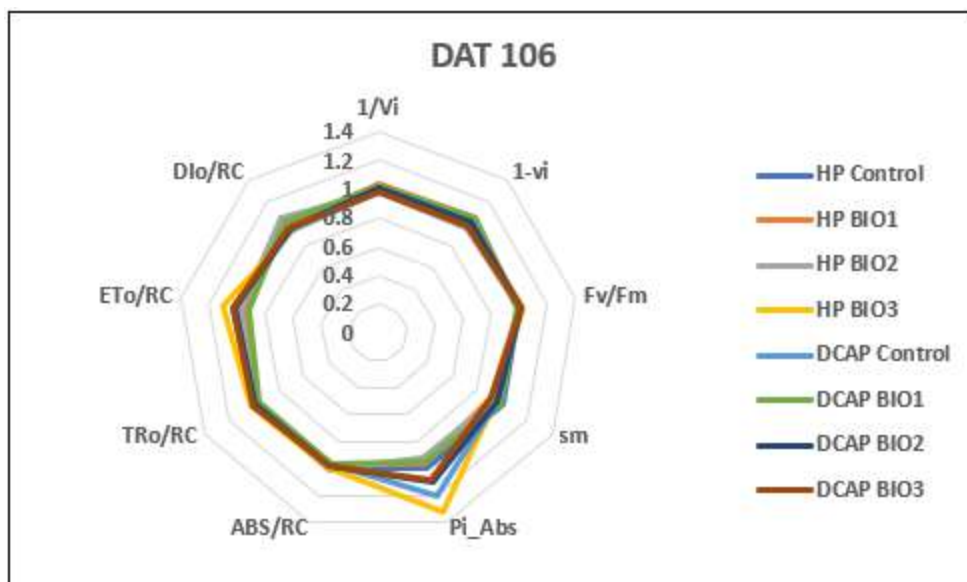
DAT 64	HP Control	HP BIO1	HP BIO2	HP BIO3	DCAP Control	DCAP BIO1	DCAP BIO2	DCAP BIO3
1/Vi	b	ab	a	ab	ab	ab	ab	b
1-vi	b	ab	a	ab	ab	ab	ab	b
Fv/Fm	a	ab	bc	bc	a	bc	c	c
sm	a	a	a	a	a	a	a	a
Pi_Abs	a	b	b	b	a	b	b	b
ABS/RC	bc	abc	a	ab	c	ab	ab	ab
TRO/RC	ab	ab	a	ab	b	ab	ab	ab
ETO/RC	b	ab	a	a	b	a	a	a
DIO/RC	ab	a	a	a	ab	a	a	a



Διάγραμμα 20: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης α όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 86 (M.O. $\pm$ Sd, n=15) .

Πίνακας 5: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης α (OJIP) την Ημέρα 86.

DAT 86	HP Control	HP BIO1	HP BIO2	HP BIO3	DCAP Control	DCAP BIO1	DCAP BIO2	DCAP BIO3
1/Vi	b	ab	ab	ab	b	a	ab	ab
1-vi	b	ab	ab	ab	b	a	ab	ab
Fv/Fm	a	ab	ab	b	ab	c	cd	d
sm	a	a	a	a	a	a	a	a
Pi_Abs	ab	ab	ab	ab	a	ab	b	c
ABS/RC	bc	bc	bc	bc	c	bc	b	a
TRo/RC	b	b	b	b	b	b	ab	a
ETo/RC	a	a	a	a	a	a	a	a
Dlo/RC	d	cd	d	cd	d	bc	b	a



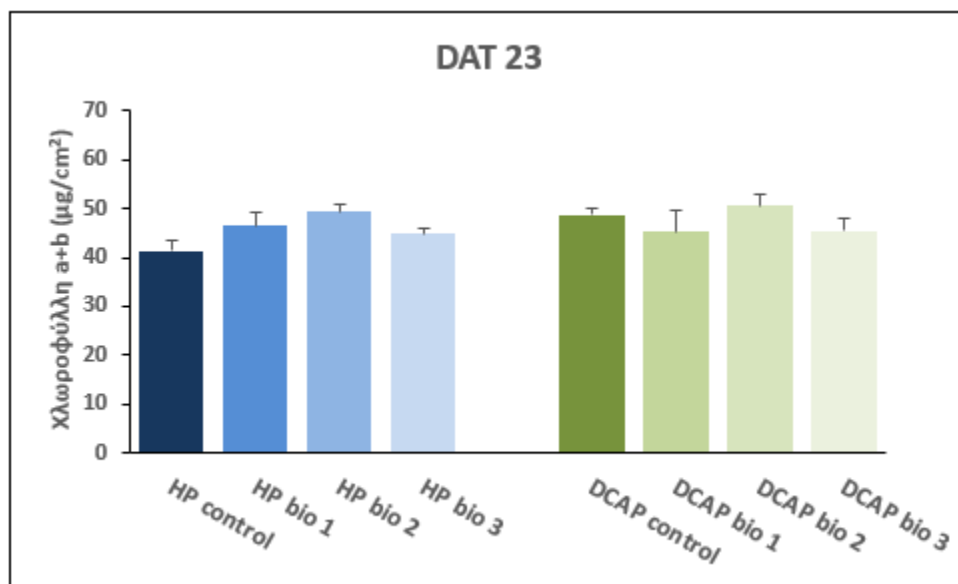
Διάγραμμα 21: Ομαλοποιημένες ως προς το HP Control τιμές παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης α όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 106 (Μ.Ο. $\pm$ Sd, n=15).

Πίνακας 6: Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων φθορισμού χλωροφύλλης α (OJIP) την ημέρα 106.

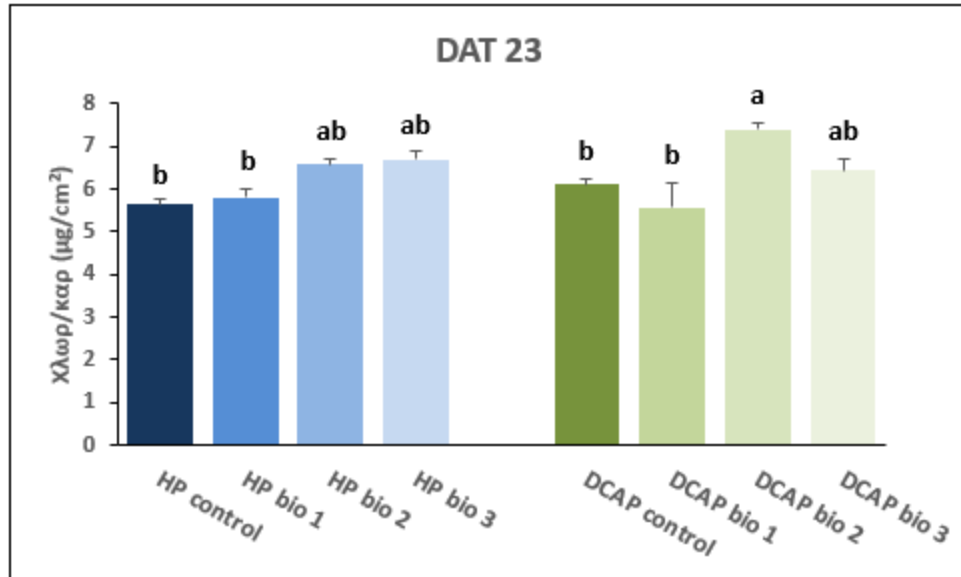
DAT 106	HP Control	HP BIO1	HP BIO2	HP BIO3	DCAP Control	DCAP BIO1	DCAP BIO2	DCAP BIO3
1/Vi	a	a	a	a	a	a	a	a
1-vi	a	a	a	a	a	a	a	a
Fv/Fm	ab	ab	ab	a	ab	b	ab	ab
sm	a	a	a	a	a	a	a	a
Pi_Abs	a	a	a	a	a	a	a	a
ABS/RC	a	a	a	a	a	a	a	a
TRo/RC	a	a	a	a	a	a	a	a
ETo/RC	ab	ab	ab	a	ab	b	ab	ab
Dlo/RC	a	a	a	a	a	a	a	a

3.6 Φωτοσυνθετικές χρωστικές

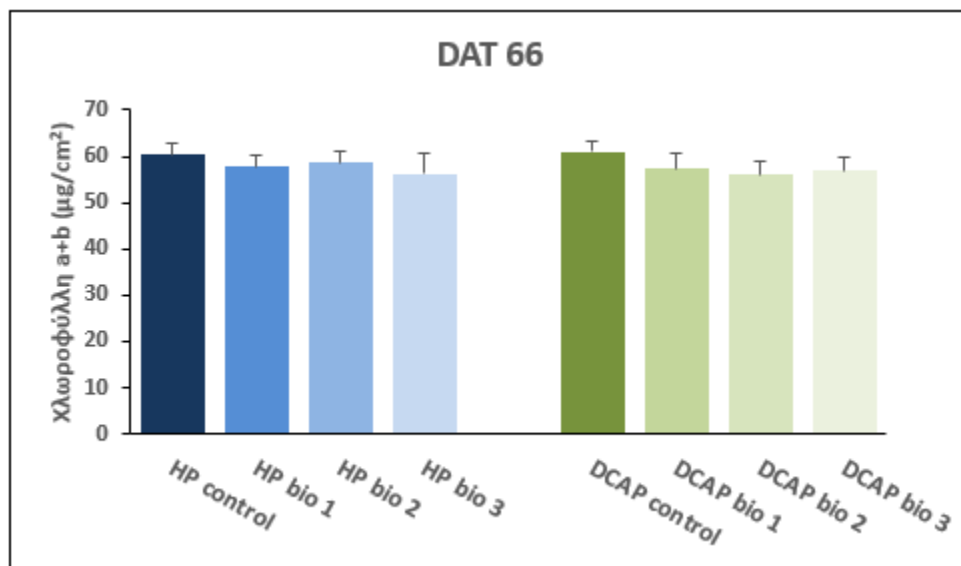
Τα αποτελέσματα των συνολικά τριών μετρήσεων των φωτοσυνθετικών χρωστικών με την φασματοφωτομετρική μέθοδο παρουσιάζονται παρακάτω και χωρίστηκαν στο άθροισμα της συγκέντρωσης των χλωροφυλλών a+b (Διαγράμματα 22, 24 και 26) και το λόγο των χλωροφυλλών προς τα καροτενοειδή (Διαγράμματα 23, 25 και 27). Η μόνη στατιστικά σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση των χλωροφυλλών a+b παρουσιάστηκε την Ημέρα 107 και όπως δείχνει το διάγραμμα 26 η μεταχείριση Control της υδροπονίας ήταν η μόνη που διέφερε με εμφανώς μειωμένη τιμή σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Επίσης παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης των χλωροφυλλών με τη πάροδο του χρόνου το οποίο παρατηρείται από τη σύγκριση των διαγραμμάτων 22,24 και 26. Ο λόγος της συγκέντρωσης των χλωροφυλλών προς τα καροτενοειδή από την άλλη παρουσίασε στατιστικές διαφορές την Ημέρα 23 με το διάγραμμα 23 να απεικονίζει μικρότερες τιμές στις μεταχειρίσεις Control και Bio 1 τόσο για την υδροπονία όσο και για την αποξευγμένη ενυδρείοπονία.



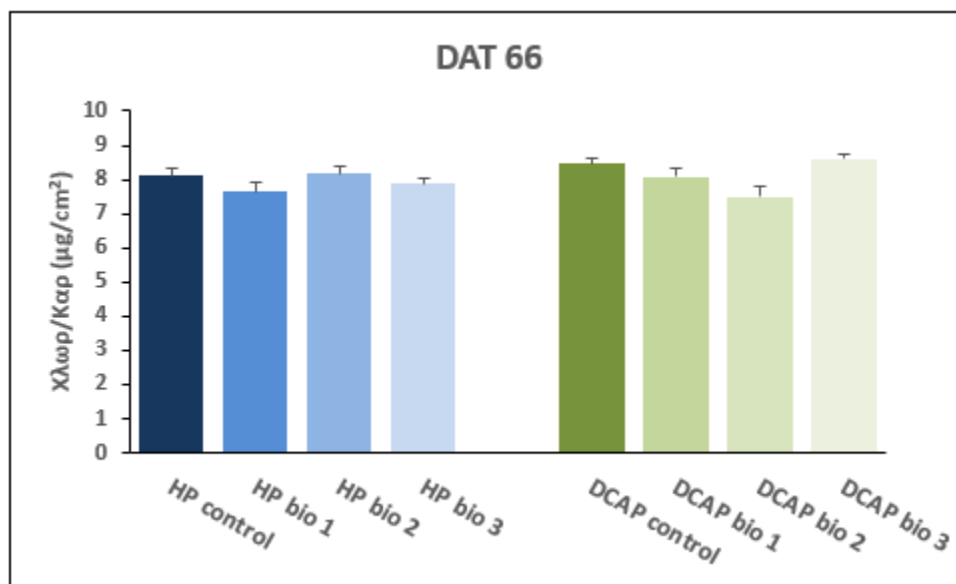
Διάγραμμα 22: Αθροιστική συγκέντρωση χλωροφύλλης a και b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 23 (M.O. $\pm$ Sd, $n=10$). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



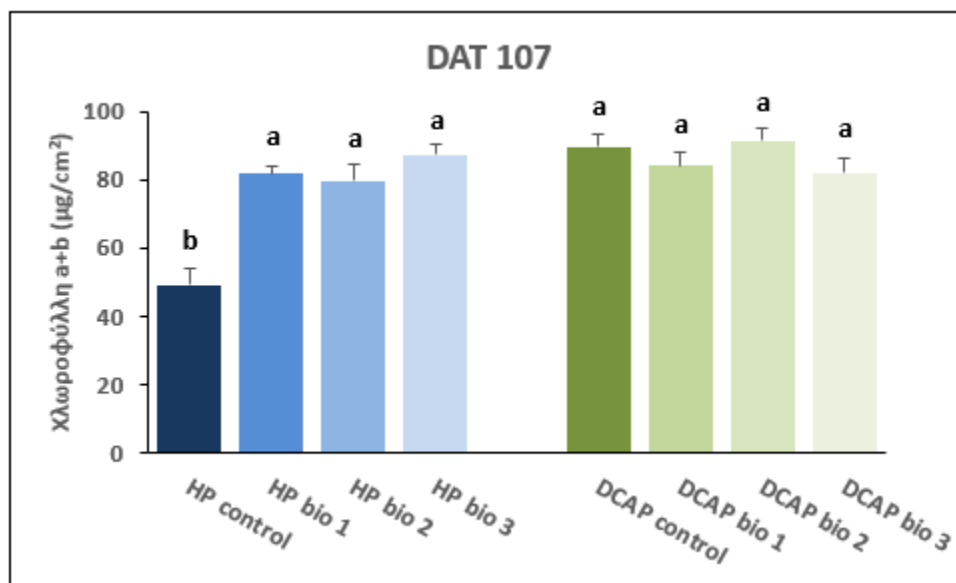
Διάγραμμα 23: Λόγος συγκέντρωσης χλωροφυλλών προς καροτενοειδή ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 23 (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



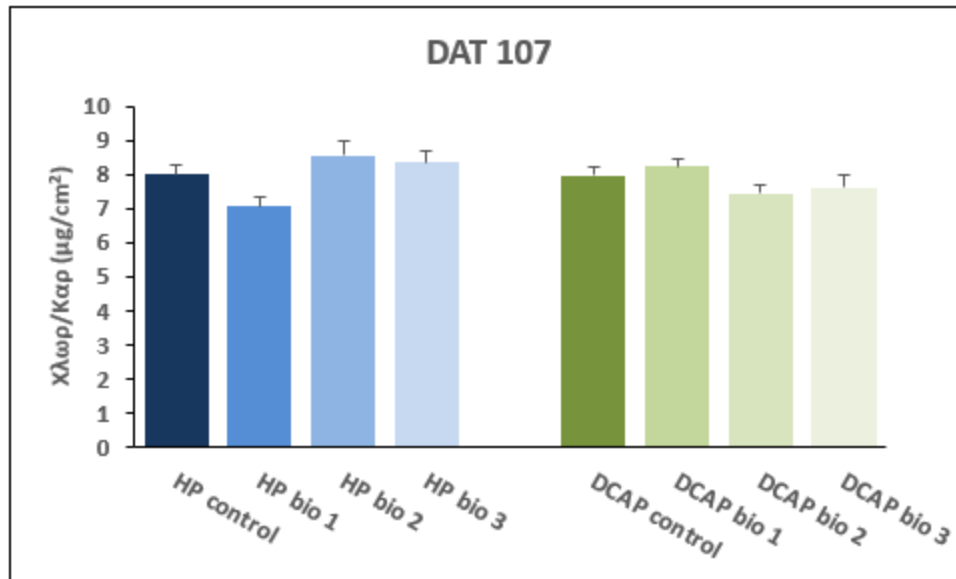
Διάγραμμα 24: Αθροιστική συγκέντρωση χλωροφύλλης a και b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 66 (M.O. $\pm$ Sd, n=10). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



Διάγραμμα 25: Λόγος συγκέντρωσης χλωροφυλλών προς καροτενοειδή ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 66 (M.O. $\pm$ Sd, $n=10$). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



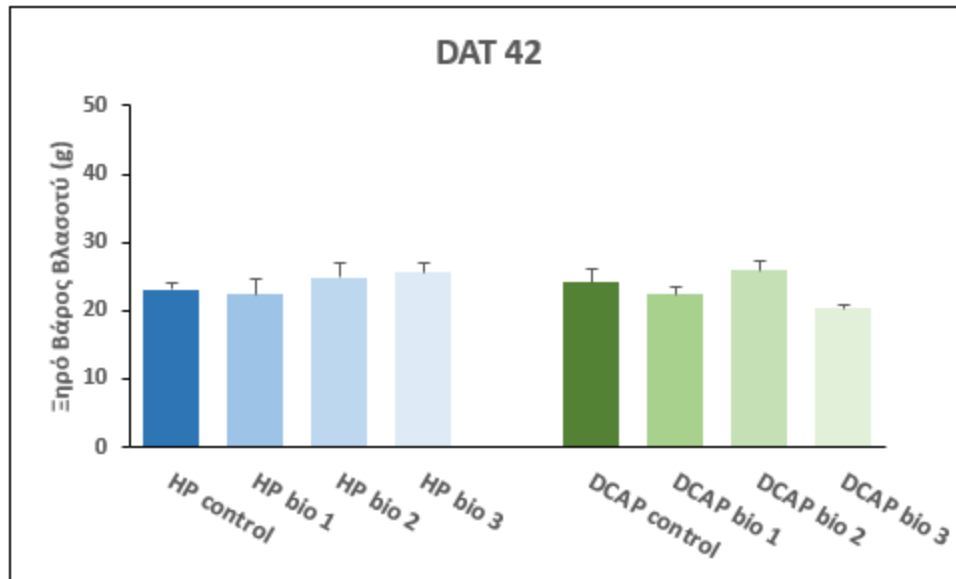
Διάγραμμα 26: Αθροιστική συγκέντρωση χλωροφύλλης a και b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 107 (M.O. $\pm$ Sd, $n=10$). Τα διαφορετικά γράμματα υποδεικνύουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



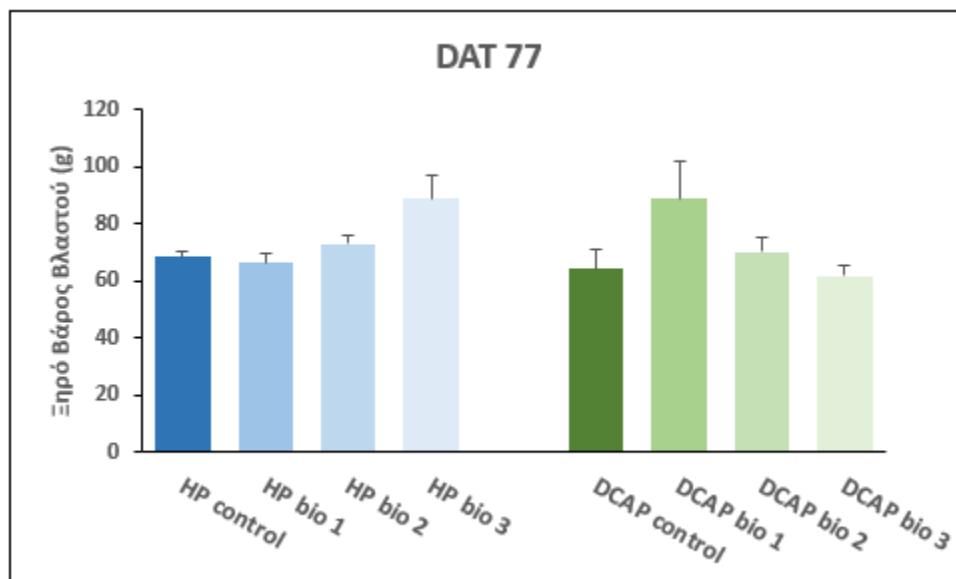
Διάγραμμα 27: Λόγος συγκέντρωσης χλωροφυλλών προς καροτενοειδή ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 107. (M.O. $\pm$ Sd, $n=10$). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.

3.7 Ξηρό Βάρος Βλαστού

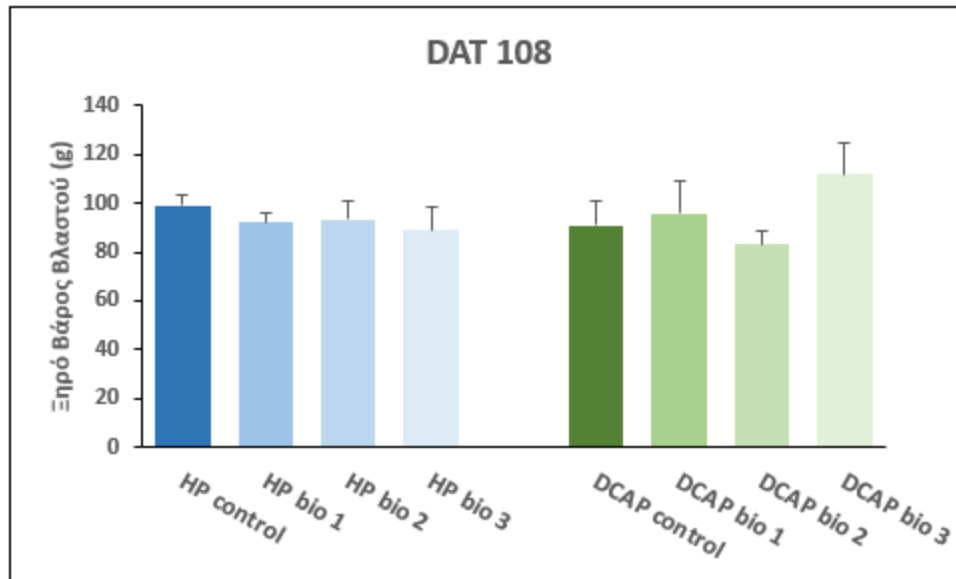
Τα ξηρά βάρη του βλαστού από τις 3 καταστροφικές συγκομιδές που πραγματοποιήθηκαν δεν διέφεραν στατιστικά ανάμεσα στις μεταχειρίσεις με την αυξητική τάση των τιμών με την πάροδο του χρόνου να οφείλεται στην ανάπτυξη του αγγουριού. Μεγαλύτερη διαφορά στις τιμές είχαμε την Ημέρα 77 με τη πρωτιά να κατέχουν οι μεταχειρίσεις HP bio 3 και DCAP Bio 1 όπως φαίνεται στο διάγραμμα 29.



Διάγραμμα 28: Ξηρό βάρος βλαστού (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



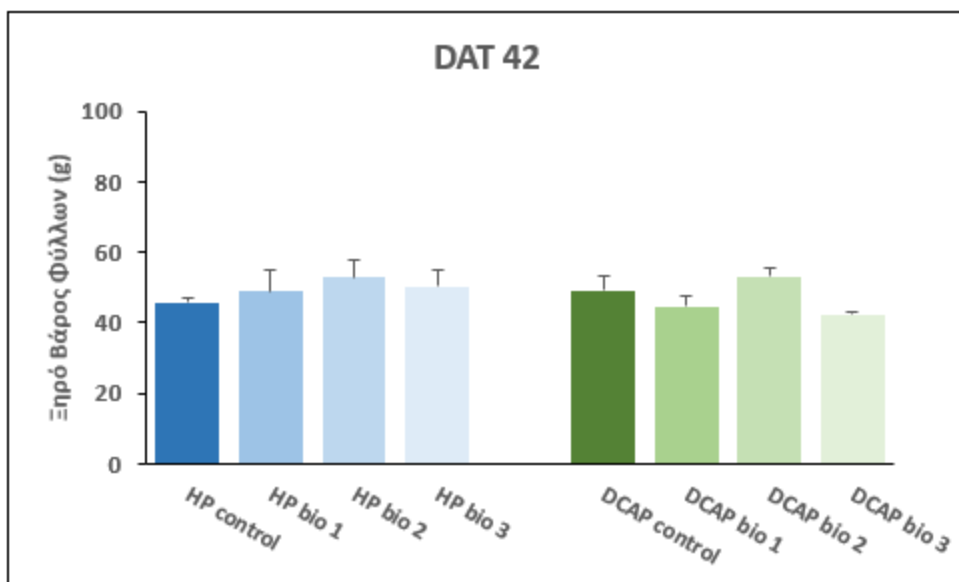
Διάγραμμα 29: Ξηρό βάρος βλαστού (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 77 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



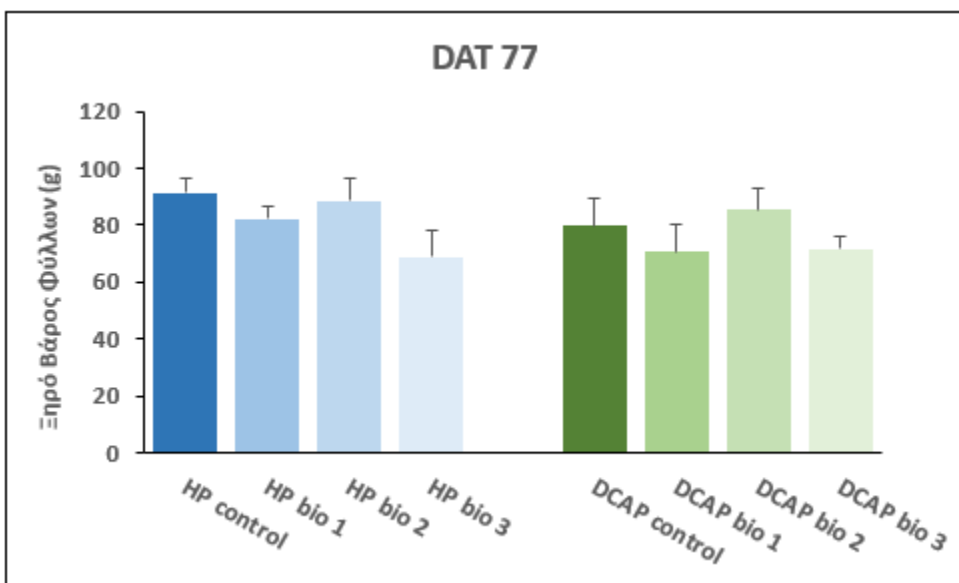
Διάγραμμα 30: Ξηρό βάρος βλαστού (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 108 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.

3.8 Ξηρό Βάρος Φύλλων

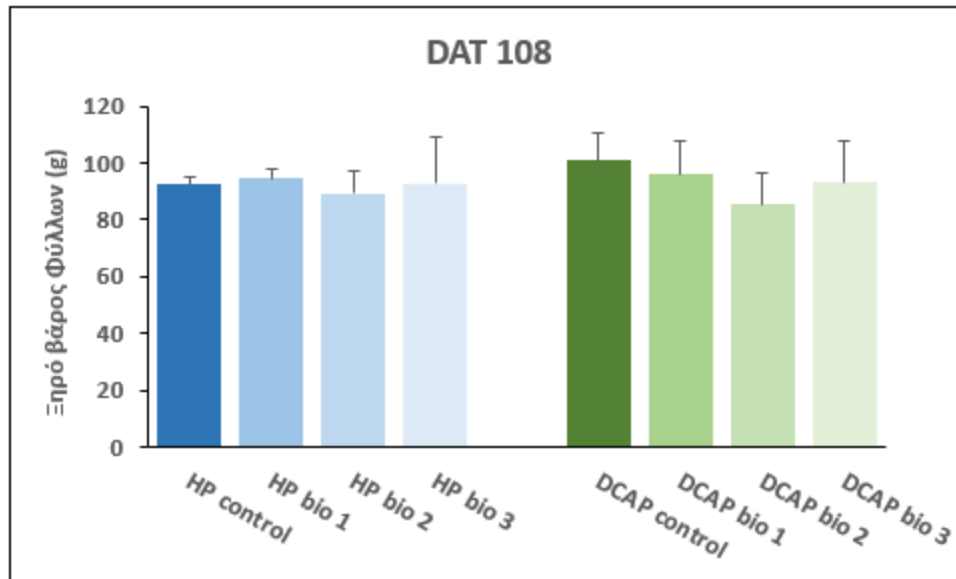
Σε καμία ημέρα συγκομιδής από αυτές που καταγράφονται στα γραφήματα 31-33 δεν καταγράφηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στο ξηρό βάρος των φύλλων, ενώ οι τιμές κινούνταν επίσης ανοδικά καθώς προχωρούσε η αναπτυξιακή περίοδος, όπως και στο βλαστό.



Διάγραμμα 31: Ξηρό βάρος φύλλων (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



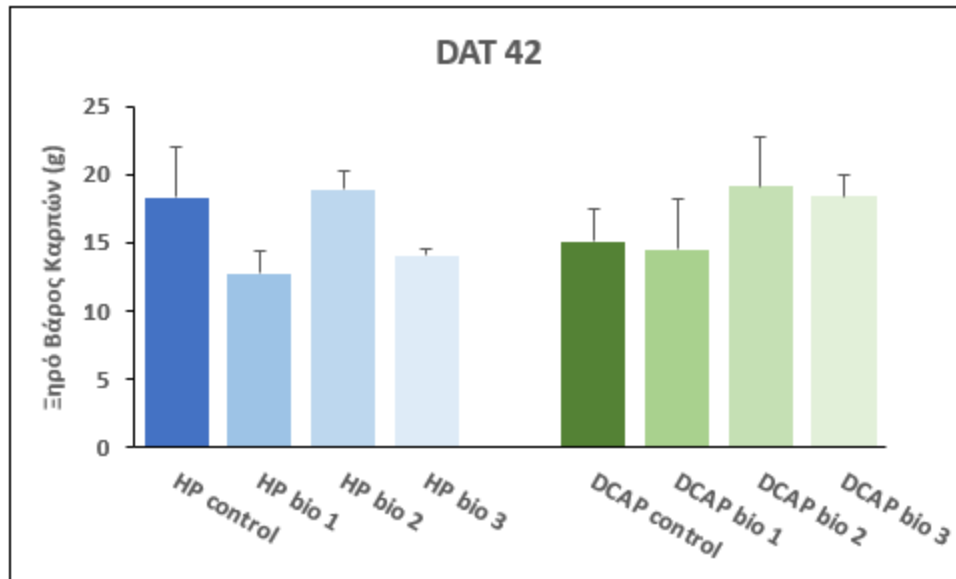
Διάγραμμα 32: Ξηρό βάρος φύλλων (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 77 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



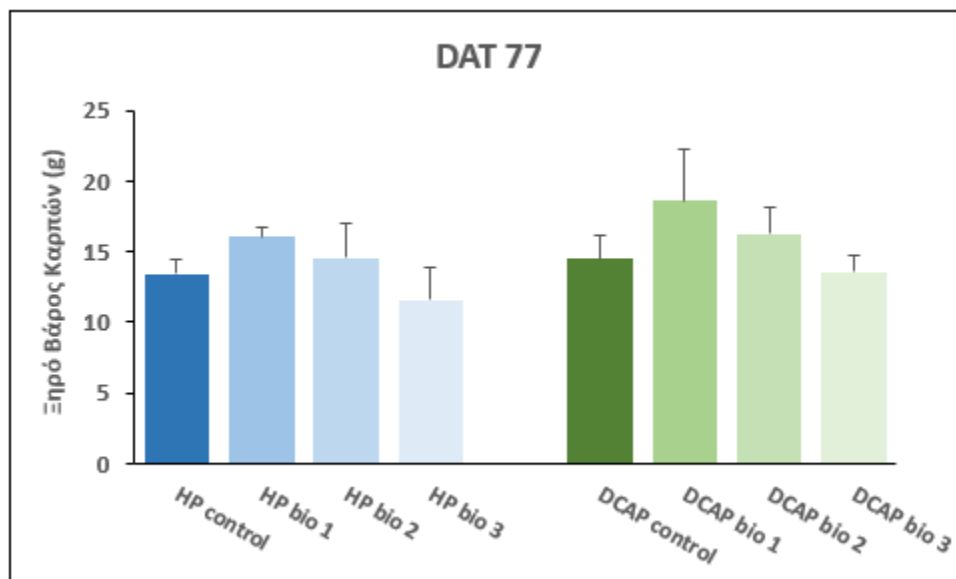
Διάγραμμα 33: Ξηρό βάρος φύλλων (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 108 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.

3.9 Μέσο Ξηρό Βάρος Καρπού

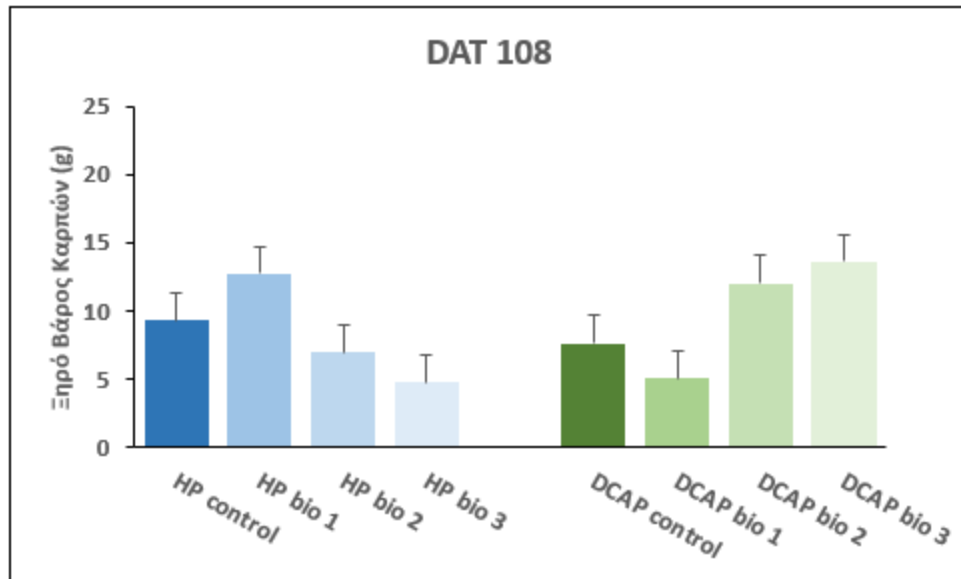
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 34, 35 και 36 φαίνεται πως το μέσο ξηρό βάρος καρπού ελαττώθηκε με τη πάροδο του χρόνου. Στα διαγράμματα αυτά αποτυπώνεται το μέσο βάρος όλων των καρπών που υπήρχαν εκείνη τη στιγμή πάνω στο φυτό που επιλέχθηκε για την καταστροφική δειγματοληψία. Αντίθετα, στο διάγραμμα 37 φαίνεται το μέσο ξηρό βάρος εμπορεύσιμων καρπών που επιλέχθηκαν τυχαία από 10 φυτά/μεταχείριση στο μέσο του πειράματος ώστε να εκτιμηθεί η βιομάζα αυτής της κατηγορίας καρπών. Σε καμία από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις δεν καταγράφηκαν στατιστικώς σημαντικές αλλαγές μεταξύ των μεταχειρίσεων.



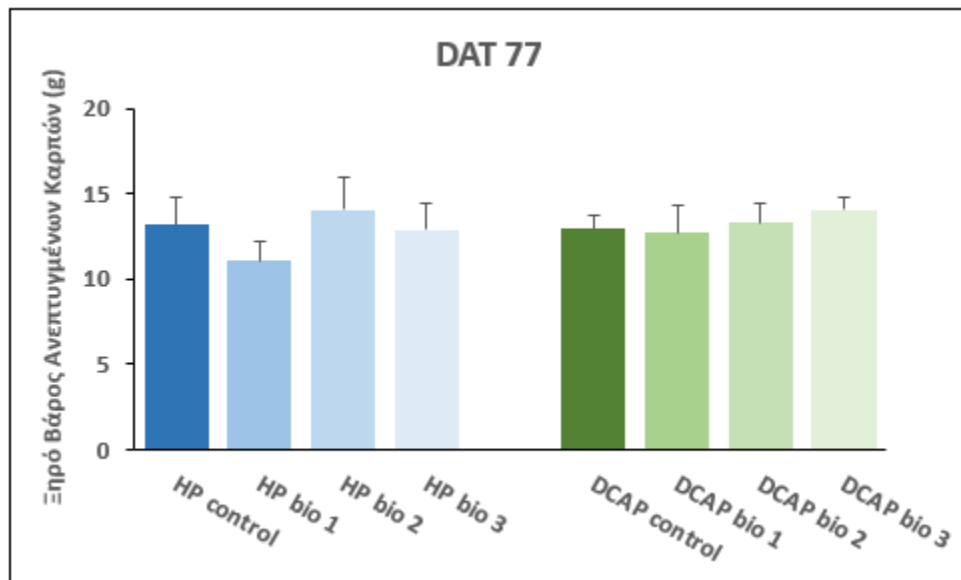
Διάγραμμα 34: Μέσο ξηρό βάρος καρπού (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 42 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



Διάγραμμα 35: Μέσο ξηρό βάρος καρπού (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 77 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



Διάγραμμα 36: Μέσο ξηρό βάρος καρπού (g) όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 108 (M.O. $\pm$ Sd, n=4). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.



Διάγραμμα 37: Ξηρό βάρος εμπορεύσιμων καρπών (g) των φυτών όλων των μεταχειρίσεων την Ημέρα 77. (M.O. $\pm$ Sd, n=6). Η απουσία γραμμάτων υποδηλώνει μη στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων σε επίπεδο $p \leq 0,05$.

3.10 Ποιότητα καρπού

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις της ποιότητας του καρπού παρουσιάζονται σε μορφή πινάκων στους οποίους έχουν ενσωματωθεί οι μέσοι όροι όλων των παραμέτρων καθώς και η στατιστική ανάλυση. Οι παράγοντες του συστήματος καλλιέργειας και των βιοδιεγερτών εμφάνισαν αλληλεπίδραση μόνο για τη παράμετρο του χρώματος και των διαλυτών στερεών την ημέρα 71. Πιο συγκεκριμένα το χρώμα σύμφωνα με το πίνακα 7 την ημέρα 71 οι μεταχειρίσεις DCAP Bio 2 και DCAP Bio 3 διέφεραν στατιστικώς σημαντικά στις παραμέτρους L, a και b συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Συγκεκριμένα είχαν μεγαλύτερες τιμές στο L και b και μικρότερες στο a, κάτι που σύμφωνα με τη φόρμουλα μεταφράζεται σε πιο ανοιχτό χρωματισμό. Στον πίνακα 8 όμως αντιθέτως οι χρωματικοί παράμετροι την ημέρα 104 δεν παρουσίασαν καμία στατιστική διαφορά για όλες τις μεταχειρίσεις. Στη σκληρότητα την Ημέρα 71 η HP Bio 2 είχε την μικρότερη τιμή (1.95) η οποία ήταν και η μόνη που διέφερε στατιστικά με τη μεταχείριση HP Control και HP Bio 3. Παρόμοια διακύμανση είχαμε και στα ολικά διαλυτά στερεά με τη διαφορά ότι τη μικρότερη τιμή που διέφερε στατιστικά είχε αυτή τη φορά η μεταχείριση DCAP Control (2.84) την ημέρα 71 και οι τιμές (brix %) από αυτή την ημέρα ήταν συνολικά μικρότερες συγκριτικά με την ημέρα 104. Τις μεγαλύτερες τιμές διαλυτών στερεών είχε την ημέρα 71 η HP Bio 2 και HP bio 3 και την ημέρα 104 η DCAP Bio 2 ακολουθούμενη από την HP Bio 2. Το pH δεν διέφερε στατιστικά σε καμία μεταχείριση με τις τιμές της ημέρας 71 να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές της ημέρας 104.

Πίνακας 7: Ποιοτικά χαρακτηριστικά συγκομισμένων καρπών την Ημέρα 71.

DAT 71	HP Control	HP BIO1	HP BIO 2	HP BIO 3	DCAP Control	DCAP BIO 1	DCAP BIO 2	DCAP BIO 3
L	31 ± 0.99 ^b	30.13 ± 0.25 ^b	29.51 ± 0.93 ^b	29.05 ± 0.57 ^b	30.342 ± 0.77 ^{ab}	29.10 ± 1.34 ^b	35.18 ± 1.16 ^a	35.42 ± 0.76 ^a
a	-7.36 ± 0.33 ^a	-7.33 ± 0.15 ^a	-7.01 ± 0.33 ^a	-6.86 ± 0.22 ^a	-7.29 ± 0.35 ^a	-7.02 ± 0.46 ^a	-9.99 ± 0.47 ^b	-10.68 ± 0.35 ^b
b	9.29 ± 0.48 ^b	9.27 ± 0.16 ^b	8.89 ± 0.47 ^b	8.57 ± 0.30 ^b	9.16 ± 0.46 ^b	8.88 ± 0.62 ^b	14.37 ± 0.69 ^a	15.62 ± 0.61 ^a
Σκληρότητα	3 ± 0.13 ^a	2.73 ± 0.13 ^{ab}	1.95 ± 0.34 ^b	3.04 ± 0.19 ^a	2.89 ± 0.24 ^{ab}	3.10 ± 0.10 ^{ab}	2.75 ± 0.19 ^{ab}	2.75 ± 0.30 ^{ab}
Brix %	3.52 ± 0.18 ^{ab}	3.3 ± 0.37 ^{ab}	4.32 ± 0.30 ^a	4.36 ± 0.31 ^{ab}	2.84 ± 0.26 ^b	3.94 ± 0.14 ^{ab}	3.66 ± 0.26 ^{ab}	3.12 ± 0.28 ^{ab}
pH	6.47 ± 0.10 ^a	6.52 ± 0.07 ^a	6.46 ± 0.13 ^a	6.41 ± 0.08 ^a	6.52 ± 0.10 ^a	6.54 ± 0.12 ^a	6.26 ± 0.16 ^a	6.28 ± 0.11 ^a

Πίνακας 8: Ποιοτικά χαρακτηριστικά συγκομισμένων καρπών την Ημέρα 104.

DAT 104	HP Control	HP BIO1	HP BIO 2	HP BIO 3	DCAP Control	DCAP BIO 1	DCAP BIO 2	DCAP BIO 3
L	34.54 ± 0.97 ^a	35.39 ± 0.65 ^a	33.87 ± 0.66 ^a	35.19 ± 0.95 ^a	35.16 ± 0.75 ^a	34.50 ± 0.49 ^a	34.12 ± 0.28 ^a	34.68 ± 0.51 ^a
a	-8.91 ± 0.29 ^a	-9.18 ± 0.33 ^a	-7.95 ± 0.40 ^a	-9.17 ± 0.34 ^a	-8.75 ± 0.49 ^a	-9.09 ± 0.34 ^a	-7.85 ± 0.14 ^a	-9.11 ± 0.30 ^a
b	12.57 ± 0.44 ^a	12.91 ± 0.47 ^a	10.96 ± 0.51 ^a	12.99 ± 0.57 ^a	12.11 ± 0.74 ^a	12.54 ± 0.63 ^a	10.97 ± 0.26 ^a	12.70 ± 0.63 ^a
Σκληρότητα	2.65 ± 0.26 ^a	3.24 ± 0.30 ^a	2.48 ± 0.26 ^a	2.59 ± 0.20 ^a	2.58 ± 0.29 ^a	3.09 ± 0.16 ^a	3.09 ± 0.04 ^a	3.16 ± 0.31 ^a
Brix %	4.66 ± 0.40 ^a	4.70 ± 0.12 ^a	5.22 ± 0.55 ^a	4.34 ± 0.37 ^a	4.58 ± 0.16 ^a	4.58 ± 0.47 ^a	5.90 ± 0.42 ^a	4.40 ± 0.43 ^a
pH	6.08 ± 0.14 ^a	6.22 ± 0.13 ^a	6.18 ± 0.08 ^a	6.29 ± 0.07 ^a	6.33 ± 0.14 ^a	6.30 ± 0.11 ^a	5.82 ± 0.28 ^a	5.94 ± 0.18 ^a

4. Συζήτηση

Στη παρούσα πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε καλλιέργεια αγγουριού σε πιλοτικό σύστημα ενυδρειοπονίας η οποία χωρίστηκε σε 8 διαφορετικές μεταχειρίσεις. Ο διαχωρισμός αυτός αποσκοπούσε στη σύγκριση του υδροπονικού και του αποζευγμένου ενυδρειοπονικού συστήματος καλλιέργειας με και χωρίς τον συνδυασμό της χρήσης δυο διαφορετικών βιοδιεγερτών και ενός βιολιπάσματος. Οι μετρήσεις αφορούσαν αναπτυξιακές και φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού ενώ ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις παραμέτρους που σχετίζονται με τη φωτοσυνθετική λειτουργία. Αρκετές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στη σύγκριση της παραγωγικής δυναμικότητας μεταξύ των δυο συστημάτων καλλιέργειας (Blanchard et al. 2020, Rodgers et al. 2022, Mourantian et al, 2023), οι περισσότερες όμως δεν εμβαθύνουν στους μηχανισμούς φυσιολογίας του φυτού από τους οποίους πηγάζουν αυτές οι αναπτυξιακές αποκρίσεις με το σκοπό της παρούσας εργασίας να βασίζεται στο συγκεκριμένο βιβλιογραφικό κενό.

Η ανάπτυξη και εξέλιξη του ενυδρειοπονικού συστήματος καλλιέργειας προσπαθεί να ισορροπήσει μεταξύ των υφιστάμενων επιβαρυμένων περιβαλλοντικών συνθήκων και των αυξημένων διατροφικών αναγκών των ανθρώπων. Η συχνή εμφάνιση ελλειμματικών συγκεντρώσεων σε βασικά θρεπτικά στοιχεία στο συζευγμένο σύστημα, παρά τα περιβαλλοντικά οφέλη αποκλείει τη καλλιέργεια καρπωδών λαχανικών που είναι απαιτητικά σε θρέψη όπως είναι το αγγούρι. Η επιπλέον προσθήκη θρεπτικών στοιχείων

στο ενυδρειοπονικό διάλυμα (αποζευγμένο σύστημα) επιτρέπει την ολοκληρωμένη ανάπτυξη του αγγουριού, με αρκετές έρευνες να προδίδουν και επιπλέον οφέλη συγκριτικά με την υδροπονία (Blachard et al, 2020). Παράδειγμα τέτοιων ερευνών αποτελεί το πείραμα της Aslanidou και των συνεργατών της (2023), στο οποίο βρέθηκε μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στη χρήση θρεπτικών στην αποζευγμένη ενυδρειοπονική καλλιέργεια αγγουριού, τομάτας και μαρουλιού σε σύγκριση με την υδροπονία. Υπάρχουν και περιπτώσεις όπως αυτή του πειράματος των Delaide et al, (2016) όπου η παραγωγή μαρουλιού στην αποζευγμένη ενυδρειοπονία ξεπέρασε κατά 33% σε παραγωγή αυτή της υδροπονίας. Στην έρευνα του ο Χαραχούσιος (2024) σε κοινή καλλιέργεια με το δικό μας πείραμα υπολόγισε την συνολική παραγωγή των αγγουριών η οποία για την υδροπονική καλλιέργεια ανερχόταν συνολικά σε 1309.8kg ενώ για την αποζευγμένη ενυδρειοπονία σε 1232 kg. Όπως φαίνεται η παραγωγή στα δυο συστήματα είναι κοντά, κάτι που αιτιολογείται παρακάτω από τη μεριά της φυσιολογίας των φυτών που πραγματεύεται το δικό μας πείραμα. Επίσης, να σημειωθεί εδώ ότι καμία από τις αναπτυξιακές παραμέτρους των φυτών που αφορούσε τη συσσώρευση βιομάζας σε βλαστούς, φύλλα και καρπούς δεν εμφάνισε σημαντική διαφορά λόγω των μεταχειρίσεων. Τα φυτά όλων των μεταχειρίσεων παρήγαγαν παρόμοιου βάρους καρπούς, οι οποίοι επιπροσθέτως είχαν παρόμοια ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως φάνηκε από τις μετρήσεις σκληρότητας, χρώματος, επιπέδου ολικών διαλυτών στερεών και pH.

Μια αναπτυξιακή παράμετρος που επίσης μετρήθηκε είναι το LSM που είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την επένδυση σε βιομάζα φύλλων και δείχνει πως συνδέεται η απορρόφηση της ακτινοβολίας με την ανάπτυξη του φυτού και την πρόσληψη του άνθρακα και σχετίζεται άμεσα με την φωτοσυνθετική ικανότητα (Cheng et al, 2014). Και στο LSM παρατηρήθηκαν, όπως και στο δείκτη SPAD, μικρές διαφορές μεταξύ μεταχειρίσεων, με την DCAP Bio 2 να δίνει τις μικρότερες τιμές στην αρχή και τις μεγαλύτερες στην τελική μέτρηση. Σε σχετικό πείραμα που πραγματοποιήθηκε η ομάδα του Meng (2023) μελέτησε την επίδραση της έλλειψης μαγνησίου σε φωτοσυνθετικές παραμέτρους για υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού και ρυζιού. Στο αγγούρι μεταξύ άλλων παρατηρήθηκε αύξηση του LSM από 0.15 g/dm² στο Control σε 0.2 g/dm² στη μεταχείριση που υπήρχε ελάχιστη συγκέντρωση Mg ενώ η παράμετρος Fv/Fm από 0.799 μειώθηκε στο 0.707 αντίστοιχα, τιμή που αποκλίνει από το ιδανικό εύρος. Στο δικό μας

πείραμα όλες οι τιμές του LSM ήταν μεγαλύτερες από αυτές του αντίστοιχου Control των Meng et al, (2023) και παρουσίασαν μια μικρή αύξηση με την πάροδο του χρόνου . Σε ένα ακόμα πείραμα οι Azarmi et al, (2018) στη μεταχείριση του μη σκιαζόμενου αγγουριού χωρίς τη προσθήκη Mg η τιμή του LSM έφτασε 0.7 g/dm² ενώ όταν προστέθηκε Mg η τιμή του LSM μειώθηκε και αυξήθηκε το ξηρό βάρος του υπέργειου τμήματος.

Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης στα φύλλα σχετίζεται στενά με τα επίπεδα του αζώτου, έτσι η μέτρησή της αποτελεί ένα από τα εργαλεία εκτίμησης της θρεπτικής κατάστασης του φυτού (Ji-Yong et al, 2012). Ένας γρήγορος και αποτελεσματικός τρόπος για την απευθείας μέτρηση της χλωροφύλλης στο πεδίο είναι με τη χρήση φορητών οργάνων μέτρησης χλωροφύλλης (Padilla et al, 2017). Στο πείραμα του Ayirio (2021) μετρήθηκε μεταξύ άλλων η τιμή της χλωροφύλλης με όργανο SPAD σε ενυδρειοπονική καλλιέργεια αγγουριού. Στη μεταχείριση που υπήρχε προσθήκη θρεπτικών στοιχείων οι τιμές στις δυο επαναλήψεις του πειράματος του ήταν 36.19 και 32.99, συγκριτικά χαμηλότερες με τις δικές μας τιμές. Στο πείραμα μας για τις μεταχειρίσεις του αποζευγμένου συστήματος συγκεκριμένα η μικρότερη τιμή ξεκινούσε από 44.25 και έφτανε μέχρι και 63.9 που είναι σχεδόν διπλάσιο από τα αποτελέσματα του Ayirio, (2021). Πιο κοντά στα δικά μας αποτελέσματα ήταν η μέτρηση SPAD (47.1) των Mukarami και Ibaraki, (2018) σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού περίπου 2 εβδομάδων και περισσότερο των Azarmi et al, (2018) που στη μεταχείριση με τη μεγαλύτερη προσθήκη Mg η τιμή SPAD σε μη σκιαζόμενο υδροπονικό αγγούρι έφτασε μέχρι 62.33. Στην παρούσα μελέτη καταγράφηκαν κάποιες διαφορές κατά τον πρώτο μήνα, οι οποίες όμως ήταν μικρές και διαφορετικής κατεύθυνσης σε δύο διαδοχικές μετρήσεις. Στην συνέχεια του πειράματος όμως οι όποιες διαφορές εξισώθηκαν, άρα η γενική εικόνα είναι ότι ως προς τον δείκτη SPAD δεν είχαμε διαφορετικές αποκρίσεις των φυτών των μεταχειρίσεων.

Οι φωτοσυνθετικές χρωστικές, δηλαδή οι χλωροφύλλες a, b και τα καροτενοειδή κατέχουν πρωτεύοντα στη φωτοσυνθετική διαδικασία αφού εκτελούν την απορρόφηση και μεταφορά της ενέργειας του φωτός. Η μέτρηση της συγκέντρωσης αυτών των χρωστικών είναι ζωτικής σημασίας καθώς αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της σωστής φωτοσυνθετικής λειτουργίας (Taiz et al, 2017). Λόγω της ανάγκης για ακρίβεια στις συγκεκριμένες μετρήσεις προτιμάται η εργαστηριακή καταστροφική μέτρηση σε σύγκριση

με τη μέτρηση SPAD που μπορεί να χρησιμοποιηθεί επικουρικά (Pinkard et al, 2006). Στο δικό μας πείραμα τα αποτελέσματα της εργαστηριακής ανάλυσης των συγκεντρώσεων των φωτοσυνθετικών χρωστικών είχαν σχετική αντιστοιχία με τις τιμές SPAD αφού δεν παρατηρήθηκε κάποια μεγάλη διαφορά μεταξύ των μεταχειρίσεων εκτός από την ημέρα 107 όπου η τιμή της μεταχείρισης HP Control ήταν αρκετά μειωμένη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, κάτι που δεν αποτυπώθηκε στη τιμή SPAD. Η ομάδα του Guzel (2018) σε πείραμα με αγγούρι διαπίστωσαν μεγάλη υπεροχή της υδροπονίας σε σύγκριση με τη συζευγμένη ενυδραιοπονία στις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης a, b και καροτενοειδών, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στη δική μας περίπτωση και αποδόθηκε στην εφαρμογή του αποζευγμένου συστήματος.

Επιπροσθέτως η ερμηνεία της ανάλυσης του φθορισμού της χλωροφύλλης a αποτελεί ισχυρή ένδειξη για την ύπαρξη ή όχι περιβαλλοντικών καταπονήσεων στα φυτά (Kalaji et al, 2018). Μια από τις τεχνικές μέτρησης του φθορισμού της χλωροφύλλης a είναι η OJIP με τα αρχικά της (O,J,I,P) να αντιστοιχούν στα οξειδοαναγωγικά στάδια των φωτοσυστημάτων PSI και PSII (Strasser et al, 2004). Αποτελεί μια απλή, γρήγορη και μη καταστροφική μέθοδο που είναι ικανή να μας παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση κυρίως του PSII μέσα από αρκετές παραμέτρους (Zuchi & Matsuzoe, 2017). Μια από τις κυριότερες παραμέτρους είναι ο λόγος F_v/F_m που αποτελεί τη μέγιστη ανά φωτόνιο φωτοχημική απόδοση του PSII. Όταν οι τιμές μέτρησης αποκλίνουν από το ιδανικό εύρος (0.75-0.85), αυτό υποδηλώνει ότι η φωτοσυνθετική συσκευή λειτουργεί προβληματικά, άρα είναι πιθανό το φυτό να υφίσταται κάποιου είδους καταπόνηση (Καραμπουρνιώτης, 2012). Η πλειονότητα των δικών μας μετρήσεων ήταν ελάχιστα χαμηλότερες από τη τιμή 0.8 εκτός από τη Ημέρα 86 όπου όλες οι μεταχειρίσεις την ξεπέρασαν εκτός από την DCAP Bio 3. Επίσης, δεν καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές σε αυτό τον δείκτη μεταξύ των φυτών των μεταχειρίσεων. Χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική οι Harizanova και Koleva-Valkova (2019) μέτρησαν τη παράμετρο F_v/F_m σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού με καταπόνηση αλατότητας και τη χρήση ενός βιοδιεγέρτη. Η τιμή της μεταχείρισης Control ήταν 0.81 και η μεταχείριση που έγινε η χρήση του βιοδιεγέρτη ήταν 0.804 το οποίο πλησιάζει τα δικά μας αποτελέσματα. Άλλο ένα πείραμα που χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος OJIP είναι αυτό του Doğru (2020) όπου σε νεαρά φυτάρια αγγουριού υδροπονικής καλλιέργειας μελετήθηκαν οι επιπτώσεις των υψηλών

θερμοκρασιών στις διάφορες φυσιολογικές παραμέτρους. Η αύξηση της θερμοκρασίας στους 55°C επηρέασε όλες τις παραμέτρους συγκριτικά με το control. Ενδεικτικά η παράμετρος F_v/F_m από 0.821 (Control) μειώθηκε σε 0.259, η ABS/RC από 2.81 κατέληξε σε τετραπλάσια τιμή, η TRo/RC από 2.18 μειώθηκε στο 1.90 και το Dlo/RC από 0.65 έφτασε σε 6.93 υπό συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Συγκριτικά με το δικό μας πείραμα οι τιμές από αυτές τις παραμέτρους συγκλίνουν με τη δική τους μεταχείριση Control που δεν υπήρξε καταπόνηση με μόνη εξαίρεση τη DCAP Bio 3 την ημέρα 86 που είχε μικρότερη τιμή F_v/F_m και αυξημένες τιμές Dlo/RC και ABS/RC. Γενικά από την D42 έως την D86 υπήρξε μία πτώση του παράγοντα Plabs και του Dlo/RC σε όλες τις μεταχειρίσεις που λάμβαναν βιοδιεγέρτες και βιολίπασμα, ανεξαρτήτως συστήματος καλλιέργειας. Η πρώτη παράμετρος αφορά τη λειτουργικότητα της μετατροπής της ενέργειας που απορροφάται από την φωτοσυλλεκτική κεραία του PSII, ενώ η δεύτερη παράμετρος σχετίζεται με την ενέργεια διέγερσης που αποσβένεται θερμικά ανά κέντρο αντίδρασης. Εντούτοις, οι μειώσεις που προαναφέρθηκαν εξισώθηκαν στις επόμενες μετρήσεις, χωρίς να μεταβάλουν σημαντικά τη συνολική εικόνα. Αυτό υποδεικνύει ότι συνολικά δεν υπήρχε κάποια σοβαρή καταπόνηση που να αποτελεί εμπόδιο στην φυσιολογική λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής των φυτών τόσο της υδροπονίας όσο και της αποζευγμένης ενυδρείοπονίας.

Η καλή λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής σχετίζεται άμεσα με την αποδοτικότητα χρήσης φωτός. Όταν η ακτινοβολία είναι υπερβολικά υψηλή, τότε επέρχεται καταπόνηση στο φυτό που καταλήγει σε μείωση της φωτοσύνθεσής του. Ένας από τους μηχανισμούς προστασίας που ενεργοποιούνται στο φυτό είναι ο κύκλος των ξανθοφυλλών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την διέγερση χρωστικών όπως οι ξανθοφύλλες που οδηγεί σε απόσβεση της πλεονάζουσας ενέργειας με την ταυτόχρονη μετατροπή της σε θερμότητα (Καραμπουρνιώτης, 2012). Σε αυτόν το μηχανισμό στηρίζεται ο δείκτης PRI που μετρήθηκε, ο οποίος υπολογίζει την ανακλαστικότητα των φύλλων σε δυο μήκη κύματος (531nm και 570nm) από το οποίο συμπεραίνεται η δραστηριότητα του προαναφερθέντα κύκλου (Liu et al, 2022). Οι Mukarami και Ibaraki (2018) σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού έδειξαν ότι οι τιμές του δείκτη PRI μειώνονταν όσο αυξανόταν χρονικά η έκθεση του φύλλου στο φως και όσο μεγάλωνε η ένταση της ακτινοβολίας με τις απότομες διακυμάνσεις να μην αποτελούν αξιόπιστη συνθήκη. Αυτό έρχεται σε

αντιστοιχία με το δικό μας πείραμα όπου οι μετρήσεις έγιναν κατά τις πρωινές ώρες με τις τιμές να είναι σχετικά υψηλές. Την ημέρα 20 και 62 έφτασαν στο ανώτερο επίπεδο (0.04-0.05) σε σχέση με τις άλλες τρεις ημέρες με την εξήγηση να αποδίδεται στο γεγονός ότι εκείνες τις δυο ημέρες επικρατούσε συννεφιασμένος καιρός, κάτι που δικαιολογεί τη μειωμένη λειτουργία του κύκλου των ξανθοφυλλών λόγω της μειωμένης προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Τέλος όσον αφορά την εφαρμογή των βιοδιεγερτών σε καλλιέργεια αγγουριού πολλές έρευνες έχουν επισημάνει την ευεργετική τους ιδιότητα ιδιαίτερα σε συνθήκες καταπόνησης ή προβληματικής θρεπτικής κατάστασης λόγω ελλείψεων σε στοιχεία (Cristofano et al, 2021). Ο Celletti και η ομάδα του (2021) διαπίστωσαν ότι η χρήση βιοδιεγέρτη HSS αύξησε τη χλωροφύλλη και την περιεκτικότητα σιδήρου μόνο στα φυτά αγγουριού που είχαν θρεπτικές ελλείψεις, ενώ ήταν αναποτελεσματικός στα φυτά που είχαν σωστή θρέψη. Αυτό έρχεται σε αντιστοιχία με τα δικά μας αποτελέσματα αφού στην αποζευγμένη ενυδρειοπονία με τη προσθήκη στοιχείων τα φυτά προσέγγιζαν τη θρεπτική κατάσταση της υδροπονίας. Η συνολική σύγκριση των μεταχειρίσεων έδειξε ότι οι βιοδιεγέρτες και το βιολίπασμα δεν είχαν κάποια σημαντική επίδραση στα φυτά. Οι μόνες αξιοσημείωτες διαφορές που υπήρξαν ανάμεσα στις μεταχειρίσεις Control και Bio παρατηρήθηκαν στη περίπτωση του δείκτη PRI στα μέσα του πειράματος όπου οι τιμές των μεταχειρίσεων Control ήταν μειωμένες σε σχέση με αυτές που εφαρμόστηκαν οι βιοδιεγέρτες και το βιολίπασμα καθώς επίσης και στη συγκέντρωση των φωτοσυνθετικών χρωστικών την D107 όπου η μεταχείριση HP Control παρουσίασε μία μείωση.

5. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας με γνώμονα τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας και σε σύγκριση με παρόμοια πειράματα της παγκόσμιας βιβλιογραφίας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Η αποζευγμένη ενυδρειοπονία συνολικά φάνηκε να συναγωνίζεται την υδροπονία ως προς τα αναπτυξιακά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά του αγγουριού αφού οι τιμές των παραμέτρων στην πλειοψηφία τους δεν είχαν αποκλίσεις μεταξύ των μεταχειρίσεων. Επίσης οι τιμές των παραμέτρων που αποτελούν δείκτη καταπόνησης στα

φυτά όπως το PRI και το Fv/Fm βρίσκονταν σε επίπεδα που υποδεικνύουν ότι η φωτοσυνθετική συσκευή λειτουργούσε χωρίς κάποια παρεμπόδιση. Στις μεταχειρίσεις που χρησιμοποιήθηκαν οι βιοδιεγέρτες και το βιολίπασμα δεν παρουσιάστηκαν

6. Βιβλιογραφία

6.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Aires, A. (2018). Hydroponic Production Systems: Impact on Nutritional Status and Bioactive Compounds of Fresh Vegetables. Στο M. Asaduzzaman & T. Asao (επιμ.), *Vegetables - Importance of Quality Vegetables to Human Health*. Portugal: InTechOpen, 55-62.

Aslanidou, M., Elvanidi, A., Mourantian, A., Levizou, E., Mente, E. & Katsoulas, N. (2023). Nutrients Use Efficiency in Coupled and Decoupled Aquaponic Systems. *Horticulturae*, 9, 1077.

Ayipio, E. (2021). Utilizing Aquaculture Efficiently in Cucumber Production through Substrate Choice and Fertigation Management. (Αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή). Auburn University Alabama- Auburn.

Azarmi, R., Tabatabaei, S. J. & Chaparzadeh, N. (2018). Interactive effects of Mg and shading on the yield, physiology and antioxidant activity in cucumber grown in hydroponics. *Journal of Plant Process and Function*, 6, 63-71.

Baddadi, S., Bouadila, S., Ghorbel, W., & Guizani, A. (2019). Autonomous greenhouse microclimate through hydroponic design and refurbished thermal energy by phase change material. *Journal of Cleaner Production*, 211, 360-379.

Badiola, M., Mendiola, D. & Bostock, J. (2012). Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26-35.

Benton Jones Jr., J. (2005). *Hydroponics A Practical Guide for the Soilless Grower*. Florida. CRC Press.

Bjørndal, T., Dey, M. & Tusvik, A. (2023). Economic analysis of the contributions of aquaculture to future food security. *Aquaculture*, 578, 740071.

- Baltazar, M., Correia, S., Guinan, K. J., Sujeeth, N., Bragança, R., & Gonçalves, B. (2021). Recent Advances in the Molecular Effects of Biostimulants in Plants: An Overview. *Biomolecules*, 11, 1096.
- Blanchard, E., C. (2019). Improving Greenhouse Cucumber Production in De-coupled Aquaponic Systems. (Αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή). Auburn University Alabama-Auburn.
- Blanchard, E., C., Wells D., E., Pickens, J. M. & Blersch, D., M. (2020). Effect of pH on Cucumber Growth and Nutrient Availability in a Decoupled Aquaponic System with Minimal Solids Removal. *Horticulturae*, 6, 10.
- Bulgari, R., Franzoni, G. & Ferrante, A. (2019). Biostimulants Application in Horticultural Crops under Abiotic Stress Conditions. *Agronomy*, 9, 306.
- Buzby, K. M. & Lin, L. S. (2014). Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquacultural Engineering*, 63, 39-44.
- Celletti, S., Astolfi, S., Guglielmo, N., Colla, G., Cesco, S., & Mimmo, T. (2020). Evaluation of a Legume-Derived Protein Hydrolysate to Mitigate Iron Deficiency in Plants. *Agronomy*, 10, 1942.
- Cheng, T., Rivard, B., Sánchez-Azofeifa, A. G., Féret, J.-B., Jacquemoud, S., & Ustin, S. L. (2014). Deriving leaf mass per area (LMA) from foliar reflectance across a variety of plant species using continuous wavelet analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 28–38.
- Colt, J., Schuur, A. M., Weaver, D., & Semmens, K. (2021). Engineering Design of Aquaponics Systems. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 30, 1–95.
- Colt, J. & Schuur, A. M. (2021). Comparison of nutrient costs from fish feeds and inorganic fertilizers for aquaponics systems. *Agricultural Engineering*, 95, 102205.
- Cristofano, F., El-Nakhel, C. & Rouphael Y. (2021). Biostimulant Substances for Sustainable Agriculture: Origin, Operating Mechanisms and Effects on Cucurbits, Leafy Greens, and Nightshade Vegetables Species. *Biomolecules*, 11, 1103.

- David, L. H., Pinho, S. M., Agostinho, F., Costa, J. I., Portella, M. C., Keesman, K. J. & Garcia, F. (2022). Sustainability of urban aquaponics farms: An emergy point of view. *Journal of Cleaner Production*, 331, 129896.
- Delaide, B., Goddek, S., Gott J., Soyeurt, H. & Jijakli, M. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water*, 8, 467.
- Derikvand, P., Sauter, B. & Stein, L. Y. (2021). Development of an aquaponics microbial inoculum for efficient nitrification at acidic pH. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105, 7009-7021.
- Doğru, A. (2020). Photochemical Responses of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Plants to Heat Stress. *Notulae Scientia Biologicae*, 12, 829-835.
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14.
- Drizo, A. & Shaikh, M. O. (2023). An assessment of approaches and techniques for estimating water pollution releases from aquaculture production facilities. *Marine Pollution Bulletin*, 196, 115661.
- Elvanidi, A., Reascos, C. M. B., Gourzoulidou, E., Kunze, A., Max, J. F. J., Katsoulas, N., & Max, J. F. J. (2020). Implementation of the circular economy concept in greenhouse hydroponics for ultimate use of water and nutrients. *Horticulturae*, 6, 1-16.
- Gamon JA, Peñuelas J, Field CB. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35-44.
- Gericke, W. F. (1937). Hydroponics-Crop Production in Liquid Culture Media. *Science*, 85, 177-178.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H. & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability*, 7, 4199-4224.

Goddek S, Joyce A, Kotzen B & Dos-Santos M. (2019). Aquaponics and global food challenges. Aquaponics food production systems. Στο S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (επιμ.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Switzerland: Springer, 3-19.

Güzel, S., Ödün, U. C., Cakmakci, T. & Cakmakci, Ö. (2018). The Effect of Cucumber (*Cucumis sativus*) Cultivation in Aquaponic and Hydroponic Systems on Plant Nutrient Elements and Antioxidant Enzyme Activity. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27, 553-558.

Hosseinzadeh, S., Verheust, Y., Bonarrigo, G., & Van Hulle, S. (2017). Closed hydroponic systems: operational parameters, root exudates occurrence and related water treatment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16, 59–79.

Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A. C., & Khanal, S. K. (2015). Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology*, 188, 92–98.

Ji-Yong, S., Xiao-Bo, Z., Jie-Wen, Z., Kai-Liang, W., Zheng-Wei, C., Xiao-Wei, H., De-Tao, Z. & Holmes, M. (2012). Nondestructive diagnostics of nitrogen deficiency by cucumber leaf chlorophyll distribution map based on near infrared hyperspectral imaging. *Scientia Horticulturae*, 138, 190–197.

Joyce, A., Goddek, S., Kotzen, B., & Wuertz, S. (2019). Aquaponics: Closing the Cycle on Limited Water, Land and Nutrient Resources. Στο S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (επιμ.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Switzerland: Springer, 19-35.

Kalaji, H. M., Račková, L., Paganová, V., Swoczyna, T., Rusinowski, S., & Sitko, K. (2018). Can chlorophyll- a fluorescence parameters be used as bio-indicators to distinguish between drought and salinity stress in *Tilia cordata* Mill? *Environmental and Experimental Botany*, 152, 149–157.

Kalvakaalva, R., Smith, M., Prior, S. A., Runion, G. B., Ayipio, E., Blanchard, C., Wells, D., Blerch, D., Adhikari, S., Prasad, R., Hanson, T. R. & Higgins, B. T. (2023). Life cycle

assessment of a decoupled biofloc aquaponics facility across seasons. *Journal of Cleaner Production*, 429, 139356.

Katsoulas, N., Savvas, D., Kitta, E., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2015). Extension and evaluation of a model for automatic drainage solution management in tomato crops grown in semi-closed hydroponic systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 113, 61-71.

Kauffman, G. L., Kneivel, D. P., & Watschke, T. L. (2007). Effects of a Biostimulant on the Heat Tolerance Associated with Photosynthetic Capacity, Membrane Thermostability, and Polyphenol Production of Perennial Ryegrass. *Crop Science*, 47, 261.

Klinger, D., & Naylor, R. (2012). Searching for Solutions in Aquaculture: Charting a Sustainable Course. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 247–276.

Krastanova M., Sirakov, I., Ivanova-Kirilova S., Yarkov, D., Orozova, P. (2022). Aquaponic systems: biological and technological parameters. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 36, 305-316.

Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K. & Thompson, R. E. (2014). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67-74.

Mahmoud, M., M., M., Darwish, R. & Bassiuny, A., M. (2023). Development of an economic smart aquaponic system based on IoT. *Journal of Engineering Research*, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.08.024>

Mandal, S., Anand, U., Lopez-Buzio, J., Radha, Kumar, M., Lal, K., M., Tiwari, R., K. & Dey, A. (2023). Biostimulants and environmental stress mitigation in crops: A novel and emerging approach for agricultural sustainability under climate change. *Environmental Research*, 233, 116357.

Mariod, A. A., Mirghani, M. E. S. & Hussein, I. (2017). Unconventional Oilseeds and Oil Sources. London: Academic Press, 89-94.

Md Noor, N. & Harun, S. N. (2022). Towards Sustainable Aquaculture: A Brief Look into Management Issues. *Applied Sciences*, 12, 7448.

- Meng X, Bai S, Wang S, Pan Y, Chen K, Xie K, Wang M and Guo S (2023) The sensitivity of photosynthesis to magnesium deficiency differs between rice (*Oryza sativa* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14, 1164866.
- Mourantian, A., Aslanidou, M., Mente, E., Katsoulas, N. & Levizou, E. (2023). Basil functional and growth responses when cultivated via different aquaponic and hydroponics systems. *PeerJ*, 11, e15664.
- Mukarami, K. & Ibaraki, Y. (2018). Time course of the photochemical reflectance index during photosynthetic induction: its relationship with the photochemical yield of photosystem II. *Physiologia Plantarum*, 165, 524-536.
- Munoz, P., Paranjpe, A., Montero, J. I., & Anton, A. (2012). Cascade Crops: an Alternative Solution for Increasing Sustainability of Greenhouse Tomato Crops in Mediterranean Zone. *Acta Horticulturae*, 927, 801-806.
- Nakphet, S., Ritchie, R. J., & Kiriratnikom, S. (2016). Aquatic plants for bioremediation in red hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis mossambicus*) recirculating aquaculture. *Aquaculture International*, 25, 619–633.
- Neocleous, D., & Savvas, D. (2016). NaCl accumulation and macronutrient uptake by a melon crop in a closed hydroponic system in relation to water uptake. *Agricultural Water Management*, 165, 22-32.
- Lichtenthaler H. K., Wellburn A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591-592.
- Liu, Y., Wu, C., Tian, F., Wang, X., Gamon, J. A., Wong, C. Y. S., Gonsamo, A. & Jassal, R. S. (2022). Modeling plant phenology by MODIS derived photochemical reflectance index (PRI). *Agricultural and Forest Meteorology*, 324, 109095.
- Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens, K. (2014). *An International Survey of Aquaponics Practitioners*. *PLoS ONE*, 9, e102662.
- Omar, R., Mahat, S. B., Muhamad Saaufi, M. K., & Aida Isma, M. I. (2023). Ammonia conversion in an aquaponics system using activated carbon-coated and non-coated

bioball in the biological treatment tank. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.678>.

Ohno, Y. (2000). CIE Fundamentals for Color Measurements. In IS&Ts NIP16: 2000 International Conference on Digital Printing Technologies, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 540-545.

Padilla, F. M., Peña-Fleitas, M. T., Gallardo, M., Giménez, C., & Thompson, R. B. (2017). Derivation of Sufficiency Values of a Chlorophyll Meter to Estimate Cucumber Nitrogen Status and Yield. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 54–64.

Paris, H. S., Tadmor, Y. & Schaffer, A. A. (2017). Cucurbitaceae Melons, Squash, Cucumber. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, 3, 209–217.

Park, Y. & Williams, K. A. (2024). Organic Hydroponics: A Review. *Scientia Horticulturae*, 324, 112604.

Pinkard, E. A., Patel, V., & Mohammed, C. (2006). Chlorophyll and nitrogen determination for plantation-grown Eucalyptus nitens and E. globulus using a non-destructive meter. *Forest Ecology and Management*, 223, 211–217.

Ramírez-Pérez, L. J., Morales-Díaz, A. B., Benavides-Mendoza, A., De-Alba-Romenus, K., González-Morales, S. & Juárez-Maldonado, A. (2018). Dynamic modeling of cucumber crop growth and uptake of N, P and K under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 234, 250-260.

Rodgers, D., Won, E., Timmons, M. B. & Mattson, N. (2022). Complementary Nutrients in Decoupled Aquaponics Enhance Basil Performance. *Horticulturae*, 8, 111.

Savvas, D., Gianquinto, G., Tuzel Y. & Gruda N. (2013). Soilless culture. Στο Food and Agriculture Organization of the United Nations (επιμ.), Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops : principles for Mediterranean climate areas. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 303-354.

Savvas, D., & Passam, H., 2002. Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Athens. Embryo Publications.

Sanchez-Quintero, A., Fernandes, S. C. M. & Beigbeder, J. B. (2023). Overview of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants produced from wastewater and CO₂ streams towards sustainable agriculture: A review. *Microbiological Research*, 277, 127505.

Schmautz, Z., Espinal, C. A., Smits, T. H. M., Frossard, E. & Junge, R. (2021). Nitrogen transformations across compartments of an aquaponic system. *Aquaculture Engineering*, 92, 102145.

Sharma, V., Sharma, S. & Sandhu, K., S. (2020). Cucumber (*Cucumis sativus* L.). Στο G. A. Nayik & A. Gull (επιμ.), *Antioxidants in Vegetables and Nuts - Properties and Health Benefits*. Singapore: Springer, 333-340.

Sotiroudis, G., Melliou, E., Sotiroudis, T. & Chinou I. (2010). Chemical analysis, antioxidant and antimicrobial activity of three Greek cucumber (*Cucumis sativus*) cultivars. *Journal of Food Biochemistry*, 34, 61-78.

Stanghellini, C., Kempkes, F. L. K., Pardossi, A., & Incrocci, L. (2005). Closed Water Loop in Greenhouses : Effect of Water Quality and Value of Produce. *Acta Horticulturae*, 691, 233-242.

Stathopoulou, P., Berillis, P., Vlahos, N., Nikouli, E., Kormas, K. A., Levizou, E., Katsoulas, N. & Mente, E. (2021). Freshwater-adapted sea bass *Dicentrarchus labrax* feeding frequency impact in a lettuce *Lactuca sativa* aquaponics system. *PeerJ*, 9, e11522.

Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., & Srivastava, A. (n.d.). Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient. *Advances in Photosynthesis and Respiration*, 321–362.

Suárez-Cáceres, G. P., Lobillo-Eguíbar, J., Fernández-Cabanás, V. M., Quevedo-Ruiz, F. J., & Pérez-Urrestarazu, L. (2021). Polyculture production of vegetables and red hybrid tilapia for self-consumption by means of micro-scale aquaponic systems. *Aquacultural Engineering*, 95, 102181.

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, M. I. & Murphy, A. (2017). Φυσιολογία και Ανάπτυξη Φυτών. Αθήνα. Utopia.

Taufik, M., Ismail, T. I. T., Manan, H., Ikhwanuddin, M., Salam, A. I. A., Rahim, A. I. A., Ishak, A. N., Kamaruzzan, A. S., Draman, A. S. & Kasan, N. A. (2023). Synergistic effects of Recirculating Aquaculture System (RAS) with combination of clear water, probiotic and biofloc Technology: A review. *Aquaculture and Fisheries*, <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.07.006>

Tsoumalakou, E., Mente, E., Kormas, K. A., Katsoulas, N., Vlahos, N., Kapsis, P. & Levizou, E. (2022). Precise Monitoring of Lettuce Functional Responses to Minimal Nutrient Supplementation Identifies Aquaponic System's Nutrient Limitations and Their Time-Course. *Agriculture*, *12*, 1278.

Tsoumalakou, E., Mente, E., Vlahos, N., Levizou, E. (2023). Spinach Responds to Minimal Nutrient Supplementation in Aquaponics by Up-Regulating Light Use Efficiency, Photochemistry, and Carboxylation. *Horticulturae*, *9*, 291.

Verma, A., K., Chandrakant, M., H., John, V., C., Peter, R., M. & John, I, E. (2023). Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): Emerging trends and future prospects. *Technological Forecasting and Social Change*, *194*, 122709.

Xia, T., Chen, A., Zi, Y., Zhang, Y., Xu, Q., Gao, Y. & Li, C. (2023). Performance of fish sludge solubilization and phototrophic bioconversion by purple phototrophic bacteria for nutrient recovery in aquaponic system. *Waste Management*, *171*, 105-115.

Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A. & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in Plant Science: A Global Perspective. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 2049.

Yep, B. & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges - A review. *Journal of Cleaner Production*, *228*, 1586-1599.

Zhang, J., Feng, S., Yuan, J., Wang, C., Lu, T., Wang, H. & Yu, C. (2021). The Formation of Fruit Quality in Cucumis sativus L. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 729448.

Yildiz, H. Y., 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*, 13.

Zushi, K., & Matsuzoe, N. (2017). Using of chlorophyll a fluorescence OJIP transients for sensing salt stress in the leaves and fruits of tomato. *Scientia Horticulturae*, 219, 216–221.

6.2 Ελληνική Βιβλιογραφία

Καραμπουρνιώτης, Γ. (2012). Φυσιολογία Καταπονήσεων των φυτών. Οι Λειτουργίες των Φυτών Κάτω από Αντίξοες Συνθήκες Περιβάλλοντος. Αθήνα. Έμβρυο.

Μαυρογιαννόπουλος, Γ., Ν. (2017). Τεχνολογία Θερμοκηπίων. Αθήνα. Εκδόσεις Σταμούλης.

Ολύμπιος, Χ., Μ. (2001). Η Τεχνική της Καλλιέργειας των Κηπευτικών στα Θερμοκήπια. Αθήνα. Εκδόσεις Σταμούλη.

Σάββας, Δ. (2012). Καλλιέργεια Εκτός Εδάφους: Υδροπονία, Υποστρώματα. Αθήνα, Εκδόσεις Αγρότυπος.

Τσουμαλάκου, Ε. (2023). Λειτουργικές Αποκρίσεις Φυτών που Αναπτύσσονται υπό Συνθήκες Ενυδρειοπονίας (aquaponics). (Αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή). Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Χα, Ι., Α., & Πετρόπουλος, Σ. (2014). Γενική Λαχανοκομεία & Υπαίθρια Καλλιέργεια Λαχανικών. Βόλος. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Θεσσαλίας.

Χαραχούσιος, Θ. (2024). Μελέτη της Αποτελεσματικότητας Χρήσης Νερού και Λιπασμάτων Υδροπονικής και Ενυδρειοπονικής Καλλιέργειας και Επίδραση της Χρήσης Βιοδιεγερτών. (Αδημοσίευτη μεταπτυχιακή διατριβή). Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.