



Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Γεωπονίας Αμαλιάδας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΕΚΤΟΣ ΕΛΑΦΟΥΣ



Σπουδαστες: **Ντρούλιας Φίλιππος Μπατζής Αλέξης**

Επιβλέπων Καθηγητής: **Γεώργιος Σαλάχας**

ΑΜΑΛΙΑΔΑ 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	4
Περίληψη	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
Κεφάλαιο 1^ο Υδροπονική Καλλιέργεια	7
1.1. Ιστορική Αναδρομή εμφάνισης της υδροπονίας.....	7
1.2. Ορισμός και λειτουργία υδροπονικής καλλιέργειας.....	10
1.3. Κατανομή Υδροπονικής Καλλιέργειας στον Κόσμο	11
1.3.1. Παγκόσμια τάση υδροπονικής καλλιέργειας.....	11
1.3.2. Κατανομή τύπων υδροπονικών καλλιεργειών.....	13
1.3.3. Κατανομή τύπων υδροπονικής καλλιέργειας	13
1.3.4. Κατανομή Υδροπονικών Καλλιεργειών σε διάφορες περιοχές.....	15
Κεφάλαιο 2^ο Ανοικτά και Κλειστά Συστήματα Υδροπονικής Καλλιέργειας	17
2.1. Ταξινόμηση Υδροπονικών Συστημάτων Καλλιέργειας	17
2.2. Ανοικτά και κλειστά συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους.....	17
2.3. Τύποι Υδροπονικών Συστημάτων	19
2.3.1. Σημαντικότεροι τύποι συστημάτων υδροπονίας.....	20
2.3.2. Αεροπονικά Συστήματα (Aeroponic systems).....	25
2.3.3. Ακουαπονική ή Ενυδραιοπονία (Aquaponics).....	29
2.3.4. Καλλιέργεια σε υποστρώματα (Substrate culture)	33
2.3.5. Γενικές προδιαγραφές των χαρακτηριστικών των συστημάτων υδροπονίας	34
2.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υδροπονικής καλλιέργειας.....	36
2.5. Σύγκριση ανοικτών και κλειστών υδροπονικών συστημάτων	37
2.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τύπων των συστημάτων υδροπονικής καλλιέργειας.....	38

Κεφάλαιο 3^ο Θρεπτικά Διαλύματα Υδροπονικών Συστημάτων.....	41
3.1. Εισαγωγή.....	41
3.2. Θρεπτικό διάλυμα	42
3.2.1. pH του θρεπτικού διαλύματος	42
3.2.2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος.....	47
3.2.3. Σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος	49
3.3. Διαχείριση θρεπτικών διαλυμάτων	53
3.3.1. Ρύθμιση pH.....	55
3.3.2. Διαχείριση ηλεκτρικής αγωγιμότητας	56
3.3.3. Έλεγχος θερμοκρασίας	58
3.3.4. Οξυγόνωση θρεπτικού διαλύματος.....	59
3.4. Παρασκευή θρεπτικού διαλύματος.....	60
3.4.1. Σχεδιασμός θρεπτικών λύσεων.....	60
3.4.2. Ποιότητα νερού.....	61
3.4.3. Πηγή λιπάσματος για θρεπτικό διάλυμα	62
Κεφάλαιο 4^ο Συμπεράσματα	64
4.1. Γενικά Συμπεράσματα	64
4.2. Προοπτικές.....	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	68
Ελληνική	68

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική μελέτη πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στο Τμήμα Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Πατρών στην Αμαλιάδα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Σαλάχα για την πολύτιμη βοήθειά του τόσο κατά τη διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας όσο και για τη εκπαίδευσή μου στα συστήματα καλλιεργειών εκτός εδάφους.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υποστήριξη και την βοήθεια που μου παρείχαν τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η υδροπονία είναι μια κερδοφόρα, βιώσιμη μέθοδος καλλιέργειας και φιλική προς το περιβάλλον τεχνική για την καλλιέργεια φυτών χωρίς έδαφος. Είναι ο ταχύτερα αναπτυσσόμενος γεωργικός τομέας και κερδίζει γρήγορα δυναμική και δημοτικότητα και είναι πιθανό να κυριαρχήσει στην παραγωγή τροφίμων στο μέλλον. Τα θρεπτικά διαλύματα και η διαχείρισή τους είναι οι ακρογωνιαίοι λίθοι ενός επιτυχημένου υδροπονικού συστήματος και είναι οι πιο σημαντικοί καθοριστικοί παράγοντες της απόδοσης και της ποιότητας της καλλιέργειας, οι οποίοι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον βαθμό στον οποίο λαμβάνονται τα θρεπτικά συστατικά των φυτών από το θρεπτικό διάλυμα. Όλα τα θρεπτικά συστατικά του διαλύματος παρέχονται απευθείας στο φυτό σε ισορροπημένες αναλογίες και η σύνθεση του διαλύματος πρέπει να αντικατοπτρίζει τις αναλογίες των επιμέρους στοιχείων της καλλιέργειας. Η ισορροπημένη παροχή θρεπτικών ουσιών αποτελεί προϋπόθεση για την αποτελεσματική χρήση των πόρων και η σταθεροποίηση του pH του διαλύματος, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, του επιπέδου O_2 και της θερμοκρασίας είναι απαραίτητα για τη βέλτιστη απόδοση των καλλιεργειών στα υδροπονικά συστήματα. Στην παρούσα εργασία, συζητείται η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος, η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών που επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες και η διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υδροπονική είναι μια μέθοδος γεωργίας που αναπτύχθηκε για την καλλιέργεια φυτών χωρίς χώμα (Gericke 1945). Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα θρεπτικό διάλυμα και καλλιεργώντας φυτά είτε σε ένα αδρανές υπόστρωμα εκτός του εδάφους, που καλείται μερικές φορές καλλιέργεια εκτός εδάφους (soiless culture), είτε χωρίς καθόλου υπόστρωμα, που συνιστά την πραγματική υδροπονία (Jensen 1997). Το έδαφος δρα ως μέσο αποθήκευσης των διαφόρων θρεπτικών συστατικών που απαιτούνται για την ανάπτυξη. Όταν το νερό εισχωρεί στο έδαφος, απορροφά αυτά τα θρεπτικά συστατικά με τη μορφή αλάτων, όπου μπορούν να αλληλεπιδράσουν πιο εύκολα με τις ρίζες των φυτών (Campbell & Reece 2002). Στην υδροπονία, η ανάγκη για χώμα εξαλείφεται με τη χρήση θρεπτικού διαλύματος. Αυτό το θρεπτικό διάλυμα είναι ένα μείγμα νερού και θρεπτικών αλάτων, αναμειγμένα σε συγκεκριμένες συγκεντρώσεις για να καλύψει τις ανάγκες του φυτού (Resh 2013).

Παρόλο που πολλοί πιστεύουν ότι είναι μια επαναστατική τεχνολογία, η υδροπονία δεν έχει ακόμη ξεπεράσει την υπαίθρια γεωργία ως την κύρια μέθοδο παραγωγής για πολλές καλλιέργειες στη γεωργική βιομηχανία, αν και υπάρχει περιθώριο για αισιοδοξία (Jensen, 1997). Επί του παρόντος, η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την καλλιέργεια ντοματών, αγγουριών, πιπεριών, μαρουλιού και μιας ποικιλίας ειδικών καλλιεργειών (Brentlinger 1997). Η βιομηχανία έχει επικεντρωθεί στην καλλιέργεια ντομάτας, αγγουριού και μαρουλιού, καθώς αυτές οι καλλιέργειες έχουν δείξει το εισόδημα που απαιτείται για να κάνει μια επιχείρηση υδροπονίας κερδοφόρα (Jensen 1997).

Επί του παρόντος, στον τομέα της υδροπονίας, υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή συστημάτων. Αυτό θα εξαρτηθεί κυρίως από τον τύπο του φυτού και τυχόν περιορισμούς που επιβάλλονται από τον καλλιεργητή ή/και την περιοχή καλλιέργειας (Jensen, 1997). Σε γενικές γραμμές, αυτές οι τεχνικές μπορούν να χωριστούν σε δύο τύπους συστημάτων: ανοιχτό και κλειστό (Abd-Elmoniem et al. 2006). Ενώ αυτοί οι τύποι συστήματος μπορούν να μοιράζονται πολλά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού, διαφέρουν ουσιαστικά στον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζονται το θρεπτικό διάλυμα.

Κεφάλαιο 1^ο Υδροπονική Καλλιέργεια

1.1. Ιστορική Αναδρομή εμφάνισης της υδροπονίας

Κατά τους αρχαίους χρόνους, οι άνθρωποι αντιμετώπισαν πολλές προκλήσεις κατά την καλλιέργεια. Ο άνθρωπος εξαρτιόταν ανέκαθεν από τις καλλιέργειες και ως εκ τούτου ήθελε να μάθει τι κάνει τα φυτά να μεγαλώνουν. Το έδαφος είναι μια μυστηριώδης ουσία που παρέχει κάποιες κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών. Οι ασθένειες και νοσήματα των φυτών συχνά μειώνουν ή ακόμη και καταστρέφουν τις αποδόσεις των φυτών και η κοινωνία βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ευημερία των φυτών. Όταν δεν υπήρχαν σοδειές, οι κοινωνίες υπέφεραν από λιμό και θάνατο. Αυτό οδηγούσε σε πολέμους και θανάτους. Αυτό επισημαίνει ότι οι άνθρωποι εξαρτώνται από τις καλλιέργειες για την επιβίωσή τους. Εάν οι άνθρωποι μάθαιναν περισσότερα για τις αιτίες των απωλειών των καλλιεργειών, θα μπορούσαν να προσπαθήσουν να τις σταματήσουν. Αυτό έγινε το θεμέλιο της γεωργίας - ανακαλύπτοντας γιατί τα φυτά αναπτύσσονται έτσι ώστε οι άνθρωποι να μπορούν να τα καλλιεργούν υπό ευνοϊκές συνθήκες, οδηγώντας σε υψηλές αποδόσεις (Resh, 2015).

Γρήγορα οι αρχαίοι πολιτισμοί συνειδητοποίησαν ότι το νερό ήταν απαραίτητο για κάθε γεωργική πρακτική, έτσι οι πληθυσμοί συγκεντρώθηκαν σε περιοχές που είχαν άφθονη πηγή νερού που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την καλλιέργεια φυτών. Η καλλιέργεια εκτός εδάφους ή υδροπονία (soilless agriculture) χρονολογείται εδώ και 4000 χρόνια και έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς βοτανολόγους και φυσιολόγους στα εργαστηριακά τους πειράματα για την κατανόηση της διατροφής και της φυσιολογίας των φυτών. Οι πρώτες αναφορές υδροπονίας αναφέρονται στον Αιγύπτιο. Αρκετές εκατοντάδες χρόνια π.Χ., η καλλιέργεια φυτών στο νερό ήταν ήδη πραγματικότητα. Οι κρεμαστοί κήποι της Βαβυλώνας, οι πλωτοί κήποι των Αζτέκων στο Μεξικό και οι Κινέζοι δημιούργησαν επίσης μια μορφή υδροπονίας. Η παραγωγή εκτός εδάφους τεκμηριώνεται ότι γεννήθηκε από το εργαστήριο του Θεόφραστου (372-287 π.Χ.) για την καλύτερη κατανόηση των φυτικών διατροφικών απαιτήσεων για ανάπτυξη και εξέλιξη (Resh, 2015).

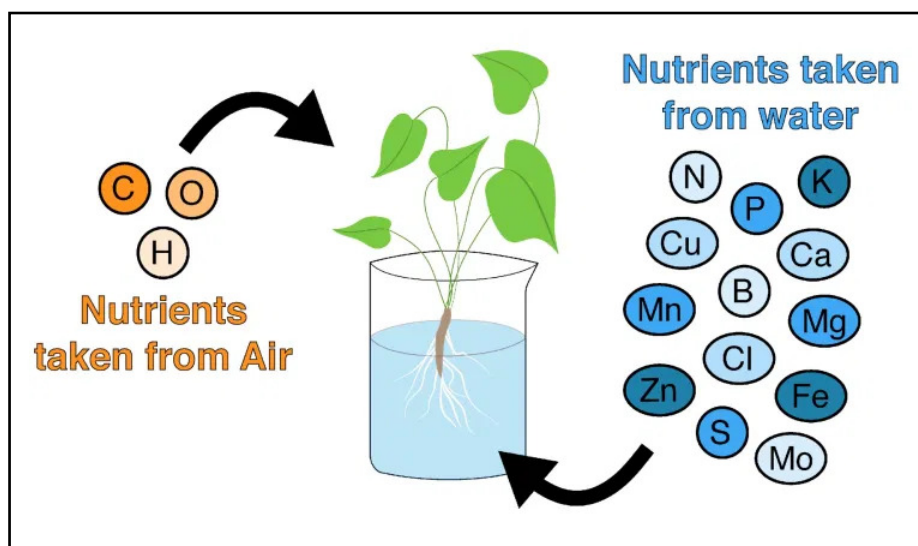
Πολλοί αρχαίοι πολιτισμοί χρησιμοποιούσαν και τεκμηρίωσαν την υδροπονία, ωστόσο δεν υπάρχουν εκτεταμένες καταγεγραμμένες πληροφορίες γι' αυτό. Ωστόσο, το παλαιότερο δημοσιευμένο έργο για την ανάπτυξη καλλιεργειών χωρίς έδαφος ήταν το

βιβλίο του 1627, των *Sylva Sylvarum* του Sir Francis Bacon, πατέρα της επιστημονικής μεθόδου, το οποίο το ονόμασε «υδατοκαλλιέργεια». Ωστόσο, ο Ιρλανδός επιστήμονας Robert Boyle περιέγραψε το πρώτο πείραμα ανάπτυξης φυτών το 1666, στο οποίο οι ρίζες των φυτών βυθίστηκαν στο νερό. Το 1699, ο John Woodward δημοσίευσε πειράματα υδατοκαλλιέργειας με δυόσμο και διαπίστωσε ότι τα φυτά σε λιγότερο καθαρές πηγές νερού αναπτύχθηκαν καλύτερα από αυτά στο απεσταγμένο νερό. Το 1860, οι Γερμανοί βοτανολόγοι Julius von Sachs και Wilhelm Knor τελειοποίησαν για πρώτη φορά τη μέθοδο της καλλιέργειας φυτών πάνω από το έδαφος χρησιμοποιώντας διαλύματα μεταλλικών θρεπτικών συστατικών μέσω πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν το 1842 και το 1895 αντίστοιχα (Resh, 2015).

Το 1600, ο Βέλγος Jan van Helmont, διαπίστωσε ότι το έδαφος παρείχε λιγότερο από το 1% των αναγκών ενός φυτού για ανάπτυξη και εξέλιξη (Christie, 2014). Αυτό το εύρημα οδήγησε σε περαιτέρω επιστημονική έρευνα για την κύρια πηγή φυτικών θρεπτικών ουσιών για ανάπτυξη. Το παλαιότερο δημοσιευμένο έργο για την ανάπτυξη καλλιεργειών εκτός εδάφους ήταν το βιβλίο του 1627, των *Sylva Sylvarum* του Sir Francis Bacon, πατέρα της επιστημονικής μεθόδου, το οποίο το ονόμασε «υδατοκαλλιέργεια». Οι Sachs & Knor (1859 - 1865) ανέπτυξαν την καλλιέργεια με θρεπτικά στοιχεία (nutri-culture), ένα υδατικό διάλυμα που περιείχε άζωτο, φώσφορο, κάλιο, ασβέστιο, θείο και μαγνήσιο. Αυτή η τεχνική παρέμεινε ως εργαστηριακή τεχνική μέχρι το 1929 όταν ο W.F. O Gericke καλλιέργησε με επιτυχία καρπούς ντομάτας εκτάσεως εικοσιπέντε ποδιών σε εξωτερικούς χώρους όπου οι ντομάτες συγκομίζονται με σκάλα (Resh, 2015). Εμπορευματοποίησε την καλλιέργεια λαχανικών και καλλωπιστικών φυτών χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική (Resh, 2015). Δημιούργησε τη λέξη «υδροπονική» για να περιγράψει το σύστημα παραγωγής καλλιέργειας με βάση τη θρεπτικά στοιχεία. Ο όρος υδροπονική είναι ελληνικής προέλευσης («ύδωρ=νερό, πόνος εργασία). Στη συνέχεια η υδροπονική παραγωγή μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιήθηκε στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες (Christie, 2014).

Η πρώτη κυκλοφορία εμπορικού συστήματος υδατοκαλλιέργειας έλαβε χώρα το 1929 μέσω του καθηγητή William Frederick Gericke από το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας στο Μπέρκλεϋ. Η επινόηση του όρου «υδροπονική» έγινε από τον Gericke το 1937 προκειμένου να περιγραφεί η ανάπτυξη της καλλιέργεια με το ριζικό σύστημα να αναπτύσσεται σε ένα υγρό μέσο (Σχήμα 1). Αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί ότι, ο

Gericke το 1940 έγραψε το βιβλίο με τίτλο: «Πλήρης οδηγός για την καλλιέργεια φυτών εκτός εδάφους (Complete Guide to Soilless Gardening)». Ωστόσο, δύο άλλοι καλλιεργητές στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια ονόμασαν οι Dennis R. Hoagland και Daniel I. Arnon από το 1938 είχαν αναπτύξει γνωστό θρεπτικό διάλυμα με το όνομα Hoagland διάλυμα που χρησιμοποιείται στην υδροπονία μέχρι σήμερα. Από το 1930, στη Νήσο Γουέικ, η οποία συνιστά μια βραχώδη ατόλη στον Ειρηνικό Ωκεανό, και το οποίο χρησιμοποιείται ως στάση ανεφοδιασμού για τις αερογραμμές Pan American, χρησιμοποιήθηκε η υδροπονία προκειμένου να καλλιεργηθούν λαχανικά για τους επιβάτες. Η τεχνική της υδροπονικής ήταν αναγκαία για το νησί Γουέικ δεδομένου ότι δεν υπήρχε έδαφος, και ήταν οικονομικά ανέφικτη η αεροπορική μεταφορά των φρέσκων λαχανικών. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960 στην Αγγλία, ο Allen Cooper ανέπτυξε το σύστημα NFT (Nutrient Film Technique = Τεχνική λεπτής θρεπτικής στοιβάδας). Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον από πληθώρα εταιρειών ανά τον κόσμο που κάνουν συστηματική έρευνα όσον αφορά στην υδροπονική γεωργία. Επιπλέον, η NASA έχει πραγματοποιήσει εκτενή για το ελεγχόμενο οικολογικό σύστημα υποστήριξης ζωής (CELSS) (EI-Kazzaz, 2017).



Σχήμα 1: Σύσταση θρεπτικού διαλύματος. Το φυτό λαμβάνει τρία θρεπτικά συστατικά από τον αέρα - C, H και O καθώς και δεκατρία θρεπτικά συστατικά από συμπληρωματικό νερό: N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Cl και Mo. Πηγή:

Lagomarsino & Senft, 2019

1.2. Ορισμός και λειτουργία υδροπονικής καλλιέργειας

Η καλλιέργεια εκτός εδάφους ή υδροπονική καλλιέργεια είναι τεχνητή με την προϋπόθεση ότι η παροχή θρεπτικών συστατικών και νερού στα φυτά λαμβάνει χώρα μέσω μιας τεχνητής δεξαμενής. Σύμφωνα με τους Savvas et al. (2013), η υδροπονική καλλιέργεια μπορεί να οριστεί ως «οποιαδήποτε μέθοδος καλλιέργειας φυτών χωρίς τη χρήση του εδάφους για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, στην οποία τα ανόργανα θρεπτικά συστατικά που απορροφώνται από τις ρίζες παρέχονται μέσω του νερού άρδευσης». Η μοναδική και παλιά τεχνική υδροπονικής καλλιέργειας δύναται να αποτελέσει ένα δοχείο με νερό μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα διάλυση ανόργανων χημικών ουσιών (διάλυμα θρεπτικών ουσιών) προκειμένου να παραχθούν όλα τα θρεπτικά συστατικά που είναι απαραίτητα για τα φυτά. Τυπικά η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως καλλιέργεια διαλύματος ή καλλιέργεια νερού.

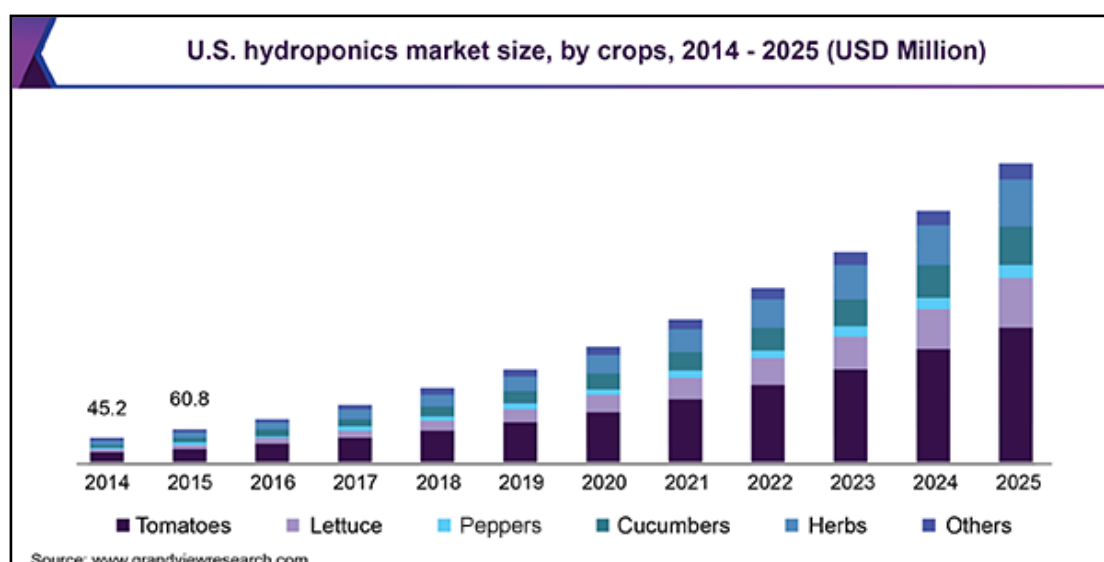
Η διαδικασία της καλλιέργειας φυτών με τη χρήση της υδροπονικής μεθόδου είναι σε θέση να ενισχύσει την ανάπτυξη των φυτών ενώ λαμβάνει χώρα έλεγχος των ποσοτήτων νερού, των μεταλλικών αλάτων και ειδικότερα του διαλυμένου οξυγόνου. Η βασικότερα ιδέα της ανάπτυξης της υδροπονικής καλλιέργειας είναι αρκετά απλή και λαμβάνει χώρα όταν οι ρίζες των φυτών αιωρούνται σε νερό που κινείται και ως εκ τούτου λαμβάνει χώρα γρήγορη απορρόφηση θρεπτικών συστατικών και οξυγόνου. Στην περίπτωση που η περιεκτικότητα του οξυγόνου είναι ανεπαρκής, τα φυτά δεν αναπτύσσονται με σταθερό ρυθμό και ως εκ τούτου λαμβάνει χώρα αργή ανάπτυξη. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή εάν υπάρχει περίσσεια οξυγόνου, λαμβάνει χώρα επιτάχυνση της ανάπτυξης των φυτών. Συνεπώς ο εκάστοτε καλλιεργητής είναι υπεύθυνος για την εξισορρόπηση του συνδυασμού νερού, θρεπτικών ουσιών και οξυγόνου, ανάλογα με τις ανάγκες του φυτού, με απώτερο στόχο να αυξήσει τόσο την απόδοση όσο και την ποιότητα των φυτών. Για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα, λαμβάνονται υπόψη μερικές ορισμένες επιπλέον παράμετροι όπως της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των επιπέδων CO₂, της έντασης του φωτός, του αερισμού, του pH και της γενετικής σύνθεσης του φυτού. Ουσιαστικά, αυτό θα έκανε κάθε προσεκτικός καλλιεργητής. Η γεωργία εκτός του εδάφους περιλαμβάνει την υδρο-γεωργία (Υδροπονική), την υδατοκαλλιέργεια (Aquaponics), την αεροπονική γεωργία (Aeroponics) καθώς και τη γεωργία που χρησιμοποιεί υποστηρικτικούς μεσολαβητές. Ωστόσο, στα φυτά υδροπονικής καλλιέργειας δεν χρειάζεται χώμα, αλλά πρέπει να εφοδιάζονται με ορυκτά: αζώτου, καλίου φωσφόρου, ασβεστίου, μαγνησίου, θείου,

σιδήρου, μαγγανίου, χαλκού, ψευδαργύρου, μολυβδαινίου, βορίου, γλωρίου και βιταμινών. Επιπλέον χρειάζονται νερό, φως, διοξείδιο του άνθρακα και οξυγόνο στη ρίζα τους (EI-Kazzaz, 2017).

1.3. Κατανομή Υδροπονικής Καλλιέργειας στον Κόσμο

1.3.1. Παγκόσμια τάση υδροπονικής καλλιέργειας

Το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς υδροπονίας εκτιμήθηκε σε 1,33 δις. USD το 2018 και προβλέπεται αύξησή του με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 22,52% από το 2019 έως το 2025. Η εν λόγω αυξημένη ανάπτυξη οφείλεται στην αύξηση της χρήση υδροπονικών συστημάτων ιδιαίτερα για καλλιέργεια λαχανικών σε εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, λαμβάνει χώρα αύξηση του ποσοστού υιοθέτησης εναλλακτικών μεθόδων εξαιτίας της αυξανόμενης ευαισθητοποίησης των καταναλωτών όσον αφορά στις αρνητικές επιπτώσεις των φυτοφαρμάκων και των παραγόντων τεχνητής ωρίμανσης στην ποιότητα των φυτών και ως εκ τούτου στην υγεία των ανθρώπων. Αυτό έχει ως συνέπεια την αυξανόμενη ζήτηση για υδροπονικά προϊόντα, δεδομένου ότι η μέθοδος της υδροπονίας εξαλείφει την ανάγκη για φυτοφάρμακα και ως εκ τούτου παρέχει θρεπτικά ανώτερα φυτά. Επιπρόσθετα το χαμηλό κόστος ανάπτυξης των συστημάτων αυτών καθώς και η εύκολη λειτουργία τους δύναται να ενισχύσει την υιοθέτησή τους στο εγγύς μέλλον (Grand View Research, 2020).



Σχήμα 2. Εξέλιξη της υδροπονικής αγοράς στις Η.Π.Α. Πηγή: Grand View Research, 2020

Όπως έχει αναφερθεί η τεχνική της υδροπονικής καλλιέργειας συνιστά καλλιέργεια φυτών χωρίς έδαφος, όπου γίνεται αντικατάσταση του εδάφους από ένα μεταλλικό διάλυμα το οποίο καλύπτει τις ρίζες του φυτού. Έτσι οι ρίζες των φυτών βυθίζονται κάτω από το χημικό διάλυμα και ελέγχονται περιοδικά για να διασφαλιστεί ότι διατηρείται κατάλληλη χημική σύνθεση για την ανάπτυξή τους. Ως εκ τούτου, η τεχνική της υδροπονίας μειώνει την εμφάνιση ασθενειών που δημιουργούνται από τους οργανισμούς του εδάφους. Επιπλέον, τα υδροπονικά φυτά παράγουν υψηλότερη απόδοση από ό, τι παρόμοια φυτά που αναπτύσσονται στο έδαφος λόγω του κατάλληλου ελέγχου των θρεπτικών συστατικών (Grand View Research, 2020).

Η αύξηση του πληθυσμού έχει ως συνέπεια την αύξηση της ζήτησης για τρόφιμα σε όλο τον κόσμο. Σύμφωνα με την Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ), ο παγκόσμιος πληθυσμός αναμένεται να φθάσει τα 9,1 δισεκατομμύρια έως το 2050, για τον οποίο η παραγωγή τροφίμων αναμένεται να αυξηθεί από 25% σε 70%. Αυτό θα έχει ως συνέπεια την αύξηση της ζήτησης εναλλακτικών τεχνολογιών γεωργίας που θα είναι σε θέση να δώσουν υψηλότερες αποδόσεις καλλιεργειών σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Στις περιφέρειες της Ασίας-Ειρηνικού και της Ευρώπης, όπου οι εκτάσεις αρόσιμης γης και τα ποσοστά νερού μειώνονται, λαμβάνει χώρα εκτεταμένη υιοθέτηση εναλλακτικών τεχνολογιών για την επίτευξη γεωργικής παραγωγής υψηλής απόδοσης, γεγονός που πρόκειται να ενισχύσει την ανάπτυξη της αγοράς (Grand View Research, 2020).

Οι εξελίξεις στον έλεγχο του κλίματος, την τεχνική λεπτής θρεπτικής στοιβάδας και τις τεχνολογίες ανίχνευσης, μεταξύ άλλων, αναμένεται να αποτελέσουν θετικά στοιχεία για την ανάπτυξη της υδροπονικής αγοράς στο εγγύς μέλλον. Οι υδροπονικές μέθοδοι γεωργίας προσφέρουν στους καταναλωτές διάφορους τρόπους παρακολούθησης και διαχείρισης των καλλιεργειών τους με πολλούς αισθητήρες, διαδικτυακές πλατφόρμες, λογισμικό και εφαρμογές για κινητά. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί και η εταιρεία SmartBee Technology, Inc, η οποία παρέχει δυνατότητα ελέγχου άρδευσης, αισθητήρων νερού και θρεπτικών συστατικών, περιβαλλοντικών αισθητήρων καθώς και λογισμικού μέσω του οποίου λαμβάνει χώρα έλεγχος σε πραγματικό χρόνο. Μέσω της προηγμένης προσέγγισης της χρήσης του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) επιτρέπεται η αυτόματη και εξ' αποστάσεως συλλογή και παρακολούθηση δεδομένων. Εξαιτίας των εν λόγω τεχνολογικών εξελίξεων στις υδροπονικές τεχνικές, αναμένεται

σημαντική ανάπτυξη της αγοράς από το 2019 έως το 2025 (Grand View Research, 2020).

1.3.2. Κατανομή τύπων υδροπονικών καλλιέργειών

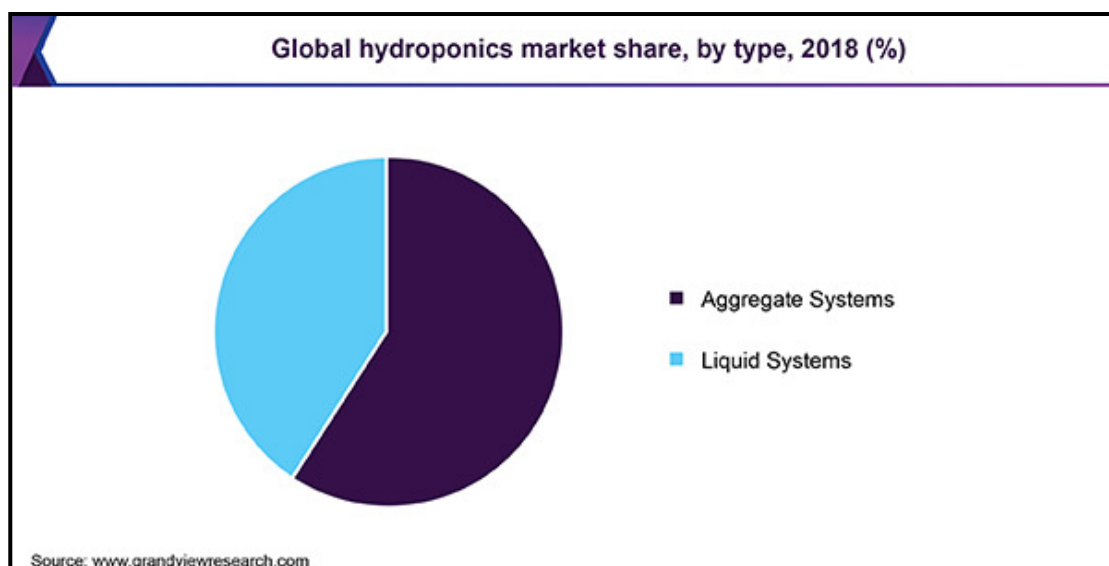
Με βάση τις καλλιέργειες, η υδροπονική αγορά χωρίστηκε σε ένα τμήμα που περιλαμβάνει ντομάτες, μαρούλι, πιπεριές, αγγούρια, βότανα και άλλα. Το άλλο τμήμα αποτελείται από φυτά, κάνναβης, μούρων, φρούτων και φυλλωδών λαχανικών. Το πρώτο τμήμα κατείχε ποσοστό μεγαλύτερο από το 30% του συνολικού μεριδίου αγοράς το 2018. Είναι οι μεγαλύτερες καλλιέργειες υδροπονικής καλλιέργειας σε όλο τον κόσμο λόγω του ταχύτερου ρυθμού καλλιέργειας και καθώς απαιτεί πολύ λιγότερη ποσότητα νερού σε σύγκριση με την παραγωγή υπαίθριων ντοματών. Για την διαδικασία της υδροπονικής καλλιέργειας εσωτερικού χώρου (indoor farmers), οι καλλιεργητές χρησιμοποιούν ως καλλιεργητικά υλικά τον πετροβάμβακα, τον περλίτη ή τον κοκοφοίνικα για υδροπονική προκειμένου να καλλιεργήσουν ντομάτες. Εκτιμάται ότι στις περιφέρειες της Ευρώπης και της Ασίας-Ειρηνικού έως το 2025 θα καλλιεργηθούν σημαντικές ποσότητες μέσω της υδροπονικής μεθόδου (Grand View Research, 2020).

Τα περισσότερο δημοφιλή λαχανικά τα οποία καλλιεργούνται μέσω της υδροπονικής τεχνικής είναι τα φυλλώδη λαχανικά, όπως σπανάκι, ρόκα, λάχανο και μαρούλι. Ωστόσο μεταξύ αυτών, το πράσινο και κόκκινο μαρούλι αποτελεί το ταχύτερα αναπτυσσόμενο υδροπονικό λαχανικό με τη χρήση της υδροπονικής καλλιέργειας εσωτερικού χώρου εξαιτίας της ωμής κατανάλωσής του σε σχετικά μεγάλες ποσότητες. Η υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού αυξάνεται στη Βόρεια Αμερική λόγω της αυξανόμενης ζήτησης από νοικοκυριά και αλυσίδες γρήγορου φαγητού σε ολόκληρη την περιοχή. Το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς για το μαρούλι εκτιμάται ότι καταγράφει το ταχύτερο σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) άνω του 25% κατά την περίοδο πρόβλεψης (Grand View Research, 2020).

1.3.3. Κατανομή τύπων υδροπονικής καλλιέργειας

Με βάση τον τύπο, η αγορά υποδιαιρέθηκε σε υδροπονικές καλλιέργειες σε στερεά υποστρώματα (Aggregate systems) και υδατοκαλλιέργειες (Liquid systems). Τα υδροπονικά συστήματα που αναπτύσσονται σε στερεά υποστρώματα παρουσιάζουν το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς το 2018, εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης της από τους

καλλιεργητές εσωτερικού χώρου. Η αυξημένη χρήση της οφείλεται στην ευκολία εγκατάστασής των συστημάτων αυτών καθώς και του χαμηλού τους κόστους. Σε αυτού του είδους τα υδροπονικά συστήματα, χρησιμοποιείται ένα αδρανές στερεό μέσο όπως για παράδειγμα της τύρφης, του πετροβάμβακα, του βερμικουλίτη, της άμμου, του πριονιδίου, του περλίτη ή του κοκοφοίνικα τα οποία παρέχουν υποστήριξη στα φυτά. Οι αρχικές υδροπονικές τεχνικές περιελάμβαναν συστήματα στάγδην, σύστημα παροχέτευσης και ροής, και συστήματα φυτίλι. Από αυτές της τεχνικές, η τεχνική της διαρροής και της ροής είναι οι πιο συνηθισμένες και πιο εύκολα προτιμώμενες δεδομένου ότι είναι εύκολο και οικονομικά φθηνό στην κατασκευή του (Grand View Research, 2020).



Σχήμα 3. Παγκόσμια κατανομή συστημάτων υδροπονικής καλλιέργειας σε στερεά υποστρώματα τα και συστήματα υδατοκαλλιέργειας. Πηγή: Grand View Research, 2020

Η υδατοκαλλιέργεια εκτιμάται ότι θα επεκταθεί στο ταχύτερο σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) από το 2019 έως το 2025, λόγω της αυξανόμενης δημοτικότητας των συστημάτων κλειστής καλλιέργειας μεταξύ των καλλιεργητών. Τα συστήματα καλλιέργειας σε βαθύ νερό (Deepwater culture) και η Υδροπονική Καλλιέργεια NFT (Ρηχό Διάλυμα Θρεπτικού Διαλύματος) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την καλλιέργεια μαρουλιού και άλλων φυλλωδών λαχανικών. Μέσω των συστημάτων υδατοκαλλιέργειας εξαλείφεται η χρήση του στερεού μέσου ενώ λαμβάνει χώρα βύθιση των ριζών απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα, συνεπώς γίνεται διευκόλυνση της καλλιεργητικής διαδικασίας. Επιπρόσθετα, καθώς γίνεται απευθείας διοχέτευση των

θρεπτικών συστατικών στις ρίζες του φυτού, λαμβάνει χώρα επιτάχυνση της ανάπτυξης και ως εκ τούτου λαμβάνονται υψηλότερες αποδόσεις. Παρόλο που μέσω των μεθόδων καλλιέργειας χωρίς έδαφος ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος ασθενειών που μεταδίδονται μέσω του εδάφους, αυξάνεται ο κίνδυνος διασποράς παθογόνων εξαιτίας της ανακυκλοφορίας θρεπτικών διαλυμάτων στα κλειστά συστήματα. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό, απαιτείται συχνή συντήρηση για την παρακολούθηση και την αλλαγή των θρεπτικών διαλυμάτων στα συστήματα υδατοκαλλιέργειας (Grand View Research, 2020).

1.3.4. Κατανομή Υδροπονικών Καλλιιεργειών σε διάφορες περιοχές

Εξαιτίας της εκτενούς υιοθέτησης των υδροπονικών συστημάτων από την Κίνα, την Αυστραλία, τη Νότια Κορέα και άλλες χώρες, οι περιοχές της Ασίας και του Ειρηνικού κατείχαν το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς το 2018 και αυτό αναμένεται να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό έως το 2025 εξαιτίας της αύξησης της χρήσης των υδροπονικών καλλιιεργειών σε αστική κλίμακα. Επίσης η περιοχή της Βόρειας Αμερικής παρουσιάζει υψηλές προοπτικές ανάπτυξης εξαιτίας της πληθώρας εταιριών που βρίσκονται στην περιοχή, καθώς και της αυξανόμενης υιοθέτησης εναλλακτικών τεχνικών καλλιιεργειας σε αστικές περιοχές. Μερικές από τις κορυφαίες Εταιρίες στην αγορά της Βόρειας Αμερικής περιλαμβάνουν: AeroFarms (ΗΠΑ), AMHYDRO (ΗΠΑ), Argus Control Systems Limited (Καναδάς) και LumiGrow (ΗΠΑ) (Grand View Research, 2020).

Όσον αφορά στην Ευρώπη κατείχε το δεύτερο μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς το 2018, εξαιτίας της μεγάλης υιοθέτησης των υδροπονικών συστημάτων σε απάντηση της ταχείας εκβιομηχάνισης καθώς και της ανεπάρκειας καλλιιεργήσιμων εκτάσεων. Στην Ευρώπη υπάρχουν χώρες με ανεπτυγμένη οικονομία όπως η Γαλλία, η Γερμανία, η Ελλάδα, η Ιταλία, η Ισπανία και οι Κάτω Χώρες. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και της παραγωγής τροφίμων τα οποία να είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΟΧ) το 2010 ενθάρρυνε την κατασκευή κάθετων αγροκτημάτων. Αυτό είχε ως συνέπεια την ανάπτυξη της περιφερειακής αγοράς. Λόγω της αυξανόμενης επέκτασης της γενετικά τροποποιημένης τεχνολογίας καλλιιεργειών, η περιοχή αναμένεται επίσης να παρουσιάσει σημαντικό σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) μέχρι το 2025. Ωστόσο, η έλλειψη κυβερνητικών κινήτρων και η έλλειψη βασικού εξοπλισμού για τη δημιουργία μεγάλων υδροπονικών εκμεταλλεύσεων αναμένεται να εμποδίσει την

ανάπτυξη των αναπτυσσόμενων χωρών από τη Μέση Ανατολή, την Αφρική και τη Νότια Αμερική (Grand View Research, 2020).

2.1. Ταξινόμηση Υδροπονικών Συστημάτων Καλλιέργειας

Υπάρχουν πολλές ομάδες υδροπονικών συστημάτων. Γενικά, τα υδροπονικά συστήματα ταξινομούνται με βάση την καλλιέργεια νερού, την καλλιέργεια θρεπτικών ουσιών και την καλλιέργεια άνυδρου (υποστρώματος ή δοχείου) (Christie, 2014). Οι περισσότερες ταξινομήσεις βασίζονται είτε σε μία από αυτές είτε σε συνδυασμό όλων των ομάδων ανάλογα με την καλλιέργεια, τον κύκλο καλλιέργειας και τη μέθοδο φύτευσης. Για μικρούς κύκλους καλλιέργειας όπως φυλλώδη βλάστηση, χρησιμοποιείται η επιπέδου υδροπονία ή η υδατοκαλλιέργεια (water culture) (Resh, 2015). Για φρούτα και λαχανικά (όπως τα μέλη των οικογενειών solanacea και cucurbit) προτιμάται η καλλιέργεια σε δοχεία (container culture). Τα διακοσμητικά φυτά που καλλιεργούνται υδροπονικά ταξινομούνται με βάση τα ισχύοντα συστήματα καλλιέργειας θρεπτικών συστατικών (Silber, 2018).

Με βάση την ταξινόμηση θρεπτικών ουσιών, το υδροπονικό σύστημα υποδιαιρείται με βάση το σύστημα διανομής του θρεπτικού διαλύματος ή άρδευσης (Abd-Elmoniem et al., 2006). Επομένως, το σύστημα ομαδοποιείται ως στάσιμο, ρέον, ψεκασμός, στάγδην άρδευση ή υδροπονικό σύστημα υπο-άρδευσης. Μια άλλη ταξινόμηση του υδροπονικού συστήματος βασίζεται στον τύπο υποστρώματος που χρησιμοποιείται, δηλαδή στο οργανικό και ανόργανο υδροπονικό σύστημα (Pardossi et al., 2011). Τέλος, η υδατοκαλλιέργεια βασίζεται στην αποστράγγιση του θρεπτικού διαλύματος και ταξινομείται ως ανοικτό σύστημα (ελεύθερη αποστράγγιση) ή κλειστό (ανακυκλοφορία) σύστημα. Οι περισσότερες εμπορικές υδροπονικές ταξινομήσεις φυλλωδών φυτών βασίζονται στο σύστημα καλλιέργειας νερού (Christie, 2014).

2.2. Ανοικτά και κλειστά συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι καλλιέργειας εκτός εδάφους: η κλειστού τύπου και η ανοικτού τύπου καλλιέργεια (EI-Kazzaz, 2017):

Κλειστός τύπος καλλιέργειας εκτός εδάφους: Τα κλειστά συστήματα επαναχρησιμοποιούν το θρεπτικό διάλυμα μέσω επανακυκλοφορίας για απροσδιόριστο χρονικό διάστημα (Lykas et al. 2006). Σε αυτά τα συστήματα το θρεπτικό διάλυμα παρακολουθείται συστηματικά και γίνεται ανάλογη ρύθμισή τους

προκειμένου να διατηρούνται ορθές αναλογίες θρεπτικών συστατικών. Συνήθεις προσαρμογές είναι η διατήρηση του όγκου του διαλύματος θρεπτικών ουσιών, μέσω προσθηκών νερού και επιπέδων συγκέντρωσης θρεπτικών ουσιών, μέσω προσθήκης διαλύματος θρεπτικών ουσιών. Σε αντίθεση με τα ανοιχτά συστήματα, τα κλειστά συστήματα εξοικονομούν νερό και θρεπτικά συστατικά, γεγονός που μειώνει σημαντικά τη παραγωγή αποβλήτων (Abd-Elmoniem et al. 2006). Γενικότερα, τα κλειστά συστήματα είναι σε θέση να χρησιμοποιούν 20-40% πιο λίγο νερό και θρεπτικά συστατικά σε σχέση με τα ανοιχτά συστήματα, ωστόσο είναι πιο δύσκολη η παρακολούθηση και η συντήρησή τους (Nederhoff & Stanghellini 2010). Αυτή η δυσκολία πηγάζει από τη συσσώρευση ιόντων όταν το θρεπτικό διάλυμα ανακυκλώνεται (Lykas et al. 2006). Η ανακύκλωση απαιτεί επίσης υποδομή για την παρακολούθηση και συντήρηση των δεξαμενών και των συστημάτων άντλησης προκειμένου να λειτουργούν ορθά.

Αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί ότι τα θρεπτικά διαλύματα στα κλειστά συστήματα απορρίπτονται τουλάχιστον μία φορά λίγο πριν από την επαναχρησιμοποίησή τους (Lykas et al. 2006). Επίσης κάποιοι ερευνητές ταξινομούν τα συστήματα αυτά σε ημικλειστά (Nederhoff & Stanghellini 2010). Οι συνηθισμένοι χρόνοι για την απόρριψη ενός θρεπτικού διαλύματος είναι συνήθως μετά από μία εβδομάδα (Bugbee 2004), δύο εβδομάδες (David et al. 1996) ή μέσω ανάλυσης του θρεπτικού διαλύματος συνήθως μέσω μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC). Η παράταση του χρόνου ζωής του θρεπτικού διαλύματος είναι σημαντική τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική πλευρά. Σε ένα κλειστό σύστημα, στο οποίο το θρεπτικό διάλυμα δεν απορρίπτεται ποτέ, αλλά αντιθέτως γίνεται παρακολούθηση, ρύθμιση και έλεγχος αυτού, δίχως παραγωγή αποβλήτων, συνιστά την πλέον επιθυμητή κατάσταση για την υδροπονία.

Ανοιχτά συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας εκτός εδάφους: Ένα ανοιχτό σύστημα, γνωστό και ως σύστημα ανάκτησης αποβλήτων, είναι ένα σύστημα στο οποίο το θρεπτικό διάλυμα ρέει μέσω του συστήματος μόνο μία φορά. Αυτός ο τύπος χορήγησης θρεπτικών διαλυμάτων παρέχει δύο σημαντικά οφέλη: 1) εξαλείφει την ανάγκη συντήρησης των θρεπτικών συστατικών και 2) μειώνει τον κίνδυνο μόλυνσης. Εκτός από αυτά τα πλεονεκτήματα, τα ανοιχτά συστήματα έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα, σπαταλούν πολύ νερό και θρεπτικά συστατικά (Nederhoff & Stanghellini 2010).

2.3. Τύποι Υδροπονικών Συστημάτων

Η υδροπονία είναι η ανάπτυξη φυτών εκτός εδάφους. Τα φυτά δεν απαιτούν την ύπαρξη εδάφους αλλά βιταμινών και ανόργανων αλάτων που δύναται να παρέχει το έδαφος σε αυτά. Απαραίτητα για τα φυτά είναι η ύπαρξη φωτός, νερού, διοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου στη ριζική ζώνη. Στην υδροπονική καλλιέργεια, η καλλιέργεια των φυτών λαμβάνει χώρα σε αδρανή μέσα όπως πετρώματα ή ίνες κοκοφοίνικα ενώ γίνεται τροφοδοσία ενός διαλύματος το οποίο περιλαμβάνει μείγμα βασικών, δευτερογενών και μικρο-θρεπτικών συστατικών. Όλα σχεδόν τα είδη φυτών μπορούν να καλλιεργηθούν υδροπονικά, συμπεριλαμβανομένων των λαχανικών, των βοτάνων, των φρούτων και των λουλουδιών (Verner et al., 2017).

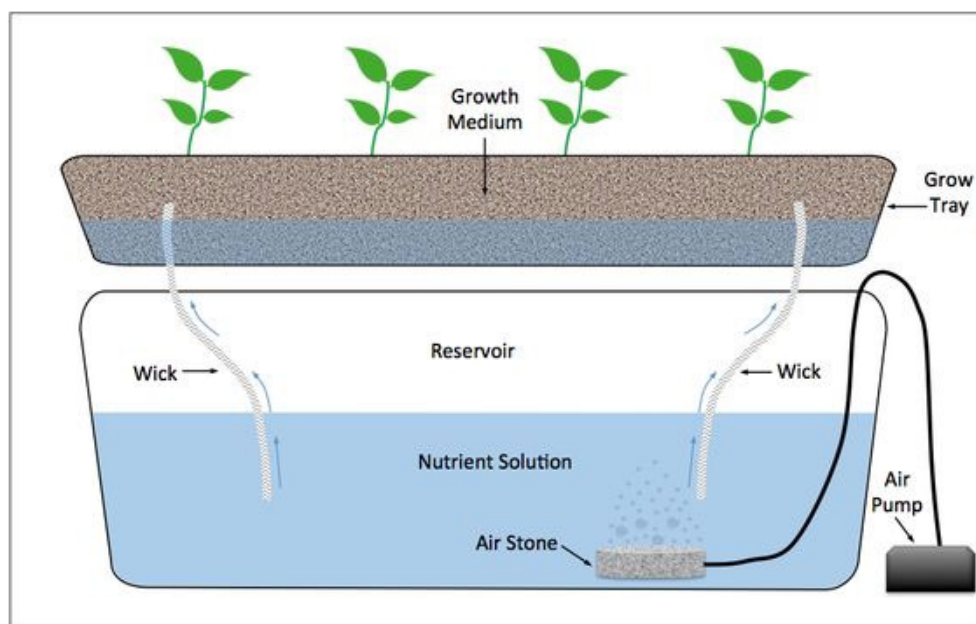
Η υδροπονία χρησιμοποιείται παγκοσμίως από τους αγρότες και τους καλλιεργητές. Η υδροπονία παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι της καλλιέργειας εντός εδάφους για διάφορους λόγους. Η καλλιέργεια των φυτών μπορεί να γίνει καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, δεδομένου ότι οι κλιματικές συνθήκες δύναται να ελεγχθούν σε ένα θερμοκήπιο. Επειδή οι ρίζες τους δεν χρειάζονται θρεπτικά συστατικά, τα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν πιο κοντά. Τα φυτά που καλλιεργούνται είναι σημαντικά μεγαλύτερα εξαιτίας τόσο των διαθέσιμων θρεπτικών συστατικών και δεν χρειάζεται να χάνεται χρόνος για την ανάπτυξη εκτεταμένων ριζικών συστημάτων. Αυτό έχει ως συνέπεια υψηλότερες αποδόσεις. Επίσης το θρεπτικό διάλυμα διατηρεί διαθέσιμη όλη την ώρα την ποσότητα θρεπτικών συστατικών σε ίσες ποσότητες σε αντίθεση με το έδαφος το οποίο χάνει τα θρεπτικά συστατικά του καθώς αυτά απορροφούνται. Ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων καθιστά τα φυτά που καλλιεργούνται υδροπονικά πιο παραγωγικά σε σχέση με τα φυτά που καλλιεργούνται στο έδαφος. Συνέπεια αυτού είναι η στροφή πολλών αγροτών ανά τον κόσμο στην υδροπονική καλλιέργεια. Ένας άλλος παράγοντας της στροφής των αγροτών στην υδροπονία είναι η ανησυχία της χρήσης του νερού δεδομένου ότι μέσω της υδροπονίας επιτυγχάνεται εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων νερού σε σχέση με τις συνηθισμένες μεθόδους καλλιέργειας. Τα ακόλουθα σχήματα από το 1 έως το 5 δείχνουν ορισμένα από τα είδη υδροπονίας που χρησιμοποιούνται πιο πολύ, ωστόσο ο καθένας μπορεί να βάλει το δικό του σχέδιο σύμφωνα με τις ανάγκες του και το είδος των φυτών σύμφωνα με τον κύριο στόχο και τον σκοπό της υδροπονικής λειτουργίας (Verner et al., 2017).

2.3.1. Σημαντικότεροι τύποι συστημάτων υδροπονίας

Πιο κάτω γίνεται λεπτομερής περιγραφή των πέντε βασικότερων υδροπονικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται κυρίως στα κλειστού τύπου συστήματα.

Υδροπονικό σύστημα Wick (Φιτιλιού)

Ένα από τα πιο απλά υδροπονικά συστήματα είναι το υδροπονικό σύστημα φιτιλιού (Σχήμα 1). Αυτό συμβαίνει επειδή παραδοσιακά δεν έχει κινούμενα μέρη, επομένως δεν χρησιμοποιεί αντλίες ή ηλεκτρικό ρεύμα. Το φιτίλι συνιστά το συνδετικό μέρος ανάμεσα στο φυτό που βρίσκεται στο δοχείο και του θρεπτικού διαλύματος στην υφιστάμενη. Επειδή δεν απαιτείται η ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος για τη λειτουργία του, θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιοχές όπου δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρική ενέργεια ή είναι αναξιόπιστη. Το σύστημα φιτιλιού είναι ένας εύκολος τύπος συστήματος που μπορεί να κατασκευαστεί πολύ εύκολα γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται συχνά από εκπαιδευτικούς στις τάξεις ως πειράματα για παιδιά. Στο σύστημα αυτό τα φυτά καλλιεργούνται σε υπόστρωμα (EI-Kazzaz, 2017).



Σχήμα 1. Υδροπονικό σύστημα Φιτιλιού. Πηγή: <https://offgridgorilla.com/off-grid-systems/food/hydroculture-hydroponics/>

Τα συστήματα Wick είναι μη κυκλοφορούντα συστήματα που αποτελούνται από υπερυψωμένα παρτέρια κήπου που έχουν δεξαμενή νερού κάτω από τις ρίζες του φυτού. Η παροχή του νερού λαμβάνει χώρα μέσω ενός σωλήνα στη δεξαμενή νερού

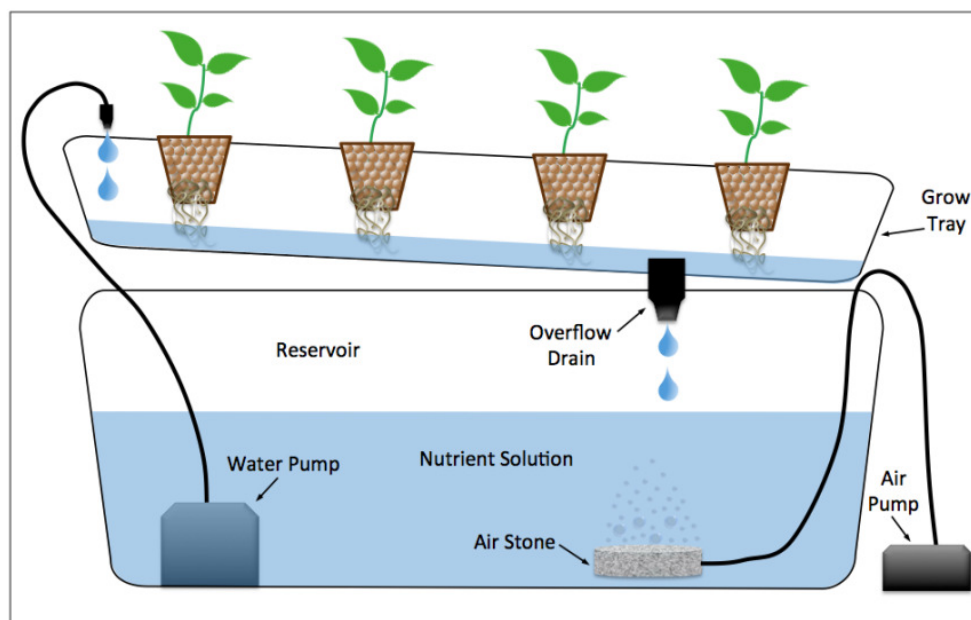
και η απορρόφηση του νερού γίνεται προς τα πάνω στη ριζική ζώνη με τριχοειδή δράση, με αποτέλεσμα τα φυτά να απορροφήσουν την απαραίτητη γι'αυτά ποσότητα νερού που χρειάζονται. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητο το γενικό πότισμα με αποτέλεσμα να χάνονται ελάχιστες ποσότητες νερού μέσω της διαδικασίας της εξάτμισης. Η ανάπτυξη των ριζών στο υγρό έδαφος γίνεται μέσω συνεχούς παροχής νερού, οξυγόνου και θρεπτικών συστατικών (Verner et al., 2017).

Η λειτουργία της τεχνικής του συστήματος φυτιλιού είναι ιδανική σε ξηρά περιβάλλοντα καθώς και σε περιβάλλοντα όπου επικρατεί λειψυδρία καθώς και σε περιοχές με περιορισμένη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και όπου δεν υπάρχει άμεσα διαθέσιμη βοήθεια. Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης αυτού του συστήματος είναι: (i) η μονάδα μπορεί να φυτευτεί 3-5 φορές ανά έτος. (ii) είναι απλό, ασφαλές και εύκολο στη διαχείριση · (iii) έχει υψηλή αποδοχή του από τους παραδοσιακούς αγρότες επειδή τα φυτά βρίσκονται σε μέσα καλλιέργειας παρόμοια με αυτή του εδάφους και, (iv) το σύστημα φυτιλιού περιλαμβάνει σκουλήκια που μπορούν να αφομοιώσουν τα οργανικά απορρίμματα κουζίνας σε κομπόστ για τη δημιουργία λιπάσματος. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι: (i) δεν λειτουργεί καλά με μεγαλύτερα φυτά με υψηλότερες απαιτήσεις σε νερό. (ii) τα υποστρώματα φυτιλιού είναι λιγότερο αποτελεσματικά από άλλες μεθόδους παροχής θρεπτικών ουσιών σε μεγάλα τροφοδοτικά, ντομάτες, πιπεριές κ.λπ. · (iii) το αλάτι συσσωρεύεται στα μέσα καλλιέργειας και πρέπει να γίνεται εβδομαδιαία έκπλυση για την απομάκρυνση της περίσσειας θρεπτικών ουσιών από τη ριζική ζώνη (Verner et al., 2017).

Τεχνική θρεπτικών μεμβρανών (NFT)

Η τεχνική της θρεπτικής μεμβράνης (Σχήμα 2) είναι σχεδιασμένη για ανακυκλοφορία ώστε να παρέχει συνεχώς διαλυμένα θρεπτικά οξυγονωμένα θρεπτικά συστατικά στις ρίζες των φυτών μέσω ενός συνόλου καναλιών, που συνήθως αναπτύσσονται σε κύπελλα που κρέμονται σε σωλήνα PVC. Η άντληση του διαλύματος λαμβάνει χώρα μέσω της δεξαμενής συγκράτησης, μέσω αρδευτικών συστημάτων που βρίσκονται στο πάνω μέρος του εκάστοτε κεκλιμένου σωλήνα και η απορροή υγρού που υπάρχει στο κάτω μέρος των καναλιών επιστρέφει στη δεξαμενή. Έτσι, το θρεπτικό διάλυμα ανακυκλώνεται συνεχώς. Υπάρχει δυνατότητα η γωνία του σωλήνα να γίνει μικρότερη και να προστεθεί ένας σωλήνας υπερχειλίσης. Αυτό θα χρησιμεύσει για την παροχή μιας δεξαμενής θρεπτικών ουσιών που θα παραμείνουν σε περίπτωση διακοπής

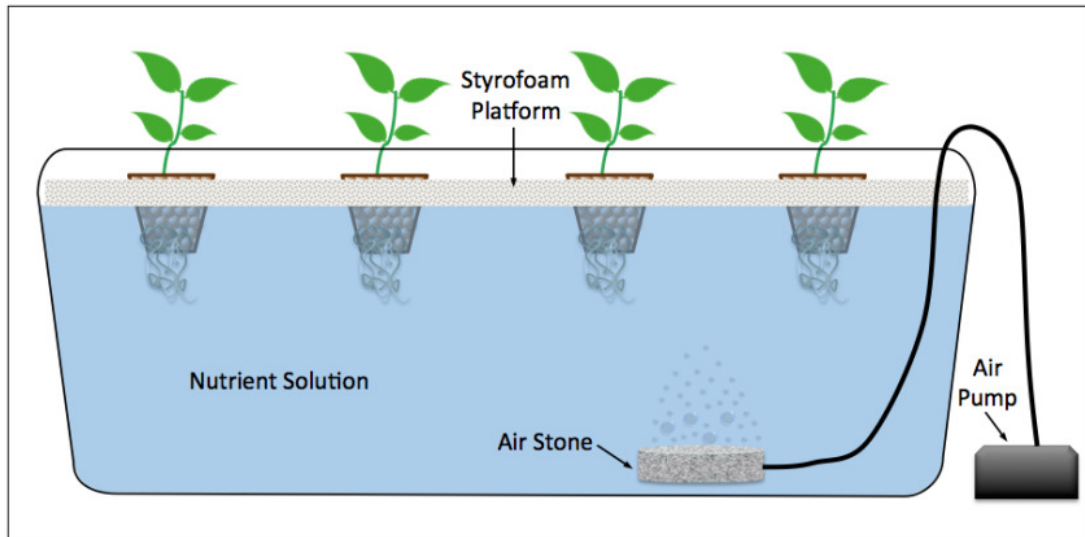
ρεύματος ή αντλίας. Εξαιτίας του μικρού χώρου που διαθέτει ένας σωλήνας PVC καθώς και επειδή απαιτείται συνεχής ροή θρεπτικών συστατικών πάνω από τις ρίζες, η τεχνική των θρεπτικών μεμβρανών θεωρείται κατάλληλη για φυτά που έχουν μικρό ριζικό σύστημα όπως μαρούλι, φράουλες και βότανα υπόστρωμα (EI-Kazzaz, 2017).



Σχήμα 2. Τεχνική θρεπτικών μεμβρανών (NFT). Πηγή: <https://offgridgorilla.com/off-grid-systems/food/hydroculture-hydroponics/>

Υδατοκαλλιέργεια ή Καλλιέργεια σε βαθύ νερό (Water culture or deep water culture - DWC)

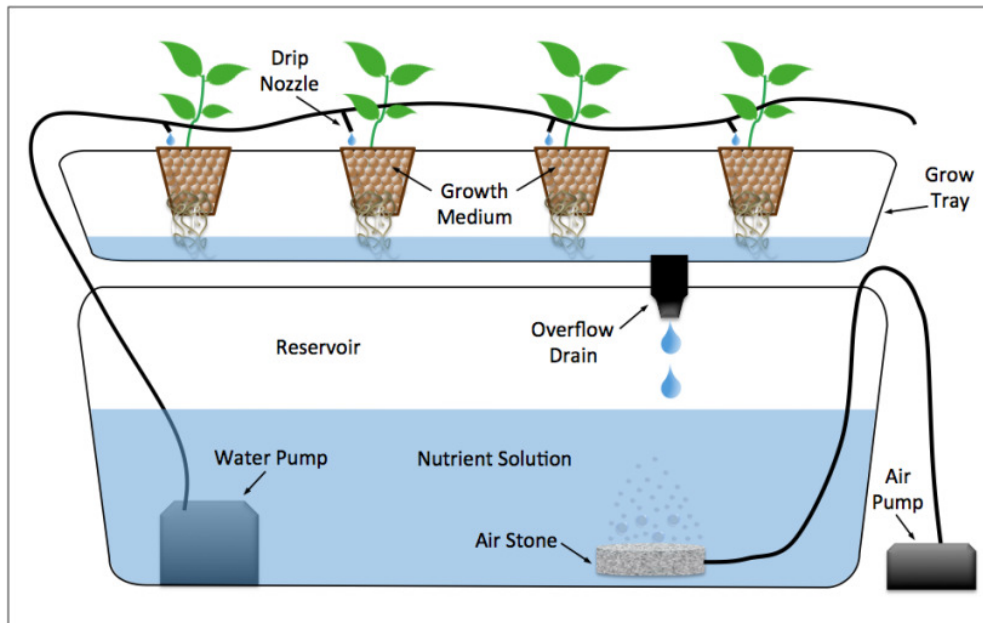
Η υδατοκαλλιέργεια ή η καλλιέργεια σε βαθύ νερό είναι η απλή μορφή υδροπονικών συστημάτων (Σχήμα 3). Τα φυτά επιπλέουν με πλατφόρμα επίπλευσης σε ένα λουτρό υδροπονικού θρεπτικού διαλύματος. Η παροχή οξυγόνου γίνεται μέσω μίας αντλίας αέρα που έχει συνεχή ροή. Το σύστημα υδατοκαλλιέργειας δύναται να αναπτυχθεί εύκολα σε γυάλινες λεκάνες, (λίμνες ψαριών), σε πλαστικά κουτιά, σε κιβώτια πάγου, σε λεκάνες από σκυρόδεμα κλπ τα οποία είναι καλυμμένα με φύλλα πολυπροπυλενίου. Εξαιτίας της συνεχούς επίπλευσης των φυτών αυτό έχει ως συνέπεια την άμεση επαφή τους με το θρεπτικό διάλυμα, και ως εκ τούτου δεν υπάρχει κίνδυνος πρόκλησης ζημιών στα φυτά στην περίπτωση που υπάρχει διακοπή ρεύματος ή διακοπή της αντλίας αέρα. Τα φυτά που αναπτύσσονται ιδιαίτερα καλά σε αυτό το σύστημα είναι το μαρούλι, οι φράουλες και τα βότανα (EI-Kazzaz, 2017; Verner et al., 2017).



Σχήμα 3: Σύστημα καλλιέργειας σε βαθύ νερό. Πηγή: <https://offgridgorilla.com/off-grid-systems/food/hydroculture-hydroponics/>

Σύστημα σταγόνων (Drip System)

Το σύστημα στάγδην (Σχήμα 4) είναι μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη υδροπονική τεχνική με το νερό να κυκλοφορεί μέσω του συστήματος χρησιμοποιώντας εκπομπές στάγδην. Οι εκπομπές στάγδην στάζουν νερό αλλά δεν ψεκάζουν ή ρέουν, όπως συμβαίνει στην παραδοσιακή άρδευση στάγδην, και χρησιμοποιείται ένα σύστημα στάγδην σε κάθε φυτό τοποθετημένο σε αναπτυσσόμενο μέσο. Εφόσον το νερό περάσει από το κύπελλο που κρατάει κάθε φυτό, επιστρέφει στη δεξαμενή νερού και ανακυκλώνεται ξανά μέσω του συστήματος. Τα φυτά μπορούν να καλλιεργηθούν σε κουβάδες ή δίσκους. Το σύστημα απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδοσία μιας υποβρύχιας αντλίας για τη διασπορά του νερού και μια αερόπετρα για την ανάμιξη του νερού στη δεξαμενή (Verner et al., 2017).

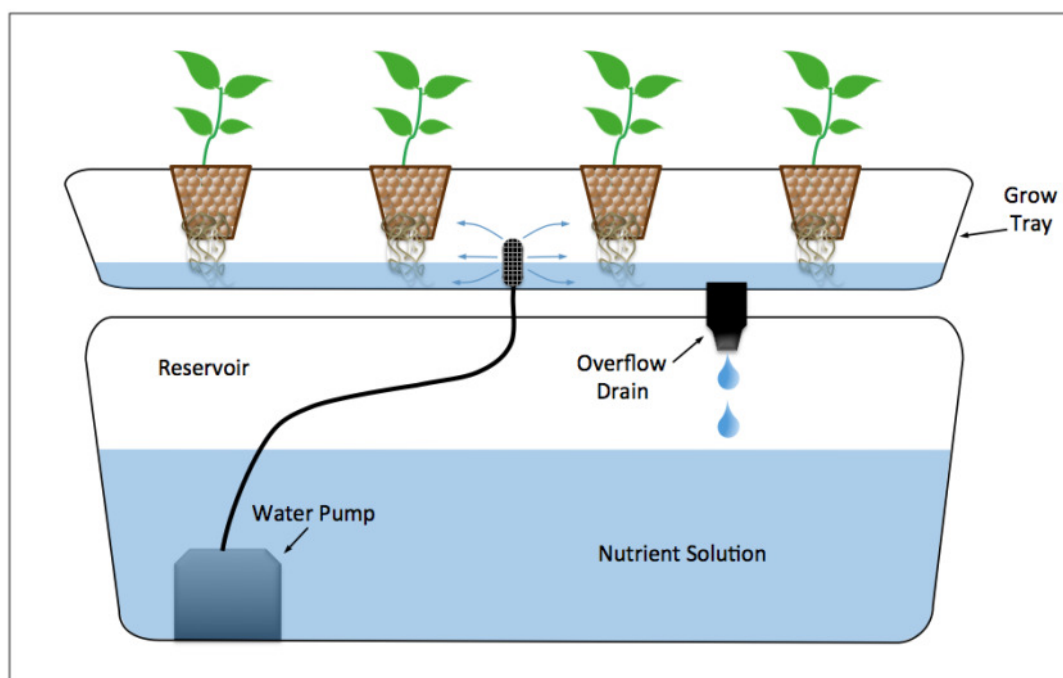


Εικόνα 4: Σύστημα σταγόνων. Πηγή: <https://offgridgorilla.com/off-grid-systems/food/hydroculture-hydroponics/>

Συστήματα πλήρωσης και απορροής (Ebb και Flow System)

Το σύστημα Ebb and flow (Σχήμα 5) είναι ένας άλλος φθηνός τύπος υδροπονικής εγκατάστασης. Η εγκατάσταση του συστήματος προσομοιάζει με το σύστημα σταγόνων, στο οποίο είναι διαθέσιμα δύο δοχεία, το ένα στην κορυφή το οποίο περιλαμβάνει τα φυτά μέσα σε γλάστρες με υπόστρωμα, και ένα δοχείο στο κάτω μέρος που περιλαμβάνει το θρεπτικό διάλυμα. Αντί λοιπόν η παροχή του θρεπτικού διαλύματος να γίνεται με στάγδην ροή στο στέλεχος κάθε φυτού, η άντληση των θρεπτικών συστατικών λαμβάνει χώρα σε μεγάλους όγκους στο πάνω δοχείο, πλημμυρίζοντας το δοχείο. Ο καθορισμός του ύψους των θρεπτικών συστατικών γίνεται μέσω ενός σωλήνα υπερχείλισης, συνήθως από το σημείο απ' όπου ξεκινούν οι ρίζες στη βάση του στελέχους. Αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί ότι η περίσσεια υγρού ανακυκλώνεται μέσω του σωλήνα υπερχείλισης πίσω στο κάτω δοχείο. Με το σύστημα παροχής ρεύματος και ροής, η αντλία ενεργοποιείται και απενεργοποιείται κατά διαστήματα (ίσως 30 λεπτά ενεργοποιημένη, 15 λεπτά εκτός λειτουργίας), για να γεμίζει περιοδικά ο δίσκος ανάπτυξης. Όταν λαμβάνει χώρα απενεργοποίηση της αντλίας, γίνεται απομάκρυνση όλων των θρεπτικών συστατικών από το δίσκο καλλιέργειας διαμέσου της γραμμής αντλίας. Το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η εκκένωση, επιτρέπεται στο οξυγόνο να φτάσει στις ρίζες και ως εκ τούτου δεν είναι

απαραίτητη η ύπαρξη αερόπετρας για τα συστήματα ροής. Όπως και με τα συστήματα στάγδην, λαμβάνει χώρα πολύ καλή ανάπτυξη των φυτών μέσω του συστήματος πλήρωσης και απορροής. Τα φυτά με μεγάλο ριζικό σύστημα είναι επιπλέον ιδιαίτερα κατάλληλα για τέτοια συστήματα (EI-Kazzaz, 2017).

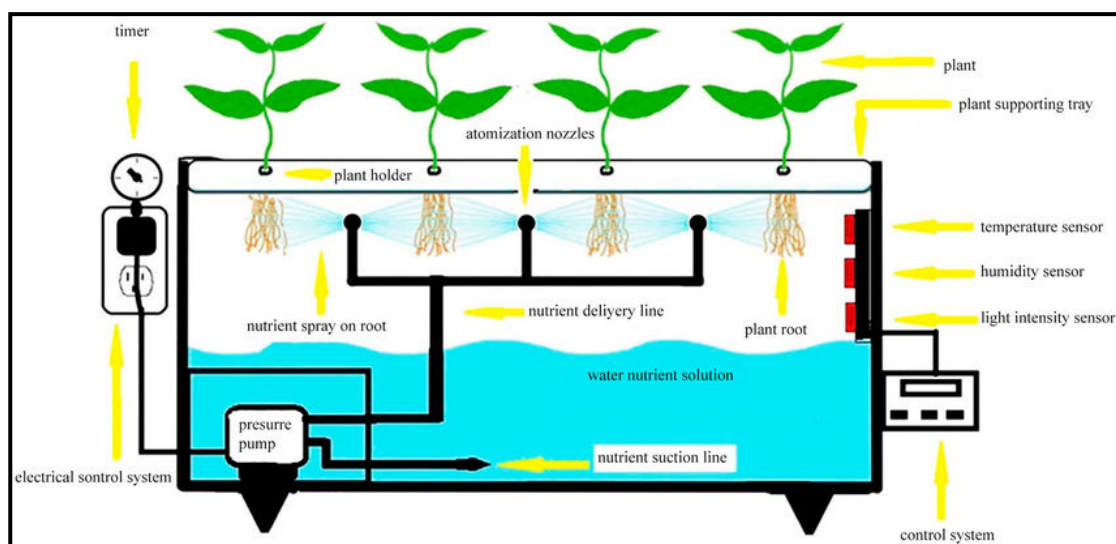


Σχήμα 5: Σύστημα πλήρωσης και απορροής (Ebb και Flow System). Πηγή: <https://offgridgorilla.com/off-grid-systems/food/hydroculture-hydroponics/>

2.3.2. Αεροπονικά Συστήματα (Aeroponic systems)

Το σύστημα αεροπονίας ανήκει στο κλειστό σύστημα καλλιέργειας εκτός εδάφους (Σχήμα 6) και είναι πιθανώς ο πιο υψηλής τεχνολογίας τύπος υδροπονικού συστήματος. Στο σύστημα της αεροπονίας οι κλειστοί θάλαμοι του ριζικού συστήματος που χρησιμοποιούνται ως δεξαμενή θρεπτικού διαλύματος και τα φυτά πάνω από το κάλυμμα της δεξαμενής (πολυστυρένιο ή άλλο υλικό) πρέπει να στηρίζονται ή να κρέμονται μέσω οπών στο διογκωμένο κάλυμμα. Ως εκ τούτου, οι ρίζες κρέμονται στον αέρα κάτω από το κάλυμμα της δεξαμενής και ψεκάζονται με θρεπτικό διάλυμα που βρίσκεται στη δεξαμενή από αντλία πίεσης για να καλύψει όλη την περιοχή γύρω από τη ρίζα με ψεκάσμα θρεπτικού διαλύματος. Ο ψεκασμός λαμβάνει χώρα συνήθως κάθε λίγα λεπτά. Επειδή οι ρίζες εκτίθενται στον αέρα, οι ρίζες στεγνώνουν γρήγορα εάν διακοπεί ο κύκλος ψεκασμού. Ο έλεγχος των θρεπτικών ουσιών γίνεται μέσω ενός χρονοδιακόπτη όπως και σε άλλους τύπους υδροπονικών συστημάτων, εκτός του

συστήματος αεροπονίας που χρειάζεται χρονοδιακόπτη μικρού κύκλου που χρησιμοποιεί την αντλία για λίγα δευτερόλεπτα κάθε δύο λεπτά. Ωστόσο, ο θάλαμος πρέπει να είναι κατασκευασμένος από μη φωτεινά υλικά σε όλη την έκτασή, έτσι ώστε οι ρίζες να βρίσκονται στο σκοτάδι προκειμένου να είναι λειτουργικά καλές και να αναστέλλουν την ανάπτυξη φυκών που εμποδίζει τα αναπτυσσόμενα φυτά και μολύνουν το σύστημα (EI-Kazzaz, 2017; Verner et al., 2017).



Σχήμα 6: Σύστημα αεροπονίας. Πηγή: Lakhia et al., 2018

Σε αυτό το σύστημα, ψεκάζεται το θρεπτικό διάλυμα ως μικρό σύννεφο σε κλειστούς θαλάμους ρίζας. Η καλλιέργεια των φυτών γίνεται σε τρύπες σε πλάκες από διογκωμένο πολυστυρένιο ή άλλο υλικό. Οι ρίζες του φυτού αιωρούνται στη μέση κάτω από την πλάκα πολυστυρενίου και περικλείεται σε ένα κουτί ψεκασμού. Το κουτί σφραγίστηκε έτσι ώστε οι ρίζες να είναι στο σκοτάδι (για την αναστολή της ανάπτυξης των φυκιών) και σε υγρασία κορεσμού. Μέσω ενός συστήματος ψεκασμού λαμβάνει χώρα περιοδική μεταφορά θρεπτικού διαλύματος στο ριζικό σύστημα. Το σύστημα ψεκασμού ενεργοποιείται συνήθως κάθε 2-3 λεπτά. Αυτό θεωρείται αρκετό για τη διατήρηση των ριζών σε υγρή κατάσταση και το σωστό αερισμό του θρεπτικού διαλύματος (EI-Kazzaz, 2017).

Υπάρχουν τρία είδη αεροπονικών πλαισίων. Το πρώτο πλαίσιο είναι ότι τα πλαίσια αεροπονικής υψηλής πίεσης δεν χρησιμοποιούν γενικά αντλία νερού λόγω των διαφόρων κύκλων (ενεργοποίησης / απενεργοποίησης) που απαιτούνται. Συνήθως συνίστανται από δεξαμενή δύο όψεων με ελαστικό διαχωριστικό. Η διάταξη για τα συμπληρωματικά θρεπτικά συστατικά βρίσκεται στη μία πλευρά και η παροχή αέρα

στην άλλη. Στο σημείο αυτό γίνεται χρήση αεροσυμπιεστή για τη συμπίεση της δεξαμενής. Από την πλευρική διάταξη που βρίσκονται τα συμπληρωματικά θρεπτικά συστατικά ξεκινάει ένας αγωγός νερού ο οποίος οδηγεί στις νεφελώδεις κεφαλές, και γίνεται χρήση ενός σωληνοειδούς προκειμένου να ανοίγει και να κλείνει μια βαλβίδα στον αγωγό σε ακριβείς χρόνους με τη χρήση ενός κύκλου ρολογιού. Το γνήσιο πλαίσιο αεροπονικής χρησιμοποιεί υψηλή πίεση (60-90 psi) (EI-Kazzaz, 2017)..

Το δεύτερο πλαίσιο αποτελεί αυτό της αερονομικής χαμηλής πίεσης (soakaponics) και αφορούν σε αυτά που οι περισσότεροι έχουν στο μυαλό τους όταν αναφέρονται στην αεροπονική μέθοδο καλλιέργειας. Τα πλαίσια χαμηλής πίεσης κάνουν χρήση τυπικών υποβρύχιων αντλιών νερού, αλλά παράλληλα απαιτείται ένα αξιοσημείωτο μέτρο βάρους νερού ή απλά το νερό να ρέει έξω από τις κεφαλές του ψεκαστήρα. Όσο μεγαλύτερος αριθμός κεφαλών ψεκαστήρα χρησιμοποιούνται, τόσο μεγαλύτερη πίεση νερού θα χρειαστεί. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι βυθιζόμενες αντλίες δεν είναι σε θέση να δώσουν τιμές πίεσης psi, δίνουν απλά ένα μέτρο που αφορά γαλόνια ανά ώρα (GPH), το οποίο είναι ένα μέτρο όγκου, όχι πίεσης. Ένας πολύ καλός δείκτης βάρους νερού είναι η τιμή "ύψος κεφαλής". Λαμβάνει την πίεση για την άντληση νερού, οπότε όσο περισσότερο GPH μπορεί να αντλήσει υψηλότερα, τόσο περισσότερη πίεση νερού θα έχει. Εντούτοις το μεγαλύτερο ποσοστό αναφέρεται σε πλαίσια διαβροχής χαμηλής πίεσης, όπως επίσης και αερονομικά (EI-Kazzaz, 2017).

Το τρίτο πλαίσιο είναι οι υπερηχητικοί ψεκαστήρες που δημιουργούν μια ομίχλη σε αεροπονικά πλαίσια. Ενώ αναπτύσσεται μια ομίχλη με λίγο νερό, δεν υφίσταται πραγματική υγρασία στην ομίχλη / νέφος. Η ομίχλη από υπερηχητικούς ψεκαστήρες επίσης να πέφτει στη βάση του συγκρατητήρα, διασφαλίζοντας ότι οι ρίζες προστατεύονται συνεχώς πλήρως από την ομίχλη. Ένα άλλο ζήτημα εφαρμογής ψεκαστήρων είναι ότι οι πλάκες τείνουν να φράσσονται εξαιτίας της δημιουργίας ορυκτών αλάτων. Οι σημαντικότερες πλάκες που είναι σε θέση να λειτουργούν με σημαντική αξιοπιστία είναι και οι ακριβές, αναφερόμενοι στις κεφαλές Teflon. Μπορούν μερικές φορές να καθαριστούν χρησιμοποιώντας λευκό ξύδι, ή αραιωμένο (EI-Kazzaz, 2017).

Στην Ελλάδα για πρώτη φορά το 2011 αναπτύχθηκε από τον καθηγητή κ. Σαλάχα Γ. με επιτυχία ένα πειραματικό αεροπονικό σύστημα, στο οποίο εγκατασταθήκαν δυο καλλιέργειες φυτών μαρουλιού τύπου Romana και πλατύφυλλου βασιλικού και με βάση αυτές μελετήθηκε

η ανάπτυξη και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών στο αεροπονικό σύστημα συγκριτικά με αντίστοιχο υδροπονικό σύστημα με υπόστρωμα περλίτη. Τα αποτελέσματα ήταν εντυπωσιακά και έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια των 35 ημερών του πειράματος τα φυτά μαρουλιού και πλατύφυλλου βασιλικού που καλλιεργήθηκαν στο αεροπονικό σύστημα είχαν πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα ανάπτυξης και παραγωγή βιομάζας σε σχέση με τα αντίστοιχα φυτά που καλλιεργήθηκαν στο υδροπονικό σύστημα. Επιπλέον μετρήθηκαν αυξημένες ταχύτητες φωτοσύνθεσης και διαπνοής στα φυτά που καλλιεργήθηκαν αεροπονικά σε σχέση με τα αντίστοιχα φυτά που καλλιεργήθηκαν υδροπονικά.

Στη συνέχεια μέσω του ερευνητικού προγράμματος Αρχιμήδης μελετήθηκαν και διερευνήθηκαν οι δύο σημαντικότερες παράμετροι που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη και στα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών στο αεροπονικό σύστημα που είναι: ο διαθέσιμος όγκος ανάπτυξης του ριζικού συστήματος και ο έλεγχος της θερμοκρασίας της ριζόσφαιρας. Επιπλέον μελετήθηκαν και ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καλλιεργούμενων φυτών δηλαδή το συνολικό φαινολικό-αντιοξειδωτικό φορτίο και η συγκέντρωση νιτρικών.

Τελικά ολοκληρώθηκε μία καινοτόμος καλλιεργητική τεχνική αεροπονικής καλλιέργειας προσαρμοσμένη στις Μεσογειακές συνθήκες



Πλήρως Αυτοματοποιημένο Σύστημα Αεροπονικής Καλλιέργειας Φυτών (Σαλάχας 2012)

Το «Πλήρως Αυτοματοποιημένο Σύστημα **Αεροπονικής Καλλιέργειας Φυτών**» που είναι μια εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία αιχμής (**smart technology**) με δυνατότητα διαχείρισης και ελέγχου μέσω internet(IOT).

Η **Αεροπονία** απαιτεί τα minimum, και παράγει ασταμάτητα όλο το χρόνο (μέγιστη σοδειά σε ελάχιστη έκταση), με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων φυσικών πόρων και ενέργειας.

Η μέθοδος της Αεροπονίας είναι ένα εξαιρετικό κλειστό ανακυκλούμενο σύστημα αειφορικής παραγωγής τροφίμων και κυκλικής οικονομίας, με μηδενική σχεδόν επιβάρυνση στο περιβάλλον.

Η κυκλική οικονομία είναι ένα κυκλικό μοντέλο παραγωγής, στο οποίο τα παραγόμενα απόβλητα ελαχιστοποιούνται και συνεχίζουν με την ίδια ή «τροποποιημένη» μορφή τον κύκλο ζωής τους αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα χρήσης τους και περιορίζοντας τη σπατάλη και την υποβάθμιση των φυσικών πόρων. Στόχος της είναι η προσαρμογή της γεωργίας στην κλιματική αλλαγή. Η κυκλική οικονομία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, και ήδη υποστηρίζεται με πόρους δισεκατομμυρίων.

Το συγκριτικό πλεονέκτημα της Αεροπονίας σε σχέση με όλες τις προηγούμενες τεχνολογίες, είναι το ότι αξιοποιεί στο μέγιστο βαθμό τους περιορισμένους διαθέσιμους φυσικούς πόρους.



*Πλήρως Αυτοματοποιημένο Σύστημα **Αεροπονικής Καλλιέργειας Φυτών** (Σαλάχας 2012)*

2.3.3. Ακουαπονική ή Ενυδραιοπονία (Aquaponics)

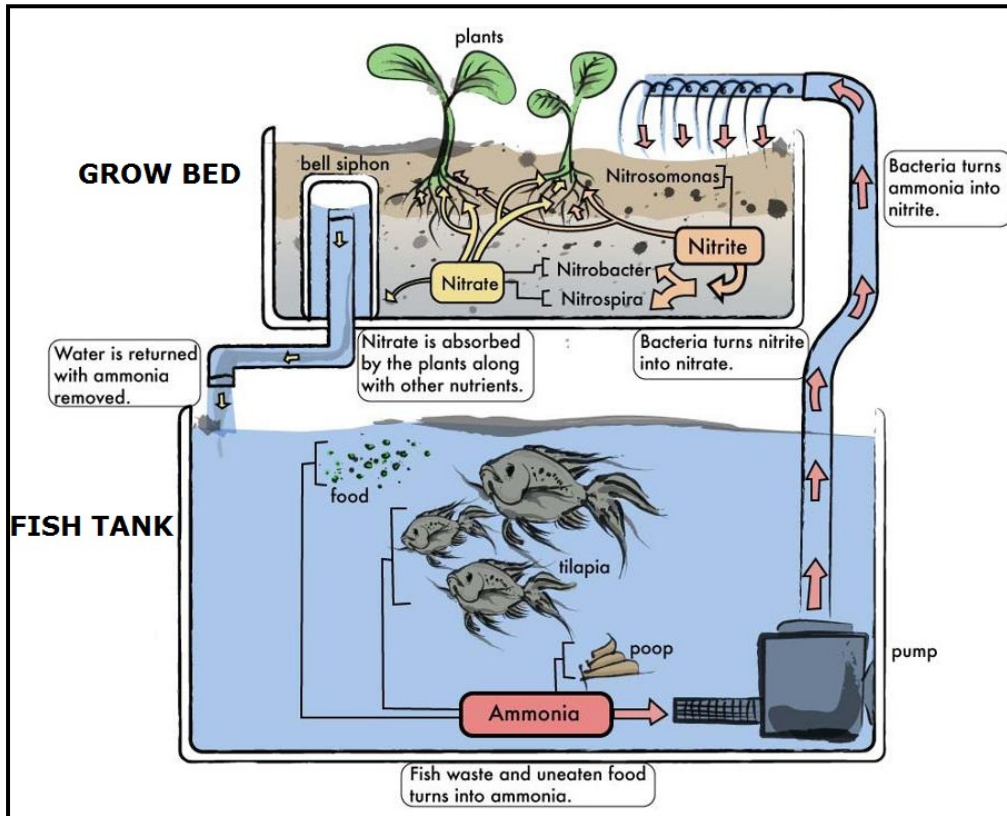
Η ενυδραιοπονία είναι ένα σύστημα υδατοκαλλιέργειας (Σχήμα 7) στο οποίο υδρόβια ζώα όπως σαλιγκάρια, ψάρια, караβίδες ή γαρίδες καλλιεργούνται σε δεξαμενές με συνδυασμό υδροπονίας όπου τα φυτά αναπτύσσονται σε νερό σε ένα συμβιωτικό περιβάλλον (Verner et al., 2017). Στην υδατοκαλλιέργεια, οι εκκρίσεις των υδρόβιων ζώων αυξάνονται και συσσωρεύονται στο νερό, αυξάνοντας την τοξικότητα σύμφωνα με τη βάση αμμωνίας ως τοξικά υποπροϊόντα για τα υδρόβια ζώα. Ως εκ τούτου, η υδατοκαλλιέργεια πρέπει να καθαριστεί από αυτό το τοξικό υλικό. Σε ένα σύστημα ενυδρείου, το νερό από ένα σύστημα υδατοκαλλιέργειας περνά στο σύστημα υδροπονίας όπου το τοξικό υποπροϊόν διασπάται από βακτηρίδια νιτροποίησης που ζουν στην επιφάνεια της βάσης καλλιέργειας φυτών (grow beds) αρχικά σε νιτρώδη και στη συνέχεια σε νιτρικά άλατα, τα οποία χρησιμοποιούνται από φυτά ως θρεπτικά συστατικά, και το νερό στη συνέχεια καθαρίζεται και επιστρέφει στο σύστημα υδατοκαλλιέργειας. Παρόλα αυτά, το νερό που χρησιμοποιείται περνάει διαμέσου ενός βιολογικού φίλτρου σε ένα μέρος όπου αναπτύσσονται βακτηρίδια νιτροποίησης και να λάβει χώρα μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά άλατα, τα οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν από τα φυτά. Δεδομένου ότι οι υφιστάμενες διαδικασίες υδροπονικής καλλιέργειας συνιστούν το θεμέλιο για όλα τα πλαίσια της ενυδραιοκαλλιέργειας, το μέγεθος, η ανάπτυξη και τα είδη των τροφίμων που καλλιεργούνται σε ένα πλαίσιο ενυδρείου δύναται να διαφέρουν όσο οποιοδήποτε πλαίσιο βρίσκεται σε κάποια συγκεκριμένη καλλιέργεια (EI-Kazzaz, 2017).

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι συστημάτων ενυδραιοπονίας είναι:

- 1- Η τεχνική Media bed είναι η απλούστερη μορφή ενυδραιοπονίας, όπου χρησιμοποιούνται δοχεία γεμάτα με μεσαίου μεγέθους πέτρες από διογκωμένο πηλό ή παρόμοια. Λαμβάνει χώρα άντληση νερού μέσα από μια δεξαμενή ψαριών επάνω από τα στρώματα που είναι γεμισμένα με νερό ενώ τα φυτά αναπτύσσονται στα πετρώματα. Αυτό το σύστημα δύναται να λάβει χώρα με δύο διαφορετικούς τρόπους, μέσω συνεχούς ροής νερού πάνω από τα πετρώματα, ή μέσω πλημμύρας και αποστράγγισης της βάσης ανάπτυξης των

φυτών, σε μια διαδικασία ενός κύκλου πλημμύρας και αποστράγγισης ή πλημμυρίδας και άμπωτης (Ebb και flow).

- 2- Η τεχνική θρεπτικών μεμβρανών_(NFT) η οποία αποτελεί μια κοινή μέθοδο υδροπονικής καλλιέργειας, η οποία ωστόσο δεν είναι τόσο συχνά χρησιμοποιούμενη στα συστήματα ακουπονικής ή ενυδρειοπονίας. Στο σύστημα NFT, λαμβάνει χώρα άντληση νερού το οποίο είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά και το οποίο έχει τη μορφή ενός πολύ λεπτού υμενίου κάτω από μικρές κλειστές υδρορροές. Τα φυτά αναπτύσσονται σε μικρά πλαστικά δοχεία αφήνοντας έτσι στο ριζικό τους σύστημα τη δυνατότητα πρόσβασης στο νερό και απορρόφησης των θρεπτικών συστατικών. Η μέθοδος NFT θεωρείται κατάλληλη μόνο για ορισμένους τύπους φυτών, και γενικότερα για τα φυλλώδη πράσινα λαχανικά. Τα μεγαλύτερα φυτά θα έχουν πολύ μεγάλα ριζικά συστήματα και ως εκ τούτου θα είναι πολύ βαριά για τις ελαφριές αναπτυσσόμενες υδρορροές.
- 3- Η καλλιέργεια σε βαθύ νερό (DWC), βασίζεται στην ιδέα των πλωτών φυτών πάνω από το νερό επιτρέποντας στις ρίζες να κρέμονται στο νερό. Αυτό δύναται να λάβει χώρα με πολλούς και διάφορους τρόπους. Αυτή η μέθοδος συνιστά μία από τις πλέον συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες εμπορικές μεθόδους. Η τεχνική DWC μπορεί να με επίπλευση ενός αφρώδες υλικού πάνω από τη δεξαμενή ψαριών. Παρόλα αυτά, μια ακόμη συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η καλλιέργεια των ψαριών σε μια δεξαμενή ψαριών μέσω της άντλησης του νερού από ένα σύστημα φιλτραρίσματος και, εν συνεχεία μεταφορά τους σε μεγάλα κανάλια όπου υπάρχουν πλωτές σχεδίες με αναπτυσσόμενα φυτά τα οποία επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού εξάγοντας θρεπτικά συστατικά. Το σύστημα αυτό αποτελεί ένα κλειστό σύστημα υδροπονίας ενώ λαμβάνει χώρα ανακυκλοφορία του θρεπτικού διαλύματος.



Σχήμα 7. Σύστημα Ενδραιοπονίας. Πηγή: <https://www.earth-ways.co.uk/event/aquaponics/#.YMNTN6gzbIU>



Σχήμα 8. Σύστημα Ενυδρειοπονίας (Κλαδάς, Σαλάχας)

2.3.4. Καλλιέργεια σε υποστρώματα (Substrate culture)



Σχήμα 8. Ορισμένα από τα χρησιμοποιούμενα υποστρώματα σε καλλιέργειες εκτός εδάφους

Το μέσο ανάπτυξης είναι το υποκατάστατο του εδάφους σε συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους. Χαρακτηριστικού του συστήματος αυτού είναι ότι χρησιμοποιείται ένα στερεό μέσο προκειμένου να παρέχει υποστήριξη στα φυτά. Το μέσο ανάπτυξης είναι υπεύθυνο στο να παρέχει οξυγόνο στις ρίζες του φυτού, να μεταφέρει νερό και τα διαλυμένα θρεπτικά συστατικά στις ρίζες διαμέσου του συστήματος άρδευσης, να ανακυκλώνει το θρεπτικό διάλυμα και να σταθεροποιεί τα φυτά λειτουργώντας ως

παράγοντας ενίσχυσης τους. Υπάρχουν διάφορα υποστρώματα (Σχήμα 8) που χρησιμοποιούνται ως μέσο ανάπτυξης που αποτελούνται από ανόργανα (φυσικά μέσα όπως, διογκωμένος πηλός, υαλοβάμβακας, χαλίκι, περλίτης, ελαφρόπετρα, πετροβάμβακας, άμμος, σεπιόλιθος, βερμικουλίτης, ηφαιστειακή τέφρα και ζεόλιθος ή συνθετικά · αφρώδη στρώματα, υδρογέλη και αφρώδες πλαστικό) ή οργανικά (φλοιός, κοκοφοίνικας, χόμα κοκοφοίνικα, δέρας, στέμφυλα, τύρφη, φλοιός σπάγκου ή φυτικών ινών (raffia), φλοιός ρυζιού, πριονίδι και κομμάτια ξύλου) (Olympios, 1999).

Τα συστήματα που καλλιεργούνται σε υπόστρωμα ταξινομούνται σύμφωνα με την διαδικασία αποστράγγισης σε δύο κύρια συστήματα (El-Behairy, 2015). Όπως αναφέρθηκε προηγούμενος, στις περισσότερες καλλιέργειες εκτός εδάφους που χρησιμοποίησαν υποστρώματα χωρίς δεξαμενή για την ανακυκλοφορία του θρεπτικού διαλύματος ανήκουν σε ανοικτές καλλιέργειες εκτός εδάφους, επομένως, πρέπει να ληφθεί περισσότερη μέριμνα για τη θρέψη των φυτών, επειδή το νερό άρδευσης με τα συμπληρώματα χάνεται ως επί το πλείστον. Η πλέον ελπιδοφόρα μέθοδος αποτελεί η ανοικτή καλλιέργεια υποστρώματος εξαιτίας της καλύτερης προσαρμοστικότητάς της στις συνθήκες των αγροτών. Σε χώρες όπου η εφαρμογή της υδροπονίας γίνεται για εμπορικούς λόγους, η χρήση των ανοικτών συστημάτων υδροπονικής καλλιέργειας δημιουργού προβλήματα ρύπανσης με συνέπεια να γίνεται ακολούθως χρήση των κλειστών συστημάτων. Τα κλειστά συστήματα με χρήση υποστρώματος έχουν ως πλεονέκτημα την αύξηση της αποτελεσματικότητας χρήσης του νερού, των θρεπτικών ουσιών και των φυτοφαρμάκων ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται μείωση των επιπτώσεων τους περιβάλλον. Ωστόσο είναι απαραίτητα να αναπτύσσεται ένα συγκεκριμένο σύστημα για κάθε καλλιέργεια (Tüzel et al., 2019).

2.3.5. Γενικές προδιαγραφές των χαρακτηριστικών των συστημάτων υδροπονίας

Ιδιότητες ουσιών που χρησιμοποιούνται στην καλλιέργεια εκτός εδάφους ή υδροπονία

Υπάρχουν πολλά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των αναπτυσσόμενων συστημάτων καλλιέργειας εκτός εδάφους, όπως αμίαντος, αλουμίνιο, σκυρόδεμα, κυματοειδή φύλλα, πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο, αφρός πολυστυρολίου, PVC, χάλυβες κλπ. Όλα αυτά τα είδη θα πρέπει να διαθέτουν χαρακτηριστικά αειφορίας (Olympios, 1999).

Τεχνικές προδιαγραφές των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των συστημάτων

Τα υλικά πρέπει να έχουν τις παρακάτω προδιαγραφές:.

- 1- Να μην παρουσιάζουν εκροή κατά τη διαδικασία εγκατάστασης και χρήσης και δυνατότητα αξιολόγησης πιθανών εκροών.
- 2- Να μην παρουσιάζουν επιβλαβή πτητικοποίηση υγρασίας ή ουσιών.
- 3- Να αντέχουν στη χρήση ατμών που γίνεται για τη συλλογή αποβλήτων, την υπερϊώδη ακτινοβολία και τα φυτοφάρμακα.
- 4- Να γίνεται εξασφάλιση της επαναφοράς των υλικών στους προμηθευτές για ανακύκλωση.
- 5- Να κοστίζουν όσο το δυνατό λιγότερο.
- 6- Να μην παρουσιάζουν αντιδράσεις μεταξύ τους ή με χρησιμοποιημένα διαλύματα (αδρανή).
- 7- Επίσης, τα μεταλλικά υλικά πρέπει να επικαλύπτονται με αδιάβροχα υλικά ώστε να μην αλληλεπιδρούν με οποιαδήποτε στερεά υλικά, υγρά ή αέρια.

Τεχνικές προδιαγραφές υποστηρικτικών υποστρωμάτων

Συχνά η υδροπονία ως τεχνική καλλιέργειας εκτός εδάφους χρησιμοποιεί μόνο νερό, χωρίς υπόστρωμα. Αυτό ισχύει για τις τεχνικές NFT ή Aero-hydroponics, οι οποίες δεν χρησιμοποιούν μέσα ή αρκούν για να λειτουργήσουν ως υποστηρικτικά φυτών. Ωστόσο, οι καλλιεργητές που χρησιμοποιούν τις τεχνικές Drip Irrigation, Deep Channel NFT ή την τεχνική Ebb και Flow, χρησιμοποιούν περισσότερο ή λιγότερο υποστηρικτικό υπόστρωμα ανάλογα με το αναπτυσσόμενο σύστημα που επιλέγουν. Τα υποστηρικτικά υποστρώματα πρέπει να έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες: (Olympios, 1999):

- 1- Αερισμός και αποστράγγιση.
- 2- Να γίνεται εφαρμογή σε φυσική μορφή δίχως την ανάγκη επεξεργασίας.
- 3- Δύναται να εξορυχθεί ή να παραχθεί από τη βιομηχανία.
- 4- Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (buffering action).
- 5- Να είναι εύκολο στη χρήση δίχως να προκαλεί περιβαλλοντικούς κινδύνους ή κινδύνους για την υγεία.
- 6- Δεν πρέπει να περιέχει χαλίκια, βαρέα μέταλλα και ραδιενεργούς ρύπους.

- 7- Θα πρέπει να έχει σταθερή ποιότητα, δίχως να προκαλεί μείωση των φυσικών ιδιοτήτων κατά τη χρήση του.
- 8- Θα πρέπει να έχουν διάρκεια ζωής για τουλάχιστον τρία χρόνια.
- 9- Θα πρέπει να είναι υδρόφιλο.
- 10- Θα πρέπει να είναι αδρανές, δίχως να προκαλεί κάποιου είδους αντίδραση με τα θρεπτικά συστατικά.
- 11- Να έχει χαμηλό κόστος.
- 12- Να έχει χαμηλή πυκνότητα.
- 13- Να διαθέτει ουδέτερο pH.
- 14- Να έχει αυξημένο πορώδες.
- 15- Να είναι ανακυκλώσιμα υλικά ή να καταστρέφονται χωρίς κίνδυνο.
- 16- Να είναι ανθεκτικά στην αποστείρωση αρκετές φορές χωρίς αλλαγή της δομικής ποιότητας.
- 17- Χωρίς παράσιτα.
- 18- Σταθερότητα οργανικής ύλης.
- 19- Να έχουν την ικανότητα να συγκρατούν το νερό και την αναλογία νερού προς αέρα.

Μία άλλη παράμετρος που θεωρείται σημαντική είναι στενή σχέση ανάμεσα στο υποστηρικτικό υπόστρωμα και της εφαρμογής των κύκλων άρδευσης, δεδομένου ότι ορισμένα από τα υποστρώματα είναι σε θέση να διατηρήσουν πολύ περισσότερη υγρασία από άλλα.

2.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υδροπονικής καλλιέργειας

Τα κύρια μειονεκτήματα που σχετίζονται με την υδροπονία είναι το κόστος. Το κόστος κατασκευής και τα λειτουργικά έξοδα για την ανάπτυξη των υδροπονικών συστημάτων θεωρούνται πολύ μεγάλα σε σχέση με την παραδοσιακή παραγωγή καλλιεργειών ανοικτού πεδίου. Ως εκ τούτου, είναι δύσκολο να θεωρηθούν οι υδροπονικές καλλιέργειες ως ή πιο επικερδείς από αυτές που παράγονται στο έδαφος. Πολλά υδροπονικά συστήματα είναι αρκετά εξελιγμένα τόσο ως προς τον σχεδιασμό τους, όσο και ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους. Συνεπώς απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι καλλιέργειες παραμένουν υγιείς. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος των υδροπονικών συστημάτων αναπτύσσεται σε ελεγχόμενες συνθήκες (π.χ. θερμοκήπια), η προμήθεια ενέργειας

συνιστά ένα πολύ σημαντικό κόστος, εξαιτίας της ανάγκης μεταφοράς θρεπτικών διαλυμάτων και του περιβαλλοντικού ελέγχου (Christie, 2014).

Αψηφώντας το οικονομικό κόστος της ανάπτυξης των υδροπονικών συστημάτων, η τεχνητή της υδροπονίας διαθέτει ένα ευρύ φάσμα πλεονεκτημάτων, τα περισσότερα από τα οποία παρέχονται από τη μη εξάρτηση από το έδαφος. Η καλλιέργεια εκτός έδαφος μειώνει πολλές από τις επιβλαβείς επιπτώσεις που προκαλούνται από την παραγωγή καλλιεργειών ανοιχτού πεδίου. Η υδροπονία δίνει τη δυνατότητα στα φυτά να καλλιεργούνται όλο το χρόνο μέσα σε ελεγχόμενες συνθήκες, να τοποθετούνται πιο κοντά μεταξύ τους, ή ακόμη και να αναπτύσσονται σε κάθετη διάταξη με αποτέλεσμα να παρέχονται αυξημένες αποδόσεις παραγωγής (Resh 2013). Δεοδμένου ότι κατά την διάρκεια της υδροπονικής καλλιέργειας γίνεται χρήση ενός θρεπτικού διαλύματος αντί για πότισμα ανοιχτού χωραφιού, ελαχιστοποιείται η κατανάλωση νερού στο 70-95% περίπου σε σχέση με την παραδοσιακή παραγωγή στο έδαφος (Bradley 2001). Επίσης δίνεται η δυνατότητα ελέγχου και συντήρησης του θρεπτικού διαλύματος, αποτρέποντας έτσι με αποτελεσματικό τρόπο το ενδεχόμενο απορροής. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η ανάπτυξη των υδροπονικών συστημάτων σε περιοχές όπου υπό κανονικές συνθήκες δεν θα ήταν δυνατή η καλλιέργεια και η παραγωγή φυτών (π.χ. άνυδρο, αστικό περιβάλλον). Η μετάβαση προς την υδροπονική καλλιέργεια τροφίμων σε αστικές περιοχές θα μπορούσε να περιορίσει την απώλεια φυσικών οικοτόπων, διατηρώντας περισσότερα φυσικά οικοσυστήματα και δημιουργώντας μια φυσική πρόοδο προς την αποκατάσταση των οικοτόπων (Nelkin & Caplow 2008).

2.5. Σύγκριση ανοικτών και κλειστών υδροπονικών συστημάτων

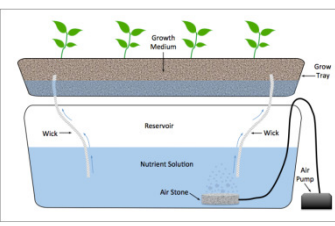
Τα ανοικτά υδροπονικά συστήματα χρησιμοποιούν παροχή θρεπτικού διαλύματος μόνο μία φορά, το οποίο ρέει και δεν επανακυκλοφορεί ή να ανακυκλώνεται. Το κλειστό υδροπονικό σύστημα επαναχρησιμοποιεί θρεπτικά διαλύματα που το επανακυκλοφορούν καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου παραγωγής της καλλιέργειας. Το ανοικτό υδροπονικό σύστημα μπορεί να μειώσει σημαντικά την πιθανότητα μόλυνσης, ωστόσο, αυτό το σύστημα απαιτεί υψηλές ποσότητες νερού και θρεπτικών ουσιών. Το ανοικτό υδροπονικό σύστημα είναι επομένως ακριβό όσον αφορά το νερό, το αντιδραστήριο και τη διάθεση χρησιμοποιημένου διαλύματος θρεπτικών ουσιών (Pardossi et al., 2011).

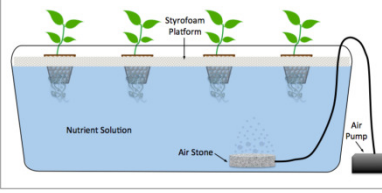
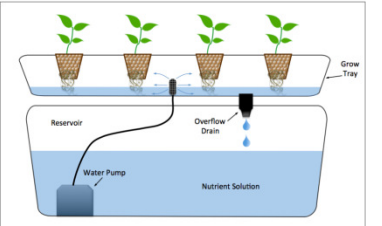
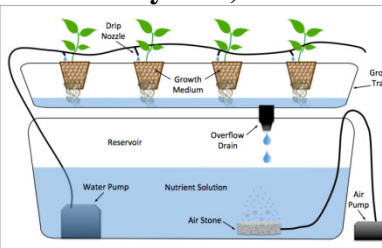
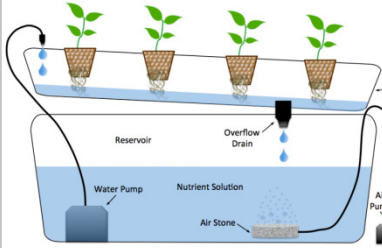
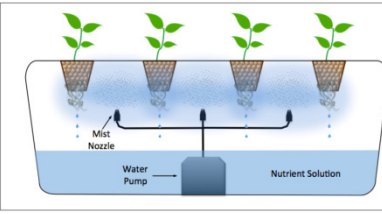
Τα κλειστά υδροπονικά συστήματα ενέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο μόλυνσης σε σχέση με το ανοιχτό υδροπονικό σύστημα, επειδή το διάλυμα επανακυκλοφορεί συνεχώς. Ωστόσο, τα παθογόνα μπορεί να μειωθούν με την απολύμανση και την τακτική αποστείρωση του κλειστού συστήματος. Τα κλειστά υδροπονικά συστήματα απαιτούν λιγότερο νερό και θρεπτικά συστατικά, αλλά απαιτούν επίσης προσωπικό με τεχνική τεχνογνωσία για τη διαχείριση και τον έλεγχο των περιστατικών ασθενειών και παρασίτων (Christie, 2014).

2.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τύπων των συστημάτων υδροπονικής καλλιέργειας

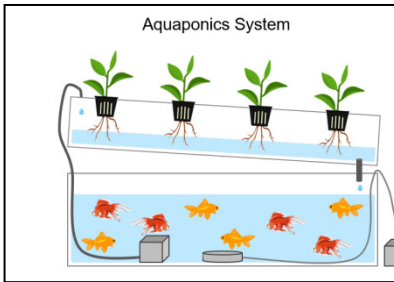
Στον πίνακα 2.1. που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων τύπων συστημάτων υδροπονικής καλλιέργειας.

Πίνακας 2.1. Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των τύπων υδροπονικής καλλιέργειας. Πηγή: Verner et al., 2017

	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<p>Σύστημα Wick</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Οικονομικό. ▪ Απλή ρύθμιση. ▪ Χαμηλή συντήρηση. ▪ Δεν απαιτείται αντλία θρεπτικών συστατικών ή ηλεκτρική ενέργεια. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Περιορισμένη πρόσβαση σε οξυγόνο. ▪ Πιο αργός ρυθμός ανάπτυξης. ▪ Καμία ανακυκλοφορία θρεπτικών ουσιών. ▪ Επιρρεπείς σε ανάπτυξη φυκών ▪ Λιγότερο αποτελεσματική από άλλες υδροπονικές μεθόδους. ▪ Συσσώρευση αλατιού χρειάζεται έκπλυση.
<p>Καλλιέργεια σε βαθύ νερό (DWC)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Φτηνός. ▪ Απλή ρύθμιση. ▪ Χαμηλή συντήρηση. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Κίνδυνος σήψης ρίζας εάν δεν καθαρίζεται τακτικά.

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Δεν απαιτείται αντλία θρεπτικών συστατικών ή ηλεκτρική ενέργεια. ▪ Αξιοπίστη. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Πιο αργός ρυθμός ανάπτυξης. ▪ Πρέπει να γεμίσει το νερό μέχρι οι ρίζες να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να πέσουν στο θρεπτικό διάλυμα. ▪ Πρέπει συχνά να ξαναγεμίζεται τη δεξαμενή.
<p>Συστήματα πλήρωσης και απορροής (Ebb και Flow System)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Οικονομικό ▪ Χαμηλή συντήρηση ▪ Η περίσσεια του θρεπτικού διαλύματος ανακυκλοφορεί. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Επιρρεπείς σε ανάπτυξη φυκών. ▪ Οι τεχνικές δυσλειτουργίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια καλλιεργειών.
<p>Σύστημα σταγόνων (Drip System)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Η περίσσεια του θρεπτικού διαλύματος ανακυκλοφορεί. ▪ Επαρκή ροή οξυγόνου 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Επιρρεπείς σε ανάπτυξη φυκών. ▪ Επιρρεπείς σε απόφραξη. ▪ Απαιτεί τακτικό καθαρισμό.
<p>Τεχνική θρεπτικών μεμβρανών (NFT)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Η περίσσεια θρεπτικών ουσιών ανακυκλοφορεί. ▪ Άφθονη ροή οξυγόνου. ▪ Επαρκής χώρος. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Επιρρεπείς σε απόφραξη. ▪ Οι τεχνικές δυσλειτουργίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια καλλιεργειών.
<p>Αερόπονικά Συστήματα (Aeroponic systems)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ικανότητα εκτροφής ψαριών. ▪ ανακυκλώνει το 95-99% του νερού. ▪ Εντελώς βιολογικό. ▪ Χρησιμοποιεί 90% λιγότερο νερό από την παραδοσιακή γεωργία ▪ Χωρίς χημικά φυτοφαρμάκων. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Υψηλό κόστος κατασκευής. ▪ Υψηλό κίνδυνο βλάβης του συστήματος. ▪ χρειάζεται τακτική παρακολούθηση. ▪ Υψηλή κατανάλωση ενέργειας. ▪ Χρειάζεται τεχνική εμπειρογνομοσύνη. ▪ χρειάζεται αξιοπίστη ηλεκτρική ενέργεια.

Ενυδρειοπονία (Aquaponics)



- Μέγιστη απορρόφηση θρεπτικών συστατικών.
- Η περίσσεια θρεπτικών ουσιών ανακυκλοφορεί.
- Άφθονη ροή οξυγόνου.
- Επαρκής χώρος.
- Περίπου 70% λιγότερο νερό από την υδροπονία.
- Επιρρεπείς σε απόφραξη.
- Οι τεχνικές δυσλειτουργίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια καλλιεργειών.
- Υψηλής τεχνολογίας.
- Χρονοβόρα.
- Δεν ταιριάζει σε πυκνά θρεπτικά συστατικά και πρόσθετα με βάση τα οργανικά.

Κεφάλαιο 3^ο Θρεπτικά Διαλύματα Υδροπονικών Συστημάτων

3.1. Εισαγωγή

Η χρήση της υδροπονικής καλλιέργειας για την παραγωγή φυτών έχει σημειώσει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια σε παγκόσμιο επίπεδο, δεδομένου ότι επιτρέπει αποτελεσματικότερη χρήση νερού και θρεπτικού διαλύματος, αλλά και γιατί επιτρέπει τον καλύτερο έλεγχο των συνθηκών ανάπτυξης και των ελεγχωμένων παρασίτων. Επιπρόσθετα, η υδροπονική παραγωγή είναι σε θέση να αυξήσει την ποιότητα και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών, με συνέπεια την επίτευξη υψηλότερης ανταγωνιστικότητας και υψηλότερων οικονομικών εισοδημάτων (Σάββας, 2012).

Μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν τα υδροπονικά συστήματα παραγωγής, το θρεπτικό διάλυμα θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους καθοριστικούς παράγοντες της απόδοσης και της ποιότητας των καλλιεργειών. Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει να εξηγήσει πτυχές που σχετίζονται με τη θρέψη των φυτών και τις επιπτώσεις της στην παραγωγή υδροπονικών καλλιεργειών, λαμβάνοντας υπόψη βασικές πτυχές όπως τα θρεπτικά διαλύματα και η ανάπτυξή τους με την παροχή των ετών, τα συστατικά των θρεπτικών διαλυμάτων (μακρο και μικροθρεπτικά συστατικά), λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια της θρεπτικής αναγκαιότητας σε ανώτερα φυτά και την ταξινόμησή τους, καθώς και μια σύντομη περιγραφή των λειτουργιών τους στα φυτά. Επίσης γίνεται ορισμός της έννοιας «βελτιωτικό στοιχείο» καθώς και ταξινόμησή τους, με αναφορά σε ορισμένα παραδείγματα της προσθήκης τους σε θρεπτικά διαλύματα. Ορίζεται επίσης η έννοια του pH του θρεπτικού διαλύματος, καθώς και η επίδρασή του στη θρεπτική διαθεσιμότητα. Γίνεται αναφορά στο οσμωτικό δυναμικό του θρεπτικού διαλύματος και στη σχέση του με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, πέραν των χρησιμοποιούμενων μονάδων και των ισοδυναμιών τους, και την επίδραση και των δύο παραγόντων στην πρόσληψη θρεπτικών συστατικών στα φυτά. Επιπλέον γίνεται επισήμανση της σημασίας της οξυγόνωσης στο θρεπτικό διάλυμα. Αναφέρονται επίσης κλιματολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των θρεπτικών διαλυμάτων, με έμφαση στη θερμοκρασία. Περιγράφεται επίσης ο σχηματισμός και η παρασκευή διατροφικών διαλυμάτων, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές πηγές λιπασμάτων και την ποιότητα του νερού. Τέλος, τίθενται θέματα που σχετίζονται με τη διαχείριση των θρεπτικών διαλυμάτων ανάλογα με τις ειδικές θρεπτικές ανάγκες και το υδροπονικό σύστημα που χρησιμοποιείται,

συμπεριλαμβανομένων διαγραμμάτων ροής και αριθμών που διευκολύνουν την κατανόηση των εννοιών (Σάββας, 2012).

3.2. Θρεπτικό διάλυμα

Το θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται στα υδροπονικά συστήματα αποτελεί ένα υδατικό διάλυμα που περιλαμβάνει κυρίως ανόργανα ιόντα από διαλελυμένα άλατα βασικών στοιχείων για ανώτερα φυτά. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν και ορισμένες οργανικές ενώσεις όπως χηλικά άλατα σιδήρου. Τα βασικά στοιχεία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών και η απουσία τους αποτρέπει τον πλήρη κύκλο ζωής των φυτών. Συνεπώς υπάρχουν δεκαεπτά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των περισσότερων φυτών: άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο, φώσφορο, κάλιο, ασβέστιο, μαγνήσιο, θείο, σίδηρο, χαλκό, ψευδάργυρο, μαγγάνιο, μολυβδαίνιο, βόριο, χλώριο και νικέλιο. Εξαιρουμένου του άνθρακα και του οξυγόνου, που παρέχονται από την ατμόσφαιρα, η λήψη των βασικών στοιχείων γίνεται από το μέσο ανάπτυξης. Άλλα στοιχεία που θεωρούνται σημαντικά για την ανάπτυξη των φυτών είναι το νάτριο, το πυρίτιο, το βανάδιο, το σελήνιο, το κοβάλτιο, το αλουμίνιο και το ιώδιο. Τα στοιχεία αυτά είναι σε θέση να αντισταθμίσουν τις τοξικές επιδράσεις άλλων στοιχείων ή μπορεί να αντικαταστήσουν τα βασικά θρεπτικά συστατικά σε λιγότερο συγκεκριμένο ρόλο. Τα πιο βασικά θρεπτικά διαλύματα συμπεριλαμβάνουν στη σύνθεσή τους μόνο άζωτο, φώσφορο, κάλιο, ασβέστιο, μαγνήσιο και θείο και συμπληρώνονται με μικροθρεπτικά συστατικά (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012).

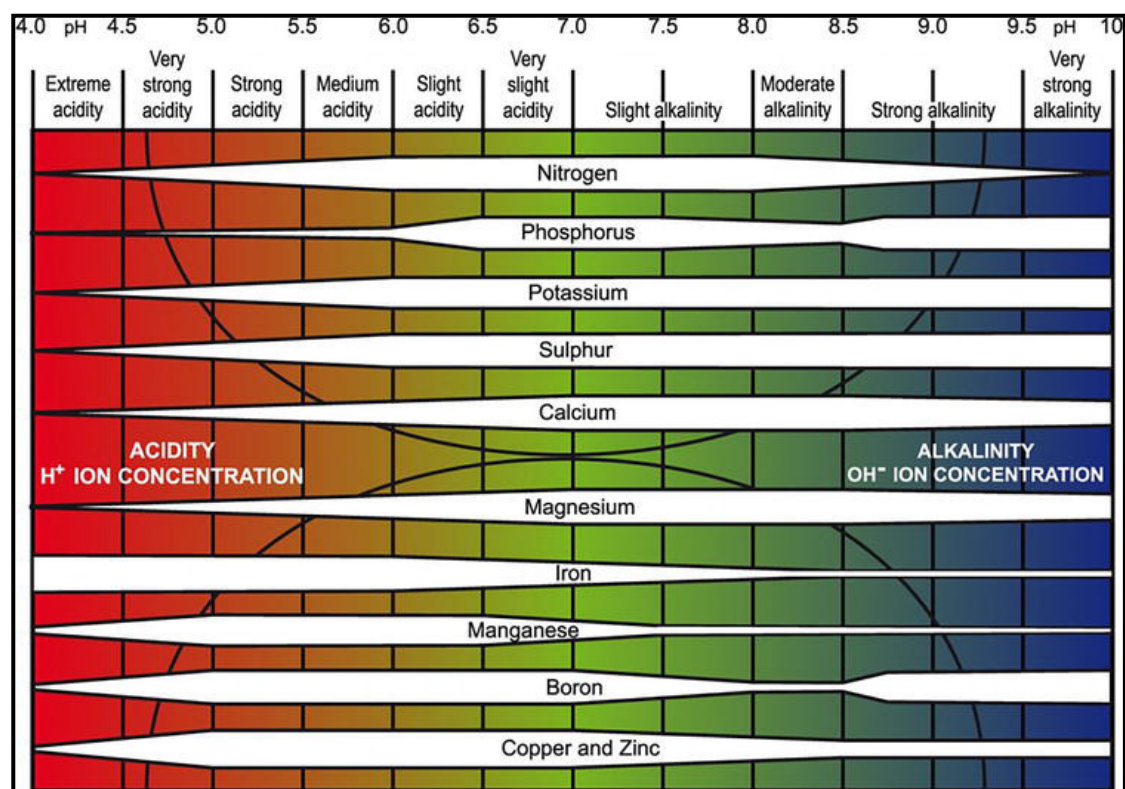
Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και το οσμωτικό δυναμικό του διαλύματος. Επιπρόσθετα, υπάρχουν και άλλες παράμετροι που προσδιορίζουν ένα θρεπτικό διάλυμα όπως θα συζητηθεί παρακάτω λεπτομερώς.

3.2.1. pH του θρεπτικού διαλύματος

Το pH συνιστά την παράμετρο που προσδιορίζει την οξύτητα ή την αλκαλικότητα ενός διαλύματος. Αυτή η τιμή δείχνει τη σχέση ανάμεσα στη συγκέντρωση των ελεύθερων ιόντων H^+ και του OH^- σε ένα διάλυμα και παίρνει τιμές από 0 έως 14.

Το διάγραμμα Trough δείχνει την επίδραση του pH στη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών στα φυτά (Εικόνα 1). Η μεταβολή του pH ενός θρεπτικού διαλύματος είναι σε θέση να επηρεάσει τη σύνθεσή του, τον στοιχειακό προσδιορισμό και τη

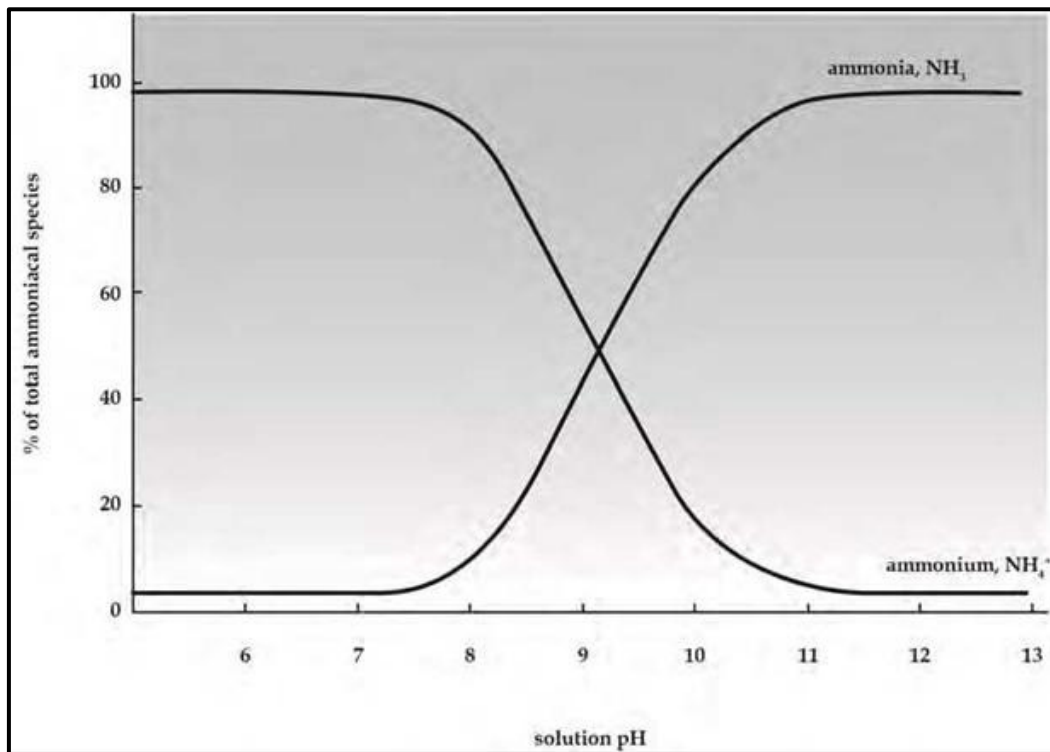
βιοδιαθεσιμότητα. Ο όρος «διαχωρισμός» υποδηλώνει την κατανομή των στοιχείων μεταξύ των διαφόρων χημικών και φυσικών μορφών τους όπως: ελεύθερα ιόντα, διαλυτά σύμπλοκα, χηλικά, ζεύγη ιόντων, στερεές και αέριες φάσεις και διαφορετικές καταστάσεις οξείδωσης (De Rijck & Schrevens, 1998a).



Εικόνα 1. Διάγραμμα Τρουγ της επίδρασης του pH στη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών στα φυτά. Πηγή: Ali Al Meselmani, 2022

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των θρεπτικών διαλυμάτων είναι ότι πρέπει να περιέχουν τα ιόντα σε διάλυμα και σε χημικές μορφές που μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά, έτσι σε υδροπονικά συστήματα η παραγωγικότητα των φυτών σχετίζεται στενά με την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών και τη ρύθμιση του pH. Κάθε θρεπτικό συστατικό παρουσιάζει διαφορετικές αποκρίσεις σε μεταβολές στο pH του θρεπτικού διαλύματος όπως περιγράφεται παρακάτω (Trejo-Télez & Gómez-Merino, 2012)

Στο θρεπτικό διάλυμα, το NH_3 σχηματίζει μόνο ένα σύμπλοκο με H^+ . Για εύρος pH ανάμεσα στο 2 και 7, το NH_3 υπάρχει εντελώς ως NH_4^+ (Εικόνα 2). Αυξανόμενου του pH πάνω από 7 η συγκέντρωση του NH_4^+ μειώνεται, ενώ η συγκέντρωση του NH_3 αυξάνει (De Rijck & Schrevens, 1999).

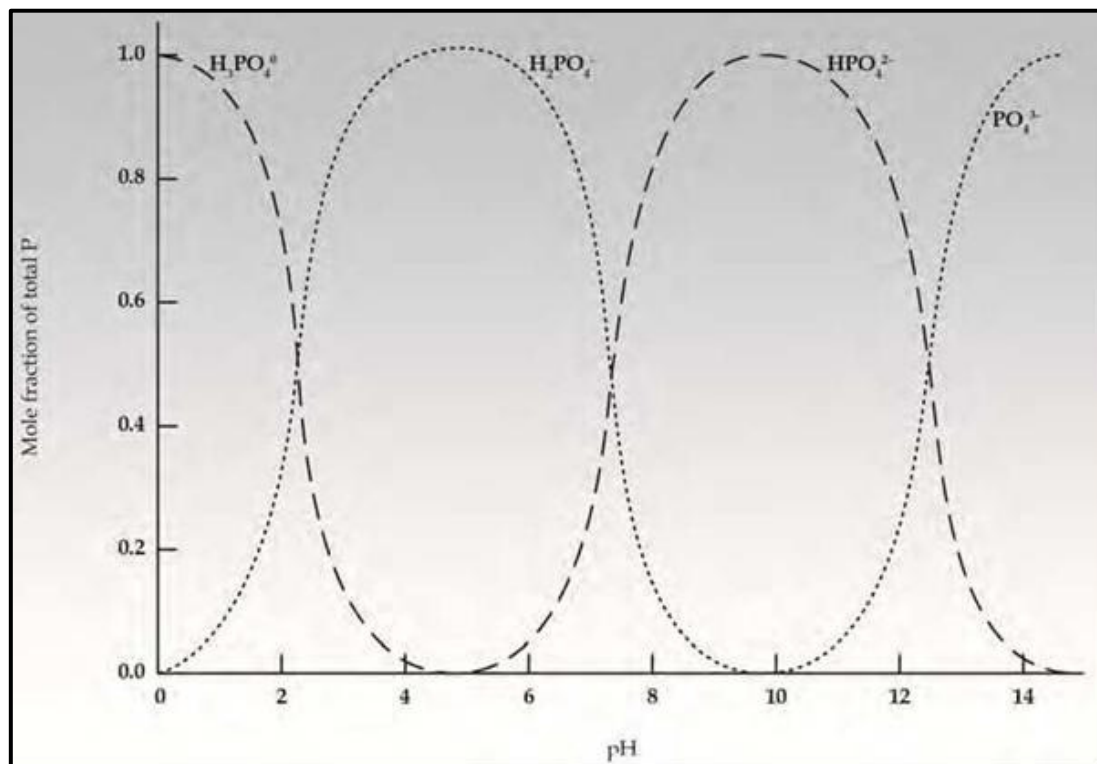


Εικ. 2. Αμμωνιακός προσδιορισμός σε συνάρτηση του pH. Πηγή: Trejo-Télliez & Gómez-Merino, 2012

Οι Tyson et al. (2007) σε μια μελέτη για τον προσδιορισμό της απόκρισης του ρυθμού νιτροποίησης σε ένα βιολογικό φίλτρο περλίτη (μέσο ανάπτυξης ρίζας) που εκτίθεται σε υδροπονικό θρεπτικό διάλυμα, ποικίλες συγκεντρώσεις NO₃ και δύο επίπεδα pH (6,5 και 8,5), θεώρησε ότι η νιτροποίηση επηρεάστηκε σημαντικά από το pH του νερού. Η αύξηση του ρυθμού οξείδωσης της αμμωνίας (1,75) σε σχέση με τον ρυθμό οξείδωσης του νιτρώδους (1,3) σε pH 8,5 έχει ως συνέπεια τη συσσώρευση NO₂⁻ σε επίπεδα κοντά σε εκείνα τα επιβλαβή για τα φυτά (παρατηρούμενη κορυφή 4,2 mg L⁻¹ NO₂⁻). Η πιθανότητα αύξησης των επιπέδων της μη ιονισμένης αμμωνίας, η οποία μείωσε την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών από την καταβύθιση μικροθρεπτικών συστατικών, είναι επιπλέον προβλήματα που σχετίζονται με το pH=8,5.

Ο φωσφόρος αποτελεί ένα στοιχείο που η μορφή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον του pH. Στο ριζικό σύστημα ο φώσφορος δύναται να βρεθεί ως ιόντα PO₄³⁻, HPO₄²⁻ και H₂PO₄⁻. Τα HPO₄²⁻ και H₂PO₄⁻ συνιστούν τις κύριες μορφές P που χρησιμοποιούνται από φυτά. Σε ένα αδρανές υπόστρωμα, η μεγαλύτερη ποσότητα P που είναι διαθέσιμη σε ένα θρεπτικό διάλυμα εμφανίζεται όταν το pH του είναι ελαφρώς όξινο (pH=5). Όσον αφορά στα αλκαλικά και πολύ όξινα διαλύματα, εμφανίζεται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης P (Dyśko et al., 2008). Ως εκ τούτου,

με pH=5, το 100% του P υπάρχει ως H_2PO_4^- . Αυτή η μορφή μετατρέπεται σε HPO_4^{2-} σε pH=7,3 (pKa2), φτάνοντας το 100% σε pH=10. Το εύρος pH που κυριαρχεί το ιόν $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ στο HPO_4^- είναι μεταξύ 5 και 6 (De Rijck & Schrevens, 1997). Ο εξαρτώμενος από το pH προσδιορισμός του P φαίνεται στην Εικόνα 3.



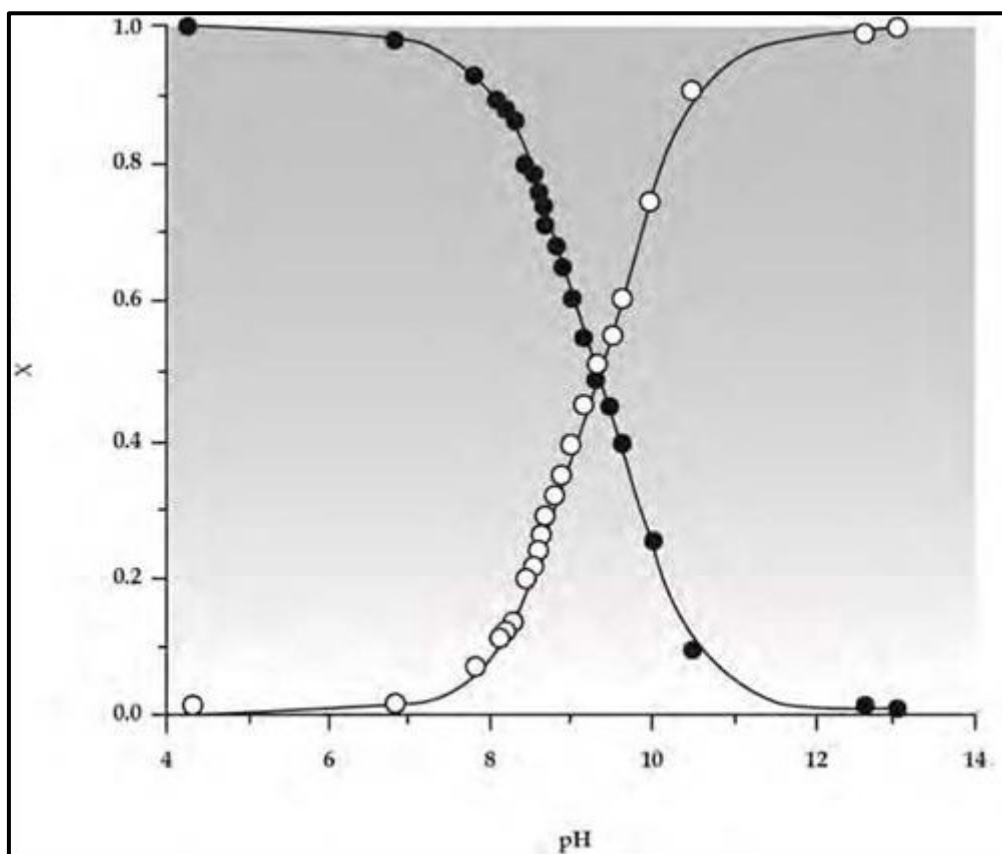
Εικόνα 3. Προσδιορισμός του P ανάλογα με το pH. Πηγή: Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012

Η ύπαρξη του K είναι σχεδόν εντελώς ελεύθερη με τη μορφή ιόντος σε ένα θρεπτικό διάλυμα με τιμές pH από 2 έως 9. Μόνο ελάχιστες ποσότητες K^+ δύναται να δημιουργήσουν ένα διαλυτό σύμπλοκο με SO_4^{2-} ή δύναται να συνδεθούν με το Cl^- (De Rijck & Schrevens, 1998a). Όπως το K, έτσι και το Ca και το Mg διατίθενται στα φυτά σε ένα ευρύ φάσμα pH. Παρόλα αυτά η εμφάνιση άλλων ιόντων μπορεί να παρέμβει στη διαθεσιμότητά τους εξαιτίας του σχηματισμού ενώσεων με διαφορετικό βαθμό διαλυτότητας. Δεδομένου ότι το νερό περιέχει φυσικά HCO_3^- , αυτό το ανιόν μετατρέπεται σε CO_3^{2-} στην περίπτωση που το pH είναι υψηλότερο από 8,3 ή σε H_2CO_3 στην περίπτωση που το pH είναι μικρότερο από 3,5. Το H_2CO_3 παρουσιάζει χημική ισορροπία με το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Αυτό έχει ως συνέπεια σε συνθήκες pH άνω του 8,3, τα ιόντα Ca^{2+} και Mg^{2+} να καθιζάνουν με μεγάλη ευκολία

ως ανθρακικά άλατα (Trejo-Télliez & Gómez-Merino, 2012). Επιπλέον στην περίπτωση που το pH του θρεπτικού διαλύματος αυξάνεται, επικρατεί το ιόν HPO_4^{2-} , το οποίο με τη σειρά του καθιζάνει με Ca^{2+} όταν το προϊόν της συγκέντρωσης αυτών των ιόντων είναι μεγαλύτερο από 2,2, εκφραζόμενο σε mol m^{-3} (Steiner, 1984). Περαιτέρω το θεικό σχηματίζει σχετικά ισχυρά σύμπλοκα με Ca^{2+} και Mg^{2+} (De Rijck & Schrevens, 1998b). Στην περίπτωση που το pH αυξάνεται από 2 σε 9, το SO_4^{2-} σχηματίζει διαλυτά σύμπλοκα με Mg^{2+} ως MgSO_4 και με K^+ ως KSO_4^- αυξάνεται (De Rijck & Schrevens, 1999).

Ο Fe, ο Cu, ο Zn, το B και το Mn δεν είναι διαθέσιμα σε pH υψηλότερο από 6,5 (Tyson, 2007). Παράδειγμα αποτελεί το *Triticum aestivum*, όπου η καταβύθιση Mn στις επιφάνειες των ριζών συσχετίστηκε με την αύξηση του pH στις ρίζες του φυτού σε τιμές πάνω από 5,5 (Akon, 2019). Το B απορροφάται από τα φυτά με τη μορφή του βορικού οξέως, το οποίο δεν διαχωρίζεται έως ότου το pH φτάσει στο 7. Σε υψηλότερες τιμές pH, το βορικό οξύ δέχεται ιόντα υδροξειδίου προκειμένου να σχηματίσει ανιονικά είδη (Tariq & Mott, 2007) (Εικόνα. 4)

Συμπερασματικά λοιπόν η διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών για πρόσληψη φυτών σε pH άνω του 7 μπορεί να περιοριστεί λόγω της καθίζησης των Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_3^{-4} , Ca^{2+} και Mg^{2+} σε αδιάλυτα και μη διαθέσιμα άλατα (Resh, 2004). Οι σωστές τιμές pH του θρεπτικού διαλύματος για την ανάπτυξη των καλλιεργειών, κυμαίνονται μεταξύ 5,5 και 6,5.



Εικόνα 4. Διαδικασία μετασχηματισμού βορικού οξέος (μαύροι κύκλοι) και μορφών ανιόντος βορικού οξέος (λευκοί κύκλοι) σε συνάρτηση την τιμή του pH. Πηγή:

Bishop et al., 2004

3.2.2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος

Το συνολικό ιοντικό δυναμικό ενός θρεπτικού διαλύματος είναι σε θέση να καθορίσει την ανάπτυξη, την εξέλιξη και την παραγωγή των φυτών. Το συνολικό περιεχόμενο των ιόντων διαλυμένων αλάτων εντός του θρεπτικού διαλύματος ασκεί μια δύναμη που ονομάζεται οσμωτική πίεση (OP). Η Ωσμωτική πίεση συνιστά μια συνεργατική ιδιότητα των θρεπτικών διαλυμάτων και εξαρτάται από την ποσότητα των διαλυμένων ουσιών. Επιπλέον, ο όρος δυναμικό διαλυμένης ουσίας ή οσμωτικό δυναμικό χρησιμοποιούνται κατά κόρον όταν αναφερόμαστε σε θρεπτικό διάλυμα, που εκφράζουν την επίδραση των διαλυμένων ουσιών στο δυναμικό του νερού. Η συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών μειώνει την ελεύθερη ενέργεια του νερού προκαλώντας αραίωση στο νερό. Έτσι, οι όροι οσμωτική πίεση και οσμωτικό δυναμικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά, λαμβάνοντας υπόψη τις μονάδες που χρησιμοποιούνται, συνήθως atm, bar και MPa (Ali Al Meselmani, 2022).

Για την έμμεση εκτίμηση της οσμωτικής πίεσης του θρεπτικού διαλύματος χρησιμοποιείται η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), η οποία συνιστά ένα δείκτη της συγκέντρωσης άλατος που προσδιορίζει τη συνολική ποσότητα αλάτων σε ένα διάλυμα. Συνεπώς η EC του θρεπτικού διαλύματος αποτελεί έναν καλό δείκτη της συγκέντρωσης διαθέσιμων ιόντων στη ριζική ζώνη των φυτών (Nemali & van Iersel, 2004). Ο υπολογισμός της οσμωτικής πίεσης για ένα θρεπτικό διάλυμα με τη χρήση της EC δύναται να λάβει χώρα με τη χρήση των ακόλουθων εμπειρικών σχέσεων (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012):

$$\begin{aligned} OP \text{ (atm)} &= 0,36 \times EC \text{ (σε dS m}^{-1} \text{ στους } 25 \text{ }^{\circ}\text{C)} \\ OP \text{ (bar)} &= -0,36 \times EC \text{ (σε dS m}^{-1} \text{ στους } 25 \text{ }^{\circ}\text{C)} \\ OP \text{ (MPa)} &= OP \text{ (bar)} \times 0,1 \end{aligned}$$

Τα ιόντα που σχετίζονται με EC είναι Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} , H^{+} , NO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , HCO_3^{-} , OH^{-} (USDA, 2001). Δεδομένου ότι η παροχή μικροθρεπτικών συστατικών, δηλαδή Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo και Ni, είναι σε πολύ μικρά επίπεδα σε σχέση με τα άλλα στοιχεία (μακροθρεπτικά συστατικά), δεν έχουν σημαντική επίδραση στην EC (Sonneveld & Voogt, 2009).

Το ιδανικό EC είναι συγκεκριμένα για την εκάστοτε καλλιέργεια και εξαρτάται από τις υφιστάμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (Sonneveld & Voogt, 2009). Παρόλα αυτά, οι τιμές EC για τα υδροπονικά συστήματα κυμαίνονται από 1,5 έως 2,5 ds m^{-1} . Η ύπαρξη υψηλότερης τιμής EC μπορεί να εμποδίσει την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών προκαλώντας αύξηση της οσμωτικής πίεσης, ενώ χαμηλότερη τιμή EC δύναται να επηρεάσει σημαντικά την υγεία και την απόδοση των φυτών. Το ποσοστό μείωσης της πρόσληψης νερού συσχετίζεται σημαντικά και γραμμικά με την τιμή της EC (Dalton et al., 1997). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των καλλιεργειών σε σχέση με την ανοχή στην αλατότητα.

Όπως γίνεται φανερό από τον Πίνακα 1, ορισμένα είδη καλλιεργειών δύναται να αναπτυχθούν σε υψηλά επίπεδα EC καθώς επίσης μέσω της σωστής διαχείρισης της EC του θρεπτικού διαλύματος δύναται να αποτελέσει σημαντικό και αποτελεσματικό βελτίωσης της ποιότητας των λαχανικών (Gruda, 2009). Ειδικότερα, οι παράγοντες της ποιότητας των φρούτων, όπως ο παράγοντας της περιεκτικότητας σε διαλυτά στερεά, της τιτλοδοτούμενης οξύτητας και της ξηρής ύλης αυξάνονται, με την αύξηση του επιπέδου EC του θρεπτικού διαλύματος από 2 σε 10 dS m^{-1} . Συνεπώς, το νερό βαθέων

υδάτων (DSW) χρησιμοποιείται για θρεπτικό διάλυμα λόγω της υψηλής ποσότητας Na^+ , Mg^{2+} , K^+ και Ca^{2+} (Chadirin et al., 2007).

Πίνακας 1. Κατώτατο όριο EC για διαφορετικές ομάδες αλατότητας και παρουσίαση παραδειγμάτων από διάφορες καλλιέργειες. Πηγή: Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012

Ομάδα αλατότητας	Όριο EC, dS m^{-1}	Παράδειγμα καλλιεργειών
Ευαίσθητη	1.4	μαρούλι, καρότο, φράουλα, κρεμμύδι
Μέτρια ευαίσθητη	3.0	μπρόκολο, λάχανο, ντομάτα, αγγούρι, ραπανάκι, πιπεριά
Μέτρια ανεκτική	6.0	σόγια, λόλιο
Ανεκτική	10.0	φυσικός χλοοτάπητας αγριάδα, γρασίδι, βαμβάκι

3.2.3. Σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος

Σύμφωνα με προηγούμενες πληροφορίες, τα θρεπτικά διαλύματα συνήθως περιέχουν έξι βασικά θρεπτικά συστατικά: άζωτο, φώσφορο, νάτριο, κάλιο, ασβέστιο και μαγνήσιο. Με βάση την αναλογία των ανιόντων: NO_3^- , H_2PO_4^- και SO_4^{2-} και την αναλογία κατιόντων K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , ο Steiner ανέπτυξε την έννοια του ιοντικού λόγου. Με αυτόν τον τρόπο, ο περιορισμός της ιοντικής ισορροπίας καθιστά αδύνατη την παροχή ενός ιόντος χωρίς την εισαγωγή ενός αντισταθμιστικού ιόντος. Εάν συμβεί ακατάλληλη σχέση μεταξύ τους, η απόδοση του σχεδίου μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012).

Η αλλαγή στη συγκέντρωση ιόντων πρέπει να συνοδεύεται είτε από μια αντίστοιχη αλλαγή στο ιόν του αντίθετου φορτίου, μια συμπληρωματική αλλαγή σε άλλα ιόντα του ίδιου φορτίου ή και από τα δύο (Ali Al-Maslmani, 2022).

Τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν ιόντα σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις όταν ένα θρεπτικό διάλυμα εφαρμόζεται συνεχώς. Έχει αναφερθεί ότι μεγάλο ποσοστό των θρεπτικών συστατικών δεν χρησιμοποιούνται από τα φυτά ή η πρόσληψή τους δεν επηρεάζει την παραγωγή. Για παράδειγμα, έχει βρεθεί ότι στο ανθούριο, το 60% των

θρεπτικών συστατικών χάνεται κατά τη διήθηση (Dufour & Guérin, 2005), ωστόσο, σε κλειστά συστήματα, η απώλεια θρεπτικών συστατικών από το περιβάλλον της ρίζας ελαχιστοποιείται (Voogt, 2002). Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η συγκέντρωση του θρεπτικού διαλύματος μπορεί να μειωθεί κατά 50% χωρίς καμία αρνητική επίδραση στη βιομάζα και στην ποιότητα της ζέρμπερας (Zheng et al., 2005) και του γερανιού (Rouphael et al., 2008). Κατά συνέπεια, οι Siddiqi et al. (1998) δεν ανέφεραν καμία δυσμενή επίδραση στην ανάπτυξη, την απόδοση και την ποιότητα των καρπών της ντομάτας όταν εφαρμόστηκε μείωση των συγκεντρώσεων μακροθρεπτικών συστατικών στο 50% του επιπέδου ελέγχου καθώς και διακοπή της αναπλήρωσης του διαλύματος τροφοδοσίας για 16 ημέρες μετά από 7 μήνες ανάπτυξης σε επίπεδα ελέγχου. Ωστόσο, αναμένεται ότι σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, οι πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις δεν καλύπτουν την ελάχιστη ζήτηση ορισμένων θρεπτικών συστατικών.

Από τη μία πλευρά, τα διαλύματα θρεπτικών ουσιών με υψηλή συγκέντρωση μπορεί να οδηγήσουν σε υπερβολική πρόσληψη θρεπτικών συστατικών, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε τοξικές επιδράσεις. Αντίθετα, υπάρχουν ενδείξεις θετικής επίδρασης υψηλών συγκεντρώσεων του θρεπτικού διαλύματος. Στο ισπανικό φασκόμηλο (*Salvia hispanica*), η αύξηση της συγκέντρωσης του Hoagland στο 200% προκάλεσε τα φυτά να ανθίσουν 8 ημέρες νωρίτερα από τα φυτά σε χαμηλές συγκεντρώσεις, αυξάνοντας το συνολικό ξηρό βάρος και την επιφάνεια των φύλλων (Kang & van Iersel, 2004). Ομοίως, τα υψηλά επίπεδα K^+ στο θρεπτικό διάλυμα (14,2 meq L⁻¹ έναντι 3,4 meq L⁻¹) αύξησαν την ξηρή ουσία των καρπών, την ολική περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά και τη συγκέντρωση λυκοπενίου της ντομάτας (Fanasca et al., 2006).

Η εξήγηση για αυτές τις φαινομενικά αντιφατικές αντιδράσεις είναι η ύπαρξη βέλτιστων συγκεντρώσεων ορισμένων θρεπτικών ουσιών σε διάλυμα για καλλιέργεια υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς και οι σχετικές αναλογίες τους, παρά οι απόλυτες συγκεντρώσεις τους ως καθοριστικοί παράγοντες (Juarez et al., 2006). Για να αποφευχθούν αντικρουόμενες παρατηρήσεις, οι Dufour & Guérin (2005) προτείνουν: α) παρακολούθηση της διαθεσιμότητας θρεπτικών ουσιών μέσω αλλαγών στην ιοντική σύνθεση του υποστρώματος χρησιμοποιώντας ανάλυση διήθησης και β) αξιολόγηση της πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά χρησιμοποιώντας ανάλυση θρεπτικών ουσιών στα φύλλα. Επιπλέον, ο Voogt (2002) επισημαίνει ότι η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος πρέπει να αντικατοπτρίζει τους λόγους πρόσληψης

μεμονωμένων στοιχείων ανά καλλιέργεια και καθώς η ζήτηση μεταξύ ειδών διαφέρει, η βασική σύνθεση ενός θρεπτικού διαλύματος είναι ειδική για κάθε καλλιέργεια. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι η πρόσληψη διαφέρει μεταξύ των στοιχείων και του συστήματος που χρησιμοποιείται. Παραδείγματος χάριν σε ανοιχτά υδροπονικά συστήματα στα οποία επικρατεί ελεύθερη αποστράγγιση, μεγάλο τμήμα του θρεπτικού διαλύματος χάνεται με έκπλυση. Υπάρχουν πολλά σκευάσματα διατροφικών διαλυμάτων. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά βασίζονται σε εμπειρικά δεδομένα. Ο Πίνακας 2 περιλαμβάνει μερικά από αυτά.

Πίνακας 2. Συγκεντρώσεις βασικών ορυκτών στοιχείων στα θρεπτικά διαλύματα σύμφωνα με διάφορους συγγραφείς Πηγή: Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012; Ali Al Meselmani, 2022

Στοιχείο	Hoagland & Arnon (1938)	Hewitt (1966)	Cooper (1979)	Steiner (1984)
	mg L ⁻¹			
N	210	168	200-236	168
P	31	41	60	31
K	234	156	300	273
Ca	160	160	170-185	180
Mg	34	36	50	48
S	64	48	68	336
Fe	2.5	2.8	12	2-4
Cu	0.02	0.064	0.1	0.02
Zn	0.05	0.065	0.1	0.11
Mn	0.5	0.54	2.0	0.62
B	0.5	0.54	0.3	0.44
Mo	0.01	0.04	0.2	Δεν λήφθηκε

Θερμοκρασία του θρεπτικού διαλύματος

Η θερμοκρασία που έχει το θρεπτικό διάλυμα είναι σε θέση να επηρεάσει την ποσότητα πρόσληψης νερού και των θρεπτικών συστατικών.

Για παράδειγμα εξετάστηκαν δύο διαφορετικές θερμοκρασίες στο θρεπτικό διάλυμα (κρύο και ζεστό διάλυμα, 10 και 22 °C, αντίστοιχα) κατά τη διάρκεια δύο περιόδων ανθοφορίας τριαντάφυλλων (*Rosa × hybrida* cv. Grand Gala).

Γενικά, το κρύο διάλυμα αύξησε την πρόσληψη NO₃ και την παραγωγή λεπτών λευκών ριζών, αλλά μείωσε την πρόσληψη νερού. Η θερμοκρασία του θρεπτικού διαλύματος είχε επίδραση στη φωτοσυνθετική λειτουργία των φυτών. Γενικά, η κβαντική απόδοση και το κλάσμα των ανοιχτών κέντρων αντίδρασης PSII ήταν υψηλότερα στα φυτά τριανταφυλλιάς ψυχρής καλλιέργειας (Calatayud et al., 2008).

Στα σπορόφυτα σπανάκι, αξιολογήθηκαν αξιολογήθηκαν τρεις θερμοκρασίες νερού άρδευσης (24, 26 και 28 ° C) για 8 εβδομάδες. Το μήκος των φύλλων, ο αριθμός των φύλλων και το συνολικό βάρος φρέσκιας και ξηρής βιομάζας ανά φυτό ήταν όλα υψηλότερα σε φυτά που καλλιεργήθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες, με τον βέλτιστο ρυθμό ανάπτυξης να καταγράφεται στους 28 βαθμούς Κελσίου (Nxawe et al., 2009).

Στα φυτά τομάτας, η πρόσληψη νερού και θρεπτικών συστατικών από τις ρίζες ποικίλλει ανάλογα με την ποσότητα του ηλιακού φωτός που λαμβάνονταν. Το διάλυμα υψηλής θερμοκρασίας (35°C) παρήγαγε βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα αποτελέσματα. Βραχυπρόθεσμα, η πρόσληψη νερού και θρεπτικών συστατικών ενεργοποιήθηκε από μια μείωση στο ιξώδες του νερού και μια αλλαγή στη μεταφορά της μεμβράνης. Μακροπρόθεσμα, η διαλυτότητα του οξυγόνου μειώθηκε ενώ διεγέρθηκε η ενζυματική οξείδωση των φαινολικών ενώσεων σε επιδερμικούς ιούς και ιστούς του φλοιού, αλλά η συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών στο χυμό ρίζας ξυλώματος μειώθηκε και η συγκέντρωση του χυμού ρίζας ξυλώματος έγινε χαμηλή. Στο θρεπτικό διάλυμα, τα κύτταρα λαμβάνουν τη σωστή ποσότητα θρεπτικών ουσιών (Falah et al., 2010).

Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (22° C), το διαλυμένο οξυγόνο είναι αρκετό για να καλύψει τη ζήτηση οξυγόνου στα φυτά τομάτας. Ωστόσο, η ανάγκη έχει μειωθεί ως αποτέλεσμα των μειώσεων σε ορισμένες φυσιολογικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της αναπνοής, η οποία επηρεάζει περαιτέρω την ανάπτυξη των φυτών. Αντίθετα, σε θερμοκρασίες άνω των 22 °C, η ζήτηση οξυγόνου δεν καλύπτεται

από το θρεπτικό διάλυμα, καθώς οι υψηλότερες θερμοκρασίες αυξάνουν τη διάχυση αυτού του αερίου. Σε υψηλές θερμοκρασίες του θρεπτικού διαλύματος παρατηρείται αυξημένη βλαστική ανάπτυξη σε μεγαλύτερο βαθμό από το επιθυμητό, γεγονός που μειώνει την καρποφορία (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012).

Για να εκτιμηθεί η σημασία της θερμοκρασίας στη διαλυτότητα του οξυγόνου, ο Πίνακας 3 απεικονίζει δεδομένα για θερμοκρασίες που συνήθως χρησιμοποιούνται σε θερμοκήπια, έτσι ώστε η θερμοκρασία να έχει άμεση σχέση με την ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται από το φυτό και αντίστροφη σχέση με διαλυμένο οξυγόνο από το θρεπτικό διάλυμα.

Πίνακας 3. Διαλυτότητα οξυγόνου σε καθαρό νερό σε διάφορες θερμοκρασίες σε ατμοσφαιρική πίεση 760 mm Hg. Πηγή: Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012

Θερμοκρασία, °C	Διαλυτότητα οξυγόνου, mg L ⁻¹ καθαρού νερού
10	11.29
15	10.08
20	9.09
25	8.26
30	7.56
35	6.95
40	6.41
45	5.93

3.3. Διαχείριση θρεπτικών διαλυμάτων

Η υδροπονική καλλιέργεια επιτρέπει στους καλλιεργητές να χειρίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τις περιβαλλοντικές συνθήκες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες αποδόσεις και βελτιωμένη ποιότητα καλλιέργειας. Εάν οι παράμετροι του θρεπτικού διαλύματος, όπως η θερμοκρασία, το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η περιεκτικότητα σε οξυγόνο, δεν διατηρούνται υπό έλεγχο, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειονεκτήματα. Δείτε παρακάτω διαφορετικούς τρόπους ελέγχου ορισμένων παραμέτρων του θρεπτικού διαλύματος (Νεοκλέους, 2014).

Μια βελτιστοποιημένη και καλά ισορροπημένη παροχή θρεπτικών ουσιών αποτελεί προϋπόθεση για την αποτελεσματική χρήση των υδροπονικά καλλιεργούμενων φυτικών πόρων, όχι μόνο για την εξασφάλιση υψηλών αποδόσεων, αλλά και για την εγγύηση της ποιότητας των ιστών τροφίμων. Στην υδροπονία, λόγω της περιορισμένης ρυθμιστικής ικανότητας του θρεπτικού συστατικού σύστημα και την ικανότητα να αλλάζει γρήγορα, είναι απαραίτητος ο προσεκτικός έλεγχος του συστήματος. Η συχνότητα και η ποσότητα εφαρμογής του θρεπτικού διαλύματος εξαρτάται από τον τύπο του υποστρώματος, το στάδιο ανάπτυξης και ανάπτυξης, το μέγεθος του δοχείου, τα χρησιμοποιούμενα συστήματα άρδευσης και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Ανάλογα με το στάδιο του φυτού, ορισμένα στοιχεία στο θρεπτικό διάλυμα καταναλώνονται γρηγορότερα από άλλα, και καθώς το νερό εξατμίζεται από το θρεπτικό διάλυμα, το λίπασμα γίνεται πιο συμπυκνωμένο και μπορεί να κάψει τις ρίζες του φυτού. Στην υδροπονία, η διαχείριση των θρεπτικών συστατικών είναι πολύ σημαντική και πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά για να αυξηθεί η παραγωγικότητα χωρίς να βλάπτεται το περιβάλλον. Η διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων περιλάμβανε την εφαρμογή της σωστής πηγής λιπάσματος (όπως αμμώνιο ή νιτρικό ως πηγή αζώτου), ένα ισορροπημένο θρεπτικό διάλυμα σύμφωνα με τις ανάγκες των φυτών και σύμφωνα με τα στάδια ανάπτυξης των φυτών και τις κλιματικές συνθήκες. Τοξικότητα ορισμένων θρεπτικών συστατικών που προκύπτει από άσκοπη χρήση λιπασμάτων. Αναφέρθηκε ότι η έντονη διαφορά μεταξύ των αναλογιών των ιόντων που υπάρχουν στο θρεπτικό διάλυμα και εκείνων που απορροφώνται από τα φυτά οδήγησε στη συσσώρευση ορισμένων ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα, προκαλώντας ανισορροπία μετάλλων στο θρεπτικό διάλυμα και δημιουργώντας περισσότερη ενέργεια για απορρόφηση των κατάλληλων ιόντων (Nguyen et al., 2021). Η ανακύκλωση εξαντλημένων διαλυμάτων μπορεί επίσης να είναι μια αποτελεσματική στρατηγική για την πρόληψη της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων και του περιβάλλοντος. Ωστόσο, το κύριο πρόβλημα με την επαναχρησιμοποίηση διαλυμάτων εξαντλημένων θρεπτικών συστατικών είναι η έλλειψη ορισμένων βασικών μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών συστατικών και η αυξημένη αλατότητά τους, η οποία με τη σειρά της προκαλεί προβλήματα στις καλλιέργειες (Ali Al Meselmani, 2022). Ως εκ τούτου, είναι πολύ σημαντικό να αναπτυχθούν πρακτικές διαχείρισης ή εργαλεία που μειώνουν την αλατότητα σε ανακυκλωμένα διαλύματα ή/και ελαχιστοποιούν τη φυσιολογική επίδραση της αλατότητας στα φυτά. Η αύξηση της αλατότητας θα μπορούσε να αντισταθμιστεί με την επεξεργασία του ανακυκλωμένου

νερού με κατάλληλα οσμωτικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένης της πρόσθιας και της αντίστροφης όσμωσης.

Σε κλειστά υδροπονικά συστήματα, η συσσώρευση τοξικών οργανικών ενώσεων μπορεί να συμβεί από τις ρίζες των καλλιεργούμενων φυτών και για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές επεξεργασίας για την αποσύνθεση ή την απομάκρυνση των εκκριμάτων της ρίζας. Ωστόσο, για να είναι αποτελεσματική η θεραπεία, πρέπει να είναι ικανό να απομακρύνει τα εκκρίματα. Ρίζα χωρίς παρεμβολές στα ανόργανα θρεπτικά συστατικά του διαλύματος. Η ρύθμιση του ρυθμού ροής διαλύματος στην υδροπονική παραγωγή μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη των φυτών, η οποία μπορεί στη συνέχεια να επηρεάσει την απόδοση και την ποιότητα της καλλιέργειας. Η ανάπτυξη των φυτών σχετίζεται με τη ροή των θρεπτικών ουσιών στο φυσικό τους περιβάλλον. Η ροή του θρεπτικού διαλύματος βοηθά στη διανομή των θρεπτικών συστατικών και στην αύξηση της διαθέσιμης ενέργειας στις ρίζες των φυτών. Επομένως, είναι σημαντικό να προσαρμόσετε τον ρυθμό ροής για να έχετε την καλύτερη απόδοση από τα φυτά. Επειδή υψηλότερη ροή σημαίνει μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνει το λειτουργικό κόστος. Η εξισορρόπηση της απόδοσης των φυτών, της διαχείρισης των θρεπτικών ουσιών και της χρήσης ενέργειας είναι σημαντική για τη διασφάλιση ενός επιτυχημένου κήπου. Σύμφωνα με τους Baiyin et al. (2021) υπάρχει σχέση μεταξύ του επιπέδου του άγχους που βιώνεται και της ποιότητας του ύπνου. Ο προσδιορισμός του ιδανικού ρυθμού ροής για υδροπονική παραγωγή μπορεί να βοηθήσει στην αύξηση της απόδοσης. Ωστόσο, για να γίνει ένας συγκεκριμένος προσδιορισμός της ανάγκης για θρεπτικά συστατικά σε μια συγκεκριμένη καλλιέργεια ή μέσο καλλιέργειας, πρέπει να διενεργηθεί ανάλυση για κάθε μία. Τα υδροπονικά θρεπτικά διαλύματα είναι ο μόνος τρόπος παροχής θρεπτικών συστατικών στα φυτά. Ως εκ τούτου, είναι εξαιρετικά σημαντικό να εφαρμόσετε ένα ισορροπημένο διάλυμα που περιέχει όλα τα απαραίτητα φυτικά θρεπτικά συστατικά.

3.3.1. Ρύθμιση pH

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η τιμή του pH καθορίζει τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών για τα φυτά. Κατά συνέπεια, η προσαρμογή του πρέπει να γίνεται καθημερινά λόγω της χαμηλότερης ικανότητας αποθήκευσης των υδροπονικών συστημάτων (Ferrón-Carrillo et al., 2021).

Οι αλλαγές στο pH ενός θρεπτικού διαλύματος εξαρτώνται από τη διαφορά στην ποσότητα των θρεπτικών συστατικών που απορροφώνται από τα φυτά, όσον αφορά την ισορροπία των ανιόντων έναντι των κατιόντων. Όταν τα ανιόντα απορροφώνται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις κατιόντων, για παράδειγμα νιτρικά, το φυτό εκκρίνει ανιόντα OH^- ή HCO_3^- , για να εξισορροπήσει τα ηλεκτρικά φορτία στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα υψηλότερο pH. Το φυσιολογικό επίπεδο αλκαλικότητας σε ένα σώμα ονομάζεται συνηθισμένη αλκαλικότητα (Ali Al Meselmani, 2022).

Η ενσωμάτωση αμμωνίου στο θρεπτικό διάλυμα ρυθμίζει το pH, γεγονός που διασφαλίζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών. Οι Breteler & Smit (1974) βρήκαν ότι το αμμώνιο μπορεί να μειώσει το pH ενός θρεπτικού διαλύματος ακόμη και όταν υπάρχουν νιτρικά άλατα. Στα φυτά τριαντάφυλλου, η προσθήκη αμμωνίου σε ένα θρεπτικό διάλυμα που περιέχει νιτρικό άλας παρήγαγε μια συνολική αύξηση πρόσληψης αζώτου κατά την επιμήκυνση των βλαστών και αύξηση της συγκέντρωσης P στις ρίζες (Lorenzo et al., 2000). Η αναλογία ολικού αζώτου προστίθεται στο θρεπτικό διάλυμα καθώς το αμμώνιο εξαρτάται από την καλλιέργεια.

Από την άλλη πλευρά, η χημική ρύθμιση χρησιμοποιείται ευρέως, δηλαδή η προσθήκη οξέων για τη μείωση της τιμής του pH. Το pH σχετίζεται στενά με τη συγκέντρωση των HCO_3^- και CO_3^{2-} . Όταν εφαρμόζεται ένα οξύ, το ιόν CO_3^{2-} μετατρέπεται σε HCO_3^- και στη συνέχεια το HCO_3^- μετατρέπεται σε H_2CO_3 . Το ανθρακικό οξύ διαχωρίζεται μερικώς σε H_2O και CO_2 (De Rijck & Schrevens, 1997). Το pH ρυθμίζεται συνήθως χρησιμοποιώντας νιτρικό, θειικό ή φωσφορικό οξύ, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνα τους ή σε συνδυασμό.

3.3.2. Διαχείριση ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) ενός θρεπτικού διαλύματος ρυθμίζεται από τα φυτά καθώς απορροφούν θρεπτικά συστατικά και νερό από το διάλυμα. Καθώς η συγκέντρωση ορισμένων ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα με καλλιέργεια τριαντάφυλλου μειώθηκε ενώ άλλα αυξήθηκαν, αυτό είχε ένα συνδυασμένο αποτέλεσμα της αύξησης και της μείωσης της ανάπτυξης του φυτού. Τα επίπεδα σιδήρου, ασβεστίου, μαγνησίου και χλωρίου όλα αυξήθηκαν γρήγορα καθώς μειώθηκε η συγκέντρωση του Fe. Οι συγκεντρώσεις των K^+ , Ca^{2+} και SO_4^{2-} δεν ήταν αρκετά υψηλές ώστε να δημιουργήσουν πρόβλημα (Lykas et al., 2001). Σε ένα ανοιχτό σύστημα με ανακυκλοφορία θρεπτικών συστατικών, παρατηρείται συχνά αύξηση της

τιμής EC λόγω της συσσώρευσης υψηλών επιπέδων ορισμένων ιόντων, όπως τα διτανθρακικά, τα θειικά και τα χλωρίδια (Zekki et al. 1996). Τα υποστρώματα μπορούν να συγκρατηθούν πάνω σε ιόντα, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της EC. Για να μειωθεί η συσσώρευση αλατιού σε υποστρώματα, η ελεγχόμενη έκπλυση με νερό καλής ποιότητας είναι μια εναλλακτική λύση (Ansorena, 2004). Η χρήση ενός καλύμματος από πολυαιθυλένιο ή πολυπροπυλένιο μειώνει την κατανάλωση νερού, αυξάνει την υπολογισμένη απόδοση χρήσης νερού και μειώνει την EC του υποστρώματος, καθιστώντας το στρώμα εναλλακτική επιλογή για έλεγχο EC (Farina et al., 2003).

Από τη μία πλευρά, αναφέρονται θετικές ενδείξεις για την επαναχρησιμοποίηση διαλυτικών θρεπτικών ουσιών, η οποία συνεπάγεται απαραίτητα ρύθμιση της EC. Επομένως, η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση διαλυμάτων θρεπτικών συστατικών είναι μια τάση στην αναζήτηση βιώσιμων συστημάτων γεωργικής παραγωγής (Andriolo et al., 2006). Στη μελέτη των Brun et al. (2001) αναφέρθηκε ότι τα συστήματα ανακύκλωσης που βασίζονται στην EC χρησιμοποιούν ένα συμπλήρωμα νερού για τη μείωση των επιπέδων EC και ένα συμπληρωματικό θρεπτικό διάλυμα για να λάβουν το επιθυμητό EC. Οι Carmassi et al. (2013) ανέπτυξαν ένα απλό μοντέλο για τις αλλαγές στη ιοντική συγκέντρωση και την EC του διαλύματος ανακυκλοφορίας θρεπτικών ουσιών σε μια κλειστή υδροπονική καλλιέργεια για την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών από υδροπονικά φυτά. Αποδείχθηκε ότι σε αυτή την καλλιέργεια η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αντισταθμίζεται με επαναπλήρωση της δεξαμενής ανάμιξης με πλήρες θρεπτικό διάλυμα.

Πρόσφατα, έχει προταθεί *in situ* βέλτιστη μέθοδος ελέγχου της σύνθεσης θρεπτικού διαλύματος. Αντί να μοντελοποιήσει τους συσχετισμούς μεταξύ της ανάπτυξης λαχανικών του θερμοκηπίου και του θρεπτικού διαλύματος, αυτή η μέθοδος βασίζεται σε αλγορίθμους Q-learning για βέλτιστη πολιτική ελέγχου μέσω συστηματικής αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον (Chen et al., 2011).

Ωστόσο ο Bugbee (2004) έδειξε ότι η παρακολούθηση των ιόντων στο θρεπτικό διάλυμα δεν είναι πάντα απαραίτητη. Στην πραγματικότητα, η ταχεία εξάντληση ορισμένων θρεπτικών ουσιών συχνά προκαλεί την προσθήκη περίσσειας ποσότητας θρεπτικών ουσιών στο διάλυμα καθιστώντας την έτσι τοξική. Η παρουσία μιας ποικιλόμορφης μικροβιακής κοινότητας σε θρεπτικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται

σε συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους υποστηρίζει την ανάγκη απολύμανσης αυτών των διαλυμάτων κατά τη διάρκεια των διεργασιών καλλιέργειας για την αποφυγή εξάπλωσης φυτικών ασθενειών (Calmin et al., 2008).

3.3.3. Έλεγχος θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία του θρεπτικού διαλύματος επηρεάζει ποσό του οξυγόνου που καταναλώνουν τα φυτά και το ποσό του οξυγόνου που είναι διαλυμένο σε αυτό. Η θερμοκρασία επηρεάζει επίσης τη διαλυτότητα του λιπάσματος και την ικανότητα απορρόφησης των ριζών, καθιστώντας προφανές τη σημασία του ελέγχου αυτής της μεταβλητής ειδικά σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Κάθε είδος φυτού έχει ένα εύρος αποδεκτών θερμοκρασιών ανάπτυξης, το οποίο απαιτεί τη χρήση συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης για να διατηρείται το θρεπτικό διάλυμα εντός αυτού του εύρους.

Το σύστημα υπόγειων σωλήνων νερού για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του θρεπτικού διαλύματος στην εξοικονόμηση ενέργειας αποτελείται από έναν μεγάλο υπόγειο σωλήνα γεμάτο με νερό και μια μονάδα για την κυκλοφορία του θρεπτικού διαλύματος μεταξύ του στρώματος καλλιέργειας και του σωλήνα υπόγειου νερού. Ο υπόγειος σωλήνας νερού 1,5 m είναι σταθερός σε σύγκριση με θερμοκήπια με πολύ υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι και χαμηλές θερμοκρασίες το χειμώνα. Κατά τη διάρκεια της κυκλοφορίας, η θερμότητα μπορεί να ανταλλάσσεται μεταξύ του θρεπτικού διαλύματος και του νερού που αποθηκεύεται στον υπόγειο αγωγό νερού, ο οποίος θερμαίνει το υπερβολικά παγωμένο θρεπτικό διάλυμα τις κρύες νύχτες του χειμώνα (Hidaka et al., 2008).

Ο Nam (1996) αξιολόγησε την ικανότητα ψύξης τριών διαφορετικών συστημάτων που χρησιμοποιούν σωλήνες πολυαιθυλενίου ή ανοξείδωτου χάλυβα για δεξαμενές διαλύματος ή τύπους αντίθετου ρεύματος διπλής ροής 41, 70 ή 81% του ψυκτικού φορτίου των υδροπονικών θερμοκηπίων, αντίστοιχα.

Οι Villela et al. (2004) αξιολόγησαν τη χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας για τη ψύξη του θρεπτικού διαλύματος στους περίπου 12 ° C για την παραγωγή δύο ποικιλιών φράουλας. Η ψύξη του θρεπτικού διαλύματος προσέφερε καλύτερη παραγωγικότητα της ποικιλίας Sweet Charlie ενώ δεν προκάλεσε καμία επίδραση στην ποικιλία Campinas.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το βαθύ θαλασσινό νερό (DSW) είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, καθιστώντας το μια καλή πηγή διαλυμάτων κατά την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων. Ομοίως, είναι μια εναλλακτική λύση στα συστήματα ψύξης κατά την διάρκεια της ζεστής περιόδου λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του (Chadiriin et al., 2006).

3.3.4. Οξυγόνωση θρεπτικού διαλύματος

Η διατήρηση επαρκούς διαλυμένου O₂ σε ένα θρεπτικό διάλυμα σε ένα υδροπονικό σύστημα είναι ζωτικής σημασίας για την υγεία των φυτών. Η διαθεσιμότητα οξυγόνου στις ρίζες που αναπτύσσονται σε καλλιέργεια χωρίς έδαφος μπορεί να γίνει περιοριστική σε περίπτωση που η ζήτηση O₂ υπερβαίνει την προσφορά O₂, προκαλώντας μείωση του ρυθμού ανάπτυξης των ριζών, των ιόντων και της πρόσληψης νερού, μειώνοντας τελικά την παραγωγή των φυτών. Τα φυτά που αναπτύσσονται σε υδροπονικά συστήματα μπορούν να εξαντλήσουν γρήγορα το διαλυμένο οξυγόνο στο θρεπτικό διάλυμα, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε κακό αερισμό των ριζών όταν οι θερμοκρασίες του θερμοκηπίου είναι υψηλές. Ο Πίνακας 3 δείχνει τη διαλυτότητα του οξυγόνου σε καθαρό νερό σε διαφορετικές θερμοκρασίες (Ali Al Meselmani, 2022).

Η συγκέντρωση οξυγόνου στο θρεπτικό διάλυμα εξαρτάται επίσης από τη ζήτηση των καλλιεργειών, η οποία είναι υψηλότερη όταν αυξάνεται η φωτοσυνθετική δραστηριότητα (Papadopoulous et al., 1999). Μια μείωση κάτω από 3 ή 4 mg L⁻¹ διαλυμένου οξυγόνου, αναστέλλει την ανάπτυξη των ριζών και προκαλεί αλλαγές σε καφέ χρώμα, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως το πρώτο σύμπτωμα της έλλειψης οξυγόνου (Gislerød & Kempton, 1983).

Παρ' όλα αυτά, τα υποστρώματα σε μεγάλες περιόδους καλλιέργειας παρουσιάζουν συνήθως αύξηση της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη και της δραστηριότητας των μικροοργανισμών, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση του ανταγωνισμού για οξυγόνο στο ριζικό περιβάλλον. Ωστόσο, οι ρίζες είναι πολύ πυκνές στο υπόστρωμα, η οποία μεταβάλλει τη διάχυση και την παροχή οξυγόνου (Bonachela et al., 2010).

Η παροχή καθαρού, υπό πίεση αερίου οξυγόνου σε ένα θρεπτικό διάλυμα είναι μια πλούσια σε οξυγόνο μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά για ερευνητικούς σκοπούς που ονομάζεται oxyfertigation (Chun & Takakura, 1994).

Οι Bonachela et al. (2010) αξιολόγησαν την απόκριση πρόσληψης οξυγόνου των θρεπτικών διαλυμάτων φθινοπωρινής/χειμερινής γλυκοπιπεριάς και ανοιξιάτικων πεπονιών που καλλιεργούνται σε πλάκες πετροβάμβακα και σάκους καλλιέργειας περλίτη σε σύγκριση με μη ενισχυμένες καλλιέργειες. Το συμπιεσμένο αέριο οξυγόνο διαλύθηκε στο θρεπτικό διάλυμα κατά τη διάρκεια κάθε άρδευσης. Ο σωλήνας άρδευσης έχει εγκατεστημένο ένα μπεκ αερίου στο εσωτερικό του. Ο περιορισμός της χρήσης φθινών συστημάτων εμπλουτισμού οξυγόνου σε υποστρώματα πετροβάμβακα και περιόδους ανθοφορίας πεπονιού συνιστάται όταν η υψηλή ζήτηση οξυγόνου συμπίπτει με τη χαμηλή διαθεσιμότητα οξυγόνου.

Η μελέτη διερεύνησε πόσο συχνά χρησιμοποιείται το υπεροξείδιο του καλίου για τη δημιουργία οξυγόνου για καλλιέργειες που καλλιεργούνται σε εμπορικά υποστρώματα. Στη γλυκιά πιπεριά, το πεπόνι και το αγγούρι, διαπιστώθηκε ότι το υπεροξείδιο του καλίου χρησιμοποιείται μία φορά την εβδομάδα. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η εφαρμογή υπεροξειδίου του καλίου σε συγκέντρωση 1 γραμμαρίου ανά λίτρο είναι ο καλύτερος τρόπος χρήσης του στην καλλιέργεια του εδάφους. Το υπεροξείδιο του καλίου βοηθά στην αύξηση της απόδοσης των γλυκών πιπεριών και πεπονιών κατά 20% και των αγγουριών κατά 15%. (Urrestarazu & Mazuela, 2005).

3.4. Παρασκευή θρεπτικού διαλύματος

3.4.1. Σχεδιασμός θρεπτικών λύσεων

Ο Hansen (1978) δείχνει ότι η προσθήκη θρεπτικών ουσιών σε υδροπονικά συστήματα μπορεί να γίνει σύμφωνα με τις απαιτήσεις των φυτών σε θρεπτικά συστατικά. Η εφαρμογή των θρεπτικών συστατικών μπορεί να γίνει σύμφωνα με αναλύσεις ενός συγκεκριμένου σταδίου συγκομιδής που μπορεί να περιγράψει την κατανάλωση διαφορετικών θρεπτικών συστατικών τυπικής μιας συγκεκριμένης καλλιέργειας ή μέσω ανάλυσης των συνολικών αναγκών για φυτά που ποσοτικοποιήθηκαν και προσαρμόστηκαν στον ρυθμό ανάπτυξης και τις ποσότητες του παρεχόμενου νερού. Τα θρεπτικά συστατικά σε ένα διάλυμα λιπάσματος επηρεάζονται από το σύστημα

ανάπτυξης, την καλλιεργητική περίοδο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Steiner, 1973).

Σε καλλιέργειες εκτός εδάφους μπορεί να δοθεί οποιαδήποτε ιοντική αναλογία και οποιαδήποτε συνολική συγκέντρωση ιόντων, καθώς λαμβάνονται υπόψη όρια καθίζησης για ορισμένους συνδυασμούς ιόντων. Όταν τροφοδοτούνται τα φυτά με το θρεπτικό διάλυμα, είναι σημαντικό να βεβαιωθούμε ότι τα θρεπτικά συστατικά είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα έτσι ώστε το φυτό να απορροφά όσο το δυνατόν περισσότερο νερό και θρεπτικά συστατικά (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012).

3.4.2. Ποιότητα νερού

Σύμφωνα με τους Tognoni et al. (1998), η ποιότητα του νερού στην υδροπονία μπορεί να επηρεαστεί από τις συγκεντρώσεις συγκεκριμένων ιόντων και φυτοτοξικών ουσιών που σχετίζονται με τη διατροφή των φυτών, καθώς και από την παρουσία οργανισμών και ουσιών που μπορούν να φράξουν τα συστήματα άρδευσης..

Όσον αφορά την παρουσία οργανισμών τόσο στο νερό για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος όσο και στην ανακυκλοφορία θρεπτικού διαλύματος, ο έλεγχός του μπορεί να επιτευχθεί με θερμική επεξεργασία, υπεριώδη ακτινοβολία και διήθηση μεμβράνης. Ωστόσο, φθηνότερες χημικές επεξεργασίες όπως το υποχλωριώδες νάτριο, το διοξείδιο του χλωρίου και ο ιονισμός χαλκού-αργύρου μπορούν εν μέρει να λύσουν το πρόβλημα του παθογόνου, με τα μειονεκτήματα της εισαγωγής της πιθανής συσσώρευσης άλλων στοιχείων σε κλειστά συστήματα (van Os, 2010).

Για να βεβαιωθούμε ότι το θρεπτικό διάλυμα είναι ασφαλές για κατανάλωση, πρέπει να κάνουμε μια χημική ανάλυση του νερού που χρησιμοποιείται σε αυτό. Γνωρίζοντας τους τύπους και τις συγκεντρώσεις των ιόντων, δύναται να αναφερθούν ποια ιόντα χρειάζονται στο θρεπτικό διάλυμα και ποια ιόντα μπορούν να αφαιρεθούν. Αυτό επιτρέπει την επιλογή των θρεπτικών συστατικών που θα είναι πιο αποτελεσματικά για τα φυτά.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το DSW μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων. Οι Chadirin et al. (2007) ανέφεραν ότι τα φυτά που υπέστησαν επεξεργασία με κυκλοφορούν νερό με EC 20 dS m⁻¹ παράγαγαν ντομάτες με υψηλότερα διαλυτά στερεά, 8,0% Brix ή αυξημένη απόδοση σε 30% σε σύγκριση με τις ντομάτες μάρτυρες. Παρ' όλα αυτά, οι Pardossi et al. (2008) έδειξαν ότι το

θρεπτικό διάλυμα με υψηλή EC (9 dS m^{-1}) δεν είχε σημαντική επίδραση τόσο στην απόδοση των καλλιεργειών όσο και στην ποιότητα των φρούτων.

3.4.3. Πηγή λιπάσματος για θρεπτικό διάλυμα

Ο πίνακας περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις επιλογές λιπασμάτων και οξέος, καθώς και ορισμένα πράγματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη χρήση τους στην υδροπονία.

Πίνακας 4. Λιπάσματα που περιέχουν μακροθρεπτικά συστατικά χρησιμοποιούνται για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων. Αυτά τα λιπάσματα βοηθούν να παρέχουν στα φυτά τα θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται για να αναπτυχθούν. Πηγή: Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012

Λιπάσματα	Τύπος	Ποσοστό θρεπτικών συστατικών	Διαλυτότητα, g L ⁻¹ στους 20 °C
Νιτρικό ασβέστιο	Ca(NO ₃) ₂ 5H ₂ O	N: 15.5; Ca: 19	1290
Νιτρικό κάλιο	KNO ₃	N: 13; K:38	316
Νιτρικό μαγνήσιο	Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	N: 11; Mg:9	760
Νιτρικό αμμώνιο	NH ₄ NO ₃	N:35	1920
Δισόξινο φωσφορικό Κάλιο	KH ₂ PO ₄	P: 23; K: 28	226
Μονοαμμωνιακό φωσφορικό άλας	NH ₄ H ₂ PO ₄	N; 12; P: 60	365
Θειικό κάλιο	K ₂ SO ₄	K: 45; S: 18	111
Θειικό μαγνήσιο	MgSO ₄ 7H ₂ O	Mg: 10; S: 13	335
Θειικό αμμώνιο	(NH ₄) ₂ SO ₄	N: 21; S: 24	754
Χλωριούχο κάλιο	KCl	K: 60; Cl: 48	330

Κεφάλαιο 4^ο Συμπεράσματα

4.1. Γενικά Συμπεράσματα

Η υδροπονική γεωργία είναι ένας νέος τρόπος καλλιέργειας καλλιεργειών που είναι πολύ πιο φιλικός προς το περιβάλλον από τις παραδοσιακές τεχνικές καλλιέργειας. Χρησιμοποιεί λιγότερο νερό και λιγότερα φυτοφάρμακα και μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες αποδόσεις από την παραδοσιακή γεωργία. Αυτός ο τύπος καλλιέργειας βοηθά τους αγρότες να ελέγχουν τις συνθήκες στο περιβάλλον για να αυξήσουν τις αποδόσεις και να βελτιώσουν την ποιότητα των καλλιεργειών. Η τεχνολογία των υπολογιστών έχει καταστήσει δυνατή τη χρήση ελεγκτών για τον έλεγχο υδροπονικών φυτών. Ο μικροελεγκτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των παραμέτρων του θρεπτικού διαλύματος χρησιμοποιώντας σχετικούς αισθητήρες. Η οθόνη ελέγχει τα επίπεδα ηλεκτρικής ενέργειας και pH σε όλη τη διαδικασία παραγωγής. Παρακολουθεί επίσης τη θερμοκρασία, τον ψεκάσμό θρεπτικών ουσιών, τις διακυμάνσεις EC και pH και το επίπεδο του θρεπτικού διαλύματος στη δεξαμενή θρεπτικών ουσιών. Ωστόσο, αν και η κατανόηση των αλληλεπιδράσεων πολλαπλών επιπέδων μεταξύ των διαφόρων ορυκτών στοιχείων θεωρείται σημαντική για την κατανόηση των διαφορετικών οδών αίσθησης και σηματοδότησης που προκαλούνται από μία ή περισσότερες ελλείψεις, ο αντίκτυπος των αλληλεπιδράσεων αυτών των θρεπτικών συστατικών στην απόδοση της καλλιέργειας είναι σε μεγάλο βαθμό άγνωστος (Astolfi et al., 2021).

Ο Πίνακας 5 δείχνει πώς λειτουργούν οι διαφορετικές καλλιέργειες σε διαφορετικούς τύπους εδάφους. Ορισμένες καλλιέργειες έχουν καλύτερη απόδοση στο έδαφος και άλλες καλύτερες εκτός εδάφους. Προβλήματα από τη χρήση της παραδοσιακής γεωργίας, όπως η χρήση χημικών λιπασμάτων, η υπερβολική χρήση φυτοφαρμάκων και η περιορισμένη γη, έχουν οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης της υδροπονίας. Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων εκτός εγκατάστασης περιλαμβάνουν υψηλότερη απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας, εξοικονόμηση ενέργειας, καλύτερο έλεγχο της ανάπτυξης και ανεξαρτησία από την ποιότητα του εδάφους.

Πίνακας 5. Οι μέσες τιμές της υδροπονικής καλλιέργειας σε σύγκριση με τις συνήθειες αποδόσεις του εδάφους. Πηγή: Singh & Singh (2012)

Type of crop	Hydroponic equivalent per acre (kg)	Agricultural average per acre (kg)
Wheat	2267.9	272.2
Oats	1360.7	385.5
Rice	5443.1	340.2–408.2
Maize	3628.7	680.3
Soybean	680.3	272.2
Potato	63,502.9	7257.5
Beet root	9071.8	4082.3
Cabbage	8164.6	5896.7
Peas	6350.3	907.2
Tomato	180,000	5000–10,000
Cauliflower	13,607.7	4535.9–6803.8
French bean	19,050.9 of pods for eating	–
Lettuce	9525.4	4082.3
Cucumber	12,700.6	3175.1

Μερικοί υδροπονικοί καλλιεργητές χρησιμοποιούν περισσότερα θρεπτικά συστατικά από όσα χρειάζονται για να καλλιεργήσουν τις καλλιέργειές τους, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα υποσιτισμού. Ωστόσο, ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για ένα επιτυχημένο σύστημα υδροπονίας είναι η χρήση και διαχείριση των κατάλληλων διαλυμάτων θρεπτικών συστατικών. Η ποσότητα των θρεπτικών ουσιών που επιτρέπει ή αποκλείει τη συσσώρευση θρεπτικών συστατικών στο φυτό. Ενώ τα υδροπονικά συστήματα θεωρούνται μια βιώσιμη μέθοδος καλλιέργειας φυτών, τα θρεπτικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται στα υδροπονικά συστήματα βασίζονται σε χημικά λιπάσματα που προέρχονται από σπάνιους και μη ανανεώσιμους πόρους. Πρόσφατα, καθώς η αγορά βιολογικών τροφίμων συνεχίζει να αναπτύσσεται, υπήρξε ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη βιολογική υδροπονία, με αρκετές μελέτες να αναφέρουν τη δυνατότητα καλλιέργειας λαχανικών με χρήση οργανικών θρεπτικών διαλυμάτων. Τα οργανικά απόβλητα μπορούν να βοηθήσουν τα φυτά να αναπτυχθούν καλύτερα εάν διαλυθούν και στη συνέχεια χρησιμοποιηθούν ως πηγή θρεπτικών συστατικών (Ezziddine et al., 2021). Για παράδειγμα, τα οργανικά λιπάσματα μπορεί να αναστείλουν την ανάπτυξη των φυτών σε υδροπονικά συστήματα λόγω της υψηλής βιολογικής ζήτησης οξυγόνου στη ζώνη της ρίζας που προκαλείται από την παρουσία διαλυμένου οργανικού άνθρακα.. Επιπλέον, τα περισσότερα από τα θρεπτικά

συστατικά που περιέχονται σε οργανικές πηγές, όπως τα απόβλητα από τη γεωργία και την υδατοκαλλιέργεια, δεν είναι σε ιοντική μορφή και δεν είναι άμεσα διαθέσιμα στα φυτά. Επίσης, την τελευταία δεκαετία παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση των λυμάτων ως πηγή υδροπονικής διατροφής. Αυτό στοχεύει σε ένα διπλό όφελος από τη βελτιστοποίηση της επαναχρησιμοποίησης του νερού καθώς και σε ένα πρακτικό τελικό σημείο για τη διαχείριση των λυμάτων. Το ακατέργαστο οικιακό νερό έκπλυσης από τον δεύτερο κύκλο ξεβγάλματος ρούχων μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την καλλιέργεια υδροπονικών φυτών εσωτερικού χώρου χωρίς την ανάγκη πρόσθετου λιπάσματος. Έχει επίσης τα πλεονεκτήματα της χρήσης νερού, της επεξεργασίας λυμάτων, της προστασίας του οικοσυστήματος και της σημαντικής εξοικονόμησης νερού στην παραγωγική ικανότητα και την ικανότητα παραγωγής οικονομικά βιώσιμων καλλιεργειών τροφίμων (Sundar et al., 2021).

Σήμερα, η τεχνολογία υδροπονικής καλλιέργειας χρησιμοποιείται εκτενώς για την παραγωγή καλλωπιστικών φυτών και λουλουδιών. Η ελεγχόμενη εφαρμογή λιπασμάτων, η ικανότητα αλλαγής των θρεπτικών συστατικών υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες και διαφορετικά στάδια ανάπτυξης των φυτών, η μείωση της έκπλυσης λιπασμάτων από τη ζώνη της ρίζας, η μείωση της μόλυνσης, η προστασία του περιβάλλοντος και η βελτίωση της ποιότητας και της ποσότητας των προϊόντων θα είναι μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας .

4.2. Προοπτικές

Το κύριο συστατικό του υδροπονικού συστήματος είναι το θρεπτικό διάλυμα. Η ικανότητα ελέγχου της συγκέντρωσης των θρεπτικών ουσιών επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλης ποικιλίας φυτών. Επιπλέον, ο έλεγχος της ποσότητας των θρεπτικών συστατικών που διατίθενται στο φυτό αντιπροσωπεύει το κύριο πλεονέκτημα της ανάπτυξης εκτός του εδάφους. Επιπλέον, η ρύθμιση του pH και της θερμοκρασίας οδηγεί σε αυξημένη απόδοση και ποιότητα.

Η υδροπονία είναι μια ευέλικτη τεχνολογία, κατάλληλη για συστήματα παραγωγής από αυλές σπιτιών χωριών έως και διαστημικούς σταθμούς υψηλής τεχνολογίας. Η υδροπονική τεχνολογία μπορεί να είναι ένα αποτελεσματικό μέσο για την παραγωγή τροφίμων σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως σε ερήμους, σε ορεινές ή αρκτικές περιοχές. Σε πολύ πυκνοκατοικημένες περιοχές, η υδροπονία μπορεί να

παρέχει κατάλληλες συνθήκες καλλιεργειών υψηλής αξίας, όπως φυλλώδη λαχανικά ή άνθη.

Η μελλοντική χρήση ελεγχόμενων περιβαλλόντων για τη γεωργία και την υδροπονία πρέπει να είναι οικονομικά αποδοτική σε σύγκριση με την ανοιχτή γεωργία. Ως εκ τούτου, η πρόοδος στον τεχνητό φωτισμό, τα πλαστικά και τις νέες ποικιλίες με καλύτερη βιοτική και αβιοτική αντοχή θα συμβάλει στην αύξηση των αποδόσεων των καλλιεργειών και στο χαμηλότερο κόστος παραγωγής.

Οι προοπτικές για την υδροπονία μπορεί να βελτιωθούν εάν οι κυβερνήσεις παρέχουν επιδοτήσεις που υποστηρίζουν τέτοια συστήματα παραγωγής. Εκτός από τα οικονομικά οφέλη, η υδροπονία περιλαμβάνει εξοικονόμηση νερού, παραγωγή ενέργειας, δημιουργία θέσεων εργασίας, μειωμένο αντίκτυπο στην ευημερία και βελτιωμένη ποιότητα ζωής.

Σήμερα, η ανάπτυξη και η χρήση της υδροπονίας έχει βελτιώσει την οικονομία σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Σάββας, Δ. (2012). Καλλιέργειες εκτός εδάφους: Υδροπονία, Υποστρώματα. Εκδόσεις ΑγροΤύπος, Αθήνα

Νεοκλέους, Δ. (2014). Ανακύκλωση θρεπτικού διαλύματος. Εγχειρίδιο Υδροπονίας - Εκπαιδευτικό Κέντρο Υδροπονίας ΙΓΕ. Έκδοση Γραφείου Τύπου και Πληροφοριών, Λευκωσία.

Ξενόγλωσση

Abd-Elmoniem, E. M., Abdrabbo, M. A., Farag, A. A., & Medany, M. A. (2006). Hydroponics for Food Production: Comparison of Open and Closed Systems on Yield and Consumption of 23 Water and Nutrient. *The 2nd International Conf. on Water Resources & Arid Environment*, (April 2015), 1–9. Retrieved from <http://empaeg.com/UserFiles/File27964.pdf>

Akon M. R. (2019). The influence of nutrient solution p H on growth and yield of strawberry plants grown in aeroponic system. *J. Bangladesh Soc. Agric. Sci. Technol.*, 16(1- 4): 23-28.

Ali Al Meselmani, M. (2022). Nutrient Solution for Hydroponics. Soilless Culture [Working Title]. doi: 10.5772/intechopen.101604

Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Yamamoto, S., & Ibaraki, Y. (2021). Effect of the Flow Rate on Plant Growth and Flow Visualization of Nutrient Solution in Hydroponics. *Horticulturae*, 7(8), 225. doi: 10.3390/horticulturae7080225

Andriolo, J. L.; Godoi, R. S.; Cogo, C. M.; Bortolotto, O. C.; Luz, G. L. & Madaloz, J. C. (2006). Growth and Development of Lettuce Plants at High $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ Ratios in the Nutrient Solution. *Horticultura Brasileira*, Vol.24, No.3, (Jul-Set 2006), pp. 352-355, ISSN 0102-0811

Ansorena, J. (1994). *Sustratos. Propiedades y Caracterización*. Mundi-Prensa, ISBN 978-84-7114-481-2, Madrid, España

Benoit, F., & Ceustermans, N. (1995). Horticultural aspects of ecological soilless growing methods. *Acta Horticulturae*, (396), 11-24. doi: 10.17660/actahortic.1995.396.1

Bishop, M.M; Shahid, N.; Yang, J. & Barron, A. (2004) Determination of the Mode and Efficacy of the Cross-Linking of Guar by Borate Using MAS 11B NMR of Borate Cross-Linked Guar in Combination with Solution 11B NMR of Model

- Systems, *Dalton Transactions*, Vol.2004, No. 17, pp. 2621–2634, ISSN 0300-9246
- Böhme, M. (1995). Evaluation of organic, synthetic and mineral substrates for hydroponically grown cucumber. *Acta Horticulturae*, (401), 209-218. doi: 10.17660/actahortic.1995.401.25.
- Bonachela, S.; Acuña, R. A.; Magan, J. J. & Malfa, O. (2010). Oxygen Enrichment of Nutrient Solution of Substrate-Grown Vegetable Crops under Mediterranean Greenhouse Conditions: Oxygen Content Dynamics and Crop Response. *Spanish Journal of Agricultural Research*, Vol.8, No.4, (Dec 2010), pp. 1231-1241, ISSN: 1695-971-X
- Bradley, P., & Marulanda, C. (2000). Simplified Hydroponics to Reduce Global Hunger. *Acta Hort.* 554: 289-296.
- Breteler, H. & Smith, A. L. (1974). Effect of Ammonium Nutrition on Uptake and Metabolism of Nitrate in Wheat. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 22(1), 73–81
- Brun, R.; Settembrino, A. & Couve, C. (2001). Recycling of Nutrient Solutions for Rose (*Rosa hybrida*) in soilless culture. *Acta Horticulturae*, Vol.554, No.1, (Jun 2001), pp. 183- 192. ISSN 0567-7572
- Bugbee, B. (2004). Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Horticulturae*, (648), 99-112. doi: 10.17660/actahortic.2004.648.12
- Calatayud, A.; Gorbe, E.; Roca D.; & Martínez P. F. (2008). Effect of Two Nutrient Solution Temperatures on Nitrate Uptake, Nitrate Reductase Activity, NH_4^+ Concentration and Chlorophyll a Fluorescence in Rose Plants. *Environmental and Experimental Botany*, Vol.64, No.1, (September 2008), pp. 65-74, ISSN 0098-8472
- Calmin, G.; Dennler, G.; Belbahri, L.; Wigger, A. & Lefort F. (2008). Molecular Identification of Microbial Communities in the Recycled Nutrient Solution of a Tomato Glasshouse Soil-Less Culture. *The Open Horticulture Journal*, Vol.1, No.1, (Jan 2008), pp. 7-14, ISSN: 18748406
- Carmassi, G.; Incrocci, L.; Malorgio, M.; Tognoni, F. & Pardossi, A. (2003). A Simple Model for Salt Accumulation in Closed-Loop Hydroponics. *Acta Horticulturae*, Vol.614, No.1, (September, 2003), pp. 149-154, ISSN 0567-7572
- Chadirin, Y.; Matsuoka, T.; Suhardiyanto, H. & Susila. A. D. (2007). Application of Deep Sea Water (DSW) for Nutrient Supplement in Hydroponics Cultivation of Tomato: Effect of supplemented DSW at Different EC Levels on Fruit Properties. *Bulletin Agronomy*, Vol.35, No.2, pp. 118 – 126, ISSN 216-3403

- Charidin, Y.; Suhardiyano, H. & Matsuoka, T. 2006. Application of Deep Sea Water for Nutrient Cooling System in Hydroponic Culture, *Proceedings of APAARI the International Symposium on Sustainable Agriculture in Asia*, pp. 1-4, Bogor, Indonesia, September 18-21, 2006.
- Chen, F.; He, H. & Tang, Y. (2011). In-situ Optimal Control of Nutrient Solution for Soilless Cultivation, *Proceedings of ICACC 2011 3rd International Conference on Advanced Computer Control*, pp. 412-416, Harbin, China, Jan 18-20, 2011.
- Christie, E. (2014). *Water and Nutrient Reuse within Closed Hydroponic Systems*. Electronic Thesis and Dissertations, 1096, 1–102.
- Chun, C. & Takakuta, T. (1994). Rate of Root Respiration of Lettuce under Various Dissolved Oxygen Concentrations in Hydroponics. *Environment Control in Biology*, Vol.32, No.2, (Apr 1994), pp. 125-135, ISSN 1883-0986
- Cooper, A. (1988). "1. The system. 2. Operation of the system". In: *The ABC of NFT. Nutrient Film Technique*, 3-123, Grower Books (ed.), ISBN 0901361224, London, England.
- Dalton, F. N.; Maggio, A. & Piccinni, G. (1997). Effect of Root Temperature on Plant Response Functions for Tomato: Comparison of Static and Dynamic Salinity Stress Indices. *Plant and Soil*, Vol. 192, No.2, (May 1997), pp. 307-319, ISSN 0032-079X
- David, P., Bonsi, C., Trotman, A., & Douglas, D. (1996). Nutrient Management Effects on Sweetpotato Genotypes Under Controlled Environment. *Acta Horticulturae*, (440), 65-69. doi: 10.17660/actahortic.1996.440.12
- De Rijck G. & Schrevens E (1998c) Comparison of the Mineral Composition of Twelve Standard Nutrient Solutions. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.21, No.10, (Oct 1998), pp. 2115-2125. ISSN 0190-4167
- De Rijck G. & Schrevens E. (1997) pH Influenced by the Elemental Composition of Nutrient Solutions. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.20, No.7-8, (Jul 1997) 911-923. ISSN. 0190- 4167
- De Rijck G. & Schrevens E. (1998a) Cationic Speciation in Nutrient Solutions as a Function of pH. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.21, No.5 (May 1998), pp. 861-870, ISSN. 0190-4167
- De Rijck G. & Schrevens, E. (1999) Anion Speciation in Nutrient Solutions as a Function of pH *Journal of Plant Nutrition*, Vol.22, No.2, (Feb 1999), pp. 269-279. ISSN 0190-4167
- De Rijck, G. & Schrevens, E. (1998b). Elemental bioavailability in nutrient solutions in relation to complexation reactions. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.21, No.10, (Oct 1998), pp. 2103-2113, ISSN 0190-4167.

- Dufour, L. & Guérin, V. (2005). Nutrient Solution Effects on the Development and Yield of *Anthurium andreanum* Lind. in Tropical Soilless Conditions. *Scientia Horticulturae*, Vol.105, No.2, (Jun 2005), pp. 269-282, ISSN 0304-4238
- Dyśko, J. ; Kaniszewski, S. & Kowalczyk, W. (2008). The Effect of Nutrient Solution pH on Phosphorus Availability in Soilless Culture of Tomato. *Journal of Elementology*, Vol.13, No.2, (Jun 2008), pp. 189-198, ISSN 1644-2296
- El-Kazzaz, A. (2017). Soilless Agriculture a New and Advanced Method for Agriculture Development: an Introduction. *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal*, 3(2). doi: 10.19080/artoaj.2017.03.555610
- El-Behairy, U. (2015). Simple Substrate Culture in Arid Lands. *Soilless Culture - Use Of Substrates For The Production Of Quality Horticultural Crops*. doi: 10.5772/59628
- Falah, M. A. F.; Wajima, T.; Yasutake, D.; Sago, Y. & Kitano, M. (2010). Responses of Root Uptake to High Temperature of Tomato Plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in Soil-less Culture. *Journal of Agricultural Technology*, Vol.6, No.3, (Jul 210), pp. 543- 558, ISSN 1686-9141
- Fanasca, S.; Colla, G.; Maiani, G.; Venneria, E.; Rouphael, Y.; Azzini, E. & Saccardo, F. (2006). Changes in Antioxidant Content of Tomato Fruits in Response to Cultivar and Nutrient Solution Composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol.54, No. 12, (Jun 2006), pp. 4319-4325, ISSN 0021-8561
- Farina, E.; Allera, C.; Paterniani, T. & Palagi, M. (2003). Mulching as a Technique to Reduce Salt Accumulation in Soilless Culture. *Acta Horticulturae*, Vol.609, No.1, (May 2003),pp. 459-466, ISSN 0567-7572
- Ferrón-Carrillo, F., Cunha-Chiamolera, T., & Urrestarazu, M. (2021). Effect of ammonium nitrogen on pepper grown under soilless culture. *Journal Of Plant Nutrition*, 45(1), 113-122. doi: 10.1080/01904167.2021.1943438
- Gericke, W. F. (1945). The Meaning of Hydroponics. *Science*. 101(2615), 142-143. doi: 10.1126/science.101.2615.142 101.
- Sundar, P., Jyothi, K., & Sundar, C. (2021). Indoor Hydroponics: A Potential Solution to Reuse Domestic Rinse Water. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 18(2), 373-383. doi: 10.13005/bbra/2924
- Nguyen, V., Van, H., Le, S., Nguyen, T., Nguyen, H., & Lan, N. et al. (2021). Production of hydroponic solution from human urine using adsorption–desorption method with coconut shell-derived activated carbon. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101708. doi: 10.1016/j.eti.2021.101708

- da Silva Cuba Carvalho, R., Bastos, R., & Souza, C. (2018). Influence of the use of wastewater on nutrient absorption and production of lettuce grown in a hydroponic system. *Agricultural Water Management*, 203, 311-321. doi: 10.1016/j.agwat.2018.03.028
- Ezziddine, M., Liltved, H., & Seljåsen, R. (2021). Hydroponic Lettuce Cultivation Using Organic Nutrient Solution from Aerobic Digested Aquacultural Sludge. *Agronomy*, 11(8), 1484. doi: 10.3390/agronomy11081484
- Astolfi, S., Celletti, S., Vigani, G., Mimmo, T., & Cesco, S. (2021). Interaction Between Sulfur and Iron in Plants. *Frontiers In Plant Science*, 12. doi: 10.3389/fpls.2021.670308
- Gislerød, H. R. & Adams, P. (1983). Diurnal Variations in the Oxygen Content and Requirement of Recirculating Nutrient Solutions and in the Uptake of Water and Potassium by Cucumber and Tomato Plants. *Scientia Horticultura*, Vol.21, No.4, (Dec 1983), pp. 311–321, ISSN 0304-4238
- Grand View Research (2020). Hydroponics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Aggregate Systems, Liquid Systems), By Crops (Tomatoes, Lettuce, Peppers, Cucumbers, Herbs), By Region, And Segment Forecasts, 2019 – 2025. Διαθέσιμο στο: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/hydroponics-market>
- Graves, C.J. (1983). The Nutrient Film Technique. *Horticultural Reviews* 5: pp.1-44.
- Gruda, N. (2009). Do Soilles Culture Systems have an Influence on Product Quality of Vegetables? *Journal of Applied Botany and Food Quality*, Vol.82, No.2, pp. 141-147, ISSN 1613-9216
- Hansen, M. (1978). Plant Specific Nutrition and Preparation of Nutrient Solutions. *Acta Horticulturae*, Vol.82, No.1, (Apr 1978), pp. 109-112, ISSN 0567-7572
- Hidaka, K.; Kitano, M.; Sago, Y.; Yasutake, D.; Miyauchi, K.; Affan, M. F. F.; Ochi, M. & Imai, S. (2008). Energy-Saving Temperature Control of Nutrient Solution in Soil-Less Culture Using an Underground Water Pipe. *Acta Horticulturae*, Vol.797. No.1, (Sep 2008), pp. 185-191, ISSN 0567-7572
- Jensen, M. (1997). Hydroponics. *Hortscience*, 32(6), 1018-1021. doi: 10.21273/hortsci.32.6.1018
- Jensen, M. H. & Collins, W. L. (1985). Hydroponic Vegetable Production. *Horticultural Reviews*, Vol.7, pp. 483- 559, ISSN 9780870554926
- Juárez H., M. J.; Baca C., G. A.; Aceves N., L. A.; Sánchez G., P.; Tirado T., J. L.; Sahagún C., J. & Colinas D. L., M. T. (2006). Propuesta para la Formulación de Soluciones Nutritivas en Estudios de Nutrición Vegetal. *Interciencia*, Vol.31, No.4, (Apr 2006), ISSN 0378-1844

- Kang, J. G. & van Iersel, M. W. (2004). Nutrient Solution Concentration Affects Shoot: Root Ratio, Leaf Area Ratio, and Growth of Subirrigated *Salvia (Salvia splendens)*. *HortScience*, Vol.39, No.1, (Feb 2004), pp. 49-54, ISSN 0018-5345
- Lagomarsino, V., & Senft, R. (2019). Hydroponics: The power of water to grow food - Science in the News. Retrieved 2 April 2021, from <https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2019/hydroponics-the-power-of-water-to-grow-food/>
- Lakhiar, I., Gao, J., Syed, T., Chandio, F., & Buttar, N. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: a review on aeroponics. *Journal Of Plant Interactions*, 13(1), 338-352. doi: 10.1080/17429145.2018.1472308
- Lopez, J., Dorais, M., Tremblay, N., & Gosselin, A. (1998). Effects of varying sulfate concentrations and vapor pressure deficits (VPD) on greenhouse tomato fruit quality, foliar nutrient concentration and amino acid components. *Acta Horticulturae*, (458), 303-310. doi: 10.17660/actahortic.1998.458.38
- Lorenzo, H.; Cid, M. C; Siverio, J. M. & Caballero, M. (2000). Influence of Additional Ammonium Supply on Some Nutritional Aspects in Hydroponic Rose Plants. *The Journal of Agricultural Science*, Vol.134, No.4, (Sep, 2000), pp. 421-425, ISSN 0021- 8596
- Lykas, C. H.; Giaglaras, P. & Kittas, C. (2001). Nutrient Solution Management Recirculating Soilless Culture of Rose in Mild Winter Climates. *Acta Horticulturae*, Vol.559, No.1, (Oct 2001), pp. 543-548, ISSN 0567-7572
- Lykas, C., Katsoulas, N., Giaglaras, P., & Kittas, C. (2006). Electrical Conductivity and pH Prediction in a Recirculated Nutrient Solution of a Greenhouse Soilless Rose Crop. *Journal Of Plant Nutrition*, 29(9), 1585-1599. doi: 10.1080/01904160600848904.
- Nam, S. W.; Kim, M. K. & Son, J. E. (1996). Nutrient Solution Cooling and its Effect on Temperature of Leaf Lettuce in Hydroponic System. *Acta Horticulturae*, Vol.440, No.1, (Dec 1996), pp.: 227-32. ISSN 0567-7572
- Nederhoff, E. M., & Stanghellini, C. (2010). Water use efficiency of tomatoes - in greenhouses and hydroponics. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, 2010(115), 52-59. <https://edepot.wur.nl/156932>
- Nelkin, J., & Caplow, T. (2008). Sustainable controlled environment agriculture for urban areas. *Acta Horticulturae*, (801), 449-456. doi: 10.17660/actahortic.2008.801.48
- Nemali, K. S. & van Iersel, M. W. (2004). Light Intensity and Fertilizer Concentration: I. Estimating Optimal Fertilizer Concentration from Water-Use

- Efficiency of Wax Begonia. *HortScience*, Vol.39, No.6, (Oct 2004), pp. 1287-1292. ISSN 0018-5345
- Nxawe, S.; Laubscher, C. P. & Ndakidemi, P. A. (2009). Effect of Regulated Irrigation Water Temperature on Hydroponics Production of Spinach (*Spinacia oleracea L.*). *African Journal of Agricultural Research*, Vol.4, No.12, (December, 2009), pp. 1442-1446, ISSN 1991- 637X
- Olympios, CM. (1999). Overview of soilless culture: advantages, constraints, and perspectives. In : Choukr-Allah R (ed.), Protected cultivation in the Mediterranean region, CIHEAM / IAV Hassan II, Paris, Europe, pp. 307 -324.
- Papadopoulous, A. P.; Hao., X.; Tu, J. C. & Zheng, J. (1999). Tomato Production in Open or Closed Rockwool Culture Systems with NFT or Rockwool Nutrient Feedings. *Acta Horticulturae*, Vol.481. No.1, (Jan 1999), pp. 89-96, ISSN 0567-7572
- Pardossi, A.; Incrocci, L.; Massa, D.; Carmassi, G. & Maggini, R. (2009). The Influence of Fertigation Strategies on Water and Nutrient Efficiency of Tomato Grown in Closed Soilless Culture with Saline Water. *Acta Horticulturae*, Vol.807, No.2, (Jan 2009), pp.445-450, ISSN 0567-7572
- Resh, H. M. (2004). *Hydroponic Food Production*, Newconcept Press, Inc., ISBN-10: 093123199X, Mahwah, NJ., U. S. A.
- Resh, H.M. (2013). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. 7th ed. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Rouphael, Y.; Colla, G., (2009). The Influence of Drip Irrigation or Subirrigation on Zucchini Squash Grown in Closed-Loop Substrate Culture with High and Low Nutrient Solution Concentrations. *HortScience*, Vol.44, No.2, (Apr 2009), pp. 306-311, ISSN 0018-5345
- Ruijs, M. (1995). Economic evaluation of closed production systems in glasshouse horticulture. *Acta Horticulturae*, (340), 87-94. doi: 10.17660/actahortic.1995.340.11
- Savvas, D., Gianquinto, G., Tuzel, Y. & Gruda, N. (2013). Soilless culture. In book: Good agricultural practices principles for greenhouse vegetable production in the Mediterranean Region (pp.303-354) Chapter: Soilless culture, FAO Paper, AGP series n° 217, pp: 303-354
- Siddiqi, M. Y.; Kronzucher, H. J.; Britto, D. T. & Glass, A. D. M. (1998). Growth of a Tomato Crop at Reduced Nutrient Concentrations as a Strategy to Limit Eutrophication. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.21, No.9, (Sep 1998), pp. 1879-1895. ISSN 0190-4167

- Singh, S., & Singh, B. S. (2012, May). Hydroponics—A technique for cultivation of vegetables and medicinal plants. In *Proceedings of 4th Global conference on Horticulture for Food, Nutrition and Livelihood Options. Bhubaneswar, Odisha, India* (p. 220).
- Sonneveld, C. & Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, Springer, ISBN9048125316, New York, U. S. A.
- Steiner, A. A. (1973). The Selective Capacity of Tomato Plants for Ions in a Nutrient Solution, *Proceedings of IWOSC 1973 3rd International Congress on Soilless Culture*, pp. 43-53, Sassari, Italy, May 7-12, 1973
- Steiner, A. A. (1984). The Universal Nutrient Solution, *Proceedings of IWOSC 1984 6th International Congress on Soilless Culture*, pp. 633-650, ISSN 9070976048, Wageningen, The Netherlands, Apr 29-May 5, 1984
- Tariq, M. & Mott, C. J. B. (2007). The Significance of Boron in Plant Nutrition an environment-A Review. *Journal of Agronomy*, Vol.6, No.1, (Jan 2007), pp. 1-10, ISSN1812-5379
- Tognoni, F.; Pardossi, A. & Serra, G. (1998). Water Pollution and the Greenhouse Environmental Costs. *Acta Horticulturae*, Vol.458, No.1, (Apr 1998), pp. 385–394, ISSN 0567-7572
- Trejo-Téllez, L.I. & Gómez-Merino, F. C. (2012). Nutrient Solutions for Hydroponic Systems, In: *Hydroponics: A Standard Methodology for Plant Biological Researches*, ed. Asao T. (London: InTech;), 244.
- Tüzel, Y. Gül, A. Tüzel, I.H. & Öztekin G.B. (2019). Different soilless culture systems and their management. *Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences*, 73(3), 7-12.
- Tyson, R. V. (2007). Reconciling pH for Ammonia Biofiltration in a Cucumber/Tilapia Aquaponics System Using a Perlite Medium. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.30, No.6, (Jun 2007), pp. 901–913, ISSN 0190-4167
- Tyson, R.V., Simonne, E. H.; Davis, M.; Lamb, E. M.; White, J. M. & Treadwell, D. D. (2007). Effect of Nutrient Solution, Nitrate-Nitrogen Concentration, and pH on Nitrification Rate in Perlite Medium. *Journal of Plant Nutrition*, Vol.30, No.6, (Jun, 2007), pp. 901-913, ISSN 0190-4167
- Urrestarazu, M. & Mazuela, P. C. (2005). Effect of Slow-Release Oxygen Supply by Fertigation on Horticultural Crops under Soilless Culture. *Scientia Horticulturae*, Vol. 106, No.4, (November 2005), pp. 484-490, ISSN 0304-4238
- USDA. (2001). *Soil Quality Test Kit Guide*. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C., U.S.A.

- Van Os, E. A. (2010). Disease Management in Soilless Culture Systems. *Acta Horticulturae*, Vol.883, No.1, (Nov 2010), pp. 385-393, ISSN 0567-7572
- van Os, E., Ruijs, M., & van Weel, P. (1991). Closed Business Systems For Less Pollution From Greenhouses. *Acta Horticulturae*, (294), 49-58. doi: 10.17660/actahortic.1991.294.4.
- Verner, D., Vellani, S., Klausen, A-L. & Tebaldi, E. (2017). Frontier Agriculture for Improving Refugee Livelihoods : Unleashing Climate-Smart and Water-Saving Agriculture Technologies in MENA. World Bank, Washington, DC. World Bank. Διαθέσιμο στο: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29753>
- Villela, J.; Luiz, V. E.; Araujo, J. A. C. de & Factor, T. L. (2004). Nutrient Solution Cooling Evaluation for Hydroponic Cultivation of Strawberry Plant. *Engenharia Agrícola*, Vol.24, No.2, (May-Aug 2004), pp. 338-346, ISSN 0100-6916
- Voogt, W. (2002). Potassium management of vegetables under intensive growth conditions, In: *Potassium for Sustainable Crop Production*. N. S. Pasricha & S. K. Bansal SK (eds.), 347-362, International Potash Institute, Bern, Switzerland.
- Windsor, G. & Schwarz, M. (1990). *Soilless Culture for Horticultural Crop Production*. FAO, Plant Production and Protection. Paper 101. Roma, Italia.
- Zekki, H.; Gauthier, L. & Gosselin A. (1996). Growth, Productivity and Mineral Composition of Hydroponically Cultivated Greenhouse Tomatoes, With or Without Nutrient Slution Recycling. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol.121, No.6, (Nov 1996), pp. 1082-1088, ISSN 0003-1062
- Zheng, Y.; Graham, T. H.; Richard, S. & Dixon, M., (2005). Can Low Nutrient strategies be Used for Pot Gerbera Production in Closed-Loop Subirrigation? *Act Horticulturae*, Vol.691, No.1, (October 2005), pp. 365-372. ISSN 0567-7572