



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΥΠΟ ΚΑΛΥΨΗ - ΥΔΡΟΠΟΝΙΑ

Διπλωματική Εργασία

«Ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων από λύματα για υδροπονικές καλλιέργειες»

Γρηγορίου Αθανάσιος

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

Ντάτση Γεωργία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

ΠΑΤΡΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2025

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/ δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων από λύματα για υδροπονικές καλλιέργειες»

Γρηγορίου Αθανάσιος

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Ντάτση Γεωργία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Κόκκινος Πέτρος

Αναπληρωτής Καθηγητής

ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

ΠΑΤΡΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου για την καθοδήγηση τους και την βοήθεια τους ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την βοήθεια τους ώστε να ολοκληρωθεί το μεταπτυχιακό μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την σύντροφο μου για την υπομονή της.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη δυνατότητα ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων από λύματα και τη χρήση τους για την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος σε υδροπονικές καλλιέργειες. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας το πρωτόκολλο PRISMA, το οποίο θεωρείται διεθνώς αξιόπιστη μεθοδολογική προσέγγιση για τη συλλογή και αξιολόγηση ερευνητικών δεδομένων. Αρχικά, παρουσιάζεται η αυξανόμενη ανάγκη για αειφόρες λύσεις στη διαχείριση των λυμάτων και τη γεωργία, εστιάζοντας στα μακροθρεπτικά στοιχεία - άζωτο, φώσφορο και κάλιο - που υπάρχουν σε σημαντικές συγκεντρώσεις στα αστικά και αγροτικά λύματα. Στη συνέχεια, αναλύονται οι τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών, όπως η βιολογική και χημική επεξεργασία, τα συστήματα μεμβρανών και οι μέθοδοι ιοντοανταλλαγής, οι οποίες επιτρέπουν την παραγωγή καθαρών και ασφαλών διαλυμάτων για υδροπονική χρήση. Μέσα από τη βιβλιογραφική επισκόπηση, καταγράφονται τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων στην υδροπονία, όπως η μείωση του κόστους παραγωγής, η εξοικονόμηση φυσικών πόρων και η ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας. Επισημαίνονται, ωστόσο, και οι προκλήσεις, όπως η παρουσία βαρέων μετάλλων, οργανικών μικρορυπαντών και παθογόνων, οι οποίες απαιτούν αυστηρό έλεγχο ποιότητας και τήρηση προδιαγραφών επεξεργασίας. Τέλος, αξιολογούνται οι κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές, επισημαίνοντας τη σημασία της αποδοχής της πρακτικής από τους καταναλωτές και τη θέσπιση σαφούς ρυθμιστικού πλαισίου για την ασφαλή εφαρμογή. Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η αξιοποίηση των θρεπτικών από λύματα στην υδροπονία αποτελεί μια υποσχόμενη, βιώσιμη και εφαρμόσιμη λύση για το μέλλον της αγροδιατροφής, με προϋπόθεση τη συνεχή έρευνα και τεχνολογική πρόοδο.

Λέξεις-κλειδιά: υδροπονία, λύματα, θρεπτικά στοιχεία, ανάκτηση, κυκλική οικονομία

Abstract

This MSc Thesis examines the possibility of nutrient recovery from wastewater and its use for preparing a nutrient solution recipe in hydroponic crops. In this work, a systematic review of the international literature was carried out following the PRISMA protocol, which is considered an internationally reputable methodological approach for the collection and evaluation of research data. Initially, the growing need for sustainable solutions in wastewater management and agriculture is presented, focusing on the macronutrients - nitrogen, phosphorus and potassium - present in significant concentrations in urban and agricultural wastewater. Nutrient recovery technologies, such as biological and chemical treatment, membrane systems and ion exchange methods, which allow the production of clean and safe solutions for hydroponic use, are discussed. Through the literature review, the benefits of using treated wastewater in hydroponics, such as reducing production costs, saving natural resources and enhancing the circular economy, are documented. However, challenges are also highlighted, such as the presence of heavy metals, organic micro-pollutants and pathogens, which require strict quality control and adherence to treatment specifications. Finally, the socio-economic and environmental aspects are assessed, highlighting the importance of consumer acceptance of the adoption and establishment of a clear regulatory framework for safe implementation. The paper concludes that utilisation of nutrients from wastewater in hydroponics is a promising, sustainable and applicable solution for the future of agri-food, subject to continued research and technological advances.

Keywords: hydroponics, wastewater, nutrients, recovery, cyclical economy

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	9
1.1 Παρουσίαση του προβλήματος	9
1.2 Επιστημονική και κοινωνικο-οικονομική σημασία.....	9
1.3 Τρέχουσα κατάσταση στη διαχείριση λυμάτων και υδροπονία.....	9
1.4 Ερευνητικά ερωτήματα της ανασκόπησης.....	10
1.5 Δομή της εργασίας	11
2. Μεθοδολογία Ανασκόπησης (σύμφωνα με PRISMA).....	12
2.1 Τύπος Ανασκόπησης	12
2.2 Κριτήρια Επιλογής: Συμπερίληψης και Αποκλεισμού	12
2.3 Πηγές Πληροφόρησης – Βάσεις Δεδομένων.....	13
2.4 Όροι Αναζήτησης.....	13
2.5 Διαδικασία επιλογής άρθρων.....	14
2.6 Πίνακας PRISMA	15
2.7 Μέθοδος ανάλυσης δεδομένων	16
3. Θεματική ανάλυση της βιβλιογραφίας.....	19
3.1 Τύποι Θρεπτικών στοιχείων και οι συγκεντρώσεις τους στα λύματα ..	19
3.2 Τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών	24
3.3 Εφαρμογές στην υδροπονία	27
3.4 Περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές πτυχές	32
3.5 Παραδείγματα και συγκριτικές μελέτες από τη βιβλιογραφία.....	39
4. Συζήτηση.....	41
5. Συμπεράσματα	48
6. Βιβλιογραφία	52
Παράρτημα Α: Συγκεντρωτικός πίνακας των 118 μελετών.....	68

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας PRISMA.....	16
---	----

1. Εισαγωγή

1.1 Παρουσίαση του προβλήματος

Η παγκόσμια διαχείριση των λυμάτων αποτελεί διαρκή πρόκληση για τις κοινωνίες. Καθημερινά, παράγονται τεράστιες ποσότητες υγρών αποβλήτων σε αστικές και αγροτικές περιοχές (Barbosa et al., 2015). Αυτά τα λύματα συχνά περιέχουν σημαντικά θρεπτικά συστατικά, όπως άζωτο και φώσφορο, που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή ρύπανση στα υδάτινα οικοσυστήματα όταν απορρίπτονται χωρίς επεξεργασία (Czuba et al., 2021). Επίσης, το κόστος για την επεξεργασία και την ασφαλή διάθεση των λυμάτων παραμένει υψηλό (Mai et al., 2023). Έτσι, αναζητούνται νέες λύσεις που να συνδυάζουν περιβαλλοντική προστασία και αποδοτική αξιοποίηση των πόρων (Alayande et al., 2024).

1.2 Επιστημονική και κοινωνικο-οικονομική σημασία

Σήμερα, η ανάκτηση θρεπτικών από τα λύματα δεν αποτελεί μόνο τεχνική πρόκληση. Έχει και μεγάλη επιστημονική και κοινωνικοοικονομική αξία (Arcas-Pilz et al., 2021· Mai et al., 2023). Αυτό συμβαίνει γιατί το άζωτο και ο φώσφορος που υπάρχουν στα λύματα προέρχονται κυρίως από συνθετικά λιπάσματα, η παραγωγή των οποίων καταναλώνει ενέργεια και δημιουργεί εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Halbert-Howard et al., 2021). Ακόμη, το παγκόσμιο απόθεμα φωσφόρου εξαντλείται σταδιακά, ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται οι ανάγκες της γεωργίας για τροφή (Arcas-Pilz et al., 2021· Rodrigues et al., 2022). Η υδροπονία, που αναπτύσσεται γρήγορα, στηρίζεται σε διαλύματα θρεπτικών στοιχείων και μπορεί να επωφεληθεί άμεσα από την αξιοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων (Afonso et al., 2023· Calabria et al., 2019). Έτσι, η επαναχρησιμοποίηση θρεπτικών δημιουργεί οφέλη για το περιβάλλον, τη γεωργία, και την κοινωνία (Mai et al., 2023).

1.3 Τρέχουσα κατάσταση στη διαχείριση λυμάτων και υδροπονία

Η κλασική διαχείριση λυμάτων βασίζεται κυρίως στην απομάκρυνση των ρύπων και στην ασφαλή διάθεση του νερού (Czuba et al., 2021). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, αυξάνεται το ενδιαφέρον για τεχνολογίες που επιτρέπουν την ανάκτηση θρεπτικών από τα λύματα με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή τους στη γεωργία (Bliedung et al., 2020).

Η υδροπονία είναι μία μέθοδος που επιτρέπει την καλλιέργεια φυτών εκτός εδάφους, μέσω της παροχής θρεπτικού διαλύματος (Barbosa et al., 2015· Adrover et al., 2013). Τα τελευταία χρόνια, πολλές μελέτες εξετάζουν αν τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες των υδροπονικών καλλιεργειών (Afonso et al., 2023· Gonçalves et al., 2019). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, με σωστή επεξεργασία, τα λύματα προσφέρουν ασφαλή και αποδοτική πηγή θρεπτικών (Adrover et al., 2013· Germer et al., 2023).

Στην πράξη, εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι για την ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων από λύματα, με σκοπό τη χρήση τους ως διαλύματα λίπανσης σε υδροπονικές καλλιέργειες, όπως η χρήση χωνευμένων αποβλήτων (Bergstrand et al., 2020), η ανάκτηση αμμωνίου μέσω ειδικών τεχνολογιών, όπου γίνεται ανάκτηση του αμμωνιακού ιόντος (NH_4^+) από βιομηχανικά υγρά απόβλητα που περιέχουν οξικό αμμώνιο (Song et al., 2023), αλλά και η χρήση προεπεξεργασμένων λυμάτων ως βασικό διάλυμα σε συστήματα υδροπονίας (Calabria et al., 2019· Afonso et al., 2023).

Πολλές έρευνες επιβεβαιώνουν ότι η ποιότητα των φυτών δεν μειώνεται όταν χρησιμοποιούνται διαλύματα από επεξεργασμένα λύματα (Antón-Herrero et al., 2021· Santos et al., 2024). Όμως αυτό δεν ισχύει πάντα. Η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο διάλυμα. Η θρεπτική επάρκεια μπορεί να διαφέρει, ανάλογα με τον τρόπο επεξεργασίας των λυμάτων και με το είδος της καλλιέργειας (Santos et al., 2024). Επιπλέον, υπάρχουν ακόμη ανησυχίες για την παρουσία μικρορρυπαντών και παθογόνων, που απαιτούν αυστηρό έλεγχο και κατάλληλη επεξεργασία (Arola et al., 2019· Kreuzig et al., 2021).

1.4 Ερευνητικά ερωτήματα της ανασκόπησης

Στη βάση των παραπάνω, διαμορφώνονται σημαντικά ερωτήματα που αφορούν την παρούσα συστηματική ανασκόπηση.

1. Ποια είναι τα βασικά θρεπτικά στοιχεία που ανιχνεύονται στα λύματα και σε ποιες συγκεντρώσεις συναντώνται συνήθως;
2. Ποιες τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών εφαρμόζονται διεθνώς και πόσο αποδοτικές είναι για χρήση σε υδροπονικές καλλιέργειες;

3. Πώς εφαρμόζονται στην πράξη τα επεξεργασμένα λύματα σε υδροπονικές καλλιέργειες και ποια είναι τα πλεονεκτήματα ή τα προβλήματα που προκύπτουν;
4. Ποιες είναι οι περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές πτυχές καθώς και οι προκλήσεις αυτής της πρακτικής σε τοπικό και διεθνές επίπεδο;

Τα ερωτήματα αυτά βοηθούν να κατανοηθεί καλύτερα το θέμα της ανάκτησης θρεπτικών από λύματα και της χρήσης τους στην υδροπονία. Με αυτόν τον τρόπο στηρίζεται η δημιουργία ασφαλών και αποδοτικών τρόπων παραγωγής τροφής.

1.5 Δομή της εργασίας

Η εργασία δομήθηκε έτσι ώστε να απαντήσει στα παραπάνω ερωτήματα με σαφή και τεκμηριωμένο τρόπο. Αρχικά, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, σύμφωνα με το πρότυπο PRISMA (Page et al., 2021). Στη συνέχεια, αναλύονται τα βασικά θρεπτικά στοιχεία που υπάρχουν στα λύματα και η πορεία τους μέσω του θρεπτικού διαλύματος στα συστήματα υδροπονίας. Στην υδροπονία, τα θρεπτικά στοιχεία δίνονται στα φυτά μέσω ειδικού διαλύματος και απορροφώνται από το ριζικό τους σύστημα. Επίσης, παρουσιάζονται και οι τεχνολογίες που επιτρέπουν την ανάκτησή τους από τα λύματα. Έπειτα, περιγράφονται οι εφαρμογές στην υδροπονία και τα βασικά ευρήματα από σχετικές μελέτες. Τέλος, εξετάζονται οι περιβαλλοντικές διαστάσεις και οι μελλοντικές προοπτικές. Η εργασία ολοκληρώνεται με τη σύνθεση των αποτελεσμάτων και την παρουσίαση προτάσεων για περαιτέρω έρευνα και εφαρμογή στην πράξη (Mai et al., 2023· Arcas-Pilz et al., 2021· Page et al., 2021).

2. Μεθοδολογία Ανασκόπησης (σύμφωνα με PRISMA)

Η παρούσα εργασία αποτελεί συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί τη μέθοδο PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Moher et al., 2009; Page et al., 2021). Αυτή η μεθοδολογία είναι διεθνώς αναγνωρισμένη και διασφαλίζει τη διαφάνεια, τη συνέπεια και την πληρότητα κατά τον σχεδιασμό, την εκτέλεση και την παρουσίαση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Έτσι, η έρευνα εστιάζει στην εύρεση, αξιολόγηση και σύνθεση όλων των σχετικών μελετών που αφορούν την ανάκτηση θρεπτικών από λύματα και τη χρήση τους σε υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας.

2.1 Τύπος Ανασκόπησης

Ο τύπος της παρούσας εργασίας είναι η συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση (systematic review). Αυτό σημαίνει ότι ακολουθείται ένα συγκεκριμένο και αυστηρό πρωτόκολλο για τη συλλογή, αξιολόγηση και ανάλυση της βιβλιογραφίας. Επομένως, η διαδικασία είναι οργανωμένη και διαφανής, με στόχο να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα και οι προκαταλήψεις (Page et al., 2021). Ακόμη, η επιλογή αυτής της μεθόδου βοηθά ώστε τα ευρήματα να είναι αξιόπιστα και συγκρίσιμα με προηγούμενες ή μελλοντικές ανασκοπήσεις.

2.2 Κριτήρια Επιλογής: Συμπερίληψης και Αποκλεισμού

Αρχικά, τέθηκαν σαφή κριτήρια συμπερίληψης και αποκλεισμού των μελετών, πριν ξεκινήσει η αναζήτηση. Κριτήρια συμπερίληψης ήταν τα εξής: η μελέτη να αφορά άμεσα την ανάκτηση ή/και επαναχρησιμοποίηση θρεπτικών (όπως άζωτο, φώσφορο, κάλιο) από λύματα κάθε είδους (αστικά λύματα, βιομηχανικά απόβλητα, λύματα κτηνοτροφίας, διαχωρισμένα ούρα κ.λπ.) για υδροπονική καλλιέργεια φυτών, ή να εξετάζει την ενσωμάτωση υδροπονικών συστημάτων στην επεξεργασία λυμάτων. Επιπλέον, περιλήφθηκαν πρωτογενείς έρευνες και ανασκοπήσεις που ήταν δημοσιευμένες σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά ή πρακτικά συνεδρίων με ομότιμη αξιολόγηση (peer-review).

Ακόμη, δόθηκε έμφαση σε άρθρα της τελευταίας εικοσαετίας (2000-2025), αφού το επιστημονικό ενδιαφέρον για κυκλικά συστήματα και υδροπονία αυξήθηκε σημαντικά από το 2000 και μετά. Όμως, μελέτες-ορόσημα παλαιότερων ετών δεν αποκλείστηκαν αν ήταν σημαντικές. Όσον αφορά τη γλώσσα, η κύρια αναζήτηση έγινε στην αγγλική, επειδή η πλειοψηφία της επιστημονικής παραγωγής στο πεδίο είναι στα αγγλικά. Παράλληλα, λήφθηκαν υπόψη και λίγες πηγές σε άλλες γλώσσες (π.χ. ελληνικά), εφόσον πληρούσαν τα υπόλοιπα κριτήρια.

Από την άλλη, μελέτες που επικεντρώνονταν μόνο στην ανάκτηση θρεπτικών από λύματα για εδαφική εφαρμογή ή άλλες χρήσεις (π.χ. παραγωγή λιπασμάτων για συμβατική γεωργία) αποκλείστηκαν. Επιπλέον, απορρίφθηκαν δημοσιεύσεις που ασχολούνταν μόνο με την απομάκρυνση ρύπων χωρίς να γίνεται αξιοποίηση των θρεπτικών για υδροπονία. Τέλος, δεν συμπεριλήφθηκαν πηγές χωρίς επιστημονική τεκμηρίωση, όπως μη αξιολογημένες εκθέσεις ή εμπορικά φυλλάδια.

2.3 Πηγές Πληροφόρησης – Βάσεις Δεδομένων

Η βιβλιογραφική αναζήτηση πραγματοποιήθηκε σε πέντε βασικές διεθνείς βάσεις δεδομένων: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed και Google Scholar (jsga.edu.tr). Η επιλογή τους έγινε επειδή καλύπτουν διαφορετικά επιστημονικά πεδία, όπως περιβαλλοντική μηχανική, γεωπονία, χημική μηχανική, βιολογία και τεχνολογία τροφίμων. Η βάση Scopus και το Web of Science καλύπτουν ευρύ φάσμα ακαδημαϊκών περιοδικών υψηλού κύρους, ενώ το ScienceDirect προσφέρει πρόσβαση σε άρθρα Elsevier. Το PubMed αξιοποιήθηκε κυρίως για δημοσιεύσεις από τις περιβαλλοντικές και βιοϊατρικές επιστήμες, ενώ το Google Scholar λειτούργησε συμπληρωματικά, για εντοπισμό γκρίζας βιβλιογραφίας και αναφορών που δεν βρέθηκαν αλλού. Ταυτόχρονα, εφαρμόστηκε και backward snowballing, δηλαδή εξετάστηκαν οι βιβλιογραφικές αναφορές βασικών άρθρων για να βρεθούν επιπλέον σχετικές μελέτες.

2.4 Όροι Αναζήτησης

Για τη συστηματική ανίχνευση όλων των σχετικών πηγών, χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμοί αγγλικών λέξεων-κλειδιών που περιγράφουν τις βασικές έννοιες της ανασκόπησης. Ενδεικτικά, οι βασικοί όροι αναζήτησης ήταν:

"nutrient recovery", "wastewater", "hydroponic", "hydroponics", "soilless culture", "fertilizer", "nutrient reuse", "resource recovery", "urine", "wastewater hydroponics", "aquaponics", "constructed wetland hydroponic".

Αυτοί οι όροι χρησιμοποιήθηκαν σε πολλούς λογικούς συνδυασμούς, με χρήση των συνδέσμων *AND* και *OR*. Ενδεικτικά, ένα πρότυπο ερώτημα που χρησιμοποιήθηκε σε βάσεις δεδομένων ήταν:

("nutrient recovery" OR "nutrient reuse" OR "fertilizer recovery") AND (wastewater OR sewage OR effluent OR urine) AND (hydroponic OR "soilless culture" OR aquaponic).

Ακόμα, προσαρμόστηκαν οι όροι αναζήτησης σε κάθε βάση, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και συνώνυμα ή πληθυντικοί/παράγωγοι όροι. Για παράδειγμα, λέξεις-κλειδιά που συναντώνται σε πρόσφατα άρθρα είναι: *"Anthroponic", "Circular economy", "Fertiliser", "Source-separated urine".*

2.5 Διαδικασία επιλογής άρθρων

Αρχικά, με βάση τη συστηματική διαδικασία PRISMA, εντοπίστηκαν συνολικά 118 επιστημονικά άρθρα που σχετίζονται άμεσα με το θέμα της εργασίας. Η αναζήτηση έγινε σε μεγάλες διεθνείς βάσεις δεδομένων, όπως Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed και Google Scholar, με συγκεκριμένα κριτήρια επιλογής και αποκλεισμού, όπως η γλώσσα, η χρονολογία και ο τύπος της μελέτης (Moher et al., 2009· Page et al., 2021). Στη συνέχεια, κάθε άρθρο αξιολογήθηκε ξεχωριστά, σύμφωνα με τη συνάφεια και την ποιότητά του για τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας.

Μετά την επιλογή των άρθρων, έγινε συστηματική ανάλυση και ταξινόμηση των ευρημάτων τους. Οι πληροφορίες από τα άρθρα παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες υποενότητες του κεφαλαίου, ώστε να καλύπτονται όλες οι διαστάσεις του θέματος, όπως οι τύποι θρεπτικών, οι τεχνολογίες ανάκτησης, οι εφαρμογές στην υδροπονία και οι περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές πτυχές. Έτσι, κάθε ενότητα της εργασίας βασίζεται στα δεδομένα αυτών των 118 μελετών, με σαφείς αναφορές στα βασικά ευρήματα και συμπεράσματα.

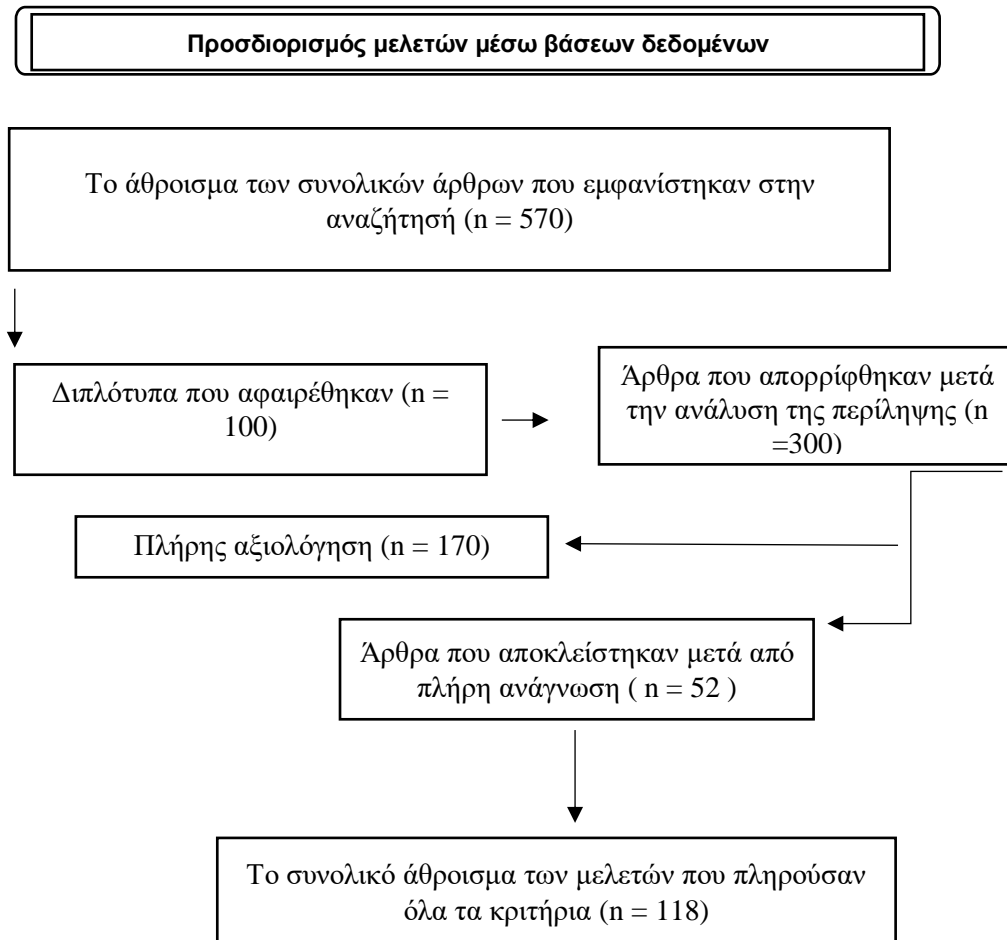
Στο παράρτημα 1, στο τέλος της παρούσας εργασίας, παρατίθεται η συγκεντρωτικός πίνακας με τις 118 μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα επισκόπηση. Ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει βασικά στοιχεία για κάθε άρθρο, όπως ονοματεπώνυμο συγγραφέα, τίτλο, χρονολογία, χώρα, τύπο μελέτης, αποτελέσματα και κύρια ευρήματα.

2.6 Πίνακας PRISMA

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας συνοψίζεται στο Σχήμα 1, δηλαδή στο διάγραμμα ροής PRISMA. Συνολικά, εντοπίστηκαν περίπου 570 εγγραφές από όλες τις βάσεις δεδομένων (περίπου 150 από Scopus, 130 από Web of Science, 100 από ScienceDirect, 80 από PubMed και 110 από Google Scholar, καθώς και λιγότερες από 20 από backward snowballing). Μετά την αφαίρεση περίπου 100 διπλότυπων, παρέμειναν περίπου 470 μοναδικές εγγραφές.

Ακολούθησε έλεγχος, όπου αποκλείστηκαν περίπου 300 μελέτες ως μη σχετικές. Έγινε πλήρης αξιολόγηση 170 άρθρων, εκ των οποίων 52 αποκλείστηκαν για συγκεκριμένους λόγους (θεματική ασυμφωνία, μη επαρκή δεδομένα, αναδημοσίευσης ίδιου ή παρόμοιου περιεχομένου από τον ίδιο συγγραφέα). Τελικά, **118 μελέτες** πληρούσαν όλα τα κριτήρια και συμπεριλήφθηκαν στην ανασκόπηση, αποτελώντας τη βάση για τις επόμενες ενότητες.

Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας PRISMA



2.7 Μέθοδος ανάλυσης δεδομένων

Η ανάλυση των δεδομένων στη συστηματική αυτή βιβλιογραφική ανασκόπηση βασίστηκε σε μια τυποποιημένη και οργανωμένη διαδικασία αποδελτίωσης. Η διαδικασία αυτή ξεκίνησε αφού πρώτα ολοκληρώθηκε η επιλογή των κατάλληλων άρθρων, βάσει των κριτηρίων συμπερίληψης και αποκλεισμού που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επομένως, κάθε επιλεγμένο άρθρο αξιολογήθηκε ξεχωριστά και καταγράφηκαν συγκεκριμένες πληροφορίες σε ενιαίο πίνακα, έτσι ώστε να υπάρχει ομοιογένεια στην καταγραφή των στοιχείων και να διευκολύνεται η μετέπειτα ανάλυση (Page et al., 2021).

Συγκεκριμένα, για κάθε άρθρο που συμπεριλήφθηκε στην τελική ανάλυση, σημειώθηκαν τα εξής βασικά στοιχεία: το όνομα των συγγραφέων, ο πλήρης τίτλος της δημοσίευσης, η χρονολογία δημοσίευσης, η χώρα προέλευσης της έρευνας, ο τύπος της μελέτης (όπως πειραματική, ανασκόπηση, πιλοτική εφαρμογή, case study κ.λπ.), τα κύρια αποτελέσματα, καθώς και τα βασικά ευρήματα της έρευνας. Αυτή η αποδελτίωση επιτρέπει να υπάρχει σαφής εικόνα για το περιεχόμενο κάθε μελέτης, αλλά και για τα πορίσματα που προκύπτουν από διαφορετικά επιστημονικά πλαίσια.

Ακόμη, η οργάνωση των δεδομένων σε πίνακες διευκολύνει πολύ τη σύγκριση ανάμεσα στις διαφορετικές μελέτες. Για παράδειγμα, μπορεί κάποιος να δει εύκολα αν συγκεκριμένες τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών έχουν εφαρμοστεί σε περισσότερες από μία χώρες ή ποια υδροπονικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο εντοπίζονται ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των ερευνών ως προς τα αποτελέσματα, τους περιορισμούς ή και τις προτάσεις τους για μελλοντικές εφαρμογές (Moher et al., 2009).

Ακόμη, μέσα από την αποδελτίωση, γίνεται πιο εύκολη η σύνθεση των ευρημάτων σε θεματικές ενότητες. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα που αφορούν την ανάκτηση αζώτου και φωσφόρου από λύματα σε διάφορα συστήματα υδροπονίας τοποθετήθηκαν στην αντίστοιχη υποενότητα, ώστε να αναλυθούν συγκριτικά. Αντίστοιχα, άλλες ενότητες αφορούν τεχνολογίες καθαρισμού ή εφαρμογές σε διάφορες καλλιέργειες (Santos et al., 2024· Shenoy et al., 2023). Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι κάθε κεφάλαιο της εργασίας βασίζεται σε συγκεκριμένα, επιστημονικά δεδομένα που μπορούν να επαληθευτούν από τη βιβλιογραφία.

Επιπλέον, η μεθοδολογία της αποδελτίωσης και της συγκριτικής ανάλυσης ακολουθεί πιστά τα πρότυπα PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Αυτή η διαδικασία απαιτεί διαφάνεια στα βήματα επιλογής των πηγών, σαφή περιγραφή της ανάλυσης και τεκμηρίωση για κάθε συμπέρασμα που παρουσιάζεται (Page et al., 2021). Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την αξιοπιστία των ευρημάτων, καθώς επιτρέπει σε άλλους ερευνητές να επαναλάβουν ή να επαληθεύσουν τα βήματα που ακολούθησε ο συγγραφέας.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος ανάλυσης που ακολουθήθηκε διακρίνεται για τη συστηματικότητα, τη διαφάνεια και την προσήλωση στα διεθνή επιστημονικά πρότυπα. Η οργάνωση των δεδομένων σε πίνακες και η αποδελτίωση κάθε άρθρου με συγκεκριμένα κριτήρια επιτρέπει την τεκμηριωμένη και επιστημονικά αξιόπιστη σύνθεση των αποτελεσμάτων. Έτσι, τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες της εργασίας βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα, που έχουν υποστεί αυστηρό έλεγχο και ανάλυση σύμφωνα με τη μεθοδολογία PRISMA (Page et al., 2021· Moher et al., 2009).

3. Θεματική ανάλυση της βιβλιογραφίας

3.1 Τύποι Θρεπτικών στοιχείων και οι συγκεντρώσεις τους στα λύματα

Ξεκινώντας την ανάλυση για τα είδη λυμάτων και τα χαρακτηριστικά τους, πρέπει να σημειωθεί ότι τα λύματα διακρίνονται κυρίως σε αστικά, βιομηχανικά και γεωργικά, ανάλογα με την προέλευση τους (Barbosa et al., 2015). Κάθε τύπος λυμάτων έχει διαφορετική σύνθεση και περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία, ρυπαντές και μικροοργανισμούς (Boyden & Rababah, 1996). Έτσι, τα αστικά λύματα περιλαμβάνουν νερά από οικιακή χρήση, όπως το νερό από μπάνια, κουζίνες, τουαλέτες και πλυντήρια (Emongor & Ramolemana, 2004).

Επιπλέον, τα αστικά λύματα έχουν συνήθως υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικές ενώσεις, άζωτο, φώσφορο, αλλά και σε παθογόνους μικροοργανισμούς (Al-Karaki, 2011). Παράλληλα, περιέχουν ίχνη βαρέων μετάλλων, απορρυπαντικά και φαρμακευτικά κατάλοιπα (Kreuzig et al., 2021). Αυτό σημαίνει ότι πριν χρησιμοποιηθούν σε υδροπονικά συστήματα χρειάζονται προσεκτική επεξεργασία και φιλτράρισμα (Arola et al., 2019).

Στη συνέχεια, τα βιομηχανικά λύματα προέρχονται από παραγωγικές μονάδες και έχουν πιο σύνθετη και επικίνδυνη χημική σύσταση (Zimmermann & Fischer, 2020). Περιέχουν συχνά βαρέα μέταλλα, οργανικούς ρυπαντές, διαλυτές και αδιάλυτες ουσίες που μπορεί να είναι τοξικές για τα φυτά και τον άνθρωπο (Medri et al., 2022). Γι' αυτόν τον λόγο, τα βιομηχανικά λύματα σπάνια χρησιμοποιούνται αυτούσια στη γεωργία, εκτός αν προηγηθεί αυστηρή επεξεργασία και απομάκρυνση των επικίνδυνων ουσιών (Bawiec, 2019).

Ακόμη, τα γεωργικά λύματα προέρχονται από την άρδευση, τη λίπανση και τη χρήση φυτοφαρμάκων στα αγροκτήματα (Villamar et al., 2018). Συνήθως περιέχουν υπολείμματα θρεπτικών στοιχείων, αλλά και φυτοφάρμακα και ζιζανιοκτόνα που μπορεί να είναι επιβλαβή για άλλες καλλιέργειες και το περιβάλλον (Panja et al., 2020). Για αυτόν τον λόγο, η επαναχρησιμοποίηση γεωργικών λυμάτων γίνεται μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία (Papadopoulos et al., 2007).

Επιπλέον, υπάρχουν και ειδικά λύματα από κτηνοτροφικές μονάδες, όπως είναι τα απόβλητα από χοιροτροφεία ή πτηνοτροφεία (Dube et al., 2016). Τα λύματα αυτά περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου και οργανικής ύλης, αλλά μπορεί να περιέχουν και παθογόνους μικροοργανισμούς (Jin et al., 2020). Έτσι, η χρήση τους σε υδροπονικά συστήματα γίνεται μόνο μετά από ισχυρή απολύμανση και επεξεργασία (Pelayo Lind et al., 2021).

Παράλληλα, τα λύματα από την επεξεργασία τροφίμων και βιομηχανιών τροφίμων έχουν αυξημένες ποσότητες οργανικής ύλης, λιπών και ελαίων (Adrover et al., 2013). Επίσης, μπορεί να περιέχουν διαλυτά σάκχαρα και άλλα στοιχεία που επηρεάζουν την απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών από τα φυτά (Correia et al., 2020). Τα λύματα αυτά χρειάζονται εξειδικευμένη επεξεργασία πριν χρησιμοποιηθούν στην υδροπονία (Afonso et al., 2023).

Συμπληρωματικά, οι ερευνητές εξετάζουν και την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων από μονάδες βιοαερίου ή αναερόβιας χώνευσης (Weimers et al., 2022). Τα λύματα αυτά είναι πλούσια σε ανόργανα στοιχεία, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για υδροπονικά διαλύματα, εφόσον τηρούνται οι κανόνες ασφαλείας (Pelayo Lind et al., 2021).

Κάθε τύπος λυμάτων έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την καταλληλότητά του για χρήση στην υδροπονική καλλιέργεια (Bergstrand et al., 2020). Η επιλογή του κατάλληλου είδους λυμάτων εξαρτάται από τη σύσταση, τη δυνατότητα επεξεργασίας και τη διασφάλιση της υγείας των φυτών και των καταναλωτών (Barbosa et al., 2015). Έτσι, η σωστή ταξινόμηση και ανάλυση των λυμάτων αποτελεί το πρώτο βήμα για την επιτυχημένη ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων (Calabria et al., 2019).

Τα θρεπτικά στοιχεία αποτελούν βασικό παράγοντα για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών σε υδροπονικά συστήματα (Barbosa et al., 2015). Τα βασικά θρεπτικά που απαντώνται στα λύματα είναι το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο, ενώ συχνά βρίσκονται και το ασβέστιο, το μαγνήσιο και το θείο σε μικρότερες συγκεντρώσεις (Chekli et al., 2017· Kreuzig et al., 2021· Ntinis et al., 2021). Επιπλέον, συναντώνται ιχνοστοιχεία όπως ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος, το μαγγάνιο και ο χαλκός (Jurga et al., 2023· Figueiredo et al., 2021). Έτσι, τα λύματα μπορούν να καλύψουν σε μεγάλο βαθμό τις βασικές

ανάγκες μιας υδροπονικής καλλιέργειας σε θρεπτικά (Bergstrand et al., 2020· Afonso et al., 2023).

Η παρουσία των θρεπτικών στα λύματα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Αρχικά, ο τύπος των λυμάτων διαμορφώνει τη χημική τους σύσταση. Για παράδειγμα, τα οικιακά λύματα περιέχουν συνήθως υψηλά επίπεδα οργανικού αζώτου και φωσφόρου λόγω των ανθρώπινων αποβλήτων και των υπολειμμάτων τροφών (Papadopoulos et al., 2007· Calabria et al., 2019). Αντίθετα, τα λύματα από αγροτοβιομηχανικές μονάδες έχουν υψηλότερη συγκέντρωση σε κάλιο και άλλα ιχνοστοιχεία, επειδή προέρχονται κυρίως από υπολείμματα φυτών και λιπάσματα (Afonso et al., 2023· Giri et al., 2025). Τέλος, τα βιομηχανικά λύματα μπορεί να εμφανίζουν σημαντικές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων ή άλλων ρυπαντών, κάτι που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη διαχείριση (Arola et al., 2019· Medri et al., 2022).

Στη συνέχεια, πρέπει να σημειωθεί ότι η μορφή υπό την οποία βρίσκονται τα θρεπτικά στα λύματα είναι κρίσιμη για την απορρόφησή τους από τα φυτά. Το άζωτο στα λύματα μπορεί να βρεθεί ως αμμωνία (NH_4^+), νιτρικά (NO_3^-) και οργανικό άζωτο (Medri et al., 2022· Kuntke et al., 2012). Οι περισσότερες υδροπονικές καλλιέργειες απορροφούν καλύτερα το νιτρικό άζωτο, όμως και η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά, εφόσον δεν υπάρχει τοξικότητα (Lee et al., 2021· Weimers et al., 2022). Αντίστοιχα, ο φώσφορος εμφανίζεται κυρίως ως ορθοφωσφορικό (PO_4^{3-}), το οποίο αποτελεί την προτιμώμενη μορφή για την ανάπτυξη των ριζών και τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Qiu et al., 2015· Shenoy et al., 2023). Το κάλιο συνήθως βρίσκεται σε ιοντική μορφή και απορροφάται εύκολα από τα φυτά (Pelayo Lind et al., 2021· Jurga et al., 2023).

Αξίζει να αναφερθεί ότι στα λύματα υπάρχουν και άλλα θρεπτικά στοιχεία όπως το ασβέστιο, που ενισχύει τη δομή των κυττάρων και την αντοχή των φυτών σε ασθένειες (Germer et al., 2023· Bliedung et al., 2020). Το μαγνήσιο, το οποίο βρίσκεται επίσης σε πολλά λύματα, είναι βασικό για τη λειτουργία της χλωροφύλλης (Ntinias et al., 2021· Mai et al., 2023). Επίσης, το θείο είναι απαραίτητο για τη σύνθεση αμινοξέων (Figueiredo et al., 2021· Mauerer et al., 2023).

Ωστόσο, η σύσταση των θρεπτικών στα λύματα δεν παραμένει σταθερή. Συχνά μεταβάλλεται λόγω εποχικότητας, γεωγραφικής θέσης και τρόπου επεξεργασίας των λυμάτων (Gonçalves et al., 2019· Villamar et al., 2018). Για παράδειγμα, σε περιοχές με έντονη χρήση λιπασμάτων, τα λύματα μπορεί να έχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε νιτρικά (Ntinis et al., 2021· Villamar et al., 2018). Η χρήση φαρμακευτικών ουσιών ή χημικών καθαριστικών μπορεί επίσης να επηρεάσει τη σύσταση, προσθέτοντας οργανικούς και ανόργανους ρύπους (Kreuzig et al., 2021· Winker et al., 2020).

Ωστόσο, όταν τα λύματα υποβάλλονται σε διαδικασίες επεξεργασίας, η μορφή και η διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων αλλάζουν σημαντικά. Η αναερόβια χώνευση διασπά το οργανικό άζωτο σε αμμωνία, ενώ η αερόβια επεξεργασία μπορεί να οξειδώσει την αμμωνία σε νιτρικά (Fumasoli et al., 2016· Bergstrand et al., 2020). Επίσης, η χημική κατακρήμνιση χρησιμοποιείται για την ανάκτηση φωσφόρου ως στρουβίτη, ο οποίος είναι κατάλληλος για χρήση ως λίπασμα (Qiu et al., 2015· Shenoy et al., 2023). Σε άλλες περιπτώσεις, μεμβρανικά συστήματα ή τεχνολογίες ιοντοανταλλαγής βοηθούν στην απομάκρυνση ανεπιθύμητων ουσιών και στη συγκέντρωση των επιθυμητών θρεπτικών στοιχείων (Medri et al., 2022· Czuba et al., 2021).

Στη συνέχεια, το ενδιαφέρον στρέφεται στη ροή των θρεπτικών στοιχείων στα υδροπονικά συστήματα που χρησιμοποιούν επεξεργασμένα λύματα. Εδώ, το μεγαλύτερο μέρος των θρεπτικών στοιχείων απορροφάται από τις ρίζες των φυτών κατά τη διάρκεια της κυκλοφορίας του διαλύματος (Chekli et al., 2017· Afonso et al., 2023). Όταν οι συγκεντρώσεις είναι επαρκείς και οι αναλογίες μεταξύ των θρεπτικών στοιχείων σωστές, τα φυτά εμφανίζουν υγιή ανάπτυξη και υψηλές αποδόσεις (Germer et al., 2023· Santos et al., 2024). Παρ' όλα αυτά, αν παρατηρηθούν ανισορροπίες, π.χ. υπερβολικό άζωτο ή έλλειψη φώσφορου, μπορεί να μειωθεί η απόδοση ή να εμφανιστούν συμπτώματα τοξικότητας (Mauerer et al., 2023· Weimers et al., 2022).

Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις η διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων απαιτεί ειδικές παρεμβάσεις. Συχνά, οι καλλιεργητές συμπληρώνουν το διάλυμα με ορισμένα θρεπτικά στοιχεία, όπως σίδηρο ή ιχνοστοιχεία, για να διασφαλίσουν την πλήρη κάλυψη των αναγκών των φυτών (Figueiredo et al., 2021· Pelayo Lind et al., 2021). Επίσης, η ρύθμιση του pH είναι κρίσιμη, διότι η διαθεσιμότητα των θρεπτικών

εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την οξύτητα του διαλύματος (Pelayo Lind et al., 2021· Sakuma et al., 2024).

Επιπρόσθετα, η συνεχής παρακολούθηση της συγκέντρωσης των θρεπτικών είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της βιωσιμότητας του συστήματος. Πολλά υδροπονικά συστήματα βασίζονται σε αυτοματοποιημένους αισθητήρες που μετρούν την αγωγιμότητα, το pH και τα επίπεδα θρεπτικών στοιχείων (Weimers et al., 2022· Chekli et al., 2017). Με αυτό τον τρόπο, ανιχνεύονται άμεσα τυχόν ανισορροπίες και γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις (Ntinis et al., 2021· Mauerer et al., 2023).

Ένα επιπλέον στοιχείο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι με τη σωστή διαχείριση, τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να αποτελέσουν μια βιώσιμη και φθηνή λύση για την κάλυψη των αναγκών της υδροπονικής καλλιέργειας σε θρεπτικά στοιχεία (Barbosa et al., 2015· Afonso et al., 2023). Αυτό προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, τόσο σε επίπεδο κόστους όσο και σε επίπεδο περιβαλλοντικής διαχείρισης, μειώνοντας τη χρήση χημικών λιπασμάτων (Mai et al., 2023· Giri et al., 2025).

Τέλος, σημαντικό είναι να λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα παρουσίας παθογόνων ή μικρορυπαντών στα λύματα, ακόμα και μετά την επεξεργασία. Οι περισσότερες μελέτες συμφωνούν ότι απαιτείται αυστηρός έλεγχος και πιθανώς συμπληρωματικές διαδικασίες, όπως φιλτράρισμα ή απολύμανση, ώστε να διασφαλίζεται η υγιεινή και ασφάλεια των παραγόμενων φυτών (Kreuzig et al., 2021· Winker et al., 2020· Fathidarehnijeh et al., 2023).

Συνοψίζοντας, η κατανόηση της σύνθεσης και της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στα λύματα είναι απαραίτητη για τη βέλτιστη χρήση τους στην υδροπονία. Τα θρεπτικά στοιχεία που περιέχονται στα λύματα μπορούν να υποστηρίξουν πλήρως την ανάπτυξη των φυτών, αν γίνεται σωστή διαχείριση της ισορροπίας, της ποιότητας και της ασφάλειας του διαλύματος (Chekli et al., 2017· Bergstrand et al., 2020· Mai et al., 2023). Με βάση τα παραπάνω, η χρήση των λυμάτων σε υδροπονικά συστήματα δεν προσφέρει μόνο οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, αλλά συμβάλλει και στη βιώσιμη κυκλική διαχείριση των θρεπτικών στη γεωργία (Bergstrand et al., 2020· Rubert et al., 2024· Wdowikowska et al., 2023).

3.2 Τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών

Σήμερα, η ανάκτηση θρεπτικών από τα λύματα θεωρείται σημαντική τεχνολογική πρόκληση για τη βιώσιμη γεωργία και την προστασία του περιβάλλοντος. Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι οι βασικές τεχνολογίες στοχεύουν στην απομόνωση και συγκέντρωση στοιχείων όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο (Fumasoli et al., 2016· Qiu et al., 2015· Mai et al., 2023). Αυτές οι ουσίες είναι ζωτικές για τα φυτά και συχνά απαιτούνται σε μεγάλες ποσότητες στα υδροπονικά συστήματα (Pelayo Lind et al., 2021· Bergstrand et al., 2020).

Αρχικά, η πιο διαδεδομένη τεχνολογία για την ανάκτηση αζώτου είναι η χρήση βιολογικών διεργασιών, όπως η αναερόβια και αερόβια χώνευση. Η αναερόβια χώνευση μετατρέπει το οργανικό άζωτο σε αμμωνία, ενώ η αερόβια νιτροποίηση μετατρέπει την αμμωνία σε νιτρικά, που είναι πιο φιλικά για την υδροπονία (Bergstrand et al., 2020· Fumasoli et al., 2016). Αυτές οι διαδικασίες βοηθούν στη σταθεροποίηση των ενώσεων και στη μείωση της τοξικότητας για τα φυτά (Germer et al., 2023· Weimers et al., 2022).

Επιπλέον, μια άλλη σημαντική τεχνολογία είναι η χημική κατακρήμνιση. Η κατακρήμνιση στρουβίτη αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο για την ανάκτηση του φωσφόρου και τμήματος του αζώτου από τα λύματα (Qiu et al., 2015· Shenoy et al., 2023). Ο στρουβίτης είναι ένα ανόργανο άλας ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), που μπορεί να συλλεχθεί εύκολα και να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα στη γεωργία (Jurga et al., 2023· Sakuma et al., 2024). Αυτή η μέθοδος είναι απλή, αλλά απαιτεί προσεκτικό έλεγχο του pH και των αναλογιών μαγνησίου, αμμωνίου και φωσφορικών στα λύματα (Qiu et al., 2015· Medri et al., 2022).

Στη συνέχεια, αξιοσημείωτη είναι και η χρήση συστημάτων ιοντοανταλλαγής για την ανάκτηση αμμωνίου από τα λύματα. Τα ρητινούχα φίλτρα ή τα φυσικά ζεόλιθοι μπορούν να προσροφήσουν ιόντα αμμωνίου από το νερό και στη συνέχεια να αποδεσμεύσουν το άζωτο για χρήση σε θρεπτικά διαλύματα (Calabria et al., 2019· Medri et al., 2022). Αυτή η μέθοδος είναι πολύ αποτελεσματική, ειδικά όταν το ζητούμενο είναι η συγκέντρωση θρεπτικών σε σχετικά μικρούς όγκους (Song et al., 2023· Czuba et al., 2021).

Παράλληλα, τα συστήματα μεμβρανών, όπως η αντίστροφη όσμωση, η νανοδιήθηση και η ηλεκτροδιάλυση, χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά για την ανάκτηση θρεπτικών από τα λύματα (Ward et al., 2018· Czuba et al., 2021). Η αντίστροφη όσμωση απομακρύνει ανεπιθύμητες ουσίες και συγκεντρώνει τα θρεπτικά στοιχεία σε καθαρότερα διαλύματα (Arola et al., 2019· Ward et al., 2018). Η ηλεκτροδιάλυση επιτρέπει τον διαχωρισμό ιόντων, όπως το αμμώνιο και τα φωσφορικά, με βάση το ηλεκτρικό τους φορτίο (Song et al., 2023· Rodrigues et al., 2022). Οι τεχνολογίες μεμβρανών προσφέρουν υψηλή καθαρότητα, αλλά έχουν αυξημένο κόστος και απαιτούν συντήρηση (Czuba et al., 2021· Mai et al., 2023).

Επιπλέον, στις σύγχρονες μεθόδους περιλαμβάνεται η χρήση φυτών και μικροαλγών για τη βιολογική ανάκτηση θρεπτικών. Τα συστήματα υδροπονίας με υδρόβια φυτά, όπως το νεροκάρδαμο, το νερόκρino ή τα φυτά vetiver, μπορούν να απορροφήσουν μεγάλες ποσότητες αζώτου και φωσφόρου, που στη συνέχεια ανακυκλώνονται στο βιομάζα (Nayanathara & Bindu, 2017· Gebeyehu et al., 2018). Τα μικροάλγοι είναι επίσης εξαιρετικά αποτελεσματικά στην απορρόφηση θρεπτικών, ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν προϊόντα προστιθέμενης αξίας όπως βιομάζα και βιοενέργεια (Morillas-España et al., 2024· Yousif et al., 2022). Αυτές οι μέθοδοι είναι φιλικές προς το περιβάλλον και ενισχύουν την κυκλική οικονομία (Worku et al., 2018· Rubert et al., 2024).

Επιπρόσθετα, τα υβριδικά συστήματα, που συνδυάζουν βιολογικές, χημικές και φυσικές τεχνικές, έχουν βρει εφαρμογή στην ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων. Για παράδειγμα, η συνδυασμένη χρήση βιοαντιδραστήρων και μεμβρανών προσφέρει καλύτερο καθαρισμό και πιο αποτελεσματική συγκράτηση θρεπτικών στοιχείων (Paucar & Sato, 2022· Clyde-Smith & Campos, 2023). Τέτοια συστήματα επιτρέπουν την ταυτόχρονη απομάκρυνση ρύπων και τη διατήρηση των απαραίτητων στοιχείων για την υδροπονία (Ward et al., 2018· Mai et al., 2023).

Ακόμη, έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία της ηλεκτροχημικής ανάκτησης αζώτου. Σε αυτή τη διαδικασία, ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται σε υδατικό διάλυμα με ιόντα αμμωνίου, οδηγώντας σε συγκέντρωση και καθίζηση ενώσεων αζώτου (Kuntke et al., 2012· Rodrigues et al., 2022). Αυτή η μέθοδος συνδυάζεται συχνά με άλλες τεχνολογίες, ώστε

να επιτυγχάνεται υψηλή καθαρότητα και ασφάλεια του τελικού προϊόντος (Ward et al., 2018· Song et al., 2023).

Επιπλέον, πρέπει να γίνει αναφορά και στις τεχνολογίες προσαρμογής του pH και της αγωγιμότητας, που ενισχύουν τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στα τελικά διαλύματα (Pelayo Lind et al., 2021· Sakuma et al., 2024). Ο κατάλληλος έλεγχος του pH επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της ανάκτησης φωσφόρου και την αποφυγή απωλειών (Shenoy et al., 2023· Mauerer et al., 2023). Παράλληλα, η διατήρηση της αγωγιμότητας σε επιθυμητά επίπεδα είναι απαραίτητη για την υγεία των φυτών και την ομαλή απορρόφηση όλων των θρεπτικών στοιχείων (Pelayo Lind et al., 2021· Mai et al., 2023).

Ακόμα, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τον τύπο των λυμάτων και τη σύσταση των θρεπτικών στοιχείων. Για παράδειγμα, τα οικιακά λύματα απαιτούν συνήθως προκατεργασία για την απομάκρυνση στερεών και οργανικού υλικού πριν την ανάκτηση των θρεπτικών στοιχείων (Papadopoulos et al., 2007· Germer et al., 2023). Τα λύματα από βιομηχανίες ή κτηνοτροφικές μονάδες παρουσιάζουν διαφορετική σύσταση, με έμφαση σε ενώσεις καλίου ή σε ιχνοστοιχεία (Afonso et al., 2023· Rubert et al., 2024).

Από την άλλη, πολλές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων ρύπων, όπως βαρέα μέταλλα, οργανικά μικρορυπαντικά και παθογόνοι μικροοργανισμοί (Kreuzig et al., 2021· Winker et al., 2020). Οι τεχνολογίες προσρόφησης με ενεργό άνθρακα ή βιο-φίλτρα και η χρήση απολυμαντικών μεθόδων, όπως η υπεριώδης ακτινοβολία ή το όζον, είναι συχνά απαραίτητες για την ασφάλεια του τελικού διαλύματος (Czuba et al., 2021· Winker et al., 2020).

Επιπλέον, η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων παρακολούθησης έχει βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των τεχνολογιών ανάκτησης. Αισθητήρες για τη μέτρηση του pH, της αγωγιμότητας, των επιπέδων αμμωνίου, φωσφόρου και καλίου, επιτρέπουν τη συνεχή ρύθμιση της διεργασίας και τη διασφάλιση σταθερής ποιότητας (Weimers et al., 2022· Ntinis et al., 2021). Αυτές οι τεχνολογίες βοηθούν τους παραγωγούς να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τη ροή των θρεπτικών στα υδροπονικά συστήματα (Mauerer et al., 2023· Santos et al., 2024).

Επιπρόσθετα, η τεχνολογία της χρήσης υλικών προσρόφησης, όπως ο βιοάνθρακας από υπολείμματα αγροτικών καλλιεργειών, έχει βρει εφαρμογή στη συγκράτηση φωσφόρου και άλλων θρεπτικών από τα λύματα (Van Nguyen et al., 2025· Rubert et al., 2024). Αυτή η μέθοδος είναι φθηνή και φιλική προς το περιβάλλον, ενώ μπορεί να προσαρμοστεί σε μικρές και μεγάλες μονάδες (Van Nguyen et al., 2025· Song et al., 2023).

Τέλος, οι νέες τεχνολογίες που συνδυάζουν την ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων με την παραγωγή ενέργειας, όπως τα μικροβιακά καύσιμα κύτταρα, αποτελούν πεδίο εντατικής έρευνας (Pauca & Sato, 2022· Kuntke et al., 2012). Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ταυτόχρονα η επαναχρησιμοποίηση θρεπτικών και η μείωση του ενεργειακού κόστους, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στη βιώσιμη διαχείριση λυμάτων (Rodrigues et al., 2022· Mai et al., 2023).

Συνολικά, η πρόοδος στις τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων έχει μεταμορφώσει τον τρόπο που βλέπουμε τα λύματα. Οι περισσότερες μελέτες συμφωνούν ότι, με σωστή επιλογή και εφαρμογή, τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να αποτελέσουν μια αξιόπιστη και ασφαλή πηγή θρεπτικών για την υδροπονία (Bergstrand et al., 2020· Afonso et al., 2023· Chekli et al., 2017). Παράλληλα, τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη είναι ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς προωθούν τη μείωση της χρήσης συνθετικών λιπασμάτων και υποστηρίζουν την κυκλική διαχείριση των πόρων (Mai et al., 2023· Rubert et al., 2024).

Επομένως, η έρευνα και η εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών ανάκτησης θρεπτικών από τα λύματα πρέπει να συνεχιστεί, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες της γεωργίας του μέλλοντος και να προστατευθεί το περιβάλλον με βιώσιμο τρόπο (Czuba et al., 2021· Shenoy et al., 2023).

3.3 Εφαρμογές στην υδροπονία

Στη σημερινή εποχή, η υδροπονία αποκτά όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον στη γεωργία. Η υδροπονία είναι μια μέθοδος καλλιέργειας χωρίς χώμα. Επομένως, τα φυτά αναπτύσσονται σε θρεπτικό διάλυμα που παρέχει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τη

σωστή ανάπτυξή τους (Barbosa et al., 2015· Bergstrand et al., 2020). Τα τελευταία χρόνια, η υδροπονία χρησιμοποιείται όχι μόνο σε θερμοκήπια αλλά και σε αστικά περιβάλλοντα, ακόμα και σε οικιακές εφαρμογές (Mai et al., 2023).

Πρώτα απ' όλα θα πρέπει να αναφερθεί, τα υδροπονικά συστήματα διακρίνονται σε διάφορους τύπους, όπως το σύστημα ροής θρεπτικού διαλύματος (NFT), το σύστημα επιπλέουσας υδροπονίας (FT) και το σύστημα υποστρώματος (Barbosa et al., 2015). Κάθε τύπος έχει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ποιότητα του διαλύματος και την ευκολία ελέγχου των θρεπτικών συστατικών (Kennard et al., 2020).

Ακόμη, η ενσωμάτωση διαλυμάτων που προέρχονται από λύματα σε υδροπονικά συστήματα απαιτεί σταθερή παρακολούθηση της σύστασης και της ποιότητας του νερού (Weimers et al., 2022). Για παράδειγμα, οι έρευνες δείχνουν ότι όταν τα λύματα χρησιμοποιούνται ως κύρια πηγή θρεπτικών, πρέπει να γίνονται συχνές μετρήσεις για το pH, την αγωγιμότητα και τις συγκεντρώσεις βασικών ιχνοστοιχείων (Giri et al., 2025· Germer et al., 2023). Έτσι, διασφαλίζεται ότι το διάλυμα καλύπτει τις ανάγκες των φυτών σε όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας (Santos et al., 2024).

Στη συνέχεια, αξίζει να αναφερθεί ότι πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν δοκιμάσει τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων ως πηγή θρεπτικών στην υδροπονία. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Από τη μία, μειώνεται η ανάγκη για χημικά λιπάσματα, που συνήθως είναι ακριβά και ενεργοβόρα (Chekli et al., 2017· Afonso et al., 2023). Από την άλλη, τα επεξεργασμένα λύματα βοηθούν στη διαχείριση του νερού και την κυκλική οικονομία, αφού περιορίζεται η σπατάλη πόρων (Bergstrand et al., 2020· Rubert et al., 2024).

Για παράδειγμα, σε μια σειρά μελετών, το επεξεργασμένο αστικό ή βιομηχανικό λύμα προστέθηκε ως θρεπτικό διάλυμα σε συστήματα υδροπονίας. Τα φυτά που αναπτύχθηκαν σε τέτοιο περιβάλλον είχαν παρόμοια ανάπτυξη με φυτά που μεγάλωσαν σε εμπορικά θρεπτικά διαλύματα (Figueiredo et al., 2021· Carvalho et al., 2018). Αυτό δείχνει ότι τα θρεπτικά στοιχεία των λυμάτων είναι αξιοποιήσιμα και μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες των φυτών (Ntinis et al., 2021· Santos et al., 2024).

Επιπλέον, πολλές μελέτες δοκίμασαν την εφαρμογή προεπεξεργασμένων λυμάτων σε διάφορες καλλιέργειες, όπως μαρούλι, τομάτα, βασιλικός και φράουλα, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα (Afonso et al., 2023· Figueiredo et al., 2021· Chimi et al., 2024). Για παράδειγμα, το μαρούλι και η τομάτα φαίνεται να μπορούν να αναπτυχθούν ικανοποιητικά με διαλύματα που βασίζονται σε επεξεργασμένα λύματα, αρκεί να τηρούνται τα όρια ασφαλείας για βαρέα μέταλλα και παθογόνους μικροοργανισμούς (Carvalho et al., 2018· Mauerer et al., 2023).

Ωστόσο, πριν χρησιμοποιηθούν τα λύματα στην υδροπονία, εφαρμόζονται τεχνολογίες καθαρισμού και ανάκτησης θρεπτικών, ώστε να απομακρύνονται πιθανοί ρύποι και παθογόνοι μικροοργανισμοί (Czuba et al., 2021· Kreuzig et al., 2021). Οι πιο συχνές τεχνολογίες περιλαμβάνουν βιολογική επεξεργασία, κατακρήμνιση και φιλτράρισμα (Bergstrand et al., 2020· Qiu et al., 2015). Με τον τρόπο αυτό, το τελικό διάλυμα είναι ασφαλές και κατάλληλο για χρήση στα φυτά.

Παράλληλα, σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται συμπληρωματική χορήγηση ορισμένων θρεπτικών στοιχείων, διότι τα λύματα μπορεί να έχουν ανεπάρκεια σε μικροθρεπτικά, όπως ο σίδηρος ή το μαγνήσιο (Pelayo Lind et al., 2021· Bergstrand et al., 2020). Επίσης, η εφαρμογή λύματος από λύματα σε υδροπονία μπορεί να αλλάζει το pH και την αγωγιμότητα, κάτι που χρειάζεται συνεχή παρακολούθηση και διορθωτικές παρεμβάσεις (Ntinis et al., 2021).

Επιπλέον, η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροπονικού συστήματος εξαρτάται και από το είδος του καλλιεργούμενου φυτού, την αντοχή του στις διακυμάνσεις της ποιότητας του διαλύματος και τη διάρκεια της καλλιέργειας (Chekli et al., 2017· Chow et al., 2000). Για παράδειγμα, τα συστήματα NFT είναι κατάλληλα για μαρούλια και αρωματικά, ενώ τα συστήματα με υπόστρωμα ευνοούν καλλιέργειες με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε σταθερότητα διαλύματος, όπως η τομάτα (Arcas-Pilz et al., 2021).

Ακόμα, οι ερευνητές προτείνουν τη χρήση μικτών συστημάτων, όπου τα λύματα αποτελούν τμήμα του θρεπτικού διαλύματος και συμπληρώνονται με συμβατικά λιπάσματα, ώστε να εξασφαλίζεται η πληρότητα σε όλα τα απαραίτητα στοιχεία (Halbert-Howard et al., 2021). Αυτό μειώνει το ρίσκο και επιτρέπει πιο ομαλή

μετάβαση προς τη χρήση 100% διαλύματος από λύματα στο μέλλον (Bliedung et al., 2020).

Τέλος, η χρήση λυμάτων σε υδροπονικά συστήματα μπορεί να απαιτήσει επιπλέον συστήματα φιλτραρίσματος ή απολύμανσης, όπως υπεριώδη ακτινοβολία ή βιολογικά φίλτρα, για την προστασία των φυτών και της δημόσιας υγείας (Lopez-Galvez et al., 2014). Έτσι, ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος και ο τακτικός έλεγχος εγγυώνται την ασφάλεια της παραγωγής (Zimmermann & Fischer, 2020). Η προσαρμογή των υδροπονικών συστημάτων στη χρήση λυμάτων απαιτεί επιστημονική προσέγγιση, συστηματικό έλεγχο και σταδιακή εφαρμογή, ώστε να αξιοποιηθούν πλήρως τα οφέλη της κυκλικής οικονομίας χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η υγεία των φυτών και των καταναλωτών (Mai et al., 2023).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η υδροπονία με επεξεργασμένα λύματα βοηθά στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Πολλά από τα στοιχεία που θεωρούνται ρύποι, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, μετατρέπονται σε χρήσιμα θρεπτικά για τα φυτά, μειώνοντας έτσι τη ρύπανση των υδάτων (Chekli et al., 2017· Rubert et al., 2024). Επιπλέον, η μείωση της εξάρτησης από χημικά λιπάσματα οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων για τον παραγωγό (Barbosa et al., 2015· Afonso et al., 2023).

Επιπρόσθετα, η υδροπονία με λύματα προσφέρει λύση για περιοχές με έλλειψη νερού ή προβλήματα υποβάθμισης του εδάφους. Σε περιοχές με φτωχά εδάφη, η καλλιέργεια με υδροπονία και επαναχρησιμοποίηση λυμάτων δίνει τη δυνατότητα για συνεχή παραγωγή χωρίς υποβάθμιση του περιβάλλοντος (Ntinis et al., 2021· Mai et al., 2023). Έτσι, η τεχνική αυτή γίνεται εργαλείο για τη βιώσιμη γεωργία και την επισιτιστική ασφάλεια.

Αξίζει επίσης να τονιστεί ότι υπάρχουν συγκεκριμένες τεχνικές υδροπονίας που εφαρμόζονται σε αυτές τις περιπτώσεις. Τα συστήματα NFT (Nutrient Film Technique), τα συστήματα καλλιέργειας σε δεξαμενές (Deep Water Culture) και τα συστήματα με φυτικά υποστρώματα (substrate systems) είναι μερικά παραδείγματα (Barbosa et al., 2015· Pilatakis et al., 2013). Κάθε σύστημα έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μπορεί να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της εκάστοτε

καλλιέργειας και στη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στα λύματα (Afonso et al., 2023· Germer et al., 2023).

Ωστόσο, οι εφαρμογές της υδροπονίας με λύματα χρειάζονται συστηματικό έλεγχο. Συχνά παρακολουθούνται το pH, η αγωγιμότητα και οι συγκεντρώσεις βασικών στοιχείων όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο (Pelayo Lind et al., 2021· Weimers et al., 2022). Οι αισθητήρες και τα αυτοματοποιημένα συστήματα διευκολύνουν τη συνεχή παρακολούθηση και την άμεση παρέμβαση αν υπάρξουν αποκλίσεις (Ntinis et al., 2021· Santos et al., 2024). Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η υγεία των φυτών και η ασφάλεια των τελικών προϊόντων.

Επιπλέον, η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων ενισχύει την κυκλική οικονομία και συμβάλλει στη βιωσιμότητα των αγροτικών εκμεταλλεύσεων. Οι παραγωγοί έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιήσουν διαθέσιμους πόρους, να μειώσουν τα απόβλητά τους και να παράγουν με λιγότερα έξοδα (Chekli et al., 2017· Rubert et al., 2024). Αυτή η προσέγγιση γίνεται ακόμα πιο σημαντική σε περιοχές όπου η διάθεση λυμάτων είναι πρόβλημα και η πρόσβαση σε θρεπτικά είναι περιορισμένη (Bergstrand et al., 2020· Afonso et al., 2023).

Επιπρόσθετα, οι εφαρμογές της υδροπονίας με λύματα συνδυάζονται συχνά με άλλες καινοτόμες τεχνικές. Για παράδειγμα, η ολοκλήρωση με συστήματα aquaponics, όπου συνδυάζεται η ιχθυοκαλλιέργεια με την υδροπονία, προσφέρει ακόμα περισσότερα οφέλη (Delaide et al., 2019). Σε αυτά τα συστήματα, τα απόβλητα των ψαριών μετατρέπονται σε θρεπτικά διαλύματα για τα φυτά, δημιουργώντας έναν εντελώς κλειστό κύκλο (Tetreault et al., 2021).

Ένα ακόμη παράδειγμα εφαρμογής είναι η αξιοποίηση του υγρού υπολείμματος από βιοαεριοποιητές (digestate) ως διάλυμα για υδροπονικές καλλιέργειες. Το digestate περιέχει σημαντικές ποσότητες αζώτου και άλλων θρεπτικών, που τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν (Bergstrand et al., 2020· Weimers et al., 2022). Αυτή η πρακτική μειώνει τα απόβλητα και ενισχύει την αυτάρκεια της γεωργικής μονάδας.

Τέλος, σημαντικό είναι να τονιστεί ότι η χρήση λυμάτων στην υδροπονία γίνεται πάντα με βάση τα ισχύοντα πρότυπα ασφαλείας και υγιεινής. Οι παραγωγοί οφείλουν να

εφαρμόζουν αυστηρά πρωτόκολλα για την προστασία τόσο των φυτών όσο και των καταναλωτών (Lopez-Galvez et al., 2014· Kreuzig et al., 2021). Όλες οι μελέτες καταλήγουν ότι με κατάλληλο έλεγχο, τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να αποτελέσουν μια ασφαλή και αποτελεσματική λύση για την υδροπονία (Germer et al., 2023· Chekli et al., 2017· Santos et al., 2024).

Συνοψίζοντας, οι εφαρμογές της υδροπονίας με επεξεργασμένα λύματα συνδυάζουν τη γεωργική παραγωγικότητα με τη διαχείριση φυσικών πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος. Με τη σωστή εφαρμογή των τεχνολογιών και την τήρηση των προδιαγραφών, τα λύματα μπορούν να μετατραπούν σε πολύτιμο εργαλείο για τη σύγχρονη γεωργία και την αστική καλλιέργεια. Έτσι, προκύπτει μια λύση που ανταποκρίνεται στις ανάγκες του παρόντος και του μέλλοντος (Barbosa et al., 2015· Bergstrand et al., 2020· Mai et al., 2023· Rubert et al., 2024).

3.4 Περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές πτυχές

Όταν γίνεται λόγος για την ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων από λύματα και τη χρήση τους στην υδροπονία, είναι σημαντικό να εξεταστούν οι περιβαλλοντικές πτυχές αυτής της πρακτικής. Τα τελευταία χρόνια, η αειφορία και η προστασία του περιβάλλοντος έχουν γίνει κεντρικοί στόχοι στη γεωργία και στη διαχείριση υδάτινων πόρων (Barbosa et al., 2015). Η αξιοποίηση των λυμάτων και η ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων προσφέρουν ευκαιρίες, αλλά και προκλήσεις για το περιβάλλον (Mai et al., 2023).

Αρχικά, είναι φανερό πως η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων στη γεωργία και την υδροπονία συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης των υδάτων. Όταν τα θρεπτικά στοιχεία, όπως το άζωτο και ο φώσφορος, επαναχρησιμοποιούνται, μειώνεται σημαντικά το φορτίο που καταλήγει σε λίμνες, ποτάμια ή θάλασσα (Rubert et al., 2024· Kreuzig et al., 2021). Έτσι, ελαχιστοποιείται το φαινόμενο του ευτροφισμού, δηλαδή η υπερβολική ανάπτυξη φυκών που μπορεί να προκαλέσει έλλειψη οξυγόνου και θάνατο ψαριών στα φυσικά οικοσυστήματα (Chekli et al., 2017· Qiu et al., 2015).

Επιπλέον, η χρήση λυμάτων ως θρεπτική πηγή στην υδροπονία μειώνει την ανάγκη για χημικά λιπάσματα. Η παραγωγή λιπασμάτων απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας

και πρώτων υλών, με αποτέλεσμα να αυξάνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της γεωργίας (Barbosa et al., 2015· Afonso et al., 2023). Όταν τα φυτά αξιοποιούν τα θρεπτικά που προέρχονται από λύματα, μειώνονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το υποξείδιο του αζώτου (Halbert-Howard et al., 2021).

Ακόμα, οι τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών, όπως η βιολογική επεξεργασία, οι μεμβράνες και η ιοντοανταλλαγή, επιτρέπουν τον καθαρισμό των λυμάτων και τη μείωση επικίνδυνων ουσιών (Czuba et al., 2021· Medri et al., 2022). Έτσι, το περιβάλλον προστατεύεται από τοξικές ενώσεις, βαρέα μέταλλα και μικρορύπους που συχνά υπάρχουν στα αστικά και βιομηχανικά λύματα (Kreuzig et al., 2021· Arola et al., 2019).

Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί ότι η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων συμβάλλει στην κυκλική οικονομία. Δηλαδή, τα απόβλητα μετατρέπονται σε χρήσιμους πόρους για νέα παραγωγική διαδικασία, χωρίς να επιβαρύνουν το περιβάλλον (Bergstrand et al., 2020· Rubert et al., 2024). Αυτό το μοντέλο είναι σημαντικό για τις πόλεις και τις γεωργικές εκμεταλλεύσεις που θέλουν να γίνουν πιο βιώσιμες.

Επιπρόσθετα, η εξοικονόμηση νερού αποτελεί βασικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα. Η υδροπονία απαιτεί συνήθως λιγότερο νερό από τη συμβατική γεωργία, ενώ η χρήση ανακτημένου νερού από λύματα μειώνει την πίεση στους υδάτινους πόρους (Barbosa et al., 2015· Mai et al., 2023). Σε πολλές χώρες με περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού, αυτή η πρακτική μπορεί να εξασφαλίσει τη συνέχιση της αγροτικής παραγωγής χωρίς υπεράντληση φυσικών αποθεμάτων (Ntinis et al., 2021).

Ωστόσο, η χρήση λυμάτων στην υδροπονία και στη γεωργία δεν είναι χωρίς κινδύνους για το περιβάλλον. Μερικές φορές, τα λύματα περιέχουν μικρορύπους, βαρέα μέταλλα ή φαρμακευτικά κατάλοιπα, που δεν απομακρύνονται πλήρως από τις επεξεργασίες (Kreuzig et al., 2021· Arola et al., 2019). Αν τα στοιχεία αυτά περάσουν στο διάλυμα, τότε μπορεί να συσσωρευτούν στα φυτά ή να διαφύγουν ξανά στο περιβάλλον (Chekli et al., 2017).

Επιπλέον, η χρήση λυμάτων απαιτεί αυστηρή παρακολούθηση και συχνές αναλύσεις. Η παραμέληση του ελέγχου μπορεί να οδηγήσει στη μεταφορά παθογόνων μικροοργανισμών ή άλλων επικίνδυνων ουσιών στον άνθρωπο ή στην τροφική αλυσίδα (Lopez-Galvez et al., 2014). Ειδικά όταν η υδροπονική παραγωγή απευθύνεται στη διατροφή του ανθρώπου, οι προδιαγραφές ασφαλείας πρέπει να τηρούνται αυστηρά (Santos et al., 2024).

Παράλληλα, ορισμένες τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών έχουν και το δικό τους περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Για παράδειγμα, η λειτουργία φίλτρων ή η χρήση χημικών για κατακρήμνιση απαιτούν ενέργεια και μπορεί να παράγουν δευτερογενή απόβλητα (Ward et al., 2018). Επομένως, η συνολική αξιολόγηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, από την επεξεργασία των λυμάτων μέχρι το τελικό προϊόν (Zimmermann & Fischer, 2020).

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της υδροπονίας με λύματα μπορεί να βοηθήσει στην αποκατάσταση περιοχών που έχουν υποστεί υποβάθμιση του εδάφους. Εκεί που το έδαφος έχει χαθεί ή μολυνθεί, η καλλιέργεια χωρίς χώμα προσφέρει μια λύση για τη συνεχή αγροτική δραστηριότητα, με λιγότερες περιβαλλοντικές πιέσεις (Bergstrand et al., 2020· Mai et al., 2023).

Επιπλέον, αρκετές μελέτες έδειξαν πως τα φυτά που αναπτύσσονται με ανακτημένα θρεπτικά στοιχεία παρουσιάζουν καλή βιομάζα και ικανοποιητική ποιότητα, χωρίς να έχουν υψηλές συγκεντρώσεις επικίνδυνων ουσιών, όταν τηρούνται οι προδιαγραφές (Figueiredo et al., 2021· Germer et al., 2023). Αυτό δείχνει ότι το σύστημα είναι περιβαλλοντικά ασφαλές, εφόσον εφαρμόζονται σωστά τα στάδια καθαρισμού.

Άλλο ένα σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος αφορά τη μείωση των απορριμμάτων. Η υδροπονία με λύματα επιτρέπει την αξιοποίηση παραπροϊόντων, όπως το digestate από βιοαεριοποίηση ή τα απόβλητα από ιχθυοκαλλιέργειες (Weimers et al., 2022· Rubert et al., 2024). Έτσι, περιορίζεται η ανάγκη για διάθεση αποβλήτων και ενισχύεται η κυκλική διαχείριση των πόρων.

Επιπρόσθετα, η επεξεργασία λυμάτων και η χρήση τους στην υδροπονία μπορεί να εφαρμοστεί και σε αστικό περιβάλλον. Οι πόλεις που αντιμετωπίζουν προβλήματα με

την εναπόθεση λυμάτων και την έλλειψη πρασίνου μπορούν να επωφεληθούν από κάθετες φάρμες ή αστικά θερμοκήπια που λειτουργούν με αυτό τον τρόπο (Mai et al., 2023· Barbosa et al., 2015). Αυτό βελτιώνει το μικροκλίμα και συμβάλλει στη συνολική ποιότητα ζωής.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις διαφέρουν ανάλογα με το είδος του λυμάτων, τη μέθοδο καθαρισμού και το φυτό που καλλιεργείται (Kreuzig et al., 2021· Chekli et al., 2017). Για αυτό το λόγο, οι ερευνητές συνιστούν εξατομικευμένη αξιολόγηση για κάθε έργο, λαμβάνοντας υπόψη τα τοπικά δεδομένα και τις δυνατότητες της κάθε περιοχής (Zimmermann & Fischer, 2020).

Σε αρκετές περιπτώσεις, γίνεται λόγος και για το κοινωνικό όφελος που προσφέρει η υδροπονία με λύματα. Με τη μείωση της ρύπανσης, την εξοικονόμηση πόρων και την αύξηση της διαθεσιμότητας τροφίμων, βελτιώνονται οι συνθήκες διαβίωσης και μειώνονται οι ανισότητες (Bergstrand et al., 2020· Mai et al., 2023). Η προστασία του περιβάλλοντος συνδέεται πλέον άμεσα με την κοινωνική δικαιοσύνη και την επισιτιστική ασφάλεια.

Τέλος, σημαντικό είναι να προωθείται η εκπαίδευση των παραγωγών, αλλά και της κοινωνίας, για τη σημασία και τα οφέλη της βιώσιμης διαχείρισης των λυμάτων. Η ορθή χρήση και ο συνεχής έλεγχος διασφαλίζουν ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη υπερτερούν των πιθανών κινδύνων (Afonso et al., 2023· Santos et al., 2024).

Οι περιβαλλοντικές πτυχές της ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων από λύματα και της εφαρμογής τους στην υδροπονία είναι πολλές και σημαντικές. Η πρακτική αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αειφορία, προστασία φυσικών πόρων, μείωση ρύπανσης και στήριξη της κυκλικής οικονομίας. Με τη σωστή διαχείριση και τις κατάλληλες τεχνολογίες, η υδροπονία με λύματα αποτελεί μια περιβαλλοντικά υπεύθυνη λύση για το μέλλον της γεωργίας (Barbosa et al., 2015· Bergstrand et al., 2020· Mai et al., 2023· Rubert et al., 2024).

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η χρήση λυμάτων ως πηγή θρεπτικών στοιχείων συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του κόστους παραγωγής, διότι περιορίζει την ανάγκη για ακριβά ανόργανα λιπάσματα (Barbosa et al., 2015). Έτσι, οι παραγωγοί

μπορούν να μειώσουν τα έξοδα, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές με υψηλό κόστος αγροεφοδίων ή περιορισμένη πρόσβαση σε εισαγόμενα προϊόντα (Afonso et al., 2023).

Παράλληλα, η μείωση της ρύπανσης των υδάτων και του περιβάλλοντος συμβάλλει στη βελτίωση της δημόσιας υγείας και στην προστασία των οικοσυστημάτων (Papadopoulos et al., 2007).

Ακόμη, η χρήση λυμάτων ενισχύει την αυτάρκεια των τοπικών κοινωνιών, καθώς περιορίζει την εξάρτηση από εισαγόμενες πρώτες ύλες και ενισχύει την τοπική οικονομία (Villamar et al., 2018). Σε αγροτικές ή ημιαστικές περιοχές, όπου οι υποδομές διαχείρισης αποβλήτων και η πρόσβαση σε θρεπτικά στοιχεία είναι περιορισμένες, η αξιοποίηση λυμάτων στη γεωργία μπορεί να αποτελέσει λύση ενίσχυσης του αγροτικού εισοδήματος και βελτίωσης της διατροφικής ασφάλειας (Germer et al., 2023).

Παράλληλα, η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της επεξεργασίας λυμάτων και της υδροπονίας μπορεί να δημιουργήσει νέες θέσεις εργασίας, τόσο στην ανάπτυξη όσο και στη λειτουργία σχετικών μονάδων (Bliedung et al., 2020). Επίσης, η καινοτομία αυτή μπορεί να δώσει ώθηση στην τοπική βιομηχανία και στη μεταφορά τεχνογνωσίας (Mai et al., 2023).

Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι η κοινωνική αποδοχή της χρήσης λυμάτων στην παραγωγή τροφίμων δεν είναι πάντα δεδομένη (Winker et al., 2020). Πολλοί καταναλωτές διατηρούν επιφυλάξεις ή φόβους σχετικά με την ασφάλεια των προϊόντων (Zimmermann & Fischer, 2020). Επομένως, απαιτείται συστηματική ενημέρωση, εκπαίδευση και διαφάνεια από τους παραγωγούς και τις αρχές, ώστε να κερδηθεί η εμπιστοσύνη του κοινού (Lopez-Galvez et al., 2014).

Επιπλέον, η υιοθέτηση αυτής της πρακτικής εξαρτάται και από το θεσμικό πλαίσιο κάθε χώρας, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί ή απουσία νομοθεσίας για τη χρήση λυμάτων στη γεωργία (Santos et al., 2024). Έτσι, απαιτείται προσαρμογή των κανονισμών, θέσπιση σαφών οδηγιών και ενίσχυση των

ελέγχων για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων (Kreuzig et al., 2021).

Τέλος, οι μελλοντικές προοπτικές περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση της ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων από λύματα σε μεγάλης κλίμακας αγροτικές εκμεταλλεύσεις και την επέκταση της πρακτικής σε αστικά περιβάλλοντα με την ανάπτυξη αστικής υδροπονίας (Fathidarehniyeh et al., 2023). Έτσι, η χρήση λυμάτων ως θρεπτική βάση μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βιώσιμη ανάπτυξη, στην προστασία των φυσικών πόρων και στη διατροφική αυτάρκεια (Mai et al., 2023).

Συνεπώς, η αξιοποίηση λυμάτων στην υδροπονική καλλιέργεια προσφέρει σημαντικά κοινωνικοοικονομικά οφέλη, αλλά απαιτεί υπεύθυνη διαχείριση, σωστή ενημέρωση του κοινού και υποστήριξη από το θεσμικό πλαίσιο για να καταστεί πραγματικά βιώσιμη και αποδεκτή (Barbosa et al., 2015· Santos et al., 2024).

Παράλληλα, το ζήτημα της ασφάλειας είναι βασικό για την ευρύτερη αποδοχή και εφαρμογή αυτής της πρακτικής (Lopez-Galvez et al., 2014). Έτσι, κάθε λύμα που χρησιμοποιείται πρέπει να υποβάλλεται σε κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να απομακρύνονται παθογόνοι μικροοργανισμοί, βαρέα μέταλλα και οργανικοί ρυπαντές (Kreuzig et al., 2021).

Επιπλέον, οι επιστήμονες τονίζουν ότι η παρουσία βαρέων μετάλλων όπως ο μόλυβδος, το κάδμιο και το αρσενικό στα λύματα μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση αυτών των στοιχείων στα φυτικά προϊόντα (Al Ajmi et al., 2009). Επομένως, η συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας του διαλύματος και η τήρηση των διεθνών ορίων είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για ασφαλή παραγωγή (Lopez-Galvez et al., 2014).

Ακόμα, οι μελέτες δείχνουν ότι σε πολλές περιπτώσεις τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα και την ασφάλεια των προϊόντων, αρκεί να εφαρμόζονται τα κατάλληλα στάδια καθαρισμού και απολύμανσης (Aslam et al., 2023). Για παράδειγμα, τεχνικές όπως η υπεριώδης απολύμανση, η χρήση μεμβρανών και τα βιολογικά φίλτρα μειώνουν σημαντικά τον μικροβιακό κίνδυνο (Arola et al., 2019).

Επιπλέον, η ποιότητα των τελικών προϊόντων παρακολουθείται ως προς τα θρεπτικά χαρακτηριστικά, την εμφάνιση, τη γεύση και την περιεκτικότητα σε επιβλαβείς ουσίες (Carvalho et al., 2018). Έρευνες δείχνουν ότι τα λαχανικά που παράγονται σε συστήματα με προσεκτικά επεξεργασμένα λύματα έχουν συγκρίσιμη ή και καλύτερη ποιότητα από εκείνα που καλλιεργούνται με συμβατικά διαλύματα (Afonso et al., 2023· Giri et al., 2025).

Ωστόσο, σημαντική πρόκληση αποτελεί η διακύμανση στη σύσταση των λυμάτων, που μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος (Germer et al., 2023). Έτσι, απαιτείται τακτική ανάλυση και συχνές ρυθμίσεις για να διατηρούνται τα επίπεδα θρεπτικών στοιχείων σε κατάλληλα όρια για τα φυτά (Fathidarehnijeh et al., 2023).

Παράλληλα, υπάρχουν και κοινωνικές προκλήσεις, καθώς πολλοί καταναλωτές εμφανίζονται διστακτικοί απέναντι στη χρήση λυμάτων στην παραγωγή τροφίμων, ανεξάρτητα από το επίπεδο επεξεργασίας (Winker et al., 2020). Για αυτό, είναι αναγκαία η ενημέρωση του κοινού και η διαφάνεια στη διαδικασία παραγωγής (Zimmermann & Fischer, 2020).

Επιπλέον, ρυθμιστικά και νομοθετικά ζητήματα πρέπει να λυθούν, καθώς σε πολλές χώρες δεν υπάρχουν σαφείς οδηγίες ή επιτρέπεται μόνο πειραματικά η χρήση λυμάτων σε υδροπονικά συστήματα (Santos et al., 2024). Έτσι, η υιοθέτηση διεθνών προτύπων και η συστηματική παρακολούθηση μπορούν να ενισχύσουν την εμπιστοσύνη των καταναλωτών και των παραγωγών (Lopez-Galvez et al., 2014).

Τέλος, ορισμένες μελέτες επισημαίνουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα όσον αφορά τις μακροχρόνιες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον από τη χρήση λυμάτων στην υδροπονία (Chekli et al., 2017· Kreuzig et al., 2021). Παράλληλα, δίνεται έμφαση στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που να μπορούν να προσφέρουν ασφαλή και σταθερά διαλύματα, με χαμηλό κόστος και ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση (Mai et al., 2023).

Συνοψίζοντας, η διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη βιώσιμη χρήση λυμάτων στην υδροπονική καλλιέργεια. Με σωστή

τεχνολογική προσέγγιση, ρυθμιστικό πλαίσιο και ενημέρωση του κοινού, η καινοτομία αυτή μπορεί να συνεισφέρει ουσιαστικά στη βιώσιμη γεωργία και στην κυκλική οικονομία (Santos et al., 2024).

3.5 Παραδείγματα και συγκριτικές μελέτες από τη βιβλιογραφία

Αρχικά, πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί για το μαρούλι, καθώς αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή φυτά στην υδροπονία (Barbosa et al., 2015). Για παράδειγμα, η έρευνα των Germer et al. (2023) έδειξε ότι το μαρούλι μπορεί να αναπτυχθεί σε συστήματα που τροφοδοτούνται με προεπεξεργασμένα αστικά λύματα, χωρίς σημαντικές διαφορές στην απόδοση και στην ποιότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά διαλύματα. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν και από τους Figueiredo et al. (2021), όπου η χρήση λυμάτων σε καλλιέργεια φράουλας δεν επηρέασε αρνητικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος.

Επιπλέον, στη μελέτη των Afonso et al. (2023) εξετάστηκε η χρήση προεπεξεργασμένων λυμάτων από βιομηχανίες τροφίμων σε καλλιέργεια τομάτας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα φυτά αναπτύχθηκαν κανονικά και τα παραγόμενα προϊόντα πληρούσαν τα πρότυπα ποιότητας. Επίσης, στη μελέτη των Antón-Herrero et al. (2021), η εφαρμογή αστικών λυμάτων ενίσχυσε την ανάπτυξη των φυτών και μείωσε τις ανάγκες για συμβατικά λιπάσματα.

Ακόμη, άλλες μελέτες έδειξαν ότι σε καλλιέργειες όπως το βασιλικό, η χρήση λυμάτων μετά από βιολογική και φυσικοχημική επεξεργασία οδήγησε σε ικανοποιητική απόδοση και υψηλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά (Gonçalves et al., 2019). Παράλληλα, η χρήση λυμάτων σε συνδυασμό με ανακυκλωμένα ανόργανα στοιχεία ενίσχυσε την ανάπτυξη και την ποιότητα της παραγωγής (Pelayo Lind et al., 2021).

Παράλληλα, υπάρχουν και μελέτες που εξετάζουν τις προκλήσεις. Για παράδειγμα, στη μελέτη του Kreuzig et al. (2021), αναφέρθηκε ότι η χρήση λυμάτων απαιτεί προηγμένη επεξεργασία για την απομάκρυνση μικρορυπαντών και βαρέων μετάλλων, ιδιαίτερα όταν το τελικό προϊόν προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση. Επίσης, η μελέτη του

Lopez-Galvez et al. (2014) τόνισε τη σημασία της συνεχούς παρακολούθησης των παθογόνων, καθώς και της ενημέρωσης των καταναλωτών για τη διασφάλιση της αποδοχής των προϊόντων.

Επιπλέον, συγκριτικές μελέτες, όπως αυτή των Bergstrand et al. (2020), έδειξαν ότι τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να αντικαταστήσουν μέρος ή και το σύνολο του θρεπτικού διαλύματος, χωρίς να μειώνεται η παραγωγικότητα. Όμως, σε ορισμένες περιπτώσεις, χρειάζεται συμπληρωματική χορήγηση μικροθρεπτικών ή επιπλέον επεξεργασία για να διασφαλιστεί η ασφάλεια (Bawiec, 2019).

Τέλος, σε ευρωπαϊκές και διεθνείς εφαρμογές, η αξιοποίηση λυμάτων σε υδροπονικά συστήματα έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πιλοτικά, κυρίως σε ερευνητικά κέντρα ή αστικές φάρμες, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα ως προς την οικονομία, το περιβάλλον και τη διατροφική επάρκεια (Winker et al., 2020· Santos et al., 2024). Έτσι, η διεθνής εμπειρία επιβεβαιώνει τη δυναμική αυτής της πρακτικής, εφόσον τηρούνται τα μέτρα ασφάλειας και γίνεται συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας (Mai et al., 2023).

Συνοψίζοντας, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων από λύματα για υδροπονία είναι εφικτή και συχνά αποδοτική, ενώ οι προκλήσεις εστιάζονται κυρίως στην ασφάλεια, την αποδοχή και τη συνεχή τεχνολογική υποστήριξη (Germer et al., 2023· Kreuzig et al., 2021).

4. Συζήτηση

Επιχειρώντας να απαντηθεί το πρώτο ερευνητικό ερώτημα, ποια είναι τα βασικά θρεπτικά στοιχεία που ανιχνεύονται στα λύματα και σε ποιες συγκεντρώσεις συναντώνται συνήθως, είναι ουσιώδες να εξεταστεί σε βάθος ποιοι είναι οι βασικοί τύποι θρεπτικών στοιχείων που ανιχνεύονται στα λύματα και ποια είναι η δυναμική της ροής τους στα υδροπονικά συστήματα. Τα λύματα συνιστούν μια σημαντική δευτερογενή πηγή θρεπτικών, περιέχοντας κυρίως τα τρία βασικά μακροθρεπτικά που είναι απαραίτητα για τη φυτική ανάπτυξη: το άζωτο (N), τον φώσφορο (P) και το κάλιο (K) (Barbosa et al., 2015· Chekli et al., 2017). Αυτά τα στοιχεία συνήθως απαντώνται σε συγκεντρώσεις που διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τον τύπο και την προέλευση των λυμάτων, με τα αστικά λύματα να χαρακτηρίζονται από υψηλότερο ποσοστό οργανικού αζώτου και φωσφόρου λόγω της παρουσίας οικιακών αποβλήτων και υπολειμμάτων τροφίμων (Papadopoulos et al., 2007· Calabria et al., 2019).

Επιπλέον, στα λύματα εντοπίζονται και άλλες κατηγορίες θρεπτικών που συνεισφέρουν στη συνολική θρεπτική αξία του διαλύματος. Αυτές περιλαμβάνουν δευτερεύοντα μακροστοιχεία όπως το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg) και το θείο (S), καθώς και πληθώρα ιχνοστοιχείων όπως ο σίδηρος (Fe), ο ψευδάργυρος (Zn), το μαγγάνιο (Mn) και ο χαλκός (Cu) (Ntinis et al., 2021· Jurga et al., 2023· Figueiredo et al., 2021). Η παρουσία αυτών των στοιχείων είναι καθοριστική για την κάλυψη των πλήρων διατροφικών απαιτήσεων των υδροπονικών καλλιεργειών, ιδίως όταν τα λύματα αποτελούν την κύρια ή αποκλειστική πηγή θρεπτικών (Afonso et al., 2023· Bergstrand et al., 2020).

Η δυναμική της ροής των θρεπτικών στοιχείων στα υδροπονικά συστήματα που αξιοποιούν λύματα εξαρτάται κυρίως από τη χημική μορφή υπό την οποία βρίσκονται τα συγκεκριμένα στοιχεία στο διάλυμα, αλλά και από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Για παράδειγμα, το άζωτο στα λύματα βρίσκεται συχνά ως αμμωνία (NH_4^+), νιτρικά (NO_3^-) και οργανικό άζωτο (Medri et al., 2022· Kuntke et al., 2012). Η μορφή αυτή έχει κρίσιμη σημασία, διότι τα φυτά απορροφούν κυρίως το νιτρικό άζωτο, ενώ η υπερβολική συγκέντρωση αμμωνίας μπορεί να οδηγήσει σε τοξικότητα (Lee et al., 2021· Weimers et al., 2022). Αντίστοιχα, ο φώσφορος εντοπίζεται κυρίως ως ορθοφωσφορικό (PO_4^{3-}), το οποίο αποτελεί την πλέον βιοδιαθέσιμη μορφή για τα φυτά,

ενώ το κάλιο απαντάται ως κατιόν K^+ , το οποίο επίσης απορροφάται άμεσα (Pelayo Lind et al., 2021· Jurga et al., 2023).

Η δυναμική της ροής θρεπτικών σε υδροπονικά συστήματα βασίζεται στη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ πρόσληψης και κατανάλωσης των στοιχείων από τα φυτά. Τα θρεπτικά εισέρχονται στο σύστημα μέσω του διαλύματος, κυκλοφορούν γύρω από τις ρίζες των φυτών και απορροφώνται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και τις απαιτήσεις κάθε είδους (Chekli et al., 2017· Germer et al., 2023). Παράλληλα, η χημική σύσταση του διαλύματος μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο λόγω της απορρόφησης και της εξάτμισης, καθιστώντας αναγκαία τη συνεχή παρακολούθηση παραμέτρων όπως το pH και η αγωγιμότητα (Pelayo Lind et al., 2021· Mauerer et al., 2023).

Ακόμα, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η συγκέντρωση και η διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων στα λύματα υπόκεινται σε σημαντικές διακυμάνσεις, οι οποίες σχετίζονται με εποχικούς, τοπικούς και τεχνολογικούς παράγοντες (Villamar et al., 2018· Gonçalves et al., 2019). Ειδικά στα βιομηχανικά λύματα, μπορεί να ανιχνεύονται βαρέα μέταλλα ή οργανικοί ρυπαντές, γεγονός που απαιτεί επιπλέον προσοχή στη διαχείριση και την προεπεξεργασία πριν τη χρήση τους σε υδροπονικά συστήματα (Medri et al., 2022· Kreuzig et al., 2021).

Συνολικά, η ορθολογική διαχείριση και η συνεχής ρύθμιση της ροής των θρεπτικών από τα λύματα στα υδροπονικά συστήματα επιτρέπουν την αξιοποίηση της θρεπτικής τους αξίας και τη διασφάλιση της υγιούς ανάπτυξης των καλλιεργειών, προσφέροντας παράλληλα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη (Bergstrand et al., 2020· Mai et al., 2023· Rubert et al., 2024).

Συνεχίζοντας, το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα εξετάζει τις τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων που εφαρμόζονται σε διεθνές επίπεδο, καθώς και το βαθμό αποδοτικότητάς τους για υδροπονική χρήση. Στη διεθνή πρακτική, έχουν αναπτυχθεί και αξιοποιούνται μια σειρά από τεχνολογικές προσεγγίσεις με στόχο την αποτελεσματική ανάκτηση και αξιοποίηση θρεπτικών στοιχείων από τα λύματα, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της σύγχρονης γεωργίας και ιδιαίτερα των υδροπονικών συστημάτων (Fumasoli et al., 2016· Bergstrand et al., 2020).

Καταρχάς, οι βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας, όπως η αναερόβια και η αερόβια χώνευση, αποτελούν το βασικό άξονα για τη μετατροπή του οργανικού αζώτου των

λυμάτων σε πιο βιοδιαθέσιμες μορφές για τα φυτά, όπως η αμμωνία και τα νιτρικά (Bergstrand et al., 2020· Fumasoli et al., 2016). Η αναερόβια χώνευση, ειδικότερα, συμβάλλει στη σταθεροποίηση της οργανικής ύλης και στη μετατροπή της σε αμμωνία, ενώ η αερόβια χώνευση προωθεί την οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα, που θεωρούνται η πλέον απορροφήσιμη μορφή για τις περισσότερες υδροπονικές καλλιέργειες (Germer et al., 2023· Weimers et al., 2022).

Παράλληλα, η χημική κατακρήμνιση αποτελεί μία από τις κυριότερες τεχνολογίες για την ανάκτηση φωσφόρου. Μέσω της παραγωγής στρουβίτη ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), επιτυγχάνεται η συλλογή του φωσφόρου και μέρους του αζώτου υπό τη μορφή ενός αβλαβούς και χρήσιμου αλάτος, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα στη γεωργία (Qiu et al., 2015· Shenoy et al., 2023). Η διαδικασία αυτή είναι απλή, αλλά απαιτεί σχολαστικό έλεγχο του pH και των συγκεντρώσεων των αντιδρώντων (Qiu et al., 2015· Medri et al., 2022). Η κατακρήμνιση στρουβίτη είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη λόγω της δυνατότητας παραγωγής ενός εμπορεύσιμου προϊόντος με υψηλή καθαρότητα, κατάλληλου για άμεση γεωργική εφαρμογή (Jurga et al., 2023· Sakuma et al., 2024).

Αξιοσημείωτες είναι επίσης οι τεχνολογίες ιοντοανταλλαγής και η χρήση ζεολίθων, οι οποίες βασίζονται στην προσρόφηση ιόντων αμμωνίου και άλλων θρεπτικών από το υγρό των λυμάτων (Medri et al., 2022· Calabria et al., 2019). Οι μέθοδοι αυτοί προσφέρουν μεγάλη ευελιξία στη συγκέντρωση των θρεπτικών, διευκολύνοντας την προσαρμογή του τελικού διαλύματος στις ανάγκες κάθε υδροπονικού συστήματος (Song et al., 2023· Czuba et al., 2021).

Επιπρόσθετα, τα συστήματα μεμβρανών, όπως η αντίστροφη όσμωση, η νανοδιήθηση και η ηλεκτροδιαλύση, χρησιμοποιούνται ευρέως για τον διαχωρισμό των θρεπτικών στοιχείων από ανεπιθύμητους ρύπους. Η αντίστροφη όσμωση προσφέρει τη δυνατότητα παραγωγής διαλυμάτων υψηλής καθαρότητας, απαλλαγμένων από παθογόνους μικροοργανισμούς και βαρέα μέταλλα, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική για υδροπονικές εφαρμογές, παρότι συνοδεύεται από αυξημένο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης (Ward et al., 2018· Czuba et al., 2021).

Επιπλέον, οι βιολογικές μέθοδοι ανάκτησης, όπως η χρήση μικροαλγών και υδρόβιων φυτών, αναδεικνύονται ως περιβαλλοντικά βιώσιμες λύσεις, διότι αξιοποιούν τους

διαθέσιμους θρεπτικούς πόρους των λυμάτων και παράγουν βιομάζα με εμπορική αξία (Nayanathara & Bindu, 2017· Morillas-España et al., 2024). Αυτές οι μέθοδοι συμβάλλουν στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και στη μείωση των αποβλήτων, χωρίς να προσθέτουν τοξικές ουσίες στο τελικό προϊόν (Worku et al., 2018· Rubert et al., 2024).

Συνολικά, η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι σύγχρονες τεχνολογίες ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων από λύματα είναι αποδοτικές και επιτρέπουν την παραγωγή καθαρών διαλυμάτων που πληρούν τις προδιαγραφές των υδροπονικών καλλιεργειών (Bergstrand et al., 2020· Afonso et al., 2023). Εντούτοις, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τη σύσταση των λυμάτων, το επιθυμητό τελικό προϊόν και το οικονομικό πλαίσιο κάθε εφαρμογής. Με σωστή εφαρμογή και αυστηρούς ελέγχους, οι τεχνολογίες αυτές αποτελούν τη βάση για τη βιώσιμη και ασφαλή υδροπονική καλλιέργεια με αξιοποίηση λυμάτων.

Στο πλαίσιο του τρίτου ερευνητικού ερωτήματος, αναλύεται η πρακτική εφαρμογή των επεξεργασμένων λυμάτων ως θρεπτικών διαλυμάτων στις υδροπονικές καλλιέργειες και διερευνώνται τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα αλλά και τα προβλήματα που ενδέχεται να προκύψουν. Πρώτα, αξίζει να σημειωθεί ότι η αξιοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων στην υδροπονία έχει μελετηθεί εκτενώς τόσο σε πειραματικό όσο και σε ημι-εμπορικό επίπεδο, με την πλειοψηφία των σχετικών μελετών να επιβεβαιώνει τη δυνατότητα χρήσης τους σε διάφορα είδη φυτών, όπως το μαρούλι, η τομάτα, ο βασιλικός και η φράουλα (Figueiredo et al., 2021· Afonso et al., 2023· Chimi et al., 2024).

Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών δείχνουν ότι τα επεξεργασμένα λύματα, εφόσον πληρούνται οι απαραίτητες προδιαγραφές ως προς τη χημική σύσταση και την απουσία ρύπων, μπορούν να υποκαταστήσουν τα συμβατικά εμπορικά θρεπτικά διαλύματα χωρίς να προκαλούν μείωση στην ανάπτυξη ή την ποιότητα των φυτών (Germer et al., 2023· Carvalho et al., 2018). Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η απόδοση των καλλιεργειών, αλλά και ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως η περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, η γεύση και η εμφάνιση, συχνά παραμένουν αμετάβλητα ή ακόμη και βελτιώνονται σε σύγκριση με παραδοσιακά διαλύματα, ιδίως όταν εφαρμόζονται

προσαρμοσμένες τεχνικές παρακολούθησης και διαχείρισης του διαλύματος (Figueiredo et al., 2021· Ntinis et al., 2021).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της πρακτικής αυτής είναι η σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής, αφού περιορίζεται η ανάγκη για χημικά λιπάσματα τα οποία είναι συνήθως ακριβά και περιβαλλοντικά επιβαρυντικά (Barbosa et al., 2015· Rubert et al., 2024). Ταυτόχρονα, η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης νερού και στην ενίσχυση της κυκλικής διαχείρισης των πόρων, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές με έλλειψη υδάτινων και θρεπτικών πόρων (Bergstrand et al., 2020· Mai et al., 2023).

Ωστόσο, η εφαρμογή των επεξεργασμένων λυμάτων στην υδροπονία συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις και πιθανούς κινδύνους. Ένα από τα κύρια προβλήματα είναι η πιθανότητα συσσώρευσης βαρέων μετάλλων, οργανικών μικρορυπαντών ή παθογόνων μικροοργανισμών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου δεν έχει προηγηθεί επαρκής και κατάλληλη επεξεργασία των λυμάτων (Kreuzig et al., 2021· Lopez-Galvez et al., 2014). Οι ενώσεις αυτές ενδέχεται να περάσουν στα φυτικά προϊόντα ή να διαταράξουν το υδροπονικό σύστημα, επηρεάζοντας αρνητικά τόσο την υγεία των φυτών όσο και την ασφάλεια των καταναλωτών.

Επιπλέον, ένα ακόμη ζήτημα αφορά τη μεταβλητότητα στη σύσταση των επεξεργασμένων λυμάτων. Η χημική σύνθεση μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις ανάλογα με την εποχικότητα, τον τύπο του λυμάτων και τις μεθόδους επεξεργασίας που εφαρμόζονται (Germer et al., 2023· Fathidarehnejeh et al., 2023). Αυτή η αστάθεια επιβάλλει την ανάγκη για τακτική ανάλυση, συνεχή παρακολούθηση των βασικών παραμέτρων (όπως pH, αγωγιμότητα, συγκεντρώσεις θρεπτικών και ρυπαντών) και συχνές διορθωτικές παρεμβάσεις στο διάλυμα για τη διατήρηση της ομοιογένειας και της ασφάλειας της καλλιέργειας.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι, για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα, πολλές υδροπονικές εγκαταστάσεις εφαρμόζουν μικτές στρατηγικές, συνδυάζοντας λύματα με συμβατικά θρεπτικά διαλύματα ή πραγματοποιώντας συμπληρωματική χορήγηση ιχνοστοιχείων (Halbert-Howard et al., 2021· Pelayo Lind et al., 2021). Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην επιλογή του κατάλληλου τύπου

υδροπονικού συστήματος και στην προσαρμογή του πρωτοκόλλου επεξεργασίας με βάση τα τοπικά δεδομένα και τις καλλιεργητικές απαιτήσεις.

Συνολικά, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η εφαρμογή επεξεργασμένων λυμάτων στην υδροπονία είναι εφικτή και αποδοτική, υπό την προϋπόθεση της συστηματικής παρακολούθησης, της επαρκούς επεξεργασίας και της προσαρμογής στις τοπικές συνθήκες, ώστε να εξασφαλίζεται τόσο η ασφάλεια όσο και η βιωσιμότητα της παραγωγής (Chekli et al., 2017· Afonso et al., 2023).

Αναφορικά με το τέταρτο ερευνητικό ερώτημα, η διερεύνηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών πτυχών, καθώς και των προκλήσεων που ανακύπτουν από την εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων στην υδροπονία, αποτελεί κρίσιμη διάσταση για την αξιολόγηση της πρακτικής σε τοπικό και διεθνές επίπεδο. Περιβαλλοντικά, η αξιοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων συνεισφέρει ουσιαστικά στη μείωση της επιβάρυνσης των υδάτινων σωμάτων, περιορίζοντας τη διάθεση ρύπων όπως άζωτο και φώσφορος στο περιβάλλον και, κατ' επέκταση, τη συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου του ευτροφισμού σε λίμνες, ποτάμια και παράκτιες περιοχές (Rubert et al., 2024· Chekli et al., 2017). Παράλληλα, η μείωση της χρήσης χημικών λιπασμάτων, τα οποία συνδέονται με υψηλή κατανάλωση ενέργειας και πόρων κατά την παραγωγή τους, οδηγεί σε περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος της γεωργίας (Barbosa et al., 2015· Afonso et al., 2023).

Επιπλέον, η πρακτική αυτή ενισχύει το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας, καθώς τα λύματα μετατρέπονται από απόβλητα σε χρήσιμους πόρους, προάγοντας την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση ουσιών εντός του γεωργικού συστήματος (Bergstrand et al., 2020). Ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση υδάτινων πόρων, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού ή σε περιόδους ξηρασίας (Barbosa et al., 2015· Mai et al., 2023). Ωστόσο, αξίζει να επισημανθεί πως ελλιπής ή μη ενδεδειγμένη επεξεργασία των λυμάτων μπορεί να επιφέρει κινδύνους, όπως η συσσώρευση βαρέων μετάλλων, οργανικών μικρορυπαντών και παθογόνων μικροοργανισμών στα φυτά ή στην τροφική αλυσίδα, υπονομεύοντας την ασφάλεια της παραγωγής και τη δημόσια υγεία (Kreuzig et al., 2021· Lopez-Galvez et al., 2014).

Σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο, η εφαρμογή των επεξεργασμένων λυμάτων στην υδροπονία συμβάλλει στη μείωση του κόστους παραγωγής, περιορίζοντας την ανάγκη για εισαγόμενα ή ακριβά ανόργανα λιπάσματα, ενώ ταυτόχρονα ενισχύει την τοπική αυτάρκεια και τη βιωσιμότητα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Afonso et al., 2023· Bliedung et al., 2020). Επίσης, η ανάπτυξη και λειτουργία μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, καθώς και η διεύρυνση της αστικής υδροπονίας, μπορούν να δημιουργήσουν νέες θέσεις εργασίας, να ενισχύσουν την τοπική οικονομία και να στηρίξουν την τεχνολογική καινοτομία (Bliedung et al., 2020· Mai et al., 2023).

Ωστόσο, σε κοινωνικό επίπεδο, παρατηρούνται προκλήσεις που αφορούν κυρίως την αποδοχή της πρακτικής από το κοινό. Πολλοί καταναλωτές εκφράζουν επιφυλάξεις σχετικά με την ασφάλεια των τροφίμων που παράγονται μέσω της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων, ακόμη και όταν τηρούνται οι απαιτούμενες διαδικασίες ελέγχου και ποιότητας (Winker et al., 2020· Zimmermann & Fischer, 2020). Επομένως, η ενίσχυση της διαφάνειας, η ενημέρωση του κοινού και η αυστηρή τήρηση των πρωτοκόλλων ασφάλειας και υγιεινής αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για την ευρεία κοινωνική αποδοχή και διάδοση της τεχνολογίας.

Επιπροσθέτως, σε αρκετές χώρες η έλλειψη σαφούς νομοθετικού πλαισίου ή η ύπαρξη αυστηρών περιορισμών ως προς τη χρήση λυμάτων στη γεωργία περιορίζει τη δυνατότητα εφαρμογής αυτής της προσέγγισης σε μεγάλη κλίμακα (Santos et al., 2024). Για τον λόγο αυτό, η επιστημονική κοινότητα τονίζει την ανάγκη προσαρμογής και εκσυγχρονισμού των κανονισμών, αλλά και τη συνέχιση της έρευνας για τη βελτίωση των τεχνολογιών επεξεργασίας, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιώσιμη και ασφαλής εφαρμογή της πρακτικής σε διεθνές επίπεδο (Mai et al., 2023· Chekli et al., 2017).

Συμπερασματικά, η εξέταση των περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών διαστάσεων καταδεικνύει ότι η ενσωμάτωση των επεξεργασμένων λυμάτων στην υδροπονία παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες για τη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων και την ενίσχυση της γεωργικής παραγωγής, υπό την προϋπόθεση της υπεύθυνης διαχείρισης, της διαρκούς ενημέρωσης και της συστηματικής παρακολούθησης της ασφάλειας και της ποιότητας των τελικών προϊόντων (Barbosa et al., 2015· Bergstrand et al., 2020· Rubert et al., 2024).

5. Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε τη δυναμική της αξιοποίησης των λυμάτων ως εναλλακτικής πηγής θρεπτικών στοιχείων για την υδροπονική καλλιέργεια. Μέσα από την ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας και των πλέον πρόσφατων ερευνητικών δεδομένων, διαφαίνεται ότι η εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών ανάκτησης θρεπτικών μπορεί να μετασχηματίσει ριζικά το παραδοσιακό πλαίσιο διαχείρισης των αποβλήτων και να συμβάλει ουσιαστικά στη βιωσιμότητα της αγροδιατροφικής παραγωγής.

Σε πρώτο επίπεδο, γίνεται φανερό ότι τα λύματα, τόσο αστικής όσο και βιομηχανικής και γεωργικής προέλευσης, εμπεριέχουν σημαντικές ποσότητες βασικών μακροθρεπτικών στοιχείων, όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο, αλλά και πολύτιμα μικροθρεπτικά, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται το ασβέστιο, το μαγνήσιο, ο σίδηρος και άλλα ιχνοστοιχεία. Η ανάκτηση και ο έλεγχος της ροής αυτών των στοιχείων προς τα υδροπονικά συστήματα δύναται να διασφαλίσει τη θρέψη των φυτών, να υποστηρίξει ικανοποιητικές αποδόσεις και να ενισχύσει τη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων. Επιπλέον, η μεταβλητότητα στη σύσταση των λυμάτων, ως προς το είδος και την πηγή, καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη προσαρμοσμένων τεχνολογικών λύσεων για κάθε περίπτωση, με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων θρεπτικών και τον περιορισμό της παρουσίας ανεπιθύμητων ρύπων ή τοξικών παραγόντων.

Παράλληλα, η πρόοδος στις τεχνολογίες ανάκτησης, όπως η βιολογική επεξεργασία, η χημική κατακρήμνιση και τα συστήματα μεμβρανών, αναβαθμίζει τις δυνατότητες επεξεργασίας και καθαρισμού των λυμάτων. Η εφαρμογή ολοκληρωμένων συστημάτων επεξεργασίας επιτρέπει τη στοχευμένη απομάκρυνση παθογόνων και βαρέων μετάλλων, καθιστώντας το τελικό προϊόν ασφαλές για χρήση στην υδροπονία. Επιπρόσθετα, η αξιοποίηση υδρόβιων φυτών και μικροαλγών ως μέσα βιολογικής ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση, καθώς συμβάλλει στην περαιτέρω ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και στην παραγωγή δευτερογενών προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας.

Όσον αφορά την πρακτική εφαρμογή, τα ερευνητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να υποκαταστήσουν τα εμπορικά θρεπτικά διαλύματα στην υδροπονία χωρίς να διακυβεύεται η ποιότητα ή η απόδοση των φυτών. Σε αρκετές περιπτώσεις, η χρήση τέτοιων διαλυμάτων συνέβαλε στην αύξηση της βιομάζας, στη βελτίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων και στη μείωση του κόστους παραγωγής. Ωστόσο, διαπιστώθηκαν και ορισμένες προκλήσεις που αφορούν κυρίως τη διασφάλιση της σταθερότητας της σύστασης των θρεπτικών στοιχείων, την αποφυγή της συσσώρευσης βαρέων μετάλλων ή τοξικών ενώσεων, και την ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση των φυσικοχημικών παραμέτρων του διαλύματος.

Αναφορικά με τις περιβαλλοντικές πτυχές, η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων ως πηγή θρεπτικών στοιχείων στη γεωργία συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση της ρύπανσης των υδάτων, στον περιορισμό του φαινομένου του ευτροφισμού και στην εξοικονόμηση υδάτινων και ορυκτών πόρων. Επιπλέον, προάγει την κυκλική διαχείριση των πόρων και ενισχύει την αυτάρκεια των αγροτικών συστημάτων, ειδικά σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού ή υψηλό κόστος αγροεφοδίων. Παράλληλα, η συστηματική επεξεργασία των λυμάτων διασφαλίζει την προστασία της δημόσιας υγείας, εφόσον τηρούνται αυστηρές προδιαγραφές και εφαρμόζονται κατάλληλες τεχνικές απομάκρυνσης ρυπαντών.

Από κοινωνικοοικονομική σκοπιά, η αξιοποίηση των λυμάτων προσφέρει πολλαπλά οφέλη. Αφενός, μειώνει το κόστος παραγωγής και αυξάνει την οικονομική βιωσιμότητα των παραγωγικών μονάδων. Αφετέρου, δημιουργεί νέες ευκαιρίες απασχόλησης και ανάπτυξης τεχνογνωσίας στους τομείς της διαχείρισης αποβλήτων και της καινοτόμου γεωργίας. Επιπλέον, συμβάλλει στην ενίσχυση της διατροφικής ασφάλειας, στην προστασία των φυσικών οικοσυστημάτων και στη στήριξη της τοπικής και εθνικής οικονομίας. Ωστόσο, η κοινωνική αποδοχή της χρήσης επεξεργασμένων λυμάτων στη διατροφή παραμένει ζήτημα που απαιτεί στοχευμένη ενημέρωση, διαφάνεια στις διαδικασίες παραγωγής και καθιέρωση σαφών ρυθμιστικών πλαισίων.

Η διασφάλιση της ασφάλειας των παραγόμενων προϊόντων, μέσω τακτικών αναλύσεων και παρακολούθησης της ποιότητας του διαλύματος, είναι απαραίτητη για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης τόσο από τους καταναλωτές όσο και από τους ίδιους τους

παραγωγούς. Η νομοθετική ρύθμιση, η ανάπτυξη προτύπων και η ενίσχυση των ελεγκτικών μηχανισμών θα ενισχύσουν τη βιώσιμη και ασφαλή υιοθέτηση της πρακτικής αυτής. Παράλληλα, η προώθηση της έρευνας, η τεχνολογική καινοτομία και η διεπιστημονική συνεργασία κρίνονται καίριας σημασίας για την επίλυση των τεχνικών και κοινωνικών προκλήσεων.

Συνοψίζοντας, η ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων από λύματα για υδροπονικές καλλιέργειες αποτελεί μια στρατηγική επιλογή για τη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων και τη μετάβαση της γεωργίας προς ένα περισσότερο κυκλικό και ανθεκτικό μοντέλο παραγωγής. Οι τεχνολογικές εξελίξεις, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις για περιβαλλοντική προστασία και διατροφική επάρκεια, καθιστούν τη συγκεκριμένη προσέγγιση ιδιαίτερα επίκαιρη και κρίσιμη για το μέλλον του αγροδιατροφικού τομέα. Η επιτυχής ενσωμάτωση της πρακτικής αυτής προϋποθέτει ολιστική προσέγγιση, συνεχείς επενδύσεις στην έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη, καθώς και την υιοθέτηση πολιτικών που ενισχύουν τη βιωσιμότητα, την ασφάλεια και την κοινωνική αποδοχή.

Η παρούσα εργασία τονίζει ότι η υδροπονία με ανακτημένα θρεπτικά στοιχεία από λύματα μπορεί να αποτελέσει όχι μόνο λύση στις προκλήσεις της σύγχρονης γεωργίας, αλλά και καταλύτη για τη διαμόρφωση ενός νέου, πιο βιώσιμου και ανθεκτικού συστήματος διαχείρισης φυσικών και οικονομικών πόρων. Για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων αυτής της προσέγγισης, κρίνεται απαραίτητο να διασφαλιστεί η διαθεσιμότητα σύγχρονων τεχνολογιών, η ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ επιστημονικών και παραγωγικών φορέων, και η διαρκής ενημέρωση και εκπαίδευση όλων των εμπλεκόμενων μερών. Μέσα από αυτές τις προϋποθέσεις, μπορεί να επιτευχθεί η ομαλή μετάβαση προς ένα μέλλον όπου η διαχείριση των λυμάτων δεν θα αποτελεί πηγή προβλημάτων, αλλά βασικό πυλώνα ανάπτυξης και αειφορίας.

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, κρίνεται σκόπιμο να εντατικοποιηθεί η ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα της ανάπτυξης καινοτόμων τεχνολογιών ανάκτησης θρεπτικών στοιχείων από λύματα, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ασφάλειας των παραγόμενων διαλυμάτων για υδροπονικές καλλιέργειες. Επιπλέον, προτείνεται η συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας των επεξεργασμένων

λυμάτων και η καθιέρωση πρότυπων διαδικασιών ελέγχου, ώστε να διασφαλίζεται η προστασία της δημόσιας υγείας και η ακεραιότητα των τροφίμων.

Παράλληλα, είναι αναγκαίο να θεσμοθετηθεί ένα ευέλικτο και σαφές κανονιστικό πλαίσιο που να υποστηρίζει την υπεύθυνη εφαρμογή της χρήσης λυμάτων στη γεωργία, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές ιδιαιτερότητες και τις κοινωνικές ευαισθησίες. Τέλος, προτείνεται η ενίσχυση της εκπαίδευσης και της ενημέρωσης τόσο των παραγωγών όσο και των καταναλωτών, με στόχο τη διεύρυνση της κοινωνικής αποδοχής και τη διαμόρφωση κουλτούρας αειφορίας στη διαχείριση των φυσικών πόρων.

6. Βιβλιογραφία

- Adrover, M., Moyà, G., & Vadell, J. (2013). Use of hydroponics culture to assess nutrient supply by treated wastewater. *Journal of environmental management*, 127, 162-165. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.044>
- Afonso, A., Regato, M., Patanita, M., Luz, S., Carvalho, M. J., Fernandes, A., ... & Carvalho, F. (2023). Reuse of pretreated agro-industrial wastewaters for hydroponic production of lettuce. *Water*, 15(10), 1856. <https://doi.org/10.3390/w15101856>
- Afonso, A., Ribeiro, C., Carvalho, M. J., Correia, T., Correia, P., Regato, M., ... & Carvalho, F. (2023). Pretreated Agro-Industrial Effluents as a Source of Nutrients for Tomatoes Grown in a Dual Function Hydroponic System: Tomato Quality Assessment. *Sustainability*, 16(1), 315. <https://doi.org/10.3390/su16010315>
- Aishwarya, J. M., & Vidhya, R. (2023). Study on the efficiency of a hydroponic treatment for removing organic loading from wastewater and its application as a nutrient for the “*Amaranthus campestris*” plant for sustainability. *Sustainability*, 15(10), 7814. <https://doi.org/10.3390/su15107814>
- Al Ajmi, A., Salih, A. A., Kadim, I., & Othman, Y. (2009). Chemical constituents and heavy metals contents of barley fodder produced under hydroponic system in GCC countries using tertiary treated sewage effluents. *Journal of Phytology*, 1(6). https://www.researchgate.net/publication/268435695_Yield_and_water_use_efficiency_of_Barley_fodder_produced_under_hydroponic_system_in_GCC_countries_using_tertiary_treated_sewage_effluents
- Alayande, A. B., Qi, W., Karthikeyan, R., Popat, S., Ladner, D. A., & Amy, G. (2024). Use of reclaimed municipal wastewater in agriculture: Comparison of present practice versus an emerging paradigm of anaerobic membrane bioreactor treatment coupled with hydroponic controlled environment agriculture. *Water Research*, 122197. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122197>
- Al-Karaki, G. N. (2011). Utilization of treated sewage wastewater for green forage production in a hydroponic system. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 23(1).

https://www.researchgate.net/publication/279996471_Utilization_of_treated_sewage_wastewater_for_green_forage_production_in_a_hydroponic_system

Almuktar, S. A. A. N., Scholz, M., Al-Isawi, R. H. K., & Sani, A. (2015). Recycling of domestic wastewater treated by vertical-flow wetlands for irrigating chillies and sweet peppers. *Agricultural Water Management*, 149, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.025>

Antón-Herrero, R., García-Delgado, C., Alonso-Izquierdo, M., Cuevas, J., Carreras, N., Mayans, B., ... & Eymar, E. (2021). New uses of treated urban waste digestates on stimulation of hydroponically grown tomato (*Solanum lycopersicon* L.). *Waste and Biomass Valorization*, 12, 1877-1889. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01137-8>

Arcas-Pilz, V., Rufi-Salís, M., Parada, F., Gabarrell, X., & Villalba, G. (2021). Assessing the environmental behavior of alternative fertigation methods in soilless systems: The case of *Phaseolus vulgaris* with struvite and rhizobia inoculation. *Science of the total environment*, 770, 144744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144744>

Arola, K., Ward, A., Mänttari, M., Kallioinen, M., & Batstone, D. (2019). Transport of pharmaceuticals during electrodialysis treatment of wastewater. *Water research*, 161, 496-504. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.031>

Aslam, T., Mirza, S. A., Rashid, A., Javed, M. A., & Campos, L. C. (2023). Efficiency of treated domestic wastewater to irrigate two rice cultivars, PK 386 and Basmati 515, under a hydroponic culture system. *Water*, 15(17), 3149. <https://doi.org/10.3390/w15173149>

Aydin, M. I., Ozaktac, D., Yuzer, B., Doğu, M., Inan, H., Okten, H. E., ... & Selcuk, H. (2021). Desalination and detoxification of textile wastewater by novel photocatalytic electrolysis membrane reactor for ecosafe hydroponic farming. *Membranes*, 12(1), 10. <https://doi.org/10.3390/membranes12010010>

Barbosa, G. L., Gadelha, F. D. A., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879-6891. <https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>

- Bawiec, A. (2019). Efficiency of nitrogen and phosphorus compounds removal in hydroponic wastewater treatment plant. *Environmental Technology*, 40(16), 2062-2072. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1436595>
- Bergstrand, K. J., Asp, H., & Hultberg, M. (2020). Utilizing anaerobic digestates as nutrient solutions in hydroponic production systems. *Sustainability*, 12(23), 10076. <https://doi.org/10.3390/su122310076>
- Bhat, M. A., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2017). Soil-less use of aquatic macrophytes in wastewater treatment and the novel SHEFROL® bioreactor. In *Advances in Health and Environment Safety: Select Proceedings of HSFEA 2016* (pp. 297-316). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7122-5_30
- Bliedung, A., Dockhorn, T., Germer, J., Mayerl, C., & Mohr, M. (2020). Experiences of running a hydroponic system in a pilot scale for resource-efficient water reuse. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10(4), 347-362. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.014>
- Boyden, B. H., & Rababah, A. A. (1996). Recycling nutrients from municipal wastewater. *Desalination*, 106(1-3), 241-246. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(96\)00114-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(96)00114-2)
- Calabria, J. L., Lens, P. N., & Yeh, D. H. (2019). Zeolite ion exchange to facilitate anaerobic membrane bioreactor wastewater nitrogen recovery and reuse for lettuce fertigation in vertical hydroponic systems. *Environmental Engineering Science*, 36(6), 690-698. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0439>
- Carreras-Sempere, M., Caceres, R., Viñas, M., & Biel, C. (2021). Use of recovered struvite and ammonium nitrate in fertigation in tomato (*Lycopersicum esculentum*) production for boosting circular and sustainable horticulture. *Agriculture*, 11(11), 1063. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111063>
- Carvalho, R. D. S. C., Bastos, R. G., & Souza, C. F. (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. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.028>

- Chekli, L., Kim, J. E., El Saliby, I., Kim, Y., Phuntsho, S., Li, S., ... & Shon, H. K. (2017). Fertilizer drawn forward osmosis process for sustainable water reuse to grow hydroponic lettuce using commercial nutrient solution. *Separation and Purification Technology*, 181, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.03.008>
- Chimi, A. N., Lekeufack, M., Djumyom, G. V. W., Nguetsop, V. F., & Fonkou, T. (2024). Treated Domestic Sewage as A Nutrient Source for Tomatoes (*Solanum lycopersicum*) Growth and Yield in A Hydroponic System in Yaoundé–Cameroon. *European Journal of Applied Sciences–Vol*, 12(3). <https://doi.org/10.14738/aivp.123.17104>
- Chow, K. K., Wang, J. Y., & Tay, J. H. (2000, May). Hydroponic cultivation of leafy vegetables in primary and secondary municipal wastewater. In *World Congress on Soilless Culture: Agriculture in the Coming Millennium* 554 (pp. 139-146). <https://www.academia.edu/download/54153663/Municipal2001.pdf>
- Clyde-Smith, D., & Campos, L. C. (2023). Engineering hydroponic systems for sustainable wastewater treatment and plant growth. *Applied Sciences*, 13(14), 8032. <https://doi.org/10.3390/app13148032>
- Correia, T., Regato, M., Almeida, A., Santos, T., Amaral, L., & Carvalho, F. (2020). Manual treatment of urban wastewater by chemical precipitation for production of hydroponic nutrient solutions. *Journal of Ecological Engineering*, 21(3). <http://dx.doi.org/10.12911/22998993/118286>
- Czuba, K., Bastrzyk, A., Rogowska, A., Janiak, K., Pacyna, K., Kosińska, N., ... & Podstawczyk, D. (2021). Towards the circular economy—A pilot-scale membrane technology for the recovery of water and nutrients from secondary effluent. *Science of The Total Environment*, 791, 148266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148266>
- da Silva Cuba, R., do Carmo, J. R., Souza, C. F., & Bastos, R. G. (2015). Potential of domestic sewage effluent treated as a source of water and nutrients in hydroponic lettuce. *Ambiente e Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 10(3), 574-586. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1575>
- Damasceno, L. M., Andrade Júnior, A. S. D., & Gheyi, H. R. (2010). Cultivation of gerbera irrigated with treated domestic effluents. *Revista Brasileira de Engenharia*

Agrícola e Ambiental, 14, 582-588. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000600003>

Dannehl, D., Huyskens-Keil, S., Wendorf, D., Ulrichs, C., & Schmidt, U. (2012). Influence of intermittent-direct-electric-current (IDC) on phytochemical compounds in garden cress during growth. *Food Chemistry*, 131(1), 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.069>

de Souza, M. V. D. S., Sala, F. C., Cardoso, J. C., & Souza, C. F. (2024). Treated domestic wastewater for water and nutrient supply in strawberry trough culture system. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 13. <https://doi.org/10.57647/ijrowa-cafh-gd60>

Delaide, B., Teerlinck, S., Decombel, A., & Bleyaert, P. (2019). Effect of wastewater from a pikeperch (*Sander lucioperca* L.) recirculated aquaculture system on hydroponic tomato production and quality. *Agricultural Water Management*, 226, 105814. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105814>

Dube, P. J., Vanotti, M. B., Szogi, A. A., & García-González, M. C. (2016). Enhancing recovery of ammonia from swine manure anaerobic digester effluent using gas-permeable membrane technology. *Waste management*, 49, 372-377. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.011>

Ebert, B., Dockhorn, T., Peters, G., Schramm, E., Teiser, B., & Winker, M. (2019). an Operator models for the reuse of municipal wastewater in hydroponic systems: potentials and options for Central and Mediterranean Europe. *IWA Water Reuse 2019, Book of Abstracts*, 725-730.

Egbuikwem, P. N., Mierzwa, J. C., & Saroj, D. P. (2020). Assessment of suspended growth biological process for treatment and reuse of mixed wastewater for irrigation of edible crops under hydroponic conditions. *Agricultural Water Management*, 231, 106034. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106034>

Egbuikwem, P. N., Mierzwa, J. C., & Saroj, D. P. (2020b). Assessment of suspended growth biological process for treatment and reuse of mixed wastewater for irrigation of edible crops under hydroponic conditions. *Agricultural Water Management*, 231, 106034. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106034>

- El-Nakhel, C., Geelen, D., De Paepe, J., Clauwaert, P., De Pascale, S., & Rouphael, Y. (2021). An appraisal of urine derivatives integrated in the nitrogen and phosphorus inputs of a lettuce soilless cultivation system. *Sustainability*, 13(8), 4218. <https://doi.org/10.3390/su13084218>
- El-Shafai, S. A., El-Gohary, F. A., Nasr, F. A., Van Der Steen, N. P., & Gijzen, H. J. (2007). Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system. *Bioresource technology*, 98(4), 798-807. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.03.011>
- Emongor, V. E., & Ramolemana, G. M. (2004). Treated sewage effluent (water) potential to be used for horticultural production in Botswana. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(15-18), 1101-1108. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.08.003>
- Eregno, F. E., Moges, M. E., & Heistad, A. (2017). Treated greywater reuse for hydroponic lettuce production in a green wall system: Quantitative health risk assessment. *Water*, 9(7), 454. <https://doi.org/10.3390/w9070454>
- Eregno, F. E., Moges, M. E., & Heistad, A. (2017). Treated greywater reuse for hydroponic lettuce production in a green wall system: Quantitative health risk assessment. *Water*, 9(7), 454. <https://doi.org/10.3390/w9070454>
- Fathidarehniyeh, E., Nadeem, M., Cheema, M., Thomas, R., Krishnapillai, M., & Galagedara, L. (2023). Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient and water use efficiency in hydroponic systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 104(2), 88-102. <https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0034>
- Figueiredo, C. G., Sala, F. C., & Souza, C. F. (2021). Treated domestic sewage as a nutrient source for strawberry under hydroponic cultivation. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 10(4), 353. <https://doi.org/10.30486/IJROWA.2021.1903049.1093>
- Fumasoli, A., Etter, B., Sterkele, B., Morgenroth, E., & Udert, K. M. (2016). Operating a pilot-scale nitrification/distillation plant for complete nutrient recovery from urine. *Water Science and Technology*, 73(1), 215-222. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.485>

- Gebeyehu, A., Shebeshe, N., Kloos, H., & Belay, S. (2018). Suitability of nutrients removal from brewery wastewater using a hydroponic technology with *Typha latifolia*. *BMC biotechnology*, 18, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12896-018-0484-4>
- Germer, J., Brandt, C., Rasche, F., Dockhorn, T., & Bliedung, A. (2023). Growth of lettuce in hydroponics fed with aerobic-and anaerobic-aerobic-treated domestic wastewater. *Agriculture*, 13(8), 1529. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081529>
- Giri, L., Hussain, M., Angmo, J. C., Mustafa, G., Singh, B., Bahukhnadi, A., ... & Nautiyal, S. (2025). Enhancing tomato (*Solanum lycopersicum*) yield and nutrition quality through hydroponic cultivation with treated wastewater. *Food Chemistry*, 463, 141079. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141079>
- Gonçalves, K. S., Alves, L. S., Paz, V. P. D. S., & Bandeira, S. D. S. (2019). Chlorophyll fluorescence of basil plants cultivated in a hydroponic system using treated domestic wastewater. *Engenharia Agrícola*, 39, 288-293. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n3p288-293/2019>
- Gong, L., Chen, G., Li, J., & Zhu, G. (2020). Utilization of rural domestic sewage tailwaters by *Ipomoea aquatica* in different hydroponic vegetable and constructed wetland systems. *Water Science and Technology*, 82(2), 386-400. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.373>
- Halbert-Howard, A., Häfner, F., Karlowsky, S., Schwarz, D., & Krause, A. (2021). Evaluating recycling fertilizers for tomato cultivation in hydroponics, and their impact on greenhouse gas emissions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 59284-59303. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10461-4>
- Han, B., Ouyang, Z., Liu, H., Cui, Z., Lu, Z., & Crittenden, J. (2016). Courtyard integrated ecological system: An ecological engineering practice in China and its economic-environmental benefit. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1363-1370. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.061>
- Ispolnov, K., Aires, L. M., Lourenço, N. D., & Vieira, J. S. (2021). A combined vermifiltration-hydroponic system for swine wastewater treatment. *Applied Sciences*, 11(11), 5064. <https://doi.org/10.3390/app11115064>

- Jakubaszek, A. (2022). Pollutants Removal Efficiency in The Hydroponic Lagoon of The Wastewater Treatment Plant. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 32(4). <http://dx.doi.org/10.2478/ceer-2022-0059>
- Jesse, S. D. (2019). *Treatment of post hydrothermal liquefaction wastewater and suitability for hydroponic lettuce production* (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign). <https://www.ideals.illinois.edu/items/112039>
- Jesse, S. D., Zhang, Y., Margenot, A. J., & Davidson, P. C. (2019). Hydroponic lettuce production using treated post-hydrothermal liquefaction wastewater (PHW). *Sustainability*, 11(13), 3605. <https://doi.org/10.3390/su11133605>
- Jin, E., Cao, L., Xiang, S., Zhou, W., Ruan, R., & Liu, Y. (2020). Feasibility of using pretreated swine wastewater for production of water spinach (*Ipomoea aquatic* Forsk.) in a hydroponic system. *Agricultural Water Management*, 228, 105856. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105856>
- Jóźwiakowska, K., & Marzec, M. (2020). Efficiency and reliability of sewage purification in long-term exploitation of the municipal wastewater treatment plant with activated sludge and hydroponic system. *Archives of Environmental Protection*, 46(3). <http://dx.doi.org/10.24425/aep.2020.134533>
- Jurga, A., Janiak, K., Wizimirska, A., Chochura, P., Miodoński, S., Muszyński-Huhajło, M., ... & Podstawczyk, D. (2021). Resource recovery from synthetic nitrified urine in the hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* var. *Capitata* L.). *Agronomy*, 11(11), 2242. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112242>
- Jurga, A., Ratkiewicz, K., Wdowikowska, A., Reda, M., Janicka, M., Chohura, P., & Janiak, K. (2023). Urine and grey water based liquid fertilizer—Production and the response of plants. *Journal of Environmental Management*, 331, 117248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117248>
- Keeratiurai, P. (2013). Efficiency of wastewater treatment with hydroponics. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*, 8(12), 800-805. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=0375268171a3a5d0add73a7b6e59fac4bb516974>

- Keller, R., Perim, K., Semionato, S., Zandonade, E., Cassini, S., & Gonçalves, R. F. (2005). Hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa*) using effluents from primary, secondary and tertiary+ UV treatments. *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(1), 95-100. <https://doi.org/10.2166/ws.2005.0012>
- Keller, R., Perin, K., Souza, W. G., Cruz, L. S., Zandonade, E., Cassini, S. T. A., & Goncalves, R. F. (2008). Use of polishing pond effluents to cultivate lettuce (*Lactuca sativa*) in a hydroponic system. *Water Science and Technology*, 58(10), 2051-2057. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.754>
- Kennard, N., Stirling, R., Prashar, A., & Lopez-Capel, E. (2020). Evaluation of recycled materials as hydroponic growing media. *Agronomy*, 10(8), 1092. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081092>
- Kreuzig, R., Haller-Jans, J., Bischoff, C., Leppin, J., Germer, J., Mohr, M., ... & Dockhorn, T. (2021). Reclaimed water driven lettuce cultivation in a hydroponic system: the need of micropollutant removal by advanced wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 50052-50062. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14144-6>
- Krishnasamy, K., Nair, J., & Bäuml, B. (2012). Hydroponic system for the treatment of anaerobic liquid. *Water Science and Technology*, 65(7), 1164-1171. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.031>
- Kumar, R. R., & Cho, J. Y. (2014). Reuse of hydroponic waste solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 9569-9577. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3024-3>
- Kuntke, P., Śmiech, K., Bruning, H., Zeeman, G., Saakes, M., Sleutels, T. H. J. A., ... & Buisman, C. J. N. (2012). Ammonium recovery and energy production from urine by a microbial fuel cell. *Water research*, 46(8), 2627-2636. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.025>
- Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Ahmad, A., Mohd Said, N. S., Mohd Rahim, N. F., ... & Purwanti, I. F. (2021). Potential of valuable materials recovery from aquaculture wastewater: an introduction to resource reclamation. *Aquaculture Research*, 52(7), 2954-2962. <https://www.researchgate.net/profile/Setyo-Budi->

[Kurniawan/publication/349896029_Potential_of_valuable_materials_recovery_from_aquaculture_wastewater_An_introduction_to_resource_reclamation/links/60b3122c92851cd0d9856389/Potential-of-valuable-materials-recovery-from-aquaculture-wastewater-An-introduction-to-resource-reclamation.pdf](https://www.kurniawan/publication/349896029_Potential_of_valuable_materials_recovery_from_aquaculture_wastewater_An_introduction_to_resource_reclamation/links/60b3122c92851cd0d9856389/Potential-of-valuable-materials-recovery-from-aquaculture-wastewater-An-introduction-to-resource-reclamation.pdf)

Lee, E., Rout, P. R., & Bae, J. (2021). The applicability of anaerobically treated domestic wastewater as a nutrient medium in hydroponic lettuce cultivation: Nitrogen toxicity and health risk assessment. *Science of The Total Environment*, 780, 146482. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146482>

Lopez-Galvez, F., Allende, A., Pedrero-Salcedo, F., Alarcon, J. J., & Gil, M. I. (2014). Safety assessment of greenhouse hydroponic tomatoes irrigated with reclaimed and surface water. *International journal of food microbiology*, 191, 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.09.004>

Madeira, L., Ribau Teixeira, M., Nunes, S., Almeida, A., & Carvalho, F. (2024). Reuse of Treated Slaughterhouse Wastewater from Immediate One-Step Lime Precipitation and Atmospheric Carbonation to Produce Aromatic Plants in Hydroponics. *Water*, 16(11), 1566. <https://doi.org/10.3390/w16111566>

Mai, C., Mojiri, A., Palanisami, S., Altaee, A., Huang, Y., & Zhou, J. L. (2023). Wastewater hydroponics for pollutant removal and food production: principles, progress and future outlook. *Water*, 15(14), 2614. <https://doi.org/10.3390/w15142614>

Mathe, L. O. J., Ramsumer, S., Brink, H. G., & Nicol, W. (2024). Aerobic Polishing of Liquid Digestate for Preparation of Hydroponic Fertiliser. *Sustainability*, 16(10), 4077. <https://doi.org/10.3390/su16104077>

Mauerer, M., Rocks, T., Dannehl, D., Schuch, I., Mewis, I., Förster, N., ... & Schmidt, U. (2023). Replacing mineral fertilizer with nitrified human urine in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.) production. *Sustainability*, 15(13), 10684. <https://doi.org/10.3390/su151310684>

Mauerer, M., Rocks, T., Dannehl, D., Schuch, I., Mewis, I., Förster, N., ... & Schmidt, U. (2018). Impact of different concentrations of nitrified urine in a recirculating nutrient solution on growth, yield and quality of lettuce. *DGG-Proceedings*, 8, 1-5. <http://dx.doi.org/10.5288/dgg-pr-mm-2018>

- Medri, V., Papa, E., Landi, E., Maggetti, C., Pinelli, D., & Frascari, D. (2022). Ammonium removal and recovery from municipal wastewater by ion exchange using a metakaolin K-based geopolymer. *Water Research*, 225, 119203. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119203>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Morillas-España, A., Pérez-Crespo, R., Villaró-Cos, S., Rodríguez-Chikri, L., & Lafarga, T. (2024). Integrating microalgae-based wastewater treatment, biostimulant production, and hydroponic cultivation: a sustainable approach to water management and crop production. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1364490. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1364490>
- Mustafa, H. M., Hayder, G., Solihin, M. I., & Saeed, R. A. (2021, April). Applications of constructed wetlands and hydroponic systems in phytoremediation of wastewater. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 708, No. 1, p. 012087). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/708/1/012087>
- Mustak, M. B., Iman, Y. E., Abrar, M. F., & Rahman, M. M. S. (2024). Evaluation of the suitability of reusing treated greywater for hydroponic lettuce cultivation: chemical health risk analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 1-28. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04696-1>
- Nayanathara, O. S., & Bindu, A. G. (2017). Effectiveness of water hyacinth and water lettuce for the treatment of greywater-a review. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng*, 3(1), 349-355. <https://ijirse.com/wp-content/upload/2017/03/K1042ijirse.pdf>
- Neofytou, G., Chrysargyris, A., Xylia, P., Botsaris, G., & Tzortzakis, N. (2025). Foliar Iron and Zinc Modulate the Qualitative and Nutritional Status of *Sideritis cypria* with Diverse Rates of Phosphorus in Hydroponic Cultivation. *Agronomy*, 15(5), 1178. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051178>

Nguyen, V. D. T., Huynh, N. T. H., Nguyen, N. H. M., & Ngo, V. T. (2018). The use of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in domestic wastewater treatment. *The Journal of Agriculture and Development*, 17(3), 49-54. <https://doi.org/10.52997/jad.7.03.2018>

Norström, A. (2005). Treatment of domestic wastewater using microbiological processes and hydroponics in Sweden (PhD dissertation, KTH). Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-183>

Novaes de Souza, R., Gheyi, H. R., Santos Gonçalves, K., da Silva Paz, V. P., de Azevedo Neto, A. D., & Soares, T. M. (2020). Treated domestic effluent as a source of water and nutrients in the hydroponic cultivation of ornamental sunflower. *Dyna*, 87(212), 112-119. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.80839>

Ntinis, G. K., Bantis, F., Koukounaras, A., & Kougias, P. G. (2021). Exploitation of liquid digestate as the sole nutrient source for floating hydroponic cultivation of baby lettuce (*Lactuca sativa*) in greenhouses. *Energies*, 14(21), 7199. <https://doi.org/10.3390/en14217199>

Ntinis, G. K., Bantis, F., Koukounaras, A., & Kougias, P. G. (2021). Exploitation of liquid digestate as the sole nutrient source for floating hydroponic cultivation of baby lettuce (*Lactuca sativa*) in greenhouses. *Energies*, 14(21), 7199. <https://doi.org/10.3390/en14217199>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Panja, S., Sarkar, D., & Datta, R. (2020). Removal of antibiotics and nutrients by Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) from secondary wastewater effluent. *International journal of phytoremediation*, 22(7), 764-773. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1710813>

Papadopoulos I., Chimonidou D., Polycarpou P., Savvides S. Irrigation of vegetables and flowers with treated wastewater. In: Lamaddalena N. (ed.), Bogliotti C. (ed.), Todorovic M. (ed.), Scardigno A.(ed.). Water saving in Mediterranean agriculture and future research needs [Vol. 2]. Bari: CIHEAM, 2007. p. 163-171 (Options

Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 56 Vol.II).
https://www.academia.edu/102059774/Irrigation_of_vegetables_and_flowers_with_treated_wastewater

Paucar, N. E., & Sato, C. (2022). Coupling microbial fuel cell and hydroponic system for electricity generation, organic removal, and nutrient recovery via plant production from wastewater. *Energies*, 15(23), 9211. <https://doi.org/10.3390/en15239211>

Pelayo Lind, O., Hultberg, M., Bergstrand, K. J., Larsson-Jönsson, H., Caspersen, S., & Asp, H. (2021). Biogas digestate in vegetable hydroponic production: pH dynamics and pH management by controlled nitrification. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 123-133. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00965-y>

Pilatakis, G., Manios, T., & Tzortzakis, N. (2013). The use of primary and secondary treated municipal wastewater for cucumber irrigation in hydroponic system. *Water Practice and Technology*, 8(3-4), 433-439. <https://doi.org/10.2166/wpt.2013.044>

Qiu, G., Law, Y. M., Das, S., & Ting, Y. P. (2015). Direct and complete phosphorus recovery from municipal wastewater using a hybrid microfiltration-forward osmosis membrane bioreactor process with seawater brine as draw solution. *Environmental science & technology*, 49(10), 6156-6163. <http://dx.doi.org/10.1021/es504554f>

Rios, J. A. A., Ramirez, D., Gini, E. J. B., Valiente, L. S. R., da Silva, G. J., & Giombelli, L. F. (2024). O Hydroponic effluent as an alternative Fertilizer in Bell Pepper Production. *Comunicata Scientiae*, 15, e4249-e4249. <https://doi.org/10.14295/cs.v15.4249>

Rodrigues, M., Lund, R. J., ter Heijne, A., Sleutels, T., Buisman, C. J., & Kuntke, P. (2022). Application of ammonium fertilizers recovered by an Electrochemical System. *Resources, Conservation and Recycling*, 181, 106225. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106225>

Rubert, A., Costa, J. A., Colla, L. M., & Hemkemeier, M. (2024). Valorization of liquid digestate from wastewater and microalgae: a promising proposal for nutrient recovery in hydroponic systems. *Environment, Development and Sustainability*, 1-36. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04726-y>

- Sakuma, S., Endo, R., & Shibuya, T. (2024). Substituting phosphorus and nitrogen in hydroponic fertilizers with a waste derived nutrients solution: pH control strategies to increase substitution ratios. *Chemosphere*, 369, 143805. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143805>
- Santos, O., Vaz, D., Sebastião, F., Sousa, H., & Vieira, J. (2024). Wastewater as a nutrient source for hydroponic production of lettuce: Summer and winter growth. *Agricultural Water Management*, 301, 108966. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108966>
- Saranya, D., & Sabhari, M. (2018). Treatment of grey water by hydroponic technique. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(4), 2715-2722. <https://www.academia.edu/download/56966442/IRJET-V5I4602.pdf>
- Shenoy, R. S., Narayanan, P., & Bhat, S. (2023). Emerging Technologies for Separation and Recycle of Phosphorous from Sewage Sludge for Hydroponic Farming System. *Biorefinery for Water and Wastewater Treatment*, 249-269. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20822-5_12
- Song, J., Heinonen, J., & Sainio, T. (2023). Recovery of ammonium from biomass-drying condensate via ion exchange and its valorization as a fertilizer. *Processes*, 11(3), 815. <https://doi.org/10.3390/pr11030815>
- Takemura, K., Endo, R., Shibuya, T., & Kitaya, Y. (2020). Application of biogas digestate as a nutrient solution for the hydroponic culture of chrysanthemum morifolium ramat with rockwool substrate. *Waste and biomass valorization*, 11, 2645-2650. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00576-8>
- Tetreault, J., Fogle, R., & Guerdat, T. (2021). Towards a capture and reuse model for aquaculture effluent as a hydroponic nutrient solution using aerobic microbial reactors. *Horticulturae*, 7(10), 334. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100334>
- Vaillant, N., Monnet, F., Sallanon, H., Coudret, A., & Hitmi, A. (2003). Treatment of domestic wastewater by an hydroponic NFT system. *Chemosphere*, 50(1), 121-129. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00371-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00371-5)

- Vairavan, B., Jackson, W. A., Green, C., & Morse, A. (2007). Identifying the growth limiting physiochemical parameter for chives grown in biologically treated graywater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184, 5-15. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9380-6>
- Van Nguyen, Q., Nguyen, K. M., Van Hoang, H., Duong, T. D., Dong, M. T. N., & Tran, H. T. M. (2025). Transforming Domestic Wastewater into Hydroponic Nutrients Using Corn-cob-Derived Biochar Adsorption. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02362-7>
- Vavra, L., Gono, M., Klosok-Bazan, I., & Svehlakova, H. (2025). Reuse of Pretreated Household Wastewater for Decentralized Food Production. *Water*, 17(3), 372. <https://doi.org/10.3390/w17030372>
- Villamar, C. A., Vera-Puerto, I., Rivera, D., & De la Hoz, F. (2018). Reuse and recycling of livestock and municipal wastewater in Chilean agriculture: A preliminary assessment. *Water*, 10(6), 817. <https://doi.org/10.3390/w10060817>
- Ward, A. J., Arola, K., Brewster, E. T., Mehta, C. M., & Batstone, D. J. (2018). Nutrient recovery from wastewater through pilot scale electrodialysis. *Water Research*, 135, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.021>
- Wdowikowska, A., Reda, M., Kabała, K., Chohura, P., Jurga, A., Janiak, K., & Janicka, M. (2023). Water and nutrient recovery for cucumber hydroponic cultivation in simultaneous biological treatment of urine and grey water. *Plants*, 12(6), 1286. <https://doi.org/10.3390/plants12061286>
- Weimers, K., Bergstrand, K. J., Hultberg, M., & Asp, H. (2022). Liquid anaerobic digestate as sole nutrient source in soilless horticulture—Or spiked with mineral nutrients for improved plant growth. *Frontiers in Plant Science*, 13, 770179. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.770179>
- Winker, M., Fischer, M., Bliedung, A., Bürgow, G., Germer, J., Mohr, M., ... & Dockhorn, T. (2020). Water reuse in hydroponic systems: a realistic future scenario for Germany? Facts and evidence gained during a transdisciplinary research project. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10(4), 363-379. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.020>

- Worku, A., Tefera, N., Kloos, H., & Benor, S. (2018). Bioremediation of brewery wastewater using hydroponics planted with vetiver grass in Addis Ababa, Ethiopia. *Bioresources and Bioprocessing*, 5, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40643-018-0225-5>
- Xavier, J. F., de Azevedo, C. A. V., de Queiroz Almeida Azevedo, M. R., Dantas, J. F., Filho, A. F. M., & de Lima, V. L. A. (2019). Application of wastewater for production of lettuce ('*Lactuca sativa*') in hydroponic system. *Australian Journal of Crop Science*, 13(10), 1586-1593. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.10.p1752>
- Yadav, S. K., & Rajagopal, K. (2019). Hydroponic Treatment System Plant for Canteen Wastewater Treatment in Park College of Technology. In *Zero Waste* (pp. 187-202). CRC Press. https://www.researchgate.net/profile/Kanagaraj-Rajagopal-2/publication/335564382_Hydroponic_Treatment_System_Plant_for_Canteen_Wastewater_Treatment_in_Park_College_of_Technology/links/61025b3b1e95fe241a95f6d6/Hydroponic-Treatment-System-Plant-for-Canteen-Wastewater-Treatment-in-Park-College-of-Technology.pdf#page=208
- Yousif, Y. I. D., Mohamed, E. S., & El-Gendy, A. S. (2022). Using chlorella vulgaris for nutrient removal from hydroponic wastewater: experimental investigation and economic assessment. *Water Science and Technology*, 85(11), 3240-3258. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.157>
- Zimmermann, M., & Fischer, M. (2020). Impact assessment of water and nutrient reuse in hydroponic systems using Bayesian Belief Networks. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10(4), 431-442. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.026>

Παράρτημα Α: Συγκεντρωτικός πίνακας των 118 μελετών

Συγγραφέας	Τίτλος	Χρονολογία	Πόλη/Χώρα	Τύπος μελέτης	Αποτελέσματα	Κύρια ευρήματα
Adrover, M., Moyà, G., & Vadell, J.	Use of hydroponics culture to assess nutrient supply by treated wastewater	2013	Ισπανία	Πειραματική	Τα λύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως θρεπτικό μέσο σε υδροπονία	Τα επεξεργασμένα λύματα καλύπτουν τις ανάγκες των φυτών σε θρεπτικά συστατικά
Afonso, A., Regato, M., et al.	Reuse of pretreated agro-industrial wastewaters for hydroponic production of lettuce	2023	Πορτογαλία	Πειραματική	Εξετάστηκε η ασφάλεια και η απόδοση της καλλιέργειας με λύματα	Τα προεπεξεργασμένα λύματα είναι κατάλληλα για υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού
Afonso, A., Ribeiro, C., et al.	Pretreated Agro-Industrial Effluents as a Source of Nutrients for Tomatoes...	2023	Πορτογαλία	Πειραματική	Έγινε χρήση λυμάτων σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας	Τα προϊόντα ήταν ασφαλή και η ποιότητα δεν επηρεάστηκε

Aishwarya, J. M., & Vidhya, R.	Study on the efficiency of a hydroponic treatment for removing organic loading...	2023	Ινδία	Πειραματική	Εξετάστηκε η απομάκρυνση οργανικού φορτίου με <i>Amaranthus campestris</i>	Υδροπονικό σύστημα αφαιρεί οργανικό φορτίο και παράγει υγιή φυτά
Al Ajmi, A., Salih, A. A., et al.	Chemical constituents and heavy metals contents of barley fodder...	2009	GCC	Πειραματική	Έγινε μέτρηση μετάλλων σε κριθάρι που καλλιεργήθηκε με λύματα	Τα επίπεδα βαρέων μετάλλων ήταν ασφαλή, η παραγωγή ικανοποιητική
Alayan de, A. B., Qi, W., et al.	Use of reclaimed municipal wastewater in agriculture..	2024	ΗΠΑ	Ανασκόπηση /Συγκριτική	Σύγκριση πρακτικών άρδευσης με λύματα	Τα νέα συστήματα είναι πιο αποδοτικά και ασφαλή
Al-Karaki, G. N.	Utilization of treated sewage wastewater for green forage production..	2011	ΗΑΕ	Πειραματική	Εξετάστηκε η καλλιέργεια ακτηνοτροφικών φυτών με λύματα	Υψηλή παραγωγή και ασφάλεια στο τελικό προϊόν

Almuktar, S. A. A. N., Scholz, M., et al.	Recycling of domestic wastewater treated by vertical-flow wetlands...	2015	Ην. Βασίλειο	Πειραματική	Πιπεριές και τσίλι αναπτύχθηκαν με λύματα	Καλή ανάπτυξη φυτών, μείωση ρύπων
Antón-Herrero, R., García-Delgado, C., et al.	New uses of treated urban waste digestates on stimulation of hydroponically grown tomato	2021	Ισπανία	Πειραματική	Εξετάστηκε χρήση αστικών υπολειμμάτων σε τομάτα	Τα φυτά παρουσίασαν καλή ανάπτυξη και παραγωγή
Arcas-Pilz, V., Ruff-Salís, M., et al.	Assessing the environmental behavior of alternative fertigation methods...	2021	Ισπανία	Πειραματική	Εναλλακτικά λιπάσματα με struvite σε υδροπονική καλλιέργεια	Η χρήση struvite βελτιώνει την αειφορία
Arola, K., Ward, A., et al.	Transport of pharmaceuticals during electrodialysis	2019	Φινλανδία	Πειραματική	Μελετήθηκε η μεταφορά φαρμακευτικών	Η ηλεκτροδιάλυση μειώνει αποτελεσματικά

	treatment of wastewater				καταλοίπων	ατικά ρύπους
Aslam, T., Mirza, S. A., et al.	Efficiency of treated domestic wastewater to irrigate two rice cultivars...	2023	Πακισ τάν	Πειραματική	Μελέτησε την άρδευση ρυζιού με λύματα	Υψηλές αποδόσεις και ασφαλή προϊόντα
Aydin, M. I., Ozakta c, D., et al.	Desalinatio n and detoxificati on of textile wastewater by novel photocatalyt ic electrolysis. ..	2021	Τουρκ ία	Πειραματική	Χρησιμοπ οιήθηκε καινοτόμο σύστημα καθαρισμο ύ λυμάτων	Το σύστημα μειώνει τοξικότητα και άλατα, κατάλληλο για υδροπονία
Barbos a, G. L., Gadelh a, F. D. A., et al.	Comparison of Land, Water, and Energy Requiremen ts of Lettuce Grown Using Hydroponic ...	2015	ΗΠΑ	Συγκριτική	Σύγκριση υδροπονία ς και συμβατική ς γεωργίας	Η υδροπονία χρειάζεται λιγότερο νερό και γη
Bawiec , A.	Efficiency of nitrogen and	2019	Πολω νία	Πειραματική	Αφαίρεση αζώτου και	Υδροπονία απομακρύν ει

	phosphorus compounds removal in hydroponic wastewater. ..				φωσφόρου με υδροπονικά συστήματα	αποτελεσματικά θρεπτικά ρύπους
Bergstr and, K. J., Asp, H., & Hultberg, M.	Utilizing anaerobic digestates as nutrient solutions in hydroponic production systems	2020	Σουηδία	Πειραματική	Χρήση αναερόβιων διαλυμάτων ως λίπασμα	Καλή ανάπτυξη φυτών, μείωση εξάρτησης από ανόργανα λιπάσματα
Bhat, M. A., Abbasi, T., & Abbasi, S. A.	Soil-less use of aquatic macrophytes in wastewater treatment...	2017	Ινδία	Πειραματική	Εφαρμοσμένη βιοαντιδραστική με υδρόβια φυτά	Τα φυτά απομακρύνουν οργανικούς ρύπους από λύματα
Bliedung, A., Dockhorn, T., et al.	Experiences of running a hydroponic system in a pilot scale for resource-efficient water reuse	2020	Γερμανία	Πιλοτική μελέτη	Επαναχρησιμοποίηση νερού σε πιλοτικό υδροπονικό σύστημα	Υψηλή απόδοση, οικονομία στο νερό
Boyden, B. H.,	Recycling nutrients	1996	ΗΠΑ	Πειραματική	Επανέχρηση	Δυνατότητα

& Rababa h, A. A.	from municipal wastewater				θρεπτικών από αστικά λύματα	ανακύκλωσ ης θρεπτικών για καλλιέργει α
Calabri a, J. L., Lens, P. N., & Yeh, D. H.	Zeolite ion exchange to facilitate anaerobic membrane bioreactor wastewater nitrogen recovery...	2019	ΗΠΑ	Πειραματική	Ανάκτηση αζώτου με ζεόλιθο για χρήση στη φύτευση	Βελτιώθηκ ε η λίπανση και η ανάπτυξη του μαρουλιού
Carrera s- Semper e, M., Caceres , R., et al.	Use of recovered struvite and ammonium nitrate in fertigation in tomato production.. .	2021	Ισπανί α	Πειραματική	Χρήση ανακτημέν ων λιπασμάτ ων σε υδροπονικ ή τομάτα	Καλή απόδοση και βιώσιμη λύση για λίπανση
Carvalh o, R. D. S. C., Bastos, R. G., & Souza, C. F.	Influence of the use of wastewater on nutrient absorption and production of lettuce...	2018	Βραζι λία	Πειραματική	Χρήση λυμάτων σε υδροπονία μαρουλιού	Τα μαρούλια απορρόφησ αν θρεπτικά και είχαν καλή παραγωγή

Chekli, L., Kim, J. E., et al.	Fertilizer drawn forward osmosis process for sustainable water reuse to grow hydroponic lettuce...	2017	Κορέα	Πειραματική	Ανάκτηση θρεπτικών με μεμβράνες για μαρούλι	Ασφαλής και αποτελεσματική λύση για υδροπονία
Chimi, A. N., Lekeufack, M., et al.	Treated Domestic Sewage as A Nutrient Source for Tomatoes Growth and Yield in A Hydroponic System	2024	Καμερούν	Πειραματική	Λύματα ως πηγή θρεπτικών σε τομάτα	Υψηλή ανάπτυξη και απόδοση καρπών
Chow, K. K., Wang, J. Y., & Tay, J. H.	Hydroponic cultivation of leafy vegetables in primary and secondary municipal wastewater	2000	Σιγκαπούρη	Πειραματική	Υδροπονική καλλιέργεια λαχανικών με αστικά λύματα	Ασφαλή προϊόντα και καλή ανάπτυξη
Clyde-Smith, D., &	Engineering hydroponic systems for	2023	Ην. Βασίλειο	Ανασκόπηση	Περιγραφή υδροπονικών	Τα υδροπονικά συστήματα

Campo s, L. C.	sustainable wastewater treatment and plant growth				ών συστημάτ ων για καθαρισμό και καλλιέργει α	είναι αποδοτικά για ταυτόχρονη επεξεργασί α και παραγωγή
Correia , T., Regato, M., et al.	Manual treatment of urban wastewater by chemical precipitatio n for production of hydroponic nutrient solutions	2020	Πορτο γαλία	Πειραματική	Χημική καθίζηση για δημιουργί α διαλυμάτω ν	Παράγοντα ι ασφαλή διαλύματα για υδροπονικέ ς καλλιέργειε ς
Czuba, K., Bastrzy k, A., et al.	Towards the circular economy— A pilot- scale membrane technology for the recovery of water and nutrients...	2021	Πολω νία	Πιλοτική	Ανάκτηση νερού και θρεπτικών από λύματα με μεμβράνες	Υψηλή απόδοση, συμβολή στην κυκλική οικονομία
da Silva Cuba,	Potential of domestic	2015	Βραζι λία	Πειραματική	Επεξεργασ μένα	Τα φυτά αναπτύχθη

R., do Carmo, J. R., et al.	sewage effluent treated as a source of water and nutrients in hydroponic lettuce				λύματα για μαρούλι σε υδροπονία	καν καλά και δεν εντοπίστηκαν ρύποι
Damas ceno, L. M., Andrad e Júnior, A. S. D., & Gheyi, H. R.	Cultivation of gerbera irrigated with treated domestic effluents	2010	Βραζιλία	Πειραματική	Επανεξέταση λυμάτων για άνθη γερμπέρα	Τα φυτά ήταν υγιή και διακοσμητικά
Dannehl, D., Huyskens-Keil, S., et al.	Influence of intermittent-direct-electric-current (IDC) on phytochemical compounds in garden cress during growth	2012	Γερμανία	Πειραματική	Μελέτη επίδρασης ηλεκτρικού ρεύματος σε φυτά κάρδαμου	Βελτίωση στη σύνθεση φυτοχημικών
de Souza,	Treated domestic	2024	Βραζιλία	Πειραματική	Υδροπονικές	Ασφαλής ανάπτυξη

M. V. D. S., Sala, F. C., et al.	wastewater for water and nutrient supply in strawberry trough culture system				φράουλες με επεξεργασ μένα λύματα	και καλή απόδοση
Delaide , B., Teerlin ck, S., et al.	Effect of wastewater from a pikeperch recirculated aquaculture system on hydroponic tomato production and quality	2019	Βέλγι ο	Πειραματική	Χρήση υδάτων ιχθυοκαλλ ιέργειας για υδροπονικ ή τομάτα	Τα φυτά είχαν καλή ποιότητα και παραγωγή
Dube, P. J., Vanotti , M. B., et al.	Enhancing recovery of ammonia from swine manure anaerobic digester effluent using gas- permeable membrane technology	2016	ΗΠΑ	Πειραματική	Τεχνολογί α μεμβρανώ ν για ανάκτηση αμμωνίας	Υψηλή απόδοση ανάκτησης και βελτίωση στη διαχείριση λυμάτων

Ebert, B., Dockhorn, T., et al.	Operator models for the reuse of municipal wastewater in hydroponic systems: potentials and options for Central and Mediterranean Europe	2019	Γερμανία	Παρουσίαση/ Συνοπτική	Εναλλακτικά μοντέλα διαχείρισης λυμάτων για υδροπονία	Υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής σε πολλές περιοχές
Egbulkem, P. N., Mierzwka, J. C., & Saroj, D. P.	Assessment of suspended growth biological process for treatment and reuse of mixed wastewater for irrigation of edible crops under hydroponic conditions	2020	Πολωνία	Πειραματική	Βιολογική επεξεργασία για λύματα σε υδροπονία	Τα αποτελέσματα δείχνουν ασφαλή παραγωγή τροφίμων
El-Nakhel,	An appraisal of	2021	Βέλγιο	Πειραματική	Χρήση παράγωγων	Καλή απορρόφηση

C., Geelen, D., et al.	urine derivatives integrated in the nitrogen and phosphorus inputs of a lettuce soilless cultivation system				ν ούρων ως λίπασμα σε μαρούλι	η θρεπτικών και φυσιολογικ ή ανάπτυξη
El- Shafai, S. A., El- Gohary , F. A., et al.	Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB- duckweed ponds system	2007	Αίγυπ τος	Πειραματική	Ανάκτηση θρεπτικών με υδροχαρή φυτά	Τα θρεπτικά απορροφών ται και το νερό καθαρίζει
Emong or, V. E., & Ramole mana, G. M.	Treated sewage effluent (water) potential to be used for horticultural production in Botswana	2004	Μποτ σουάν α	Πειραματική	Επανεχρη ση λυμάτων για καλλιέργει ες	Οι καλλιέργει ες ήταν υγιείς και παραγωγικ ές

Eregno, F. E., Moges, M. E., & Heistad, A.	Treated greywater reuse for hydroponic lettuce production in a green wall system: Quantitative health risk assessment	2017	Νορβηγία	Πειραματική	Επανεξέταση γκρίζων υδάτων για μαρούλι σε πράσινο τοίχο	Χαμηλός κίνδυνος και ασφαλής παραγωγή
Eregno, F. E., Moges, M. E., & Heistad, A.	Treated greywater reuse for hydroponic lettuce production in a green wall system: Quantitative health risk assessment	2017	Νορβηγία	Πειραματική	Γκρίζα ύδατα σε μαρούλι υδροπονικά	Ελάχιστοι κίνδυνοι, θετική απόδοση (Eregno et al., 2017)
Fathidareh, E., Nadeem, M., et al.	Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient	2023	Καναδάς	Ανασκόπηση	Διαχείριση θρεπτικών και νερού σε υδροπονία	Αποτελεσματικές στρατηγικές, αύξηση απόδοσης (Fathidareh et al., 2023)

	and water use efficiency in hydroponic systems					
Figueiredo, C. G., Sala, F. C., & Souza, C. F.	Treated domestic sewage as a nutrient source for strawberry under hydroponic cultivation	2021	Βραζιλία	Πειραματική	Υδροπονικές φράουλες με επεξεργασμένα λύματα	Ασφαλής καρποφορία και καλό μέγεθος (Figueiredo et al., 2021)
Fumasoli, A., Etter, B., et al.	Operating a pilot-scale nitrification /distillation plant for complete nutrient recovery from urine	2016	Ελβετία	Πιλοτική	Ανάκτηση θρεπτικών από ούρα για χρήση	Υψηλή απόδοση ανάκτησης θρεπτικών (Fumasoli et al., 2016)
Gebeyehu, A., Shebeshe, N., et al.	Suitability of nutrients removal from brewery wastewater using a hydroponic	2018	Αιθιοπία	Πειραματική	Χρήση Typha latifolia για καθαρισμό ζυθοποιίας	Αποτελεσματική απομάκρυνση θρεπτικών (Gebeyehu et al., 2018)

	technology with Typha latifolia					
Germer , J., Brandt, C., et al.	Growth of lettuce in hydroponics fed with aerobic-and anaerobic– aerobic- treated domestic wastewater	2023	Γερμα νία	Πειραματική	Ανάπτυξη μαρουλιού με διαφορετι κά λύματα	Ικανοποιητ ική ανάπτυξη και ασφάλεια (Germer et al., 2023)
Giri, L., Hussai n, M., et al.	Enhancing tomato yield and nutrition quality through hydroponic cultivation with treated wastewater	2025	Ινδία	Πειραματική	Τομάτα σε υδροπονία με επεξεργασ μένα λύματα	Βελτίωση απόδοσης και ποιότητας (Giri et al., 2025)
Gonçal ves, K. S., Alves, L. S., et al.	Chlorophyll fluorescenc e of basil plants cultivated in a hydroponic system using	2019	Βραζι λία	Πειραματική	Βασιλικός με επεξεργασ μένα λύματα	Καλή φωτοσύνθε ση και υγιής ανάπτυξη (Gonçalves et al., 2019)

	treated domestic wastewater					
Gong, L., Chen, G., et al.	Utilization of rural domestic sewage tailwaters by Ipomoea aquatica in different hydroponic vegetable and constructed wetland systems	2020	Κίνα	Πειραματική	Επεξεργασ ία λυμάτων με Ipomoea aquatica	Υψηλή απομάκρυν ση ρύπων και καλή ανάπτυξη (Gong et al., 2020)
Halbert - Howard, A., Häfner, F., et al.	Evaluating recycling fertilizers for tomato cultivation in hydroponics , and their impact on greenhouse gas emissions	2021	Γερμα νία	Πειραματική	Ανακυκλο ύμενα λιπάσματα για υδροπονικ ή τομάτα	Μείωση εκπομπών και σταθερή απόδοση (Halbert- Howard et al., 2021)
Han, B., Ouyang	Courtyard integrated ecological	2016	Κίνα	Πειραματική	Ενσωμάτω ση συστημάτων	Περιβαλλο ντικά και οικονομικά

, Z., Liu, H., Cui, Z., Lu, Z., & Critten den, J.	system: An ecological engineering practice in China and its economic- environmen tal benefit				ων επεξεργασ ίας λυμάτων	οφέλη (Han et al., 2016)
Ispolno v, K., Aires, L. M., Louren ço, N. D., & Vieira, J. S.	A combined vermifiltrati on- hydroponic system for swine wastewater treatment	2021	Πορτο γαλία	Πίλοτική	Επεξεργασ ία χοιρολυμά των	Αποτελέσμ ατική μείωση ρύπων, επαναχρησι μοποίηση νερού (Ispolnov et al., 2021)
Jakubas zek, A.	Pollutants Removal Efficiency in The Hydroponic Lagoon of The Wastewater Treatment Plant	2022	Πολω νία	Πειραματική	Απομάκρυ νση ρύπων από υδροπονικ ές λίμνες	Υψηλή απομάκρυν ση οργανικών και ανόργανων (Jakubasz ek, 2022)
Jesse, S. D.	Treatment of post hydrotherm al	2019	ΗΠΑ	Πειραματική (διδασκτοική)	Επεξεργασ ία λυμάτων υδροθερμι	Κατάλληλο υπό προϋποθέσ εις για

	liquefaction wastewater and suitability for hydroponic lettuce production				κής υγροποίησης	μαρούλι (Jesse, 2019)
Jesse, S. D., Zhang, Y., Margenot, A. J., & Davidson, P. C.	Hydroponic lettuce production using treated post-hydrothermal liquefaction wastewater (PHW)	2019	ΗΠΑ	Πειραματική	Χρήση PHW σε υδροπονικό μαρούλι	Ικανοποιητική ανάπτυξη, απαιτείται έλεγχος τοξικότητας (Jesse et al., 2019)
Jin, E., Cao, L., Xiang, S., Zhou, W., Ruan, R., & Liu, Y.	Feasibility of using pretreated swine wastewater for production of water spinach in a hydroponic system	2020	Κίνα	Πειραματική	Χρήση προεπεξεργασμένων χοιρολυμάτων	Ασφαλής παραγωγή νεροκάρδαμου (Jin et al., 2020)
Jóźwia kowska, K., &	Efficiency and reliability of	2020	Πολωνία	Πιλοτική	Μακροχρόνια λειτουργία	Υψηλή απόδοση καθαρισμού

Marzec , M.	sewage purification in long-term exploitation of the municipal wastewater treatment plant with activated sludge and hydroponic system				υδροπονικ ών	ύ, αντοχή συστήματο ς (Jóźwiako wska & Marzec, 2020)
Jurga, A., Janiak, K., et al.	Resource recovery from synthetic nitrified urine in the hydroponic cultivation of lettuce	2021	Πολω νία	Πειραματική	Ανάκτηση θρεπτικών από ούρα	Θετικά στην ανάπτυξη μαρουλιού, υψηλή απόδοση (Jurga et al., 2021)
Jurga, A., Ratkiewicz, K., Wdowi kowska , A., Reda, M.,	Urine and grey water based liquid fertilizer– Production and the response of plants	2023	Πολω νία	Πειραματική	Υγρό λίπασμα από ούρα και γκρίζα ύδατα	Θετική ανάπτυξη φυτών, βελτιωμένη αξιοποίηση πόρων (Jurga et al., 2023)

Janicka , M., Chohur a, P., & Janiak, K.						
Keerati urai, P.	Efficiency of wastewater treatment with hydroponics	2013	Ταϊλά νδη	Πειραματική	Υδροπονι κή επεξεργασ ία λυμάτων	Καλή απομάκρυν ση αζώτου και φωσφόρου (Keeratiura i, 2013)
Keller, R., Perim, K., Semion ato, S., Zandon ade, E., Cassini, S., & Gonçal ves, R. F.	Hydroponic cultivation of lettuce (Lactuca sativa) using effluents from primary, secondary and tertiary+ UV treatments	2005	Βραζι λία	Πειραματική	Καλλιέργει α μαρουλιού σε διαφορετι κά λύματα	Ασφαλής παραγωγή με αποδεκτή ποιότητα (Keller et al., 2005)
Keller, R., Perin, K., Souza,	Use of polishing pond effluents to cultivate	2008	Βραζι λία	Πειραματική	Υδροπονι κή καλλιέργει α μαρουλιού	Ικανοποιητ ική ανάπτυξη, καλή ποιότητα

W. G., Cruz, L. S., Zandonade, E., Cassini, S. T. A., & Goncalves, R. F.	lettuce in a hydroponic system				με λύματα λιμνοδεξαμενών	(Keller et al., 2008)
Kennard, N., Stirling, R., Prashar, A., & Lopez-Capel, E.	Evaluation of recycled materials as hydroponic growing media	2020	Ηνωμένο Βασίλειο	Πειραματική	Αξιολόγηση ανακυκλωμένων υποστρωμάτων	Καλή απόδοση, συμβατότητα με λύματα (Kennard et al., 2020)
Kreuzig, R., Haller-Jans, J., Bischoff, C., Leppin, J., Germer, J., Mohr, M., ...	Reclaimed water driven lettuce cultivation in a hydroponic system: the need of micropollutant removal by	2021	Γερμανία	Πειραματική	Εφαρμογή ανακτημένου νερού για υδροπονία	Σημαντική η αφαίρεση μικρορυπαντών (Kreuzig et al., 2021)

& Dockhorn, T.	advanced wastewater treatment					
Krishnasamy, K., Nair, J., & Bäumel, B.	Hydroponic system for the treatment of anaerobic liquid	2012	Αυστραλία	Πειραματική	Υδροπονία για καθαρισμό αναερόβιων υγρών	Καλή απομάκρυνση ρύπων, χρήσιμο υπόστρωμα (Krishnasamy et al., 2012)
Kumar, R. R., & Cho, J. Y.	Reuse of hydroponic waste solution	2014	N. Κορέα	Πειραματική	Ανακύκλωση θρεπτικών από λύματα υδροπονίας	Επαναχρησιμοποίηση εφικτή, περιβαλλοντικά οφέλη (Kumar & Cho, 2014)
Kuntke, P., Śmiechowski, K., Bruninga, H., Zeemans, G., Saakes, M., Sleutels, T. H. J. A., ... &	Ammonium recovery and energy production from urine by a microbial fuel cell	2012	Ολλανδία	Πειραματική	Ανάκτηση αμμωνίου από ούρα	Συνδυασμένη ανάκτηση θρεπτικών και ενέργειας (Kuntke et al., 2012)

Buisman, C. J. N.						
Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Ahmad, A., Mohd Said, N. S., Mohd Rahim, N. F., ... & Purwanti, I. F.	Potential of valuable materials recovery from aquaculture wastewater: an introduction to resource reclamation	2021	Ινδονησία	Ανασκόπηση	Ανάκτηση υλικών από υγρά ιχθυοκαλλιεργείας	Υδροπονικές εφαρμογές και βιώσιμη χρήση (Kurniawan et al., 2021)
Lee, E., Rout, P. R., & Bae, J.	The applicability of anaerobically treated domestic wastewater as a nutrient medium in hydroponic	2021	N. Κορέα	Πειραματική	Εφαρμογή αναερόβιων λυμάτων για μαρούλι	Απαιτείται διαχείριση τοξικότητας αζώτου (Lee et al., 2021)

	lettuce cultivation: Nitrogen toxicity and health risk assessment					
Lopez- Galvez, F., Allende , A., Pedrero - Salcedo , F., Alarco n, J. J., & Gil, M. I.	Safety assessment of greenhouse hydroponic tomatoes irrigated with reclaimed and surface water	2014	Ισπανί α	Πειραματική	Ασφάλεια τομάτας με ανακτημέν ο νερό	Αποδεκτή ασφάλεια, έλεγχος παθογόνων (Lopez- Galvez et al., 2014)
Madeir a, L., Ribau Teixeir a, M., Nunes, S., Almeid a, A., & Carvalh o, F.	Reuse of Treated Slaughterho use Wastewater from Immediate One-Step Lime Precipitatio n and Atmospheri c	2024	Πορτο γαλία	Πειραματική	Υδροπονι κή καλλιέργει α με ανακτημέν α λύματα σφαγείου	Υψηλή ποιότητα φυτών, διαχείριση pH απαραίτητη (Madeira et al., 2024)

	Carbonation to Produce Aromatic Plants in Hydroponic s					
Mai, C., Mojiri, A., Palanis ami, S., Altaee, A., Huang, Y., & Zhou, J. L.	Wastewater hydroponics for pollutant removal and food production: principles, progress and future outlook	2023	Κίνα/ Διεθν ής	Ανασκόπηση	Περιγραφ ή αρχών και πρακτικών υδροπονικ ής επεξεργασ ίας λυμάτων	Υδροπονία χρήσιμη για επεξεργασί α και παραγωγή τροφής (Mai et al., 2023)
Mathe, L. O. J., Ramsu mer, S., Brink, H. G., & Nicol, W.	Aerobic Polishing of Liquid Digestate for Preparation of Hydroponic Fertiliser	2024	Νότια Αφρικ ή	Πειραματική	Πολυβάθμ ια επεξεργασ ία χωνεμένου υπολείμμα τος	Ασφαλής χρήση ως λίπασμα σε υδροπονία (Mathe et al., 2024)
Mauere r, M., Rocksc h, T., Danneh l, D.,	Replacing mineral fertilizer with nitrified human	2023	Γερμα νία	Πειραματική	Αξιολόγη ση νιτρωμέν ων ανθρώπιν ων ούρων	Αντίστοιχη απόδοση με ανόργανα λίπάσματα (Mauerer et al., 2023)

Schuch, I., Mewis, I., Förster, N., ... & Schmid t, U.	urine in hydroponic lettuce (Lactuca sativa L.) production				ως λίπασμα	
Mauere r, M., Rocksc h, T., Danneh l, D., Schuch, I., Mewis, I., Förster, N., ... & Schmid t, U.	Impact of different concentrations of nitrified urine in a recirculating nutrient solution on growth, yield and quality of lettuce	2018	Γερμανία	Πειραματική	Μελέτη διαφόρων συγκεντρώσεων νιτρωμένων ούρων	Εύρος συγκεντρώσεων με θετικά και αρνητικά αποτελέσματα (Mauerer et al., 2018)
Medri, V., Papa, E., Landi, E., Magget ti, C., Pinelli, D., &	Ammonium removal and recovery from municipal wastewater by ion exchange using a metakaolin	2022	Ιταλία	Πειραματική	Απομάκρυνση αμμωνίου από λύματα με γεωπολυμερή	Αποτελεσματική ανάκτηση αμμωνίου (Medri et al., 2022)

Frascar i, D.	K-based geopolymer					
Morilla s- España, A., Pérez- Crespo, R., Villaró- Cos, S., Rodríg uez- Chikri, L., & Lafarga , T.	Integrating microalgae- based wastewater treatment, biostimulan t production, and hydroponic cultivation: a sustainable approach to water managemen t and crop production	2024	Ισπανί α	Πειραματική	Συνδυασμ ός φυκών, υδροπονία ς και ανακτημέν ων λυμάτων	Ολοκληρω μένη διαχείριση, αύξηση βιωσιμότητ ας (Morillas- España et al., 2024)
Mustaf a, H. M., Hayder, G., Solihin, M. I., & Saeed, R. A.	Application s of constructed wetlands and hydroponic systems in phytoremed iation of wastewater	2021	Ιράκ/ Ασία	Ανασκόπηση	Αξιολόγη ση συστημάτ ων υδροπονία ς/τεχνητώ ν υγροτόπω ν	Υδροπονία αποτελεσμ ατική σε φυτοκαθαρ ισμό (Mustafa et al., 2021)

Mustak , M. B., Iman, Y. E., Abrar, M. F., & Rahmana, M. M. S.	Evaluation of the suitability of reusing treated greywater for hydroponic lettuce cultivation: chemical health risk analysis	2024	Μπανγκλαντές	Πειραματική	Καλλιέργεια μαρουλιού με γκρίζα ύδατα	Αξιολόγηση κινδύνων, κατάλληλο με διαχείριση ρύπων (Mustak et al., 2024)
Nayanathara, O. S., & Bindu, A. G.	Effectiveness of water hyacinth and water lettuce for the treatment of greywater-a review	2017	Ινδία	Ανασκόπηση	Χρήση υδροχαρών φυτών σε γκρίζα ύδατα	Υψηλή απομάκρυνση ρύπων, δυνατότητα ανακύκλωσης (Nayanathara & Bindu, 2017)
Συγγραφέας	Τίτλος	Χρονολογία	Πόλη/Χώρα	Τύπος μελέτης	Αποτελέσματα	Κύρια ευρήματα
Neofytou, G., Chrysargyris, A., Xylia, P., Botsari	Foliar Iron and Zinc Modulate the Qualitative and Nutritional Status of	2025	Κύπρος	Πειραματική	Επίδραση ιχνοστοιχείων σε φαρμακευτικά φυτά	Βελτίωση ποιότητας με υδροπονική διαχείριση (Neofytou et al., 2025)

s, G., & Tzortza kis, N.	Sideritis cypria with Diverse Rates of Phosphorus in Hydroponic Cultivation					
Nguyen , V. D. T., Huynh, N. T. H., Nguyen , N. H. M., & Ngo, V. T.	The use of water spinach (Ipomoea aquatica) in domestic wastewater treatment	2018	Βιετν άμ	Πειραματική	Χρήση λαχανικών υδροχαρώ ν για καθαρισμό οικιακών λυμάτων	Σημαντική απομάκρυν ση θρεπτικών και ρύπων (Nguyen et al., 2018)
Norströ m, A.	Treatment of domestic wastewater using microbiolog ical processes and hydroponics in Sweden	2005	Σουηδ ία	Διδακτορική διατριβή	Ενσωμάτω ση υδροπονία ς και μικροβιακ ής επεξεργασ ίας	Βελτιωμέν η επεξεργασί α οικιακών λυμάτων (Norström, 2005)
Novaes de Souza,	Treated domestic effluent as a	2020	Βραζι λία	Πειραματική	Καλλιέργε ια ηλίανθου	Ικανοποιητ ική ανάπτυξη

R., Gheyi, H. R., Santos Gonçal ves, K., da Silva Paz, V. P., de Azeved o Neto, A. D., & Soares, T. M.	source of water and nutrients in the hydroponic cultivation of ornamental sunflower				με επεξεργασ μένα οικιακά λύματα	και άνθηση (Novaes de Souza et al., 2020)
Ntinas, G. K., Bantis, F., Kouko unaras, A., & Kougia s, P. G.	Exploitation of liquid digestate as the sole nutrient source for floating hydroponic cultivation of baby lettuce (Lactuca sativa) in greenhouses	2021	Ελλάδ α	Πειραματική	Υγρός χωνευτής ως λίπασμα για μαρούλι	Εφικτή καλλιέργει α, διαχείριση αλάτων απαραίτητη (Ntinas et al., 2021)
Panja, S., Sarkar,	Removal of antibiotics and	2020	Ινδία	Πειραματική	Εφαρμογή φυτοκαθα ρισμού με	Μείωση αντιβιοτικ ών και

D., & Datta, R.	nutrients by Vetiver grass (Chrysopog on zizanioides) from secondary wastewater effluent				Vetiver σε λύματα	θρεπτικών, ασφαλής υδροπονία (Panja et al., 2020)
Papado poulos I., Chimo nidou D., Polycar pou P., Savvid es S.	Irrigation of vegetables and flowers with treated wastewater	2007	Ελλάδ α/Κύπ ρος	Πειραματική	Πότισμα λαχανικών με ανακτημέν α λύματα	Ασφάλεια, παραγωγικ ότητα, περιορισμό ς παθογόνων (Papadopo ulos et al., 2007)
Paucar, N. E., & Sato, C.	Coupling microbial fuel cell and hydroponic system for electricity generation, organic removal, and nutrient recovery via plant	2022	Περού /Ιαπωνί α	Πειραματική	Συνδυασμ ός MFC και υδροπονία ς για ανάκτηση θρεπτικών	Παραγωγή βιοενέργεια ς και ασφαλής υδροπονική καλλιέργει α (Paucar & Sato, 2022)

	production from wastewater					
Pelayo Lind, O., Hultber g, M., Bergstr and, K. J., Larsson - Jönsson , H., Caspers en, S., & Asp, H.	Biogas digestate in vegetable hydroponic production: pH dynamics and pH managemen t by controlled nitrification	2021	Σουηδ ία	Πειραματική	Διαχείριση pH σε καλλιέργει ες με βιοϋπολεί μματα	Σταθερή ανάπτυξη λαχανικών, σημασία ελέγχου pH (Pelayo Lind et al., 2021)
Pilataki s, G., Manios , T., & Tzortza kis, N.	The use of primary and secondary treated municipal wastewater for cucumber irrigation in hydroponic system	2013	Ελλάδ α	Πειραματική	Πότισμα αγγουριών με αστικά λύματα	Καλή παραγωγή, ανάγκη επιπλέον απολύμανσ ης (Pilatakis et al., 2013)
Συγγρα φέας	Τίτλος	Χρονο λογία	Πόλη/ Χώρα	Τύπος μελέτης	Αποτελέσ ματα	Κύρια ευρήματα

Qiu, G., Law, Y. M., Das, S., & Ting, Y. P.	Direct and complete phosphorus recovery from municipal wastewater using a hybrid microfiltration-forward osmosis membrane bioreactor process with seawater brine as draw solution	2015	Σύγκριση	Πειραματική	Αποδοτική ανάκτηση φωσφόρου από αστικά λύματα	Υψηλή απόδοση φωσφόρου, δυνατότητα ανακύκλωσης (Qiu et al., 2015)
Rios, J. A. A., Ramirez, D., Gini, E. J. B., Valiente, L. S. R., da Silva, G. J., & Giomb	Hydroponic effluent as an alternative Fertilizer in Bell Pepper Production	2024	Βραζιλία	Πειραματική	Εφαρμογή αποβλήτων υδροπονίας σε πιπεριές	Βελτίωση παραγωγής, διατήρηση ποιότητας καρπών (Rios et al., 2024)

elli, L. F.						
Rodrigues, M., Lund, R. J., ter Heijne, A., Sleutels, T., Buisman, C. J., & Kuntke, P.	Application of ammonium fertilizers recovered by an Electrochemical System	2022	Ολλανδία	Πειραματική	Χρήση ανακτημένων αμμωνιακών λιπασμάτων	Αποτελεσματική λίπανση, μείωση περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Rodrigues et al., 2022)
Rubert, A., Costa, J. A., Colla, L. M., & Hemke meier, M.	Valorization of liquid digestate from wastewater and microalgae: a promising proposal for nutrient recovery in hydroponic systems	2024	Βραζιλία	Πειραματική	Αξιοποίηση υγρού χωνευμένου με μικροφύκη	Βελτιωμένη ανάπτυξη φυτών, μείωση αποβλήτων (Rubert et al., 2024)
Sakuma, S., Endo,	Substituting phosphorus and	2024	Ιαπωνία	Πειραματική	Υποκατάσταση φωσφόρου	Αποτελεσματικός έλεγχος pH

R., & Shibuya, T.	nitrogen in hydroponic fertilizers with a waste derived nutrients solution: pH control strategies to increase substitution ratios				και αζώτου με λύματα	για βιώσιμη υδροπονία (Sakuma et al., 2024)
Santos, O., Vaz, D., Sebastião, F., Sousa, H., & Vieira, J.	Wastewater as a nutrient source for hydroponic production of lettuce: Summer and winter growth	2024	Πορτο γαλία	Πειραματική	Σύγκριση καλλιιεργει ών μαρουλιού με λύματα ανά εποχή	Καλή ανάπτυξη, μεταβλητή ποιότητα αναλόγως εποχής (Santos et al., 2024)
Saranya, D., & Sabhari, M.	Treatment of grey water by hydroponic technique	2018	Ινδία	Πειραματική	Επεξεργασ ία γκρίζων υδάτων με υδροπονία	Αποτελεσμ ατική απομάκρυν ση ρύπων, ασφαλής άρδευση (Saranya & Sabhari, 2018)

Shenoy , R. S., Narayan, P., & Bhat, S.	Emerging Technologies for Separation and Recycling of Phosphorus from Sewage Sludge for Hydroponic Farming System	2023	Ινδία	Ανασκόπηση /Πειραματική	Νέες τεχνολογίες για ανάκτηση φωσφόρου από ιλύ	Υποσχόμενα αποτελέσματα για ανακύκλωση σε υδροπονία (Shenoy et al., 2023)
Song, J., Heinonen, J., & Sainio, T.	Recovery of ammonium from biomass-drying condensate via ion exchange and its valorization as a fertilizer	2023	Φινλανδία	Πειραματική	Ανάκτηση αμμωνίας από βιομάζα	Καλή αποδοτικότητα, εφαρμογή ως λίπασμα υδροπονίας (Song et al., 2023)
Takemura, K., Endo, R., Shibuya, T., &	Application of biogas digestate as a nutrient solution for the hydroponic	2020	Ιαπωνία	Πειραματική	Εφαρμογή χωνευμένου βιοαερίου σε χρυσάνθεμο	Ικανοποιητική ανάπτυξη, ανάγκη παρακολούθησης θρεπτικών

Kitaya, Y.	culture of chrysanthemum morifolium ramat with rockwool substrate					(Takemura et al., 2020)
Tetreault, J., Fogle, R., & Guerdat, T.	Towards a capture and reuse model for aquaculture effluent as a hydroponic nutrient solution using aerobic microbial reactors	2021	ΗΠΑ	Πειραματική	Επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων υδατοκαλλιεργείας σε υδροπονία	Αποτελεσματική χρήση υγρών αποβλήτων για ανάπτυξη φυτών (Tetreault et al., 2021)
Vaillant, N., Monnet, F., Sallanon, H., Coudret, A., & Hitmi, A.	Treatment of domestic wastewater by an hydroponic NFT system	2003	Γαλλία	Πειραματική	Καθαρισμός οικιακών λυμάτων με NFT υδροπονικό σύστημα	Αποτελεσματική απομάκρυνση ρύπων, υγείας ανάπτυξη φυτών (Vaillant et al., 2003)
Vairavan, B.	Identifying the growth	2007	ΗΠΑ	Πειραματική	Καλλιέργεια	Εντοπισμός παραμέτρω

Jackson, W. A., Green, C., & Morse, A.	limiting physiochemical parameter for chives grown in biologically treated graywater				σχοινόπρα σου με γκρίζα νερά	ν που περιορίζουν την ανάπτυξη (Vairavan et al., 2007)
Van Nguyen, Q., Nguyen, K. M., Van Hoang, H., Duong, T. D., Dong, M. T. N., & Tran, H. T. M.	Transforming Domestic Wastewater into Hydroponic Nutrients Using Corn cob-Derived Biochar Adsorption	2025	Βιετνάμ	Πειραματική	Μετατροπή αστικών λυμάτων με βιοάνθρακα για υδροπονία	Αποτελεσματική ανάκτηση θρεπτικών, βιώσιμη μέθοδος (Van Nguyen et al., 2025)
Vavra, L., Gono, M., Klosok-Bazan, I., &	Reuse of Pretreated Household Wastewater for Decentraliz	2025	Τσεχία	Πειραματική	Επαναχρησιμοποίηση προεπεξεργασμένων λυμάτων	Καλή παραγωγή φυτών, μικροβιακή ασφάλεια (Vavra et al., 2025)

Svehla kova, H.	ed Food Production				σε οικιακή παραγωγή	
Villamar, C. A., Vera-Puerto, I., Rivera, D., & De la Hoz, F.	Reuse and recycling of livestock and municipal wastewater in Chilean agriculture: A preliminary assessment	2018	Χιλή	Επισκόπηση/ Μελέτη περίπτωσης	Επαναχρησιμοποίηση γεωργικών και αστικών λυμάτων	Πιθανή εξοικονόμηση νερού, περιορισμός υγιεινής (Villamar et al., 2018)
Ward, A. J., Arola, K., Brewster, E. T., Mehta, C. M., & Batstone, D. J.	Nutrient recovery from wastewater through pilot scale electrodialysis	2018	Αυστραλία	Πειραματική	Ανάκτηση θρεπτικών μέσω ηλεκτροδιπίδσης	Υψηλή αποδοτικότητα, εφαρμογή σε υδροπονία (Ward et al., 2018)
Wdowikowska, A., Reda, M., Kabała,	Water and nutrient recovery for cucumber hydroponic cultivation	2023	Πολωνία	Πειραματική	Συνδυασμένη επεξεργασία ούρων/γκρίζου νερού	Ικανοποιητική ανάπτυξη, ασφάλεια χρήσης (Wdowiko

K., Chohur a, P., Jurga, A., Janiak, K., & Janicka , M.	in simultaneou s biological treatment of urine and grey water				για αγγουριά	wska et al., 2023)
Weime rs, K., Bergstr and, K. J., Hultber g, M., & Asp, H.	Liquid anaerobic digestate as sole nutrient source in soilless horticulture —Or spiked with mineral nutrients for improved plant growth	2022	Σουηδ ία	Πειραματική	Υγρός χωνευμένο ς ως θρεπτικό μέσο υδροπονία ς	Καλύτερα αποτελέσμ ατα με ενίσχυση ορυκτών θρεπτικών (Weimers et al., 2022)
Winker , M., Fischer, M., Bliedun g, A., Bürgo w, G., Germer	Water reuse in hydroponic systems: a realistic future scenario for Germany? Facts and	2020	Γερμα νία	Διεπιστημονι κή/Πιλοτική	Επαναχρη σιμοποίησ η νερού σε γερμανικά υδροπονικ ά συστήματ α	Υψηλή αποδοτικότ ητα, κοινωνική αποδοχή προκλήσεω ν (Winker et al., 2020)

, J., Mohr, M., ... & Dockho rn, T.	evidence gained during a transdiscipli nary research project					
Worku, A., Tefera, N., Kloos, H., & Benor, S.	Bioremediat ion of brewery wastewater using hydroponics planted with vetiver grass in Addis Ababa, Ethiopia	2018	Αιθιο πία	Πειραματική	Βιοαποκατ άσταση λυμάτων ζυθοποιίας με υδροπονία	Σημαντική απομάκρυν ση ρύπων, ανάπτυξη vetiver (Worku et al., 2018)
Xavier, J. F., de Azeved o, C. A. V., de Queiro z Almeid a Azeved o, M. R., Dantas,	Application of wastewater for production of lettuce (<i>Lactuca sativa</i>) in hydroponic system	2019	Βραζι λία	Πειραματική	Υδροπονι κή καλλιέργει α μαρουλιού με λύματα	Ασφαλής παραγωγή, ικανοποιητι κή ανάπτυξη (Xavier et al., 2019)

J. F., Filho, A. F. M., & de Lima, V. L. A.						
Yadav, S. K., & Rajago pal, K.	Hydroponic Treatment System Plant for Canteen Wastewater Treatment in Park College of Technology	2019	Ινδία	Πειραματική/ Κεφάλαιο βιβλίου	Καθαρισμ ός λυμάτων εστιατορίο υ με υδροπονικ ό σύστημα	Αποτελεσμ ατική μείωση ρύπων, δυνατότητα επανάχρησ ης (Yadav & Rajagopal, 2019)
Yousif, Y. I. D., Moham ed, E. S., & El- Gendy, A. S.	Using chlorella vulgaris for nutrient removal from hydroponic wastewater: experimenta l investigatio n and economic assessment	2022	Αίγυπ τος	Πειραματική	Χρήση Chlorella vulgaris για καθαρισμό υδροπονικ ών αποβλήτω ν	Αποτελεσμ ατική απορρόφησ η θρεπτικών, οικονομική βιωσιμότητ α (Yousif et al., 2022)

Zimmermann, M., & Fischer, M.	Impact assessment of water and nutrient reuse in hydroponic systems using Bayesian Belief Networks	2020	Γερμανία	Υπολογιστική/Ανάλυση δεδομένων	Επαναχρησιμοποίηση νερού/θρεπτικών σε υδροπονία	Αναγνώριση κινδύνων, αποδοτικότητα σεναρίων (Zimmermann & Fischer, 2020)
Papadopoulos, I., Chimonidou, D., Polycarpou, P., & Savvides, S.	Irrigation of vegetables and flowers with treated wastewater	2007	Κύπρος	Πιλοτική/Επισκόπηση	Άρδευση λαχανικών/ανθέων με επεξεργασμένα λύματα	Καλή ανάπτυξη, κίνδυνοι ρύπανσης παρακολουθούνται (Papadopoulos et al., 2007)
Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Ahmad, A.,	Potential of valuable materials recovery from aquaculture wastewater: an introduction	2021	Ινδονησία	Ανασκόπηση/Εισαγωγική	Ανάκτηση υλικών από υγρά απόβλητα υδατοκαλλιεργειών	Εφικτή ανάκτηση θρεπτικών, περιβαλλοντικά οφέλη (Kurniawan et al., 2021)

Mohd Said, N. S., Mohd Rahim, N. F., ... & Purwanti, I. F.	to resource reclamation					
Halbert - Howard, A., Häfner, F., Karlow sky, S., Schwar z, D., & Krause, A.	Evaluating recycling fertilizers for tomato cultivation in hydroponics , and their impact on greenhouse gas emissions	2021	Γερμα νία	Πειραματική	Ανακύκλω ση λιπασμάτ ων σε υδροπονία τομάτας	Μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίο υ, καλή ανάπτυξη φυτών (Halbert-Howard et al., 2021)
Han, B., Ouyang , Z., Liu, H., Cui, Z., Lu, Z., & Crittenden, J.	Courtyard integrated ecological system: An ecological engineering practice in China and its economic-	2016	Κίνα	Μελέτη περίπτωσης	Ολοκληρω μένο οικολογικ ό σύστημα αυλής με υδροπονία	Περιβαλλο ντικά και οικονομικά οφέλη, ανακύκλωσ η νερού (Han et al., 2016)

	environmen tal benefit					
Paucar, N. E., & Sato, C.	Coupling microbial fuel cell and hydroponic system for electricity generation, organic removal, and nutrient recovery via plant production from wastewater	2022	Περού /Ιαπωνία	Πειραματική	Συνδυασμός κυψέλης καυσίμου μικροβίων με υδροπονία	Ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θρεπτικών ουσιών (Paucar & Sato, 2022)
Pelayo Lind, O., Hultberg, M., Bergstrand, K. J., Larsson - Jönsson, H., Caspersen, S.,	Biogas digestate in vegetable hydroponic production: pH dynamics and pH management by controlled nitrification	2021	Σουηδία	Πειραματική μελέτη.	Τα αποτελέσματα δείχνουν σταθερή παραγωγή λαχανικών με σωστό έλεγχο pH.	Το κύριο εύρημα είναι ότι η σωστή διαχείριση του pH βελτιώνει την απόδοση και την ασφάλεια των καλλιεργειών (Pelayo

& Asp, H.						Lind et al., 2021).
Pilataki s, G., Manios , T., & Tzortza kis, N.	The use of primary and secondary treated municipal wastewater for cucumber irrigation in hydroponic system	2013	Ελλάδ α	Πειραματική μελέτη	Τα αποτελέσμ ατα έδειξαν ασφαλή χρήση επεξεργασ μένων λυμάτων για υδροπονικ ή καλλιέργει α αγγουριού	Κύριο εύρημα: δεν διαπιστώθη καν ρυπογόνα φορτία στους καρπούς (Pilatakis et al., 2013).
Qiu, G., Law, Y. M., Das, S., & Ting, Y. P	Direct and complete phosphorus recovery from municipal wastewater using a hybrid microfiltrati on-forward osmosis membrane bioreactor process with	2015	Σιγκα πούρη	Πειραματική μελέτη	Το αποτέλεσμ α ήταν υψηλή ανάκτηση φωσφόρου	Το κύριο εύρημα αφορά την αποδοτικότ ητα της τεχνολογία ς για επαναχρησι μοποίησης (Qiu et al., 2015).

	seawater brine as draw solution.					
Rios, J. A. A., Ramirez, D., Gini, E. J. B., Valiente, L. S. R., da Silva, G. J., & Giombelli, L. F.	Hydroponic effluent as an alternative Fertilizer in Bell Pepper Production.	2024	Βραζιλία	Πειραματική μελέτη	Αποτελέσματα δείχνουν θετική ανάπτυξη πιπεριάς με χρήση αποβλήτων υδροπονίας	Κύριο εύρημα: αυξημένη βιωσιμότητα
Rodrigues, M., Lund, R. J., Ritter, Heijne, A., Sleutels, T., Buisman, C. J., & Kuntke, P.	Application of ammonium fertilizers recovered by an Electrochemical System	2022	Ολλανδία	Πειραματική μελέτη.	Τα αποτελέσματα επιβεβαιώσαν την αποδοτικότητα του συστήματος (Rodrigues et al., 2022).	Κύριο εύρημα: τα λιπάσματα που ανακτώνται είναι ασφαλή και αποτελεσματικά.

Rubert, A., Costa, J. A., Colla, L. M., & Hemke meier, M.	Valorization of liquid digestate from wastewater and microalgae: a promising proposal for nutrient recovery in hydroponic systems.	2024	Βραζιλία	Εργαστηριακή ή μελέτη	Τα αποτελέσματα έδειξαν επιτυχή ανάκτηση θρεπτικών και ασφάλεια καλλιέργειών	Κύριο εύρημα: το σύστημα είναι φιλικό στο περιβάλλον (Rubert et al., 2024).
Sakuma, S., Endo, R., & Shibuya, T.	Substituting phosphorus and nitrogen in hydroponic fertilizers with a waste derived nutrients solution: pH control strategies to increase substitution ratios	2024	Ιαπωνία	Πειραματική	Η αντικατάσταση μπορεί να φτάσει υψηλά ποσοστά χωρίς μείωση της απόδοσης	Το pH είναι σημαντικό για τη διαχείριση θρεπτικών
Santos, O., Vaz, D., Sebastião	Wastewater as a nutrient source for hydroponic	2024	Πορτογαλία	Πειραματική	Τα λύματα καλύπτουν πλήρως τις	Δεν επηρεάζεται η ποιότητα

ão, F., Sousa, H., & Vieira, J.	production of lettuce: Summer and winter growth				ανάγκες θρεπτικών	της καλλιέργει ας
Sarany a, D., & Sabhari , M.	Treatment of grey water by hydroponic technique	2018	Ινδία	Πειραματική	Σημαντική απομάκρυ νη ρύπων	Βελτιώνεται η ποιότητα του νερού για άρδευση
Shenoy, R. S., Naraya nan, P., & Bhat, S.	Emerging Technologie s for Separation and Recycle of Phosphorou s from Sewage Sludge for Hydroponic Farming System	2023	Ινδία	Βιβλιογραφικ ή ανασκόπηση	Συνοψίζον ται τεχνολογίε ς ανάκτησης φωσφόρου	Οι νέες τεχνολογίες προσφέρου ν ευελιξία και ασφάλεια
Song, J., Heinon en, J., & Sainio, T.	Recovery of ammonium from biomass- drying condensate via ion exchange	2023	Φινλα νδία	Πειραματική	Αποδοτική ανάκτηση αμμωνίου	Αυξάνει την κυκλικότητ α των συστημάτων

	and its valorization as a fertilizer					
Takemura, K., Endo, R., Shibuya, T., & Kitaya, Y.	Application of biogas digestate as a nutrient solution for the hydroponic culture of chrysanthemum morifolium ramat with rockwool substrate	2020	Ιαπωνία	Πειραματική	Θετική επίδραση στα φυτά	Το χωνευμένο υγρό αποτελεί ασφαλή θρεπτική λύση
Tetreault, J., Fogle, R., & Guerdat, T.	Towards a capture and reuse model for aquaculture effluent as a hydroponic nutrient solution using aerobic microbial reactors	2021	ΗΠΑ	Πειραματική	Υψηλή απόδοση στη χρήση αποβλήτων υδατοκαλλιεργείας	Μειώνονται τα απόβλητα και βελτιώνεται η βιωσιμότητα

Vaillant , N., Monnet , F., Sallano n, H., Coudre t, A., & Hitmi, A.	Treatment of domestic wastewater by a hydroponic NFT system	2003	Γαλλία	Πειραματική	Καλή απομάκρυνση θρεπτικών	Το σύστημα NFT μπορεί να χρησιμοποιείται για καθαρισμό λυμάτων
Vairava n, B., Jackson , W. A., Green, C., & Morse, A.	Identifying the growth limiting physiochemical parameter for chives grown in biologically treated graywater	2007	ΗΠΑ	Πειραματική	Ορισμένες παράμετροι περιορίζουν την ανάπτυξη	Η βελτιστοποίηση αυτών αυξάνει τις αποδόσεις
Van Nguyen , Q., Nguyen , K. M., Van Hoang, H., Duong, T. D., Dong,	Transforming Domestic Wastewater into Hydroponic Nutrients Using Corncob-Derived Biochar Adsorption	2025	Βιετνάμ	Πειραματική	Αποτελεσματική προσρόφηση ρύπων	Το biochar αυξάνει την ασφάλεια του νερού

M. T. N., & Tran, H. T. M.						
Vavra, L., Gono, M., Klosok -Bazan, I., & Svehla kova, H.	Reuse of Pretreated Household Wastewater for Decentraliz ed Food Production	2025	Τσεχί α	Πειραματική	Εφικτή χρήση για καλλιέργει ες	Μειώνεται η ανάγκη για φρέσκο νερό