



«Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας»

«Καλλιέργειες υπό Κάλυψη και Υδροπονία»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**«Άρδευση στάγδην έναντι άρδευσης με αυλάκια με επεξεργασμένα υγρά
απόβλητα: απόδοση καλλιεργειών και περιβαλλοντικές επιπτώσεις»**

Λιάπη Ασπασία

A.M. : 522418

Επιβλέπων καθηγητής: Κανάτας Παναγιώτης

Πάτρα, Ιούνιος 2026

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.



**«Άρδευση στάγδην έναντι άρδευσης με αυλάκια με επεξεργασμένα υγρά
απόβλητα: απόδοση καλλιεργειών και περιβαλλοντικές επιπτώσεις»**

Λιάπη Ασπασία

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων καθηγητής

Κανάτας Παναγιώτης

Επίκουρος Καθηγητής, Γεωργίας – Φυτών Μεγάλης Καλλιέργειας

Πανεπιστήμιο Πατρών

Πάτρα, Ιούνιος 2026

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η στάγδην άρδευση συγκριτικά με την άρδευση με αυλάκια κατά τη χρήση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στη γεωργία, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασής τους στην παραγωγή των καλλιεργειών και στο περιβάλλον. Η αυξανόμενη έλλειψη υδάτινων πόρων, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και τις αυξημένες ανάγκες της γεωργικής παραγωγής, καθιστούν αναγκαία την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών νερού και σύγχρονων μεθόδων άρδευσης. Στο πλαίσιο αυτό, η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών και την ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων. Στην εργασία παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της στάγδην άρδευσης και της άρδευσης με αυλάκια, ενώ εξετάζονται οι επιπτώσεις της χρήσης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων μέσω των δύο αυτών μεθόδων, αναδεικνύοντας τόσο τα οφέλη όσο και τους πιθανούς κινδύνους για τις καλλιέργειες και το περιβάλλον. Αναλυτικότερα, εξετάζονται οι επιδράσεις των δύο μεθόδων στην ανάπτυξη και την ποιότητα των καλλιεργειών, στην εξοικονόμηση νερού, στην αλατότητα του εδάφους, στη μεταφορά θρεπτικών στοιχείων και στη ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει ότι η στάγδην άρδευση προσφέρει καλύτερη αξιοποίηση του νερού και μεγαλύτερο έλεγχο στη μεταφορά ρυπαντών και θρεπτικών στοιχείων σε σχέση με την άρδευση με αυλάκια, συμβάλλοντας παράλληλα στη βελτίωση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Ωστόσο, η ασφαλής και αποτελεσματική εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων προϋποθέτει κατάλληλη επεξεργασία των αποβλήτων, συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και ορθολογική διαχείριση των αρδευτικών πρακτικών, ώστε να διασφαλίζεται η προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

Λέξεις – Κλειδιά:

στάγδην άρδευση, άρδευση με αυλάκια, επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, επαναχρησιμοποίηση λυμάτων, επεξεργασία λυμάτων, αρδευτικά συστήματα, λειψυδρία, εξοικονόμηση νερού, αποδοτικότητα χρήσης νερού, βιώσιμη γεωργία, διαχείριση υδάτινων πόρων, ποιότητα αρδευτικού νερού, περιβαλλοντικές επιπτώσεις άρδευσης, ρύπανση υπόγειων υδάτων, ποιότητα καλλιεργειών

“Drip Irrigation versus Furrow Irrigation Using Treated Wastewater: Crop Yield and Environmental Impacts”

LIAPI ASPASIA

ABSTRACT

This diploma thesis examines drip irrigation in comparison with furrow irrigation when using treated wastewater in agriculture, aiming to investigate their impact on crop production and the environment. The increasing scarcity of water resources, combined with the effects of climate change and the growing demands of agricultural production, makes the search for alternative water sources and modern irrigation methods necessary. In this context, the reuse of treated wastewater constitutes a sustainable solution for covering irrigation needs and achieving rational water resource management.

The study presents the technical characteristics of drip irrigation and furrow irrigation, while also examining the effects of using treated wastewater through these two irrigation methods, highlighting both the benefits and the potential risks for crops and the environment. More specifically, the impacts of the two methods on crop growth and quality, water conservation, soil salinity, nutrient transport, and the pollution of groundwater and surface water are investigated.

The literature review indicates that drip irrigation provides more efficient water use and greater control over the transport of pollutants and nutrients compared to furrow irrigation, while also contributing to improved crop productivity. However, the safe and effective implementation of wastewater reuse requires appropriate wastewater treatment, continuous monitoring of water quality, and rational management of irrigation practices in order to ensure the protection of the environment and public health.

Keywords:

drip irrigation, furrow irrigation, treated wastewater, wastewater reuse, wastewater treatment, irrigation systems, water scarcity, water conservation, water use efficiency, sustainable agriculture, water resources management, irrigation water quality, environmental impacts of irrigation, groundwater pollution, crop quality

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT	2
Πίνακας εικόνων	6
ΕΝΟΤΗΤΑ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Η σημασία της εξοικονόμησης νερού στη γεωργία	7
1.2. Το πρόβλημα της έλλειψης νερού και η ανάγκη επαναχρησιμοποίησης	8
1.3 Επεξεργασμένα υγρά απόβλητα ως λύση	9
1.4 Μέθοδοι άρδευσης.....	12
1.4.1 Χαρακτηριστικά των Κύριων Μεθόδων Άρδευσης.....	13
1.4.2 Μέθοδοι Άρδευσης και Ανακτημένο Νερό	17
1.5 Τι εξετάζει η παρούσα εργασία	17
ΕΝΟΤΗΤΑ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ	18
2.1 Στάγδην άρδευση.....	18
2.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	20
2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της στάγδην άρδευσης	22
2.1.3 Απόδοση και ποιότητα	23
2.2 Άρδευση με αυλάκια.....	24
2.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	25
2.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα άρδευσης με αυλάκια.....	26
2.2.3 Καταλληλότητα καλλιεργειών και υδάτινων χαρακτηριστικών στην άρδευση με αυλάκια.....	27
2.3. Ορισμός και στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....	29
2.3.1 Κίνδυνοι και ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων	30
2.3.2 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων και αποδεκτά όρια ποιότητας	33
2.3.3 Κατευθυντήριες οδηγίες και νομοθετικό πλαίσιο	35

ΕΝΟΤΗΤΑ 3: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ.....	37
3.1. Αξιολόγηση της απόδοσης καλλιεργειών	38
3.1.1. Επίδραση της ποιότητας αρδευτικού νερού στην απόδοση.....	38
3.1.2. Επίδραση του αρδευτικού συστήματος και των τεχνικών διαχείρισης.....	39
3.1.3. Σημασία των κατάλληλων μεθόδων λίπανσης και άρδευσης στην απόδοση των φυτών	40
3.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά καρπού ή φυτού	40
3.2.1 pH.....	40
3.2.2 Αλατότητα και SAR	41
3.2.3 Συγκέντρωση Βορίου (B) και Επιπτώσεις στην Παραγωγή.....	42
3.2.4 Επίδραση του Νερού Άρδευσης στην Ποιότητα και Θρεπτική Αξία των Καρπών	42
3.2.5 Βαρέα μέταλλα και συστήματα άρδευσης.....	43
3.2.6 Μικροβιολογική Ποιότητα και Ασφάλεια των Προϊόντων	44
ΕΝΟΤΗΤΑ 4: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	46
4.1 Επιδράσεις στο έδαφος και στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα	47
4.1.1 Χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους: αλατότητα και pH.....	47
4.1.2 Αλατότητα και λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR)	48
4.1.3 Άζωτο και αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων (NUE)	49
4.1.4 Φώσφορος και το φαινόμενο του ευτροφισμού.....	51
4.1.5 Οργανική ύλη και ολικός οργανικός άνθρακας	52
4.1.6 Βαρέα μέταλλα.....	52
ΕΝΟΤΗΤΑ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ (ΕΜ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΓΑΛΑΚΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ	55
ΕΝΟΤΗΤΑ 6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	57

6.1 Αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού (IWUE) υπό επιφανειακή και στάγδην άρδευση.....	57
6.2 Οικονομική Αξιολόγηση και Συγκριτική Ανάλυση Μεθόδων Άρδευσης.....	59
6.2.1. Οικονομική Βιωσιμότητα: Επιλογή Συστημάτων Άρδευσης και Παράγοντες Κέρδους.....	59
6.2.2 Κόστος Λειτουργίας, Συντήρησης και Χρήση Νερού	60
ΕΝΟΤΗΤΑ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1: Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για αρδευτικούς σκοπούς (Mishra et al., 2023).....	9
Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....	10
Εικόνα 3: Μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	11
Εικόνα 4: Σύστημα άρδευσης με καταιονισμό (Spanu et al., 2024).....	13
Εικόνα 5: Σύστημα επιφανειακής άρδευσης με λεκάνες (Rai et al., 2017)	14
Εικόνα 6: Σύστημα άρδευσης με λωρίδες (Rahman, n.d.).....	15
Εικόνα 7: Σύστημα άρδευσης με αυλάκια (Pathik et al., 2014)	16
Εικόνα 8: Θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριού υπό τη μέθοδο στάγδην άρδευσης. Ίδια λήψη	19
Εικόνα 9: Σύστημα στάγδην άρδευσης (Wikipedia, n.d.).....	20
Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος στάγδην άρδευσης που χρησιμοποιείται στην περιοχή μελέτης της άνυδρης βορειοδυτικής Κίνας (Chuanjie et al., 2015).	21
Εικόνα 11: Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος στάγδην άρδευσης (Jha et al., 2015)	22
Εικόνα 12: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος άρδευσης με αυλάκια από τους Nuwarapaksha et al. (2025).....	25
Εικόνα 13: Σύστημα άρδευσης με αυλάκια (Abou Seeda et al., 2020)	26
Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασία λυμάτων (Nathanson & Ambulkar, 2026).	30
Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση μιας σύγχρονης μονάδας επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης λυμάτων στη Δυτική Ορντουρμάν (Ahmed et al., 2024).	37
Εικόνα 16: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην άρδευση (Ofori et al., 2021).....	46
Εικόνα 17: EM μικροοργανισμοί. Ίδια λήψη	55
Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με χρήση μικροοργανισμών EM (Ali et al., 2021).....	56

ΕΝΟΤΗΤΑ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η σημασία της εξοικονόμησης νερού στη γεωργία

Το νερό αποτελεί έναν από τους πιο πολύτιμους και αναγκαίους φυσικούς πόρους, καθώς η ύπαρξη της ζωής και η λειτουργία των σύγχρονων κοινωνιών και της βιομηχανίας εξαρτώνται άμεσα από αυτό. Η διαθεσιμότητα επαρκών ποσοτήτων γλυκού νερού συμβάλλει καθοριστικά στην οικονομική ανάπτυξη, την κοινωνική ευημερία και τη διατήρηση μόνιμων και βιώσιμων κοινοτήτων. Παρ' όλα αυτά, τα παγκόσμια αποθέματα καθαρού γλυκού νερού μειώνονται σταθερά. Σε πολλές περιοχές, η κατανάλωση νερού υπερβαίνει τους διαθέσιμους υδάτινους πόρους, ενώ η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση επιτείνουν το πρόβλημα. Ως αποτέλεσμα, οι ελλείψεις γλυκού νερού γίνονται ολοένα και πιο αισθητές σε διάφορα μέρη του κόσμου (Hussain et al., 2019).

Με τη ζήτηση για νερό να αυξάνεται, το φαινόμενο της λειψυδρίας αποτελεί πλέον σημαντική ανησυχία για πολλές περιοχές του πλανήτη, και όχι μόνο για την ΕΕ. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα γλυκού νερού επιφέρει κοινωνικές και υγειονομικές επιπτώσεις, μειωμένη γεωργική παραγωγή, δυσχέρειες στη βιομηχανία, αλλά και αυξημένο κίνδυνο ξηρασιών και πυρκαγιών (Veolia, 2022). Για τον λόγο αυτό, η εξοικονόμηση νερού και η αποδοτικότερη αξιοποίησή του συνιστούν κρίσιμες στρατηγικές προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, με σκοπό τη διασφάλιση της επαρκούς διαθεσιμότητας και της αειφόρου διαχείρισης των υδάτινων πόρων για οικιακές, βιομηχανικές και γεωργικές χρήσεις (A. F. Santos et al., 2023).

Η γεωργική παραγωγή προϋποθέτει σημαντικές ποσότητες νερού, γεγονός που καθιστά τον γεωργικό τομέα τον μεγαλύτερο καταναλωτή αντλούμενου γλυκού νερού παγκοσμίως. Σύμφωνα με τους Ventura et al. (2019), περίπου το 70% του αντλούμενου νερού χρησιμοποιείται για γεωργική άρδευση. Εάν δεν αναζητηθεί κάποια εναλλακτική πηγή νερού για άρδευση, πέρα από το γλυκό νερό, ο τομέας ενδέχεται να πληγεί σοβαρά. Οι επιπτώσεις θα είναι ακόμη μεγαλύτερες σε περιοχές με λειψυδρία, όπως οι άνυδρες και οι ημιάνυδρες περιοχές (Ofori et al., 2021).

1.2. Το πρόβλημα της έλλειψης νερού και η ανάγκη επαναχρησιμοποίησης

Η κατανάλωση γλυκού νερού έχει αυξηθεί έξι φορές από το 1900, ως αποτέλεσμα της παγκόσμιας πληθυσμιακής αύξησης και της οικονομικής ανάπτυξης, η οποία συνοδεύεται από πιο απαιτητικά πρότυπα χρήσης φυσικών πόρων (Ritchie & Roser, 2018). Το 2014, υπολογίζεται ότι περίπου 4 τρισεκατομμύρια m³ γλυκού νερού χρησιμοποιήθηκαν παγκοσμίως για γεωργικούς, βιομηχανικούς και οικιακούς σκοπούς (Ritchie & Roser, 2018). Ωστόσο, η βιωσιμότητα αυτού του κρίσιμου πόρου εξαρτάται από τη διατήρηση ενός ρυθμού άντλησης μικρότερου από τον ρυθμό φυσικής αναπλήρωσης. Ενδεικτικά, οι ανανεώσιμοι πόροι γλυκού νερού της Ευρωπαϊκής Ένωσης (όπως ροές ποταμών και υπόγεια ύδατα που προέρχονται από βροχοπτώσεις) μειώθηκαν κατά 17% μεταξύ 1962 και 2018 (Ritchie & Roser, 2018).

Η γεωργική άρδευση αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή γλυκού νερού παγκοσμίως (Hashem & Qi, 2021). Στην ΕΕ, το 2017, το 32% του αντληθέντος γλυκού νερού χρησιμοποιήθηκε για γεωργία, ενώ χώρες όπως η Σουηδία, η Πολωνία και η Δανία κατανάλωσαν μόλις το 3%, 10% και 16% αντίστοιχα για τον ίδιο σκοπό. Αντιθέτως, κράτη όπως η Πορτογαλία, η Κύπρος και η Ισπανία παρουσίασαν πολύ υψηλότερες τιμές από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο (79%, 59% και 65% αντίστοιχα) (Ritchie & Roser, 2018). Παγκοσμίως, η άρδευση αντιστοιχεί περίπου στο 70% της συνολικής χρήσης γλυκού νερού (A. F. Santos et al., 2023), ποσοστό το οποίο αναμένεται να αυξηθεί κατά επιπλέον 15% έως το 2030 (Guterres, 2017). Η εξέλιξη αυτή αναμένεται να επιτείνει τις πιέσεις στους υδάτινους πόρους σε περιοχές που ήδη αντιμετωπίζουν σημαντικές ελλείψεις, όπως η Βόρεια Αφρική και η Μέση Ανατολή (Hashem & Qi, 2021).

Επομένως, καθίσταται αναγκαία η αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών νερού. Σύμφωνα με σχετικές προβλέψεις, κατά τις επόμενες δεκαετίες περισσότερο από το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού αναμένεται να αντιμετωπίσει σοβαρές πιέσεις ή ελλείψεις νερού, γεγονός που συνιστά κρίσιμη παράμετρο για την ασφάλεια των υδάτινων πόρων (Elgallal et al., 2016). Στο πλαίσιο αυτό, η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων αναδεικνύεται ως μια καίρια λύση για τη διασφάλιση της επάρκειας των υδατικών αποθεμάτων, ειδικά για γεωργικές χρήσεις (Becerra-Castro et al., 2015).

Η πρακτική της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων θεωρείται πλέον μία από τις πλέον αποτελεσματικές στρατηγικές για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας (Gheraout et al., 2019). Τα επεξεργασμένα λύματα (Treated Wastewater – TW) ορίζονται ως «νερό που έχει υποβληθεί

τουλάχιστον σε δευτεροβάθμια επεξεργασία και βασική απολύμανση και επαναχρησιμοποιείται αφού εξέλθει από μια οικιακή εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων» (Center et al., 2008) (βλέπε Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για αρδευτικούς σκοπούς (Mishra et al., 2023)

Η Έκθεση για την Παγκόσμια Ανάπτυξη των Υδάτων του 2017 υπογράμμισε τη σημασία της επαναχρησιμοποίησης του νερού (Connor et al., 2017). Συνεπώς, η αξιοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στις χώρες που αντιμετωπίζουν έλλειψη νερού ενθαρρύνεται ιδιαίτερα (Chang & Ma, 2012), δεδομένου ότι παράγονται τεράστιες ποσότητες λυμάτων σε παγκόσμια κλίμακα (Hashem & Qi, 2021).

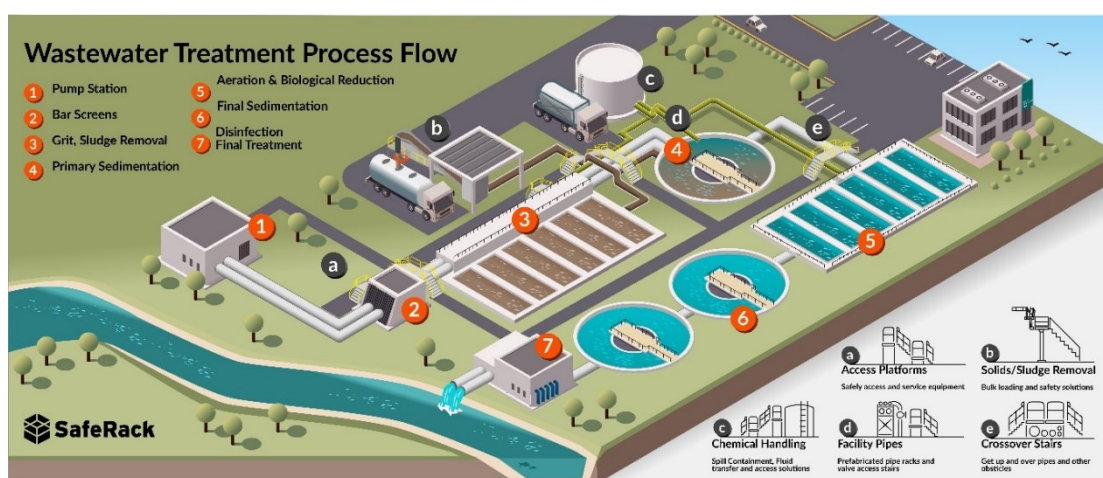
1.3 Επεξεργασμένα υγρά απόβλητα ως λύση

Η επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση λυμάτων για άρδευση αποτελούν πολύτιμη πηγή νερού και ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή, ειδικά σε άνυδρες περιοχές, καθώς τα λύματα θεωρούνται ανεξάντλητη, αξιόπιστη και σταθερή πηγή τόσο υδάτινων πόρων όσο και θρεπτικών συστατικών (Johannessen et al., 2015; Becerra-Castro et al., 2015). Για τον λόγο αυτό, σε πολλές χώρες με περιορισμένους υδάτινους πόρους, η πρακτική αυτή (Εικόνα 2 & 3) έχει καθιερωθεί ως μακροχρόνια λύση με εξέχουσα σημασία (Lazarova, 2013).

Η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων για γεωργική άρδευση είναι γενικά η πιο κοινωνικά αποδεκτή χρήση σε σχέση με την εφαρμογή τους σε άλλους τομείς (Gheraout, 2018). Τα τελευταία χρόνια, η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα έχει αποκτήσει ολοένα και

μεγαλύτερη σημασία, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένα υδάτινα αποθέματα (Khan et al., 2019). Παρά το γεγονός ότι πολλές χώρες δεν διαθέτουν σαφές θεσμικό πλαίσιο για την παρακολούθηση και έλεγχο της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων, υπάρχουν και χώρες που έχουν θεσπίσει ιδιαίτερα αυστηρούς κανονισμούς (Hashem & Qi, 2021)

Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, εκτός από την εξοικονόμηση γλυκού νερού, συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί η ανεξέλεγκτη απόρριψή τους και προάγει τη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους μέσω της προσθήκης θρεπτικών συστατικών και οργανικής ύλης (Ganjegunte et al., 2018). Σύμφωνα με μελέτες των Becerra-Castro et al. (2015) και των De Carlo et al. (2020), η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα παρουσιάζει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς τα θρεπτικά συστατικά που περιέχονται σε αυτά μπορούν να ελαχιστοποιήσουν ή και να υποκαταστήσουν πλήρως την ανάγκη χρήσης χημικών λιπασμάτων.



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (SafeRack, n.d.)

Η χρήση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων στο γεωργικό τομέα συνάδει με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και δύναται να υποστηρίξει τη Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» (Farm to Fork), καθώς παρέχει μια εναλλακτική και αξιόπιστη πηγή αρδευτικού νερού, συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του συστήματος τροφίμων της ΕΕ. Η Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» τονίζει την επιτακτική ανάγκη ενίσχυσης της βιολογικής γεωργίας και μείωσης της υπερβολικής χρήσης λιπασμάτων (European Commission, 2020).

Τα λύματα περιέχουν οργανική ύλη και θρεπτικά συστατικά επωφελή για την ανάπτυξη των φυτών (Chen et al., 2014), καθιστώντας τα σημαντικό και χαμηλού κόστους πόρο για την ενίσχυση της γεωργικής παραγωγικότητας (Jeong et al., 2014). Ωστόσο, παρά τα προφανή οφέλη, η χρήση λυμάτων στη γεωργία ενδέχεται να δημιουργήσει κινδύνους, όπως αύξηση της αλατότητας του εδάφους, παρουσία μικροοργανισμών, ρυπαντών (Shakir et al., 2017), αλλά και παθογόνων που δύνανται να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία, καθώς αυξάνεται ο κίνδυνος εμφάνισης νοσημάτων που προκαλούνται από παράσιτα, ιούς και βακτήρια στους καταναλωτές προϊόντων που αρδεύονται με επεξεργασμένα λύματα (Bahri et al., 2009).

Η αξιοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων συμβάλλει τόσο στην ενίσχυση της διαθεσιμότητας νερού για τη γεωργική παραγωγή όσο και στη μείωση των περιβαλλοντικών και υγειονομικών επιπτώσεων που συνδέονται με την ανεξέλεγκτη απόρριψη ακατέργαστων λυμάτων (Hajjami et al., 2012). Τα ακατέργαστα ή ανεπαρκώς επεξεργασμένα απόβλητα αποτελούν σημαντική απειλή για τη δημόσια υγεία, ενώ παράλληλα δύνανται να υποβαθμίσουν το περιβάλλον και να προκαλέσουν οικονομικές επιβαρύνσεις (Libutti et al., 2018; Adewumi et al., 2010). Γι' αυτό είναι απαραίτητη η εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας και διαχείρισης (Al Arni et al., 2019).



Εικόνα 3: Μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Globalex, n.d.)

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για αρδευτικούς σκοπούς προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, ωστόσο συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις. Η

έκταση των επιπτώσεων επηρεάζεται από την ποιότητα των επεξεργασμένων αποβλήτων, καθώς και από διάφορους εξωτερικούς παράγοντες (Ofori et al., 2021). Τα φυσικοχημικά και μικροβιολογικά χαρακτηριστικά αποτελούν βασικούς δείκτες της ποιότητας των λυμάτων. Όπως αναφέρουν οι Elgallal et al. (2016), η σοβαρότητα των επιπτώσεων που συνδέονται με τα λύματα επηρεάζεται από τα χημικά χαρακτηριστικά και τη συγκέντρωση των αποβλήτων, καθώς και από τη διαλυτότητα και την τοξικότητα των ουσιών που εμπεριέχουν. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η συχνότητα και ο ρυθμός άρδευσης, καθώς και οι κλιματικές συνθήκες (Ofori et al., 2021).

Γενικά, οι αρνητικές επιπτώσεις από τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων μπορούν να μειωθούν σημαντικά μέσω της επιλογής κατάλληλου συστήματος άρδευσης, της εφαρμογής ορθού προτύπου καλλιεργειών και αποτελεσματικής διαχείρισης της άρδευσης. Εξίσου σημαντική είναι η τακτική παρακολούθηση της ποιότητας του εδάφους, του νερού και των καλλιεργειών, καθώς και η εφαρμογή προληπτικών πρακτικών για την προστασία από παθογόνους οργανισμούς. (Hashem & Qi, 2021).

1.4 Μέθοδοι άρδευσης

Η αυξανόμενη πληθυσμιακή ανάπτυξη και οι σοβαρές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχουν εντείνει τις πιέσεις στην γεωργική παραγωγή, δημιουργώντας την ανάγκη για τον προσδιορισμό και την προώθηση βιώσιμων πρακτικών. Ευτυχώς, η αγροτική παραγωγή μπορεί να βελτιώνεται συνεχώς μέσω της χρήσης διαφόρων μεθόδων άρδευσης και άλλων τεχνικών. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η υπερβολική χρήση εισροών μπορεί να προκαλέσει αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις (Yang et al., 2023). Η αρδευόμενη γεωργία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ο τομέας που καταναλώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα νερού παγκοσμίως (FAO, 2023). Για παράδειγμα, στην Κίνα, τη χώρα με τη μεγαλύτερη άρδευση στον κόσμο, η αρδευόμενη έκτασή της έφτασε τα 74 εκατομμύρια εκτάρια το 2019, από τα οποία τα 68 εκατομμύρια ήταν καλλιεργήσιμη γη, αντιπροσωπεύοντας το 50,3% της συνολικής καλλιεργήσιμης γης της χώρας. Η άρδευση είναι ένα τεχνικό μέσο που χρησιμοποιείται για την αναπλήρωση του αναγκαίου νερού για την ανάπτυξη των καλλιεργειών, μιας και η επαρκής παροχή νερού είναι κρίσιμη για τη φυσιολογική ανάπτυξη των καλλιεργειών και τη σταθερή και υψηλή παραγωγή. Ως αποτέλεσμα, η εξοικονόμηση νερού είναι κρίσιμο ζήτημα (Yang et al., 2023).

1.4.1 Χαρακτηριστικά των Κύριων Μεθόδων Άρδευσης

Οι τρεις πιο συνηθισμένες μέθοδοι άρδευσης είναι:

- A) άρδευση με καταιονισμό,
- B) επιφανειακή άρδευση,
- Γ) στάγδην άρδευση.

A) Η άρδευση με καταιονισμό μοιάζει με τεχνητή βροχή (βλέπε Εικόνα 4). Το νερό διοχετεύεται υπό πίεση μέσω σωληνώσεων και εκτοξεύεται πάνω στα φυτά με περιστρεφόμενα εκτοξευτήρια (sprinklers). Η μέθοδος άρδευσης με καταιονισμό είναι ευαίσθητη στις καιρικές συνθήκες, καθώς ο άνεμος μπορεί να προκαλέσει σημαντικές απώλειες νερού μέσω εξάτμισης. Επιπλέον, η αναπόφευκτη βρεγμένη επιφάνεια των φύλλων στις καλλιέργειες αυξάνει την ευαισθησία των φυτών σε ασθένειες (Stauffer & Spuhler, 2012).



Εικόνα 4: Σύστημα άρδευσης με καταιονισμό (Spanu et al., 2024)

B) Τα συστήματα επιφανειακής άρδευσης διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του νερού στην επιφάνεια της καλλιέργειας, είτε στατικά, είτε με κινούμενο:

- άρδευση με λεκάνες ή με κατάκλυση (στατικά),

- άρδευση με περιορισμένη διάχυση ή με λωρίδες (κινούμενο)
- άρδευση με αυλάκια (κινούμενο),

Οι λεκάνες είναι επίπεδες επιφάνειες περιτριγυρισμένες από χαμηλά αναχώματα που εμποδίζουν το νερό να διαφύγει (βλέπε εικόνα 5). Η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για ορυζώνες σε επίπεδες περιοχές ή σε αναβαθμίδες, αλλά και για δέντρα, όπου κάθε δέντρο βρίσκεται στο κέντρο μιας μικρής λεκάνης (FAO, 1985a). Στην Ινδία, η τεχνική άρδευσης με κατάκλυση έχει αποδοτικότητα χρήσης νερού (οριζόμενη ως το ποσοστό νερού που καταναλώνεται σε σχέση με το συνολικά διαθέσιμο) μόλις περίπου 30–45% (Narayanamoorthy, 2009). Συνήθως, αυτή η μέθοδος οδηγεί σε σπατάλη μεγάλων ποσοτήτων νερού λόγω απωλειών κατά τη διανομή και την εξάτμιση (Singh et al., 2018).



Εικόνα 5: Σύστημα επιφανειακής άρδευσης με λεκάνες (Rai et al., 2017)

Η άρδευση με λωρίδες (βλέπε Εικόνα 6) μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση της άρδευσης με λεκάνες σε κεκλιμένες, μακριές ορθογώνιες καλλιέργειες ή σε κεκλιμένες καλλιέργειες με ισοϋψείς καμπύλες, οι οποίες έχουν δυνατότητα ελεύθερης απορροής στο κατώτερο άκρο. Οι λωρίδες είναι επιμήκεις ζώνες γης με ελαφριά κλίση, χωρισμένες μεταξύ τους με αναχώματα. Το νερό απλώνεται σαν λεπτό φύλλο στην επιφάνεια και οδηγείται από τα αναχώματα προς τα κάτω. Σε αυτή τη μέθοδο, οι ρίζες δεν βρίσκονται διαρκώς μέσα στο νερό (FAO, 1985a).



Εικόνα 6: Σύστημα άρδευσης με λωρίδες (Rahman, n.d.)

Μια άλλη μέθοδος άρδευσης που χρησιμοποιείται ευρέως για γραμμικές καλλιέργειες είναι η άρδευση με αυλάκια - μικρά κανάλια ανάμεσα στις γραμμές των φυτών (βλέπε Εικόνα 7). Τα αυλάκια προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση του νερού στην καλλιέργεια. Η απαιτούμενη παροχή νερού ανά μονάδα πλάτους της καλλιέργειας είναι μικρότερη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους επιφανειακής άρδευσης, γεγονός που συμβάλλει σε πιο ορθολογική χρήση των υδάτινων πόρων. Παράλληλα, επειδή διαβρέχεται μόνο το τμήμα της επιφάνειας που καταλαμβάνει το αυλάκι και όχι ολόκληρη η καλλιέργεια, οι απώλειες νερού μέσω εξάτμισης μειώνονται σημαντικά. Επιπλέον, τα αυλάκια δίνουν στον καλλιεργητή περισσότερες δυνατότητες να ρυθμίζει την άρδευση με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς οι συνθήκες της καλλιέργειας αλλάζουν στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (FAO, 1989).



Εικόνα 7: Σύστημα άρδευσης με αυλάκια (Pathik et al., 2014)

Ωστόσο, στην άρδευση με αυλάκια, η κατανομή του νερού στην καλλιέργεια συμβαίνει ταυτόχρονα με τη διήθησή του στο έδαφος, γεγονός που καθιστά την ομοιομορφία της κατανομής του και την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του ιδιαίτερα εξαρτημένες από τη μεταβλητότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών (Oyonarte & Mateos, 2003). Η παροχή εισροής νερού πρέπει να είναι επαρκής, ώστε το νερό να φτάνει στο άκρο των αυλακιών σε εύλογο χρονικό διάστημα, επιτρέποντας ικανοποιητική διήθηση και επιτυχημένη ομοιομορφία σε ολόκληρη την καλλιέργεια. Καθώς το νερό ρέει κατά μήκος των αυλακιών, αποσπά σωματίδια εδάφους τα οποία μεταφέρονται προς το χαμηλότερο σημείο της καλλιέργειας ή παρασύρονται εκτός αυτής (Mateos & Giráldez, 2005; Fernández-Gómez et al., 2004). Το νερό που δεν απορροφάται από το έδαφος και απορρέει εκτός της καλλιέργειας καταλήγει σε γειτονικά υδάτινα σώματα.

Συνεπώς, οι συμβατικές μέθοδοι άρδευσης μπορεί να οδηγήσουν σε υπερβολική κατανάλωση νερού, αλλά και να αυξήσουν τον κίνδυνο ρύπανσης των υπόγειων και των επιφανειακών υδάτων λόγω της έκπλυσης χημικών ουσιών και θρεπτικών στοιχείων από τη ριζόσφαιρα των καλλιεργειών (Siyal et al., 2012).

Έτσι έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για πιο αποτελεσματικά μέτρα εξοικονόμησης νερού. Αυτό μπορεί να καταστεί εφικτό μόνο με αποτελεσματικές μεθόδους διαχείρισης νερού και τη χρήση

σύγχρονων τεχνολογιών άρδευσης όπως η στάγδην άρδευση (άρδευση με σταγόνες) (Banik et al., 2024). Στη στάγδην άρδευση το νερό φτάνει υπό πίεση σε σωληνώσεις με σταλάκτες, οι οποίοι αφήνουν το νερό να πέφτει αργά και στοχευμένα δίπλα στη ρίζα του φυτού, με αποτέλεσμα να υγραίνεται μόνο η περιοχή γύρω από τη ρίζα (FAO, 1985a). Ως εκ τούτου η άρδευση με σταγόνες είναι μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος άρδευσης που συμβάλλει στη μείωση των προβλημάτων λειψυδρίας, λόγω της υψηλής της αποδοτικότητας και παραγωγικότητας χρήσης νερού (Pourgholam-Amiji et al., 2021).

1.4.2 Μέθοδοι Άρδευσης και Ανακτημένο Νερό

Το ανακτημένο νερό (Reclaimed Water – RW) έχει καταστεί μια βιώσιμη πρακτική για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας σε πολλές χώρες (Hashem & Qi, 2021), καθώς αποτελεί αξιόπιστη και σταθερή πηγή νερού και παρέχει μεγάλη ποσότητα θρεπτικών συστατικών στις καλλιέργειες, γεγονός που ενισχύει την παραγωγικότητά τους (Gu et al., 2019). Η επιλογή κατάλληλου συστήματος άρδευσης και καλλιεργητικού προτύπου με αποτελεσματικές πρακτικές διαχείρισης άρδευσης είναι καίρια για τον περιορισμό των επιπτώσεων της άρδευσης με ανακτημένο νερό, και η στάγδην άρδευση θεωρείται γενικά αξιόπιστη μέθοδος όταν χρησιμοποιείται ανακτημένο νερό λόγω ασφάλειας και αποδοτικότητας (Hashem & Qi, 2021).

1.5 Τι εξετάζει η παρούσα εργασία

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση της αποτελεσματικότητας της στάγδην άρδευσης και της άρδευσης με αυλάκια όταν χρησιμοποιούνται επεξεργασμένα υγρά απόβλητα για γεωργική χρήση. Συγκεκριμένα, η εργασία στοχεύει να αξιολογήσει:

1. Την αποδοτικότητα χρήσης νερού και την εξοικονόμηση υδάτινων πόρων με κάθε μέθοδο άρδευσης.
2. Τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης επεξεργασμένων λυμάτων, συμπεριλαμβανομένων της πιθανής ρύπανσης εδαφών και υδάτων, της αλατότητας και των μικροβιολογικών κινδύνων.
3. Τις δυνατότητες ορθολογικής διαχείρισης της άρδευσης με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας και τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων και του κόστους.
4. Τη διερεύνηση της επίδρασης κάθε μεθόδου άρδευσης στην αποτελεσματική και ασφαλή χρήση επεξεργασμένων λυμάτων για γεωργικούς σκοπούς.

ΕΝΟΤΗΤΑ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

2.1 Στάγδην άρδευση

Το σύστημα στάγδην άρδευσης με υδρολίπανση (Εικόνες 8 & 9) αναγνωρίζεται ευρέως ως μία από τις πλέον προηγμένες τεχνικές φυτικής παραγωγής. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την αποδοτική και συχνή παροχή νερού και θρεπτικών στοιχείων απευθείας στη ριζόσφαιρα των καλλιεργειών μέσω σταλακτών ή ψεκαστήρων άρδευσης με τεχνητή βροχή (Moursy et al., 2023). Η στάγδην άρδευση, συγκριτικά με άλλες μεθόδους άρδευσης, παρουσιάζει υψηλότερη παραγωγικότητα ανά μονάδα νερού, καθώς περιορίζει σημαντικά τις απώλειες λόγω διήθησης και εξάτμισης (Flores et al., 2021; Fukai & Mitchell, 2022). Παράλληλα, διευκολύνει την ορθολογική διαχείριση των λιπασμάτων και την πιο αποτελεσματική κατανομή των θρεπτικών στοιχείων, συμβάλλοντας στη μείωση του στρες των φυτών, στην πρόωμη συγκομιδή, στη ποιοτική αναβάθμιση των παραγόμενων προϊόντων και στην αύξηση της ομοιομορφίας της παραγωγής (Abou Zakhem et al., 2019; Gebremeskel et al., 2018).

Σύμφωνα με τους Pourgholam-Amiji et al. (2021), η αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών οδηγεί έμμεσα σε εξοικονόμηση υδάτινων πόρων, ενώ η βελτίωση της παραγωγικότητας του νερού αποτελεί αποτελεσματική στρατηγική για τον περιορισμό της εκμετάλλευσης μη ανανεώσιμων υδάτινων αποθεμάτων. Υπό αυτό το πρίσμα, η εφαρμογή της στάγδην άρδευσης έχει επιφέρει αναμφίβολα επαναστατικά οφέλη στη γεωργική παραγωγή (Bansal et al., 2021).

Η τεχνολογία της στάγδην άρδευσης έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, οδηγώντας στην ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών, όπως η υπόγεια στάγδην άρδευση (subsurface drip irrigation), στάγδην άρδευση υπό μεμβράνη (sub-membrane drip irrigation) και η στάγδην άρδευση με αερισμό (aerated drip Irrigation) (Yang et al., 2023). Η στάγδην άρδευση υπό μεμβράνη συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της εδαφοκάλυψης και της στάγδην άρδευσης, προστατεύοντας τη δομή των εδαφικών συσσωματωμάτων και βελτιώνοντας τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους. Η τεχνική αυτή συμβάλλει στη διατήρηση της εδαφικής υγρασίας, στη μείωση της εξάτμισης και στην εξοικονόμηση νερού και λιπασμάτων, ενώ παράλληλα αυξάνει την απόδοση και βελτιώνει την ποιότητα των καλλιεργειών. Επιπλέον, μειώνει τη χρήση φυτοφαρμάκων, την έκπλυση λιπασμάτων και την υπερβολική κατανάλωση θρεπτικών στοιχείων (Jia & Fu, 2020). Ενδεικτικά, έχει καταγραφεί αύξηση της απόδοσης του

σιταριού κατά 14,6–19,6%, της παραγωγικότητας του νερού της καλλιέργειας κατά 27,3–29,6% και της παραγωγικότητας του αρδευτικού νερού κατά 37,1–42,0% (X. Li et al., 2016).



Εικόνα 8: Θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριού υπό τη μέθοδο στάγδην άρδευσης. Ίδια λήψη

Η υπόγεια στάγδην άρδευση αποτελεί μία ακόμη καινοτόμο προσέγγιση, κατά την οποία το νερό και το υγρό λίπασμα παρέχονται απευθείας στη ριζόσφαιρα μέσω δικτύου σωληνώσεων τοποθετημένων στο υπέδαφος (X. Cheng et al., 1999). Η μέθοδος αυτή μειώνει αποτελεσματικά τις απώλειες νερού λόγω διήθησης και εξάτμισης, βελτιώνει την αποδοτικότητα χρήσης του νερού και μειώνει τις ανάγκες σε εργασία (Ayars et al., 2015).

Η στάγδην άρδευση με αερισμό αποτελεί εξέλιξη της υπόγειας στάγδην άρδευσης και βασίζεται στην έγχυση αέρα στο ριζικό περιβάλλον των φυτών μέσω εξωτερικών μηχανισμών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του υπόγειου αρδευτικού συστήματος. Με τον τρόπο αυτό βελτιστοποιείται ο αερισμός του εδάφους και αυξάνεται η αποδοτικότητα χρήσης του νερού (Camp, 1998). Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες οπωροκηπευτικών, όπως η ντομάτα, το αγγούρι, το κινέζικο λάχανο, ο ανανάς, η πιπεριά και

το καρπούζι. Έρευνες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή αερισμού στην υπόγεια στάγδην άρδευση οδήγησε σε αύξηση της απόδοσης και της αποδοτικότητας χρήσης νερού των καλλιεργειών κατά 3,6–66,4% και 5,9–60,0% αντίστοιχα (J. Li et al., 2021; Cui et al., 2020; Cao et al., 2020). Συνοψίζοντας, η υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών στάγδην άρδευσης ενισχύει την παραγωγικότητα και ποιότητα των καλλιεργειών, ενώ παράλληλα υποστηρίζει την ορθολογική διαχείριση των υδάτινων αποθεμάτων και τη διαφύλαξη του περιβάλλοντος.

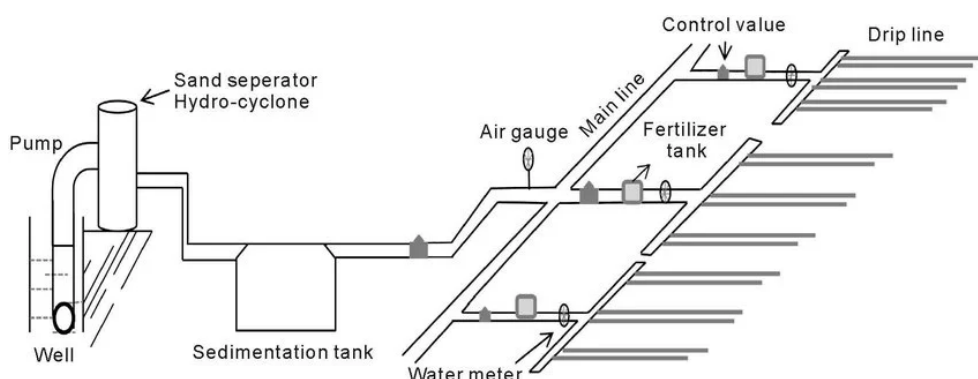


Εικόνα 9: Σύστημα στάγδην άρδευσης (Wikipedia, n.d.)

2.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η στάγδην άρδευση αποτελεί τεχνολογία γεωργίας ακριβείας, η οποία βασίζεται στον υπολογισμό των απαιτούμενων ποσοτήτων νερού και λιπασμάτων ανά στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, σύμφωνα με την αρχή της ισορροπίας νερού και θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος. Οι εισροές αυτές εφαρμόζονται σταδιακά και με ακρίβεια στη ριζόσφαιρα των φυτών μέσω ενός ελεγχόμενου συστήματος άρδευσης με σταγόνες, επιτυγχάνοντας υψηλή αποδοτικότητα χρήσης νερού και λιπασμάτων. Ο συνδυασμός της στάγδην άρδευσης με εδαφοκάλυψη ενισχύει περαιτέρω την αξιοποίηση των θρεπτικών στοιχείων και μειώνει τις απώλειες νερού (Yang et al., 2023).

Κατά τη λειτουργία του συστήματος, το νερό παρέχεται αργά και ομοιόμορφα στο έδαφος κοντά στη ριζική ζώνη, υπό συγκεκριμένη πίεση, αφού προηγουμένως φιλτραριστεί από το δίκτυο σωληνώσεων και τους σωλήνες εκροής. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, ένα τυπικό σύστημα στάγδην άρδευσης περιλαμβάνει την πηγή νερού, την κεφαλή άρδευσης, τους αγωγούς μεταφοράς και διανομής του νερού, καθώς και τους σταλάκτες (Yang et al., 2023).

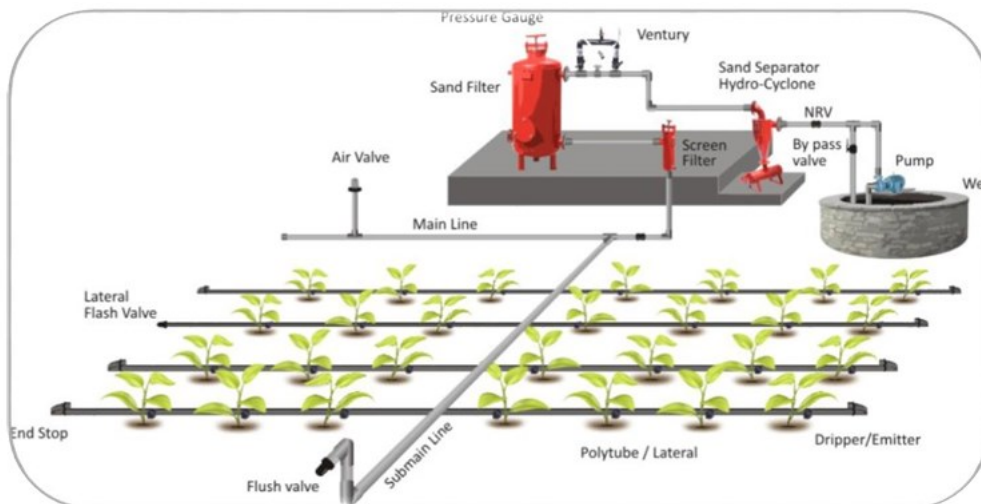


Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος στάγδην άρδευσης που χρησιμοποιείται στην περιοχή μελέτης της άνυδρης βορειοδυτικής Κίνας (Chuanjie et al., 2015).

Ο σταλάκτης αποτελεί το πλέον κρίσιμο στοιχείο του συστήματος στάγδην άρδευσης, καθώς είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση και τη σταθεροποίηση της παροχής του νερού. Μέσω της πολύπλοκης εσωτερικής δομής των καναλιών ροής, αποσβένει την πίεση της ροής, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη παροχή νερού στις καλλιέργειες (Y. Li et al., 2018). Ωστόσο, λόγω του μικρού μεγέθους αυτών των καναλιών (0,5–1,2 mm), οι σταλάκτες είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι σε απόφραξη από αιωρούμενα στερεά και άλλες ακαθαρσίες του αρδευτικού νερού. Η απόφραξη αυτή επηρεάζει αρνητικά την ομοιομορφία της άρδευσης και τη διάρκεια ζωής του συστήματος, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις καθιστά απαραίτητη την αντικατάστασή τους (Nakayama & Bucks, 1991; Pei et al., 2014).

Για την αποφυγή απόφραξης των σταλακτών και τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας του συστήματος, η χρήση φίλτρων θεωρείται απαραίτητη. Τα φίλτρα, συχνά σε συνδυασμό με συστήματα αντίστροφης έκπλυσης, εγκαθίστανται στην κεφαλή άρδευσης και συμβάλλουν καθοριστικά στην προστασία των σταλακτών και στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του συστήματος (Yang et al., 2023). Επιπλέον, βασικά τεχνικά εξαρτήματα των συστημάτων στάγδην άρδευσης αποτελούν οι συσκευές έγχυσης λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, όπως δεξαμενές λιπασμάτων με διαφορά πίεσης, εγχυτήρες τύπου Venturi και

αναλογικές αντλίες λιπασμάτων (βλέπε Εικόνα 11), οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως διεθνώς (Li JiuSheng et al., 2008).



Εικόνα 11: Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος στάγδην άρδευσης (B. Jha et al., 2015)

2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της στάγδην άρδευσης

Η στάγδην άρδευση αποτελεί σήμερα μία από τις πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες άρδευσης, λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που προσφέρει στη διαχείριση του νερού και των θρεπτικών στοιχείων (Ajdaary et al., 2007). Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης παροχής νερού και λιπασμάτων μέσω της υδρολίπανσης, αξιοποιώντας τις συνέργειες μεταξύ των δύο εισροών και αυξάνοντας την αποδοτικότητά τους. Επιπλέον, το λίπασμα εφαρμόζεται απευθείας στη ριζόσφαιρα των φυτών, γεγονός που μειώνει την επιφάνεια επαφής λιπάσματος-εδάφους και περιορίζει τη δέσμευση των θρεπτικών στοιχείων από το έδαφος. Ως αποτέλεσμα, διευκολύνεται η πρόσληψη των θρεπτικών στοιχείων από το ριζικό σύστημα και διατηρείται υψηλότερη συγκέντρωση φωσφόρου στο εδαφικό διάλυμα σε σύγκριση με τη συμβατική διασπορά λιπασμάτων (Bar-Yosef, 1999).

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της στάγδην άρδευσης είναι η μακράς διάρκειας παροχή νερού και θρεπτικών στοιχείων, η οποία συντελεί στη διατήρηση ενός σχετικά σταθερού εδαφικού περιβάλλοντος, ευνοϊκού για την ανάπτυξη και τη λειτουργία των ριζών. Παράλληλα, το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα ευέλικτης προσαρμογής του τύπου, της αναλογίας και της ποσότητας των παρεχόμενων θρεπτικών στοιχείων, ανάλογα με τις

επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τις θρεπτικές απαιτήσεις των καλλιεργειών στα διαφορετικά στάδια ανάπτυξής τους (Yang et al., 2023).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η στάγδην άρδευση εμφανίζει και ορισμένες προκλήσεις. Η κυριότερη από τις οποίες είναι η ευαισθησία του συστήματος σε αποφράξεις, λόγω του μικρού μεγέθους των σταλακτών και των καναλιών ροής, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την καλή ποιότητα του αρδευτικού νερού και τη συστηματική συντήρηση των φίλτρων (Pei et al., 2014; Nakayama & Bucks, 1991). Ως εκ τούτου, η εγκατάσταση φίλτρων και συστημάτων αντίστροφης έκπλυσης στην κεφαλή άρδευσης θεωρείται απαραίτητη για τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας των συστημάτων στάγδην άρδευσης (Li JiuSheng et al., 2008). Επιπλέον, το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι υψηλότερο σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης, ενώ απαιτείται εξειδικευμένη γνώση για τον σωστό σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη διαχείριση του συστήματος. Τέλος, η ανομοιόμορφη λειτουργία λόγω βλαβών ή κακής συντήρησης μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποίηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών και της τελικής απόδοσης.

2.1.3 Απόδοση και ποιότητα

Η στάγδην άρδευση αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο διαχείρισης νερού και λιπάσματος, επηρεάζοντας σημαντικά την ανάπτυξη, τη φυσιολογία, την ποιότητα και την απόδοση των καλλιεργειών. Σε επίπεδο ανάπτυξης και φυσιολογίας, η εφαρμογή στάγδην άρδευσης βελτιώνει τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI), τη φωτοσυνθετική ικανότητα, τη συσσώρευση ξηρής ουσίας και την ανάπτυξη του φυτικού πληθυσμού (M. Li, 2022; M. Zhang, 2021). Ιδιαίτερα η στάγδην άρδευση υπό μεμβράνη και η αεριζόμενη στάγδην άρδευση ενισχύουν το ύψος και τη διάμετρο των φυτών, τον αριθμό παραγωγικών στελεχών και τη βλάστηση (Peng et al., 2022; Zang et al., 2020). Αναφορικά με την ποιότητα των καλλιεργειών, η στάγδην άρδευση μπορεί να αυξήσει την περιεκτικότητα σε βιταμίνη C, διαλυτά σάκχαρα και διαλυτά στερεά, καθώς και την περιεκτικότητα σε οξέα, όταν η ποσότητα νερού και λιπάσματος ρυθμίζεται σωστά. Η υπερβολική παροχή νερού και θρεπτικών στοιχείων δύναται να υποβαθμίσει την ποιότητα των καρπών (Ren et al., 2012; Z. Zhang et al., 2002). Επιπλέον, η τεχνολογία αεριζόμενης άρδευσης έχει δείξει βελτίωση στη διαλυτότητα των στερεών συστατικών και στα επίπεδα βιταμίνης C και σακχάρων σε φρούτα και λαχανικά (Cao et al., 2020; Cui et al., 2020; J. Li et al., 2021).

Αναφορικά με την απόδοση και την παραγωγικότητα του νερού, η στάγδην άρδευση αυξάνει την απόδοση των καλλιεργειών και βελτιώνει σημαντικά την παραγωγικότητα του νερού σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης (Camp et al., 2000; M. Zhang, 2021). Ειδικές τεχνικές, όπως η ρηχά θαμμένη ή η αεριζόμενη στάγδην άρδευση, ενισχύουν περαιτέρω την απορρόφηση νερού από τις ρίζες και τη συνολική παραγωγικότητα (Gao et al., 2022; M. Zhang, 2021).

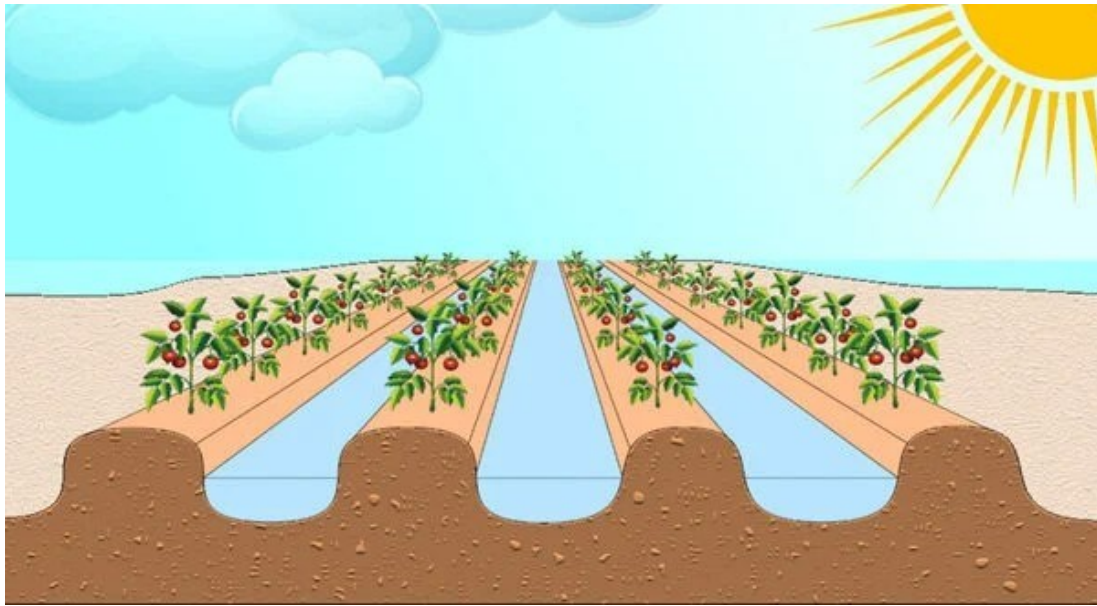
Επιπλέον, η στάγδην άρδευση μειώνει την έκπλυση νερού και θρεπτικών στοιχείων, περιορίζοντας τις απώλειες νιτρικού αζώτου και φωσφόρου σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης (Zhai et al., 2023). Η υψηλής ροής στάγδην άρδευση προάγει την οριζόντια ανάπτυξη των ριζών (Ma et al., 2022), ενώ αντίθετα η χαμηλής ροής στάγδην άρδευση ευνοεί την κατακόρυφη ανάπτυξή τους, γεγονός που καθιστά κρίσιμη τη σωστή ρύθμιση της δόσης και της συχνότητας άρδευσης για τη βέλτιστη απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος (Shi, 2020; Tian et al., 2022).

Συνολικά, η στάγδην άρδευση αποτελεί έναν αποδοτικό και βιώσιμο τρόπο βελτίωσης της ανάπτυξης, της ποιότητας και της αποδοτικότητας χρήσης νερού των καλλιεργειών, με σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι παραδοσιακών μεθόδων άρδευσης.

2.2 Άρδευση με αυλάκια

Η επιφανειακή άρδευση, όπως η άρδευση με αυλάκια, είναι μέθοδος άρδευσης κατά την οποία το νερό μεταφέρεται στην επιφάνεια της καλλιέργειας με τη βοήθεια της βαρύτητας, ενώ ταυτόχρονα διηθείται στο έδαφος. Τα επιφανειακά συστήματα άρδευσης είναι τα πιο διαδεδομένα σε πολλές χώρες παγκοσμίως (Smith et al., 2005).

Η άρδευση με αυλάκια είναι μία από τις παλαιότερες γνωστές τεχνικές επιφανειακής άρδευσης. Το νερό μεταφέρεται μέσω μικρών καναλιών με ήπια κλίση προς το τελικό άκρο των αυλακιών (βλέπε Εικόνα 12). Η απόσταση μεταξύ των καναλιών συνήθως αντιστοιχεί στην απόσταση φύτευσης της καλλιέργειας. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη για την άρδευση γραμμικών καλλιεργειών (Abou Seeda et al., 2020).



Εικόνα 12: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος άρδευσης με αυλάκια από τους Nuwarapaksha et al. (2025)

2.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τα συστήματα επιφανειακής άρδευσης χαρακτηρίζονται από απλή κατασκευή, χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και σχετικά χαμηλό αρχικό επενδυτικό κόστος. Ωστόσο, συχνά συνδέονται με υψηλές απαιτήσεις σε εργασία και χαμηλή αποδοτικότητα χρήσης του νερού (Smith et al., 2005). Η αύξηση του κόστους εργασίας, ο ανταγωνισμός για τους υδάτινους πόρους και η ανάγκη περιβαλλοντικής προστασίας έχουν επιταχύνει τη μετάβαση προς πιο προηγμένα αρδευτικά συστήματα.

Στην άρδευση με αυλάκια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13, το νερό δεν κατακλύζει ολόκληρο τον αγρό, αλλά διοχετεύεται μέσω μικρών καναλιών, τα οποία ονομάζονται αυλάκια ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, αυλακώσεις ή ραβδώσεις. Η παροχή νερού κατανέμεται κατά μήκος των αυλακιών και η διήθηση πραγματοποιείται δισδιάστατα μέσω της διαβρεχόμενης περιμέτρου, και όχι μονοδιάστατα με κατακόρυφη ροή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα αυλάκια μπορούν να φραχθούν στο τελικό τους άκρο ώστε να περιοριστεί η επιφανειακή απορροή, ωστόσο η πρακτική αυτή δεν εφαρμόζεται ευρέως (Abou Seeda et al., 2020).



Εικόνα 13: Σύστημα άρδευσης με αυλάκια (Abou Seeda et al., 2020)

2.2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα άρδευσης με αυλάκια

Η άρδευση με αυλάκια είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για γραμμικές και δενδρώδεις καλλιέργειες, καθώς το νερό δεν έρχεται σε άμεση επαφή με τα φυτά. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται με επιτυχία σε καλλιέργειες που είναι ευαίσθητες στην άμεση κατάκλυση, όπως οι ντομάτες, τα λαχανικά, οι πατάτες και τα φασόλια (Abou Seeda et al., 2020).

Μεταξύ των βασικών πλεονεκτημάτων της άρδευσης με αυλάκια συγκαταλέγεται η καταλληλότητα της για καλλιέργειες που είναι ευαίσθητες στην κάλυψη του λαιμού ή του στελέχους από το νερό. Επιπλέον, όταν συνδυάζεται με συστήματα συλλογής και επαναχρησιμοποίησης της απορροής, η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ομοιόμορφη άρδευση και τη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας του νερού. Η άρδευση με αυλάκια προσφέρει αυξημένες δυνατότητες διαχείρισης του νερού στην παραγωγή, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή της παροχής και του αριθμού των γραμμών άρδευσης. Η σχετικά μικρή διαβρεχόμενη επιφάνεια του εδάφους μπορεί να μειώσει τις απώλειες νερού από εξάτμιση, ιδιαίτερα σε αραιά φυτεμένες καλλιέργειες. Παράλληλα, η άρδευση με αυλάκια χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος εγκατάστασης και μικρότερη χρήση γης που απαιτείται για τα αρδευτικά κανάλια. Η μέθοδος εξασφαλίζει καλή αποστράγγιση του αγρού, αποφεύγεται η μερική κατάκλυση των φυτών και διαβρέχει συνήθως μόνο το μισό έως το ένα τρίτο της συνολικής επιφάνειας του αγρού. Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοστεί σε επικλινή εδάφη και, υπό κατάλληλη διαχείριση, περιορίζει τον σχηματισμό επιφανειακής κρούστας του

εδάφους (Abou Seeda et al., 2020).

Παρά τα πλεονεκτήματά αυτής τη μεθόδου, η άρδευση με αυλάκια παρουσιάζει και σημαντικά μειονεκτήματα. Η μέθοδος αυτή έχει υψηλές απαιτήσεις σε εργατικό δυναμικό σε σύγκριση με άλλες επιφανειακές μεθόδους άρδευσης και προϋποθέτει εμπειρία από τον παραγωγό για τη σωστή κατεύθυνση του νερού στα αυλάκια. Η κακή διαχείριση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος, αυξάνοντας τις απώλειες νερού και μειώνοντας την ομοιομορφία της άρδευσης (Abou Seeda et al., 2020).

Σε περιπτώσεις όπου δεν εφαρμόζονται αναχώματα στο τέλος ή συστήματα ελέγχου της απορροής, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος επιφανειακής απορροής στο τελικό άκρο των καναλιών. Επιπλέον, η άρδευση με αυλάκια μπορεί να περιορίσει την κίνηση των γεωργικών μηχανημάτων εντός του αγρού, περιορίζοντας τη δυνατότητα εκτέλεσης κάποιων εργασιών. Παράλληλα, η μέθοδος απαιτεί επιπλέον κατεργασία του εδάφους για τη δημιουργία των αυλακιών, γεγονός που αυξάνει τον χρόνο και την προσπάθεια κατά την προετοιμασία του αγρού. Επίσης, η πλευρική κατανομή του νερού είναι περιορισμένη σε αμμώδη εδάφη, ενώ για την ομοιόμορφη λειτουργία του συστήματος απαιτείται συχνά εξομάλυνση του εδάφους ώστε τα αυλάκια να έχουν ομοιόμορφη κλίση. Η πιθανότητα διάβρωσης είναι αυξημένη, ιδίως σε επικλινή εδάφη ή σε περιπτώσεις υψηλών παροχών νερού, ενώ η αυτοματοποίηση της άρδευσης με αυλάκια είναι γενικά πιο δύσκολη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους (Abou Seeda et al., 2020).

Τέλος, σε εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα ή όταν χρησιμοποιείται νερό κακής ποιότητας, ενδέχεται να παρουσιαστεί συσσώρευση αλάτων μεταξύ των αυλακιών, με πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών (Abou Seeda et al., 2020).

2.2.3 Καταλληλότητα καλλιεργειών και υδάτινων χαρακτηριστικών στην άρδευση με αυλάκια

Η άρδευση με αυλάκια μπορεί να εφαρμοστεί σε σχεδόν όλες τις αρδευόμενες καλλιέργειες, με εξαίρεση εκείνες που αναπτύσσονται υπό συνθήκες κατάκλυσης, όπως το ρύζι. Παρά τη μεγάλη της ευελιξία, ορισμένες καλλιεργητικές πρακτικές που σχετίζονται με την κατεργασία του εδάφους, ή τη συγκομιδή ενδέχεται να περιορίσουν την εφαρμογή της και να καταστήσουν αναγκαία την επιλογή εναλλακτικής μεθόδου άρδευσης. Τα αυλάκια είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για καλλιέργειες που ενδέχεται να υποστούν ζημιές όταν το νερό έρθει σε άμεση επαφή με το λαιμό ή τα στελέχη των φυτών, καθώς η εφαρμογή του νερού μακριά από τη βάση

του φυτού μειώνει τον κίνδυνο φυτοπαθολογικών ασθενειών και βελτιώνει τις συνθήκες αερισμού της ριζόσφαιρας (Abou Seeda et al., 2020).

Η καταλληλότητα του νερού για άρδευση με αυλάκια καθορίζεται τόσο από την παροχή του όσο και από τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά. Η άρδευση με αυλάκια μπορεί να εφαρμοστεί με οποιοδήποτε όγκο ή ρυθμό ροής νερού, εφόσον η διαθέσιμη παροχή επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες της καλλιέργειας στην αρδευόμενη έκταση. Όταν τα συστήματα είναι σωστά σχεδιασμένα και η διαχείριση του νερού είναι αποτελεσματική, η άρδευση με αυλάκια μπορεί να επιτύχει αποδοτικότητα συγκρίσιμη με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο εφαρμογής νερού, εκτός από ένα κατάλληλα σχεδιασμένο σύστημα στάγδην άρδευσης. Σε περιπτώσεις περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού, μπορούν να εφαρμοστούν πρακτικές όπως η εναλλασσόμενη άρδευση γραμμών ή άλλες τεχνικές προσαρμογής της άρδευσης. Τα αυλάκια είναι ιδιαίτερα ευέλικτα ως προς τον ρυθμό παροχής νερού, δεδομένου ότι ο αριθμός των αρδευόμενων γραμμών σε κάθε εφαρμογή μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες (Abou Seeda et al., 2020).

Η ποιότητα του αρδευτικού νερού αποτελεί επίσης καθοριστικό παράγοντα για την καταλληλότητα της μεθόδου. Το νερό μπορεί να είναι καλής ποιότητας ή να περιέχει σημαντικές ποσότητες κολλοειδών ουσιών, καθώς και διάφορα άλατα και μέταλλα (Maas, 1990). Σε ορισμένα εδάφη, ιδίως σε αυτά με υψηλή διηθητικότητα, όπως τα αμμώδη, η παρουσία μέτριων ποσοτήτων κολλοειδών υλικών μπορεί να αποβεί ευεργετική, καθώς αυτά αποτίθενται στον πυθμένα των αυλακιών και μειώνουν τον ρυθμό διήθησης του εδάφους, διευκολύνοντας τον έλεγχο της εφαρμογής του νερού. Επιπλέον, τα κολλοειδή υλικά ενδέχεται να συντελέσουν στη βελτίωση της εδαφικής γονιμότητας. Αντίθετα, σε άλλους τύπους εδαφών, η συσσώρευσή τους στην επιφάνεια μπορεί να δυσχεράνει την κατεργασία του εδάφους, καθιστώντας την συχνότερη και πιο απαιτητική (Abou Seeda et al., 2020).

Τα περισσότερα αρδευτικά νερά περιέχουν άλατα ή μεταλλικά στοιχεία, τα οποία μπορεί να είναι είτε ωφέλιμα είτε επιβλαβή, ανάλογα με το είδος τους. Δεδομένου ότι τα περισσότερα φυτά μπορούν να προσλαμβάνουν νιτρικά ιόντα, κατίοντα καλίου και φωσφορικά ιόντα, σπάνια συσσωρεύονται σε επιβλαβείς συγκεντρώσεις. Αντίθετα, το νάτριο, καθώς και τα θειικά και χλωριούχα ιόντα, προσλαμβάνονται σε περιορισμένο βαθμό και, λόγω της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους και της εκλεκτικής πρόσληψης από τα φυτά, τείνουν να συσσωρεύονται στα αναχώματα ανάμεσα στα αυλάκια. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος του ριζικού συστήματος αναπτύσσεται σε αυτά τα αναχώματα, η άρδευση με αυλάκια δεν

ενδείκνυται όταν το νερό περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις επιβλαβών αλάτων, και ιδιαίτερα νατρίου (Abou Seeda et al., 2020).

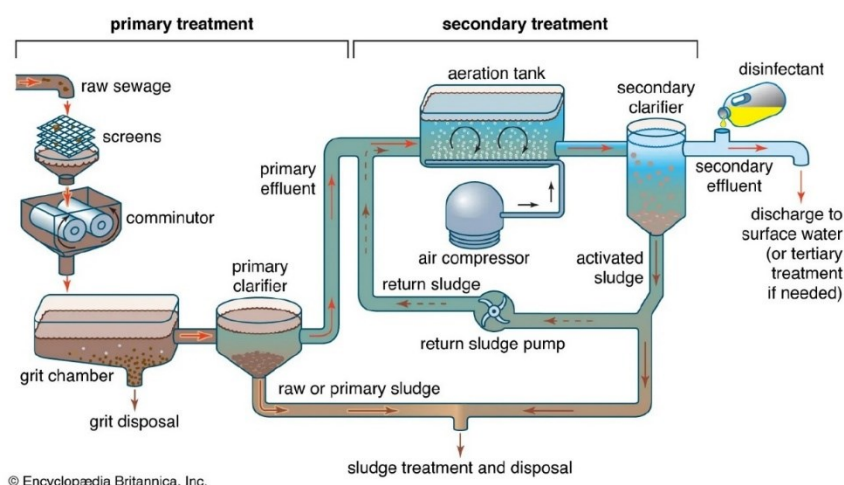
2.3. Ορισμός και στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων θεωρείται μία από τις σημαντικότερες επιλογές για τη διαχείριση της υδροληψίας (Gheraout et al., 2019; Rizzo et al., 2020). Τα επεξεργασμένα λύματα (TW) ορίζονται ως «νερό που έχει υποβληθεί τουλάχιστον σε δευτεροβάθμια επεξεργασία και βασική απολύμανση και επαναχρησιμοποιείται αφού εξέλθει από μια οικιακή εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων» (Center et al., 2008).

Όπως αναφέρεται στη μελέτες των Abdel-Raouf et al. (2012) και FAO (2003), τα κύρια στάδια της συμβατικής επεξεργασίας λυμάτων περιλαμβάνουν:

1. Προκαταρκτική επεξεργασία: Απομάκρυνση μεγάλων στερεών από τα ακατέργαστα λύματα (ξύλα, υφάσματα, περιττώματα και βαριά σωματίδια άμμου), τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν ζημιές στον εξοπλισμό ή να παρεμποδίσουν τη ροή.
2. Πρωτοβάθμια επεξεργασία: Απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών (SS) και των επιπλεόντων ουσιών (βλέπε Εικόνα 14).
3. Δευτεροβάθμια επεξεργασία: Μείωση της βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand – BOD), της χημικής ζήτησης οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand – COD) και των αιωρούμενων στερεών, μέσω απομάκρυνσης ή μείωσης των υπολειπόμενων στερεών και οργανικών ουσιών (βλέπε Εικόνα 14).

Η BOD εκφράζει την ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου που απαιτείται από αερόβιους μικροοργανισμούς για τη βιολογική αποδόμηση της οργανικής ύλης σε ένα δείγμα νερού, υπό συγκεκριμένες συνθήκες χρόνου και θερμοκρασίας (Dionisi, 2017; Ombwayo, 2019). Αντίστοιχα, η COD δείχνει την ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση της ανθρακώδους οργανικής ύλης (Von Sperling, 2007).



Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασία λυμάτων (Nathanson & Ambulkar, 2026).

4. Τριτοβάθμια ή/ και προηγμένη επεξεργασία:

Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την απομάκρυνση των θρεπτικών στοιχείων (όπως άζωτο και φώσφορος) καθώς και των βαρέων μετάλλων, τα οποία δεν απομακρύνονται κατά τα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας. Επιπλέον, περιλαμβάνει τη μείωση του μικροβιακού φορτίου μέσω μεθόδων απολύμανσης όπως η χλωρίωση, η οζόνωση και η υπεριώδης ακτινοβολία (UV), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εξουδετέρωση παθογόνων μικροοργανισμών.

Γενικά, οι αρνητικές επιπτώσεις από τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων μπορούν να μειωθούν σημαντικά μέσω της επιλογής κατάλληλου συστήματος άρδευσης, της εφαρμογής ορθού προτύπου καλλιεργειών και αποτελεσματικής διαχείρισης της άρδευσης.

2.3.1 Κίνδυνοι και ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων

Τα λύματα διακρίνονται, ως προς τα χαρακτηριστικά τους, σε φυσικά, χημικά και βιολογικά (Metcalf, 2003). Η υγρή φάση των λυμάτων αποτελεί ένα πολύπλοκο μείγμα ανόργανων συστατικών και οργανικής ύλης, η οποία εμφανίζεται σε διάφορες μορφές, όπως μεγάλα και μικρά σωματίδια, αιωρούμενα στερεά και κολλοειδή.

Στα λύματα ανιχνεύονται τοξικά ιχνοστοιχεία, όπως κάδμιο (Cd), χαλκός (Cu), αρσενικό (As), χρώμιο (Cr), μόλυβδος (Pb), ψευδάργυρος (Zn) και υδράργυρος (Hg) (FAO, 1992), καθώς και οργανικές ενώσεις όπως φυτοφάρμακα, λιπίδια, πρωτεΐνες, συνθετικά απορρυπαντικά, φαρμακευτικές ουσίες και σύνθετες αζωτούχες ενώσεις (Cizmas et al., 2015; Onesios et al., 2009). Οι ουσίες αυτές ενδέχεται να επιδράσουν αρνητικά στην ανθρώπινη υγεία, αν και οι άμεσες επιπτώσεις εξακολουθούν να διερευνώνται (Cizmas et al., 2015; Onesios et al., 2009).

Επιπλέον, έχουν εντοπιστεί μικροπλαστικά (π.χ. PET, PE, PP, PS), τα οποία δύνανται να επηρεάσουν αρνητικά τη βλαστική και αναπαραγωγική ανάπτυξη των φυτών (Ziajahromi et al., 2017; Carr et al., 2016).

Σημαντική ανησυχία προκαλεί η παρουσία ενεργών φαρμακευτικών ενώσεων στα επεξεργασμένα λύματα, καθώς οι συμβατικές διεργασίες ενεργούς ιλύος δεν τις απομακρύνουν αποτελεσματικά (Gros et al., 2010; J. L. Santos et al., 2009). Κατά συνέπεια, οι ενώσεις αυτές έχουν εντοπιστεί σε εδάφη που αρδεύονται με επεξεργασμένα λύματα (Biel-Maeso et al., 2018). Αν και ο οικοτοξικολογικός κίνδυνος θεωρείται γενικά χαμηλός, εξαρτάται από το είδος της ένωσης και τον χρόνο συσσώρευσης (Leal et al., 2020). Η μακροχρόνια παρουσία τους μπορεί να επηρεάσει τους μικροοργανισμούς του εδάφους και να οδηγήσει σε μεταφορά τους στην τροφική αλυσίδα (Montemurro et al., 2019).

Οι χημικοί κίνδυνοι σχετίζονται κυρίως με την παρουσία βαρέων μετάλλων, οργανικής ύλης, αλάτων, θρεπτικών στοιχείων και τοξικών ενώσεων (Qadir et al., 2015). Τα ανόργανα συστατικά περιλαμβάνουν υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακών ιόντων (NH_4^+), χλωριδίων (Cl^-), φωσφορικών ιόντων (PO_4^{3-}), καλίου (K), νατρίου (Na), ασβεστίου (Ca), θείου (S) και διττανθρακικών ιόντων (HCO_3^-), καθώς και βαρέα μέταλλα (Lim et al., 2010). Παράλληλα, τα επεξεργασμένα λύματα περιέχουν ιχνοστοιχεία απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών, όπως νικέλιο (Ni), χαλκό (Cu), σίδηρο (Fe), βόριο (B), κοβάλτιο (Co), ψευδάργυρο (Zn), μολυβδαίνιο (Mo) και μαγγάνιο (Mn) (Qian & Mecham, 2005).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα χημικά χαρακτηριστικά των λυμάτων δύνανται να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον με ποικίλους τρόπους. Η διαλυτή οργανική ύλη ενδέχεται να προκαλέσει μείωση των επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου στα υδάτινα σώματα και να αλλοιώσει τη γεύση και την οσμή των υδάτινων πόρων, ενώ η παρουσία τοξικών ουσιών μπορεί να επηρεάσει την τροφική αλυσίδα και να θέσει σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία (Kesalkar et al., 2012).

Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τα υγρά απόβλητα συνδέονται άμεσα με τα φυσικά, βιολογικά και χημικά χαρακτηριστικά τους (Metcalf, 2003). Τα φυσικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν κυρίως την περιεκτικότητα σε στερεά, η οποία επηρεάζει τη θολότητα, τη διαύγεια και την αισθητική ποιότητα του νερού, καθώς και τη θερμοκρασία, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη υδρόβια ζωή μειώνοντας τη διαλυτότητα του διαλυμένου οξυγόνου στα υδάτινα σώματα (Metcalf, 2003). Τα αιωρούμενα στερεά συμβάλλουν στην αύξηση της θολότητας και στη συσσώρευση ιλύος, επιβαρύνοντας τα υδάτινα οικοσυστήματα (Muttamara, 1996).

Τα βιολογικά χαρακτηριστικά των λυμάτων αφορούν την παρουσία μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, ιοί και πρωτόζωα, οι οποίοι ενδέχεται να προκαλέσουν ασθένειες στον άνθρωπο (Uyttendaele et al., 2015). Παρότι μεγάλο ποσοστό αυτών είναι αβλαβές, τα λύματα περιέχουν και παθογόνους μικροοργανισμούς, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την κατάλληλη επεξεργασία πριν από τη διάθεση ή επαναχρησιμοποίησή τους (Shaaban et al., 2004). Η δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους των παθογόνων μικροοργανισμών (Havelaar et al., 1991).

Η παρουσία οργανικής ύλης αποτελεί βασικό χημικό και βιολογικό κίνδυνο, καθώς απαιτεί μεγάλες ποσότητες οξυγόνου για τη βιολογική αποδόμησή της, οδηγώντας σε μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στους υδάτινους αποδέκτες (Metcalf & Eddy, 1991). Οι παράμετροι βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD) και χημική ζήτηση οξυγόνου (COD) χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιολόγηση του βαθμού ρύπανσης των υγρών αποβλήτων, με υψηλές τιμές να υποδηλώνουν αυξημένο οργανικό φορτίο (Sun et al., 2016). Ο λόγος BOD/COD αποτελεί σημαντικό δείκτη της βιοαποδομησιμότητας των αποβλήτων (Abdalla & Hammam, 2014; Metcalf, 2003).

Μετά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, οι συγκεντρώσεις BOD και COD μειώνονται σημαντικά λόγω της απομάκρυνσης της βιοδιασπώμενης οργανικής ύλης, περιορίζοντας έτσι τις αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον (Sun et al., 2016). Ωστόσο, η ανεπαρκής επεξεργασία ή διάθεση αποβλήτων με υψηλό οργανικό φορτίο μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων και σε κινδύνους για τη δημόσια υγεία (Metcalf, 2003; Metcalf & Eddy, 1991).

Η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD) εκφράζει την ποσότητα οξυγόνου (mg O₂/L) που καταναλώνεται σε διάστημα πέντε ημερών στους 20°C και αποτελεί βασικό δείκτη του βαθμού οργανικής ρύπανσης και της πιθανής κατανάλωσης διαλυμένου οξυγόνου σε υδάτινους

αποδέκτες ή εκροές με αυξημένο οργανικό φορτίο (Rahman & Kabir, 2010). Οι κύριες πηγές οργανικής ύλης που επηρεάζουν τις τιμές BOD είναι τα ακατέργαστα αστικά λύματα και τα βιομηχανικά απόβλητα (Malaviya & Rathore, 2007). Ενδεικτικά, το καθαρό νερό παρουσιάζει $BOD \approx 2 \text{ mg/L}$, τα ακατέργαστα λύματα $\approx 600 \text{ mg/L}$, τα επεξεργασμένα λύματα $20\text{--}100 \text{ mg/L}$, ενώ τα βιομηχανικά απόβλητα μπορεί να φτάσουν έως και 25.000 mg/L (Malaviya & Rathore, 2007).

Η χημική ζήτηση οξυγόνου (COD) αποτελεί έμμεσο δείκτη της συνολικής περιεκτικότητας του νερού σε οργανικές και ανόργανες ενώσεις και εκφράζεται επίσης σε $\text{mg O}_2/\text{L}$, αποτελώντας ταχεία και χρήσιμη παράμετρο αξιολόγησης, ιδιαίτερα για βιομηχανικά απόβλητα (Amoo & Aremu, 2012; Muthuraman & Ramaswamy, 2019). Ο λόγος BOD/COD μεταβάλλεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων και χρησιμοποιείται ευρέως ως δείκτης της βιοαποδομησιμότητάς τους (Abdalla & Hammam, 2014; Metcalf, 2003). Η παρακολούθηση αυτών των παραμέτρων είναι κρίσιμη, καθώς η υψηλή οργανική ρύπανση στα λύματα αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό και υγειονομικό κίνδυνο, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για επεξεργασία πριν από τη διάθεση ή την επαναχρησιμοποίησή τους.

2.3.2 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων και αποδεκτά όρια ποιότητας

Σε παγκόσμιο επίπεδο, εκτιμάται ότι περίπου $0,4$ τρισεκατομμύρια m^3 λυμάτων απορρίπτονται κάθε χρόνο, με αποτέλεσμα τη ρύπανση περίπου $5,5$ τρισεκατομμυρίων m^3 νερού ετησίως (Zhang & Shen, 2019). Ως εκ τούτου, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη διαχείρισης αυτών των μεγάλων ποσοτήτων λυμάτων μέσω κατάλληλων διαδικασιών επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης.

Η αυξανόμενη ζήτηση για οικιακό νερό, που οφείλεται στην πληθυσμιακή αύξηση, στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και στην ανάπτυξη του βιομηχανικού τομέα, θα οδηγήσει σε αύξηση της ποσότητας των παραγόμενων λυμάτων, προωθώντας έτσι την παγκόσμια επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (Assouline & Narkis, 2013).

Τα σημαντικότερα ζητήματα που απορρέουν από το θέμα αυτό σχετίζονται με επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και το οικοσύστημα, καθώς και με τεχνικές, θεσμικές, κοινωνικοπολιτισμικές και περιβαλλοντικές διαστάσεις της βιωσιμότητας (Deera & Krishnaven, 2015). Επομένως, η επεξεργασία και η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων καθίστανται απολύτως αναγκαίες.

Για παράδειγμα, στην Κίνα, ο δείκτης επεξεργασίας λυμάτων (δηλαδή ο λόγος της ποσότητας επεξεργασμένων λυμάτων προς το συνολικό όγκο των απορριπτόμενων λυμάτων) ανήλθε στο 86% το 2014, δηλαδή 3,4 φορές υψηλότερος σε σύγκριση με το 1999 (Z. Wang et al., 2017).

Σε διεθνές επίπεδο, η άρδευση με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα αυξάνεται κατά περίπου 10–29% ετησίως στην Κίνα, τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη, ενώ στην Αυστραλία η αύξηση φτάνει περίπου στο 41% (Aziz & Farissi, 2014).

Ο κύριος στόχος της επεξεργασίας είναι να παρασχεθούν επεξεργασμένα λύματα με ασφαλές και αποδεκτό επίπεδο περιβαλλοντικού και υγειονομικού κινδύνου, επιτυγχάνοντας τη μείωση των αιωρούμενων στερεών και της οργανικής ύλης, καθώς και την απομάκρυνση των χημικών και βιολογικών παραμέτρων που ενδέχεται να είναι επιβλαβείς για τις καλλιεργείες και την ανθρώπινη υγεία (Z. Wang et al., 2017; Seow et al., 2016).

Η γεωργική άρδευση αποτελεί σήμερα τον μεγαλύτερο χρήστη επεξεργασμένων λυμάτων παγκοσμίως· συνεπώς, προσφέρει σημαντικές μελλοντικές ευκαιρίες για τη χρήση ανακτημένου νερού τόσο σε ανεπτυγμένες όσο και σε αναπτυσσόμενες χώρες (Hashem & Qi, 2021).

Σε περίπου 44 χώρες, παγκοσμίως, περίπου 15 εκατομμύρια m³ επεξεργασμένων λυμάτων επαναχρησιμοποιούνται καθημερινά για αρδευτικούς σκοπούς στο γεωργικό τομέα (Winpenny et al., 2010). Σύμφωνα με τους Drechsel & Evans (2010), 20 εκατομμύρια εκτάρια σε περίπου 50 χώρες αρδεύονται με λύματα.

Παρότι η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων παρουσιάζει σημαντικά οφέλη, η επαναχρησιμοποίησή τους ενδέχεται να προκαλέσει περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις, καθώς οι ρύποι ενδέχεται να παραμένουν στα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα μετά την επεξεργασία και να συσσωρεύονται στους ζώντες οργανισμούς μέσω της τροφικής αλυσίδας (Q. Liang et al., 2014; Lyu et al., 2016).

Η περιβαλλοντική επιβάρυνση και οι αυξημένοι κίνδυνοι για την υγεία αποτελούν τις σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων (Drechsel et al., 2007; Ensink et al., 2008). Παρόλα αυτά, μέσω της ορθολογικής διαχείρισης της άρδευσης είναι δυνατό να περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις των επεξεργασμένων λυμάτων σε επίπεδα που θεωρούνται αποδεκτά για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία (Helmecke et al., 2020; FAO, 2003).

O Shock (2007) επισημαίνει ότι η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων μπορεί να ενέχει κινδύνους για την υγεία, εάν τα λύματα δεν έχουν υποστεί κατάλληλη προεπεξεργασία (π.χ. ανεπαρκή απομάκρυνση παθογόνων ή είσοδο βαρέων μετάλλων στην τροφική αλυσίδα). Επομένως, η κατάλληλη επεξεργασία των λυμάτων κρίνεται απαραίτητη για τον περιορισμό των πιθανών επιπτώσεων στη δημόσια υγεία.

2.3.3 Κατευθυντήριες οδηγίες και νομοθετικό πλαίσιο

Με την πρόοδο των τεχνολογιών επεξεργασίας, διάφορες χώρες έχουν εκδώσει κατευθυντήριες οδηγίες για τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων στην άρδευση και άλλους τομείς, με σκοπό τη διασφάλιση ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης και προστασίας του περιβάλλοντος (CMD, 2011; ISO, 2015; NRMMC-EPHC, 2006; OJFR, 2021; USEPA, 2004). Ο κύριος στόχος αυτών των κατευθυντήριων οδηγιών είναι η αντιμετώπιση των αρνητικών επιπτώσεων της χρήσης των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στους ανθρώπους και στο περιβάλλον. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Angelakis et al. (2018), οι περισσότερες οδηγίες επικεντρώνονται κυρίως στην προστασία της ανθρώπινης υγείας, παρουσιάζοντας ελλείψεις όσον αφορά ορισμένους επικίνδυνους ρύπους, καθώς και ασυνέπειες στα διαθέσιμα δεδομένα.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) έχει εκδώσει τρεις οδηγίες σχετικά με την ασφαλή χρήση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην άρδευση (WHO, 1973, 1989, 2006), με σκοπό τη βελτίωση των προτύπων και την υποστήριξη των εθνικών κανονισμών διαχείρισης λυμάτων (Mara & Kramer, 2008; WHO, 2006). Ο FAO έχει επίσης δημοσιεύσει δύο οδηγίες: η πρώτη ταξινομεί το αρδευτικό νερό βάσει νατρίου, αλατότητας, τοξικότητας και άλλων κινδύνων, ενώ η δεύτερη κατηγοριοποιεί την εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης ανάλογα με τον τύπο καλλιέργειας (FAO, 1985b, 1992). Η EPA έχει εκδώσει τέσσερις οδηγίες επαναχρησιμοποίησης (1980, 1992, 2004, 2012), με τη νεότερη να είναι αυστηρότερη και να στοχεύει στην ενίσχυση της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων, αξιοποιώντας τη διεθνή εμπειρία (USEPA, 2004, 2012).

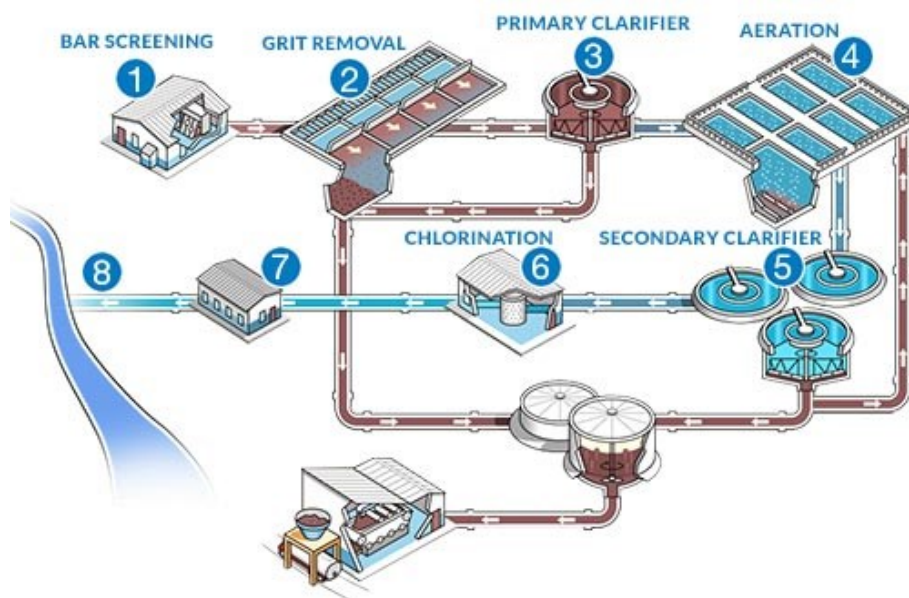
Οι κατευθυντήριες οδηγίες του WHO, EPA και FAO θεωρούνται οι κύριες αναφορές για τη δημιουργία εθνικών κανονισμών παγκοσμίως, ενώ σε χώρες χωρίς εθνικά πρότυπα συνιστάται η εφαρμογή αυτών των οδηγιών (Hashem & Qi, 2021).

Τα πρότυπα ποιότητας νερού για άρδευση περιλαμβάνουν παραμέτρους όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) το pH, η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD), η χημική ζήτηση οξυγόνου (COD), τα αιωρούμενα στερεά, καθώς και δείκτες νατρίου, όπως ο Δείκτης Προσρόφησης

Νατρίου (SAR), ο Προσαρμοσμένος Δείκτης Προσρόφησης Νατρίου (adjSAR), το Ποσοστό Διαλυτού Νατρίου (SSP), το Ποσοστό Ανταλλάξιμου Νατρίου (ESP) και το Υπολειμματικό Ανθρακικό Νάτριο (RSC). Επιπλέον, αξιολογούνται βιολογικοί δείκτες, όπως τα κολοβακτηριοειδή, το *Escherichia coli* και τα αυγά ελμίνθων, καθώς και θρεπτικά στοιχεία, η συγκέντρωση βορίου, τα βαρέα μέταλλα, τα τοξικά στοιχεία και οι φυτοτοξικές ενώσεις (FAO, 2003; Pedrero et al., 2010). Η παρακολούθηση αυτών των παραμέτρων είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ασφάλειας της άρδευσης, της προστασίας του περιβάλλοντος και της ποιότητας των καλλιεργειών, καθώς και, κατ' επέκταση, της δημόσιας υγείας.

ΕΝΟΤΗΤΑ 3: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Το ανακτημένο νερό (RW) αποτελεί μια αξιόπιστη και σταθερή πηγή νερού, παρέχοντας παράλληλα σημαντική ποσότητα θρεπτικών στοιχείων στις καλλιέργειες, γεγονός που ενισχύει την παραγωγικότητά τους (Gu et al., 2019; De Carlo et al., 2020). Επιπλέον, πέρα από τη μείωση της χρήσης καθαρού νερού, η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του εδάφους, εμπλουτίζοντάς το με οργανική ουσία και θρεπτικά στοιχεία. Αυτό με τη σειρά του ενισχύει την ικανότητα συγκράτησης νερού του εδάφους και επηρεάζει θετικά την αντίσταση στη συμπίεση και τις ιδιότητες αποστράγγισης του εδάφους (Abd-Elwahed, 2018). Μια τέτοια εφαρμογή επαναχρησιμοποίησης λυμάτων αναλύεται στη μελέτη των Ahmed et al. (2024), η οποία εξετάζει τον σχεδιασμό μιας σύγχρονης μονάδας επεξεργασίας λυμάτων στη Δυτική Ομντουρμάν του Σουδάν, η λειτουργία της οποίας στηρίζεται στον συνδυασμό βιολογικής επεξεργασίας, διήθησης άμμου, βιοαντιδραστήρων μεμβρανών και απολύμανσης (βλέπε Εικόνα 15). Η προτεινόμενη μονάδα δύναται να παράγει ανακτημένο νερό κατάλληλο για άρδευση, συμβάλλοντας στον περιορισμό της άντλησης υπόγειων υδάτων και στη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων της περιοχής (Ahmed et al., 2024).



Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση μιας σύγχρονης μονάδας επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης λυμάτων στη Δυτική Ομντουρμάν (Ahmed et al., 2024).

3.1. Αξιολόγηση της απόδοσης καλλιεργειών

3.1.1. Επίδραση της ποιότητας αρδευτικού νερού στην απόδοση

Η τομάτα (*Lycopersicon esculentum* M.) αποτελεί ένα από τα πιο απαιτητικά σε νερό κηπευτικά (Kiyamaz & Ertek, 2015). Στην πράξη, οι παραγωγοί συχνά εφαρμόζουν μεγαλύτερες ποσότητες νερού από τις απαιτούμενες, επιδιώκοντας τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της αποδοτικότητας χρήσης νερού (Y.-D. Du et al., 2017).

Η άρδευση με ανακτημένο νερό έχει συσχετιστεί με αυξημένες αποδόσεις καρπών έναντι της άρδευσης με συμβατικό νερό, πιθανώς λόγω της αυξημένης διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών (B. Li et al., 2019). Παρόμοια ευρήματα αναφέρθηκαν και από τους Gu et al. (2019) και Xu et al. (2010), οι οποίοι κατέγραψαν αυξημένη παραγωγικότητα υπό άρδευση με ανακτημένο νερό. Η αύξηση αυτή αποδίδεται κυρίως στα αυξημένα επίπεδα διαθέσιμων θρεπτικών στοιχείων που παρέχει το ανακτημένο νερό (Teklehaimanot et al., 2015; Wei et al., 2017), καθώς και στη βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους και της πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά (Jamjoum & Khattari, 1986).

Όσον αφορά τα μορφολογικά χαρακτηριστικά, η διάμετρος και το βάρος των καρπών αυξάνονται με την αύξηση της αναλογίας των επεξεργασμένων λυμάτων, με τις υψηλότερες τιμές σε μεταχειρίσεις αποκλειστικής χρήσης λυμάτων. Η αύξηση αυτή ενδέχεται να οφείλεται στην παρουσία θρεπτικών στοιχείων στα λύματα, τα οποία συμβάλλουν στην ανάπτυξη των φυτών και μειώνουν την ανάγκη για πρόσθετη λίπανση (Nielsen et al., 1989; Maurer et al., 1995). Παράλληλα, η απώλεια βάρους των καρπών μειώνεται όσο αυξάνεται η αναλογία επεξεργασμένων λυμάτων, ενώ διαφοροποιήσεις παρατηρούνται και μεταξύ των ποικιλιών (Al-Lahham et al., 2003).

Ωστόσο, η ακατάλληλη επεξεργασία των λυμάτων ενδέχεται να οδηγήσει σε συσσώρευση αλατότητας, φαινόμενα τοξικότητας και πιθανούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία (Gheraout et al., 2019). Συνεπώς, η επιλογή κατάλληλου αρδευτικού συστήματος και ορθών πρακτικών διαχείρισης άρδευσης είναι καθοριστικής σημασίας για τον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων της χρήσης ανακτημένου νερού.

Σύμφωνα με μελέτες η εφαρμογή της υπόγειας στάγδην άρδευσης με χρήση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων απέδωσε σταθερά τις υψηλότερες μέσες αποδόσεις σε βάθος τριετίας,

ακολουθούμενη από τις μεθόδους της απλής στάγδην άρδευσης και της άρδευσης με αυλάκια (Akar & Aşık, 2025; Mahmoudi et al., 2020; Tripathi et al., 2016). Συγκεκριμένα, στη μελέτη των Tripathi et al. (2016), η τοποθέτηση των σωλήνων σε βάθος 15 cm απέδωσε τον υψηλότερο δείκτη φυλλικής επιφάνειας και την καλύτερη σοδειά, ενώ στο βάθος των 30 cm ευνόησε τη μέγιστη ανάπτυξη της ρίζας. Παράλληλα, η χρήση λυμάτων αύξησε την παραγωγή κατά 5%, επιτρέποντας σημαντική εξοικονόμηση λιπασμάτων.

Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των καρπών (ύψος, μήκος και πάχος σάρκας καρπού) εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους κατά την εφαρμογή υγρών αποβλήτων με υπόγεια στάγδην άρδευση υποδηλώνοντας μια άμεση θετική συσχέτιση μεταξύ της χρήσης αποβλήτων και της ανάπτυξης χαρακτηριστικών που ευνοούν την εμπορική αξία του προϊόντος (Akar & Aşık, 2025).

3.1.2. Επίδραση του αρδευτικού συστήματος και των τεχνικών διαχείρισης

Η στάγδην άρδευση θεωρείται γενικά η καταλληλότερη μέθοδος όταν χρησιμοποιείται ανακτημένο νερό, λόγω της αυξημένης ασφάλειας και αποδοτικότητάς της (Hashem & Qi, 2021). Η χαμηλή αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού (IWUE) αποτελεί σημαντική πρόκληση για τη βιώσιμη γεωργία, ιδιαίτερα σε περιοχές επιρρεπείς στην ξηρασία (Y. Wang et al., 2010), γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή τεχνικών που αυξάνουν την αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού.

Η εναλλασσόμενη μερική άρδευση ριζικής ζώνης (APRI) αποτελεί τεχνική εξοικονόμησης νερού, η οποία δημιουργεί ταυτόχρονα υγρές και ξηρές περιοχές στη ριζική ζώνη, επιτυγχάνοντας ελάχιστες απώλειες απόδοσης και αυξημένη αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού (M. Cheng et al., 2021; Hashem et al., 2018). Παράλληλα, η χρήση εναλλασσόμενης άρδευσης αυλακιών (FUI) σε συνδυασμό με μειωμένες ποσότητες εφαρμοζόμενου νερού έχει προταθεί ως στρατηγική βελτίωσης της παραγωγικότητας του νερού (El-Sayed et al., 2020). Ωστόσο, η στάγδην άρδευση έχει αποδειχθεί πιο αποτελεσματική, καθώς αύξησε την απόδοση της τομάτας σχεδόν κατά 1,5 φορά, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα 30% λιγότερο αρδευτικό νερό σε σύγκριση με τη χρήση εναλλασσόμενης άρδευσης αυλακιών (Kahlon et al., 2007).

Επιπλέον, η υπόγεια στάγδην άρδευση (SDI) έχει αναφερθεί ότι προσφέρει καλύτερη ανάπτυξη και υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τη στάγδην επιφανειακή άρδευση (Mahmoudi et al., 2020). Σύμφωνα με τον Najafi (2006), η μέγιστη απόδοση τομάτας καταγράφηκε υπό

στάγδην άρδευση, πιθανώς λόγω της βελτιωμένης εδαφικής υγρασίας και της αυξημένης διαθεσιμότητας αζώτου (N) στη ριζική ζώνη. Επιπλέον, η υπόγεια στάγδην άρδευση, σε σύγκριση με την επιφανειακή άρδευση, μειώνει την ανάπτυξη ζιζανίων και περιορίζει την έκπλυση θρεπτικών στοιχείων (Khawla et al., 2019).

3.1.3. Σημασία των κατάλληλων μεθόδων λίπανσης και άρδευσης στην απόδοση των φυτών

Το άζωτο (N) αποτελεί βασικό θρεπτικό στοιχείο για την ανάπτυξη και την απόδοση των φυτών (Hashem et al., 2024). Η εφαρμογή κατάλληλων δόσεων και ο σωστός χρονισμός λίπανσης είναι κρίσιμα για τη βέλτιστη απόδοση και την αποτελεσματική χρήση θρεπτικών στοιχείων (Yoseftabar, 2012; Z. Zhang et al., 2021). Οι τμηματικές εφαρμογές λιπάσματος συμβάλλουν στην αποφυγή υπερλίπανσης στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης και εξασφαλίζουν επαρκή παροχή θρεπτικών στοιχείων στα μεταγενέστερα στάδια (Lu et al., 2021).

Οι Mehmood et al. (2019) διαπίστωσαν ότι η αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού της στάγδην άρδευσης ήταν υψηλότερη από εκείνη της επιφανειακής άρδευσης υπό τον ίδιο ρυθμό εφαρμογής αζώτου, επιβεβαιώνοντας τη σημασία του κατάλληλου συνδυασμού άρδευσης και λίπανσης. Στο ίδιο πλαίσιο, η διερεύνηση της επίδρασης των μεθόδων άρδευσης στην απόδοση έχει αποτελέσει αντικείμενο αρκετών μελετών. Σύμφωνα με τους Al-Hadidi & Sweity, (2022) και τους Hashem et al. (2024), η πλήρης άρδευση, σε σύγκριση με την εναλλασσόμενη μερική άρδευση ριζικής ζώνης και την ελλειμματική άρδευση, οδήγησε σε μεγαλύτερη απόδοση, το οποίο αποδόθηκε στη διατήρηση υψηλότερης εδαφικής υγρασίας σε σχέση με την ελλειμματική άρδευση.

3.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά καρπού ή φυτού

3.2.1 pH

Οι Al-Lahham et al. (2003) εξέτασαν την χρήση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (TW) για άρδευση καλλιεργειών τομάτας στην Ιορδανία. Σύμφωνα με αυτά που βρήκαν, το pH των καρπών δεν επηρεάζεται σημαντικά από το σύστημα άρδευσης, ενώ παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των ποικιλιών, οι οποίες αποδίδονται κυρίως στη γενετική σύσταση και σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθώς και στο στάδιο ωρίμανσης και στις καλλιεργητικές συνθήκες (Al-Lahham et al., 2003; Lower & Thompson, 1966; Wolf et al., 1979).

Οι Akar & Aşık (2025) εξέτασαν την επίδραση της άρδευσης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα σε σύγκριση με το γλυκό νερό στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καρπού της

πιπεριάς στην Τουρκία. Όσον αφορά την οξύτητα και το pH του πολτού της πιπεριάς, η χρήση επεξεργασμένων αποβλήτων δεν φάνηκε να προκαλεί ουσιαστικές μεταβολές, εύρημα που συνάδει με προγενέστερες έρευνες (Z. Wang et al., 2017), οι οποίες υποστηρίζουν ότι η ποιότητα των λαχανικών δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη συγκεκριμένη πηγή νερού.

3.2.2 Αλατότητα και SAR

Οι Sacks & Bernstein (2011) εξέτασαν την επίδραση της άρδευσης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καρπών σε καλλιέργειες πεπονιού στο Ισραήλ. Η χημική σύσταση των υγρών αποβλήτων που χρησιμοποιήθηκαν για άρδευση διέφερε σημαντικά από εκείνη του πόσιμου νερού, παρουσιάζοντας υψηλότερες τιμές αλατότητας (EC), pH και λόγου προσρόφησης νατρίου (SAR). Το συγκεκριμένο νερό άρδευσης ήταν εμπλουτισμένο με άλατα, όπως νάτριο, χλώριο και διττανθρακικά (HCO_3^-), καθώς και με βαρέα μέταλλα και απαραίτητα μακροστοιχεία και μικροστοιχεία. Παρά τη δυνητική επικινδυνότητα παραγόντων όπως το βόριο ή η υψηλή αλατότητα, οι οποίοι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Feigen et al., 1991) μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση των καλλιεργειών, στη μελέτη των Sacks & Bernstein (2011) διαπιστώθηκε ότι η ανάπτυξη και η απόδοση της καλλιέργειας του πεπονιού δεν τέθηκαν σε κίνδυνο.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η αλατότητα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που συνήθως περιορίζει την ανάπτυξη και επηρεάζει την ποιότητα της παραγωγής (Bernstein & Kafkafi, 2002; Friedman et al., 2007). Τα πεπόνια κατατάσσονται στις μετρίως ανθεκτικές στα άλατα καλλιέργειες, αν και η απόκρισή τους διαφοροποιείται ανάλογα με την ποικιλία, κυμαινόμενη από ευαίσθητη έως μέτρια ανθεκτική (Botía et al., 2005). Ενώ υπό συνθήκες υψηλής αλατότητας παρατηρείται συνήθως μείωση του μεγέθους και του βάρους των καρπών (Shannon & Francois, 1978), τα επίπεδα ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που εφαρμόστηκαν στη μελέτη των Sacks & Bernstein (2011), ($1,7\text{--}1,8 \text{ dS m}^{-1}$) δεν προκάλεσαν μείωση της παραγωγικότητας.

Το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκαν αλλοιώσεις στην εμφάνιση των φυτών ή στην ποσότητα της παραγωγής αποδίδεται στο ότι οι τιμές αλατότητας παρέμειναν χαμηλότερες από τα όρια των $3\text{--}7 \text{ dS m}^{-1}$, πάνω από τα οποία εντοπίζονται συνήθως ζημιές στην καλλιέργεια του πεπονιού. Ειδικότερα για την ποικιλία 'Eyal', οι συγκεντρώσεις νατρίου και χλωρίου στα χρησιμοποιούμενα απόβλητα κρίθηκαν ως ασφαλείς, καθώς βρίσκονταν κάτω από το κρίσιμο όριο πρόκλησης φυτοτοξικότητας, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα χρήσης τέτοιων υδάτινων

πόρων για τη συγκεκριμένη ποικιλία χωρίς υποβάθμιση του τελικού προϊόντος (Sacks & Bernstein, 2011).

3.2.3 Συγκέντρωση Βορίου (B) και Επιπτώσεις στην Παραγωγή

Στη μελέτη των Sacks & Bernstein (2011), η συγκέντρωση βορίου στα υγρά απόβλητα ήταν 0,38 mg/L. Η τιμή αυτή είναι σημαντική, επειδή κάθε φυτό αντιδρά διαφορετικά στο βόριο, άλλα είναι πολύ ανθεκτικά και άλλα ιδιαίτερα ευαίσθητα (Bingham et al., 1985). Παρόλο που τα πεπόνια κατατάσσονται στα είδη που είναι ευαίσθητα στην περίσσεια βορίου (Goldberg et al., 2003), η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η ενδεχόμενη μείωση της απόδοσης δεν συνδέεται πάντα άμεσα με τη συσσώρευση του στοιχείου στους φυτικούς ιστούς (Reid et al., 2004; Torun et al., 2002).

Σύμφωνα με τους Sacks & Bernstein (2011) σημειώνεται ότι οι συγκεντρώσεις βορίου στα λύματα είναι παραδοσιακά υψηλότερες σε σχέση με το πόσιμο νερό, γεγονός που επιτείνεται από το ότι οι συμβατικές μέθοδοι δευτεροβάθμιας επεξεργασίας δεν επιτυγχάνει σημαντική μείωση του στοιχείου (Ben-Hur, 2004). Παρά το γεγονός ότι τα δευτεροβάθμια επεξεργασμένα απόβλητα (STWW), τα οποία αποτελούν την κύρια πηγή άρδευσης, συχνά περιέχουν βόριο σε επίπεδα που θεωρούνται επιζήμια για πολλές καλλιέργειες, τα αποτελέσματα της έρευνας των Sacks & Bernstein (2011) δεν έδειξαν αρνητική επίδραση στην παραγωγή. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με προγενέστερες έρευνες (Bernstein et al., 2009; Nirit et al., 2006), οι οποίες επιβεβαιώνουν ότι η άρδευση με τέτοιας ποιότητας νερό μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να μην υποβαθμίζει την παραγωγικότητα της καλλιέργειας.

3.2.4 Επίδραση του Νερού Άρδευσης στην Ποιότητα και Θρεπτική Αξία των Καρπών

Όπως αναφέρεται στη μελέτη των Al-Lahham et al. (2003) στην Ιορδανία, η περιεκτικότητα των καρπών σε διαλυτά στερεά φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από το είδος του νερού άρδευσης, με υψηλότερες τιμές να καταγράφονται σε καρπούς που αρδεύονται με πόσιμο νερό. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων ενδέχεται να μειώνει τη συγκέντρωση διαλυτών στερεών, όπως επίσης αναφέρεται και στη μελέτη των Maurer et al. (1995).

Αντίστοιχα, διαφοροποιήσεις παρατηρούνται και στη σκληρότητα των καρπών ανάλογα με το είδος του νερού άρδευσης, με υψηλότερες τιμές σε καρπούς που αρδεύθηκαν με πόσιμο νερό (Al-Lahham et al., 2003). Η τάση αυτή πιθανόν να σχετίζεται και με διαφορές στις

καλλιεργητικές πρακτικές, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς και τη σύσταση των κυτταρικών τοιχωμάτων των καρπών (Hamson, 1952; Hobson, 1965; Kasrawi et al., 1981).

Σύμφωνα με τους Akar & Aşık (2025), ανάλογη τάση παρατηρείται και στην περιεκτικότητα των καρπών σε βιταμίνη C. Συγκεκριμένα, οι καρποί που αρδεύονται με γλυκό νερό παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με εκείνους που δέχονται άρδευση με υγρά απόβλητα, ιδιαίτερα υπό συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης (Akar & Aşık, 2025). Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με τα ευρήματα των Hashem & Qi (2021), οι οποίοι αναφέρουν πιθανές αρνητικές επιπτώσεις της χρήσης υγρών αποβλήτων στη συγκέντρωση βιταμίνης C. Παρ' όλα αυτά, άλλες μελέτες αποδίδουν τέτοιες αποκλίσεις σε εξωγενείς παράγοντες, όπως οι κλιματικές συνθήκες, η ποικιλία των φυτών και οι συνολικές συνθήκες ανάπτυξης (Disciglio et al., 2015; Cirelli et al., 2012).

3.2.5 Βαρέα μέταλλα και συστήματα άρδευσης

Η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στο εδάωμο μέρος του φυτού επηρεάζεται σημαντικά τόσο από την ποιότητα του αρδευτικού νερού όσο και από το σύστημα άρδευσης. Η χρήση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων (MWW) οδηγεί γενικά σε υψηλότερες συγκεντρώσεις μετάλλων σε σύγκριση με το καθαρό νερό, κυρίως λόγω της σταδιακής συσσώρευσης στο έδαφος μετά από επαναλαμβανόμενη εφαρμογή (Sinha et al., 2006). Οι Tripathi et al. (2016) εξέτασαν την επίδραση της επιφανειακής και υπόγειας στάγδην άρδευσης στην καλλιέργεια του κουνουπιδιού, συγκρίνοντας την εφαρμογή αστικών υγρών αποβλήτων με τη χρήση καθαρού νερού. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα πεδίου στην Ινδία με σκοπό να μελετηθούν τα βιομετρικά χαρακτηριστικά και η χημική σύσταση της καλλιέργειας του κουνουπιδιού. Οι συγκεντρώσεις των μετάλλων που καταγράφηκαν (As, Cu, Cr, Fe, Mn, Pb, Zn) παραμένουν σημαντικά χαμηλότερες από τα διεθνώς αποδεκτά όρια (Bhatnagar & Awasthi, 2000; Codex, 1984). Το σύστημα στάγδην άρδευσης, και ιδιαίτερα η υπόγεια στάγδην άρδευση, συμβάλλει στη μείωση της μεταφοράς μετάλλων στο φυτό, λόγω της ελεγχόμενης παροχής νερού και της περιορισμένης διαβροχής της επιφάνειας του εδάφους (Ayars et al., 2015; Tripathi et al., 2016). Αντίθετα, συστήματα επιφανειακής άρδευσης, όπως η κατάκλυση, έχουν συσχετιστεί με υψηλότερη συσσώρευση μετάλλων στο φυτό (Kiziloglu et al., 2008; Sharma et al., 2009). Επιπλέον, η εφαρμογή οργανικών εδαφοβελτιωτικών μπορεί να μειώσει τη βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων μέσω σχηματισμού σταθερών συμπλόκων (Syukor et al., 2016).

3.2.6 Μικροβιολογική Ποιότητα και Ασφάλεια των Προϊόντων

Η παγκόσμια αύξηση των τροφιμογενών νοσημάτων που συνδέονται με την κατανάλωση νωπών οπωροκηπευτικών έχει καταστήσει τη μικροβιακή ασφάλεια των καλλιεργειών πριν από τη συγκομιδή κρίσιμο ζήτημα για τη δημόσια υγεία. Παθογόνα όπως το *E. coli*, η *Salmonella* και η *Listeria* μπορούν να αποικίσουν τα φυτά μέσω μολυσμένου εδάφους ή νερού άρδευσης (Sacks & Bernstein, 2011). Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων αποτελεί δυνητική πηγή κινδύνου, καθώς η δευτεροβάθμια επεξεργασία τους συχνά δεν εξαλείφει πλήρως το μικροβιακό φορτίο (Armon et al., 2002; Bernstein, 2009).

Μηχανισμοί Επιμόλυνσης και ο Ρόλος του Εδάφους

Η μικροβιακή ποιότητα των καρπών σχετίζεται άμεσα με τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων. Συνήθως, η επιδερμίδα των καρπών παρουσιάζει τα υψηλότερα επίπεδα μικροβιακού φορτίου πιθανόν λόγω της άμεσης επαφής με το έδαφος ή το νερό, ενώ η σάρκα παραμένει προστατευμένη (Al-Lahham et al., 2003). Ωστόσο, υπάρχουν δεδομένα, τα οποία ανατρέπουν την αντίληψη ότι οι ρίζες δρουν ως απόλυτο φράγμα (Sacks & Bernstein, 2011). Σύμφωνα με τους Guo et al. (2002) και Bernstein et al. (2007), ορισμένα παθογόνα έχουν τη δυνατότητα να διεισδύουν στους εσωτερικούς φυτικούς ιστούς μέσω του ριζικού συστήματος και να μεταφέρονται στα εδώδιμα μέρη. Αυτή η εσωτερική μόλυνση αποτελεί σημαντική πρόκληση για την ασφάλεια των προϊόντων που καταναλώνονται ωμά, καθώς ο κίνδυνος παραμένει υπαρκτός ακόμη και χωρίς άμεση επαφή του καρπού με το νερό ή το έδαφος (Sacks & Bernstein, 2011).

Επιπλέον, σε πειράματα με καλλιέργεια πεπονιού στο Ισραήλ (Sacks & Bernstein, 2011), ανιχνεύθηκαν *E. coli* και κολοβακτηρίδια στη φλούδα των καρπών, ανεξάρτητα από την ποιότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε (επεξεργασμένα υγρά απόβλητα ή πόσιμο νερό). Στη μελέτη των Sacks & Bernstein (2011) επισημαίνεται ότι η μόλυνση των καρπών δεν προέκυψε από την επαφή με το νερό άρδευσης, καθώς παθογόνα ανιχνεύθηκαν ακόμη και σε καλλιέργειες που αρδεύονταν με απαλλαγμένο από μικρόβια πόσιμο νερό. Αντίθετα, η εν λόγω επιμόλυνση αποδίδεται στο εδαφικό υπόστρωμα και συγκεκριμένα στο ανώτερο στρώμα των 2 cm, όπου οι μικροβιακοί δείκτες διατηρήθηκαν ενεργοί (Sacks & Bernstein, 2011). Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η οργανική ουσία δημιουργούν ένα ευνοϊκό περιβάλλον για τη μακροχρόνια επιβίωση των εντερικών βακτηρίων (Jamieson et al., 2002).

Η Επίδραση των Μεθόδων Άρδευσης

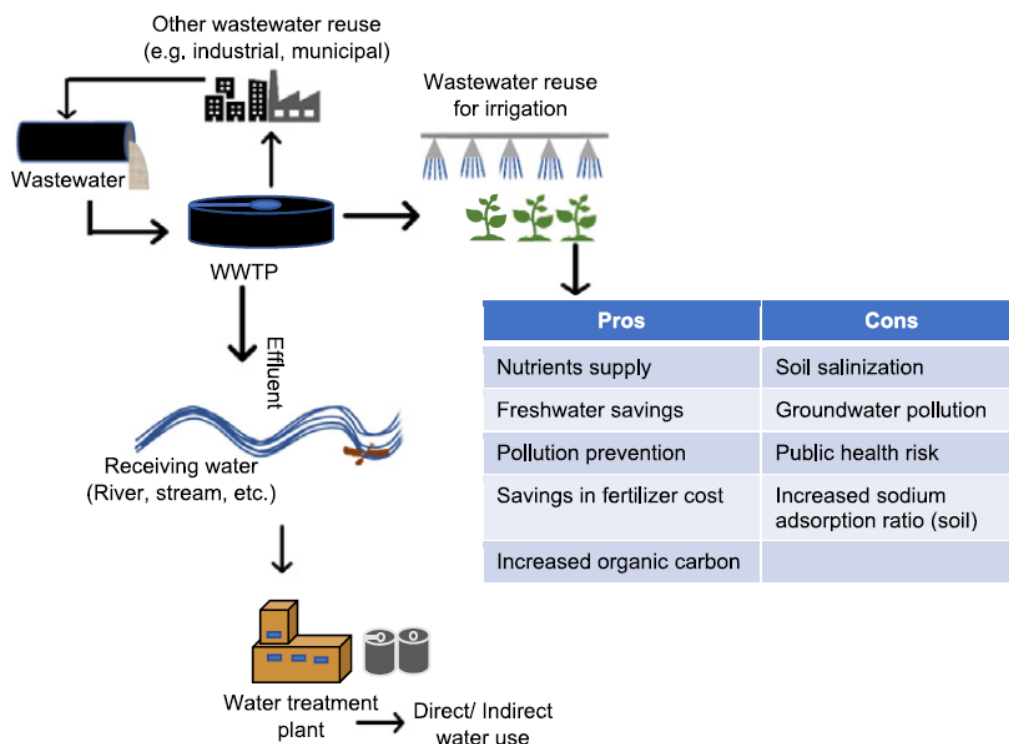
Η επιλογή της μεθόδου άρδευσης αναδεικνύεται σε καθοριστικό παράγοντα για τον περιορισμό της επιμόλυνσης. Η υπόγεια στάγδην άρδευση παρουσιάζει τα χαμηλότερα επίπεδα μικροβιακού φορτίου σε σύγκριση με την επιφανειακή άρδευση (Akar & Aşık, 2025). Αυτό συμβαίνει επειδή η υπόγεια στάγδην άρδευση διατηρεί στεγνό το ανώτερο στρώμα του εδάφους, μειώνοντας την πιθανότητα μεταφοράς παθογόνων στην επιφάνεια του καρπού (Sacks & Bernstein, 2011). Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος άρδευσης και η ποιότητα του νερού δεν αποτελούν τους μοναδικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιμόλυνση. Αν και δεν ανιχνεύθηκε *Salmonella* στο νερό άρδευσης (επεξεργασμένα υγρά απόβλητα και πόσιμο νερό), το παθογόνο εντοπίστηκε στην επιφάνεια των πιπεριών, γεγονός που υποδηλώνει ότι πιθανή πηγή επιμόλυνσης ήταν το ίδιο το έδαφος (Akar & Aşık, 2025).

Στρατηγικές Μετριασμού και Όρια Ασφαλείας

Σύμφωνα με τον WHO (1989), το προτεινόμενο αποδεκτό όριο κοπρανωδών κολοβακτηριοειδών ανέρχεται σε 1000 κοπρανώδη κολοβακτηριοειδή ανά 100 g προϊόντος, τιμή υψηλότερη από τη μέγιστη συγκέντρωση που καταγράφηκε στη μελέτη των Al-Lahham et al. (2003) (300 CFU/100 g), γεγονός που υποδηλώνει ότι το συγκεκριμένο επίπεδο επιμόλυνσης θα μπορούσε να θεωρηθεί αποδεκτό. Προς την κατεύθυνση αυτή, η υιοθέτηση καταλληλότερων μεθόδων άρδευσης θα μπορούσε να μειώσει περαιτέρω τον κίνδυνο μετάδοσης κοπρανωδών παθογόνων βακτηρίων (Bastos & Mara, 1995). Εκτός όμως από τις τεχνικές βελτιστοποίησης της άρδευσης, η μικροβιακή ασφάλεια μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω μέσω της δράσης των ωφέλιμων μικροοργανισμών του εδάφους, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να περιορίζουν τους πληθυσμούς των εντερικών παθογόνων (Thomas et al., 2024). Συγκεκριμένα, η εφαρμογή ωφέλιμων ειδών *Pseudomonas* έχει τεκμηριωθεί ότι συμβάλλει στην αποτελεσματική μείωση των πληθυσμών *E. coli* σε λαχανικά σε πειράματα πεδίου (Uhlig et al., 2021). Παράλληλα, τα γαλακτικά βακτήρια μπορούν να λειτουργήσουν ως ένας επιπλέον βιολογικός φραγμός έναντι των τροφιμογενών παθογόνων στα φρέσκα οπωροκηπευτικά, καθώς μέσω της παραγωγής βακτηριοσινών ασκούν σημαντική αντιμικροβιακή δράση (Agriopoulou et al., 2020).

ΕΝΟΤΗΤΑ 4: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Οι βιώσιμες γεωργικές πρακτικές, η ορθολογική διαχείριση της άρδευσης και η χρήση αποτελεσματικών μεθόδων επεξεργασίας μπορούν να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων (Ait-Mouheb et al., 2018) και ταυτόχρονα να διασφαλίσουν τη διατήρηση υδάτινων πόρων υψηλής ποιότητας για χρήσεις με αυξημένο κίνδυνο για τη δημόσια υγεία, όπως η κατανάλωση πόσιμου νερού (Ait-Mouheb et al., 2022). Ωστόσο, η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα ενδέχεται να προκαλέσει ανεπιθύμητες μεταβολές στο έδαφος και στις υδραυλικές του ιδιότητες, λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης διαλυμένης οργανικής ύλης, αιωρούμενων στερεών, λόγω προσρόφησης νατρίου (SAR) και αλατότητας συγκριτικά με το γλυκό νερό άρδευσης (Levy et al., 2011). Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην άρδευση φαίνονται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην άρδευση (Ofori et al., 2021)

4.1 Επιδράσεις στο έδαφος και στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα

4.1.1 Χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους: αλατότητα και pH

Η άρδευση με ανακτημένο νερό μπορεί να επηρεάσει τα χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως την αλατότητα, τη συγκέντρωση νατρίου και το pH (Hashem & Qi, 2021). Η αλατότητα αξιολογείται μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του δείκτη SAR, οι οποίοι αποτελούν βασικούς δείκτες της συγκέντρωσης διαλυμένων αλάτων και του βαθμού κορεσμού του εδάφους με νάτριο, καθώς και της δυνατότητας διήθησης του νερού (Gharaibeh et al., 2016).

Ορισμένες μελέτες, όπως εκείνη των Farhadkhani et al. (2018), έδειξαν ότι η δευτεροβάθμια επεξεργασία ανακτημένου νερού δεν είχε σημαντική επίδραση στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους, εκτός από μια μικρή αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του δείκτη SAR. Ωστόσο, δεν υπάρχει πλήρης συναίνεση στη βιβλιογραφία. Αρκετοί ερευνητές ανέφεραν ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα ήταν παρόμοια υπό ανακτημένο νερό και καθαρό νερό (Z. Du et al., 2022; G. Wang et al., 2021), ενώ άλλες μελέτες κατέγραψαν αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε ανακτημένο νερό σε σχέση με καθαρό νερό (Licata et al., 2022; P. Liang et al., 2022).

Το pH του εδάφους αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, καθώς επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά (Urbano et al., 2017). Ορισμένες έρευνες υποστηρίζουν ότι η ποιότητα του νερού δεν έχει σημαντική επίδραση στο pH (Virga et al., 2020; Z. Du et al., 2022), ενώ άλλες παρατήρησαν μείωση του pH σε παρατεταμένη άρδευση με λύματα (Rattan et al., 2005; Meena et al., 2016).

Σύμφωνα με τους Jou & Asadi (2015) το επίπεδο pH του εδάφους στις εκτάσεις που αρδεύονται με λύματα είναι σημαντικά χαμηλότερο σε σύγκριση με τις εκτάσεις που αρδεύονται με καθαρό νερό. Πολλές μελέτες έχουν αναφέρει τη μείωση της οξύτητας του εδάφους υπό συνθήκες άρδευσης με λύματα, λόγω της αύξησης της οργανικής ύλης, του σχηματισμού όξινων ενδιάμεσων ουσιών και αερίων όπως το H₂S (Mojiri, 2011). Επιπλέον, το επίπεδο αλατότητας των εδαφών που αρδεύονται με λύματα είναι υψηλότερο από αυτό που αρδεύονται με νερό γεώτρησης. Τα αποτελέσματα αρκετών μελετών έδειξαν επίσης αύξηση στα επίπεδα του αζώτου, του φωσφόρου και του καλίου στο έδαφος· ωστόσο, οι μεταβολές στα επίπεδα των βαρέων μετάλλων παρουσιάζουν άμεση συσχέτιση με τα έτη άρδευσης με λύματα (Jou & Asadi, 2015).

Οι Jou & Asadi (2015) κατέγραψαν στο πείραμα τους, το οποίο διεξάχθηκε στο Ιραν, στατιστικά σημαντική μείωση του pH του εδάφους υπό συνθήκες εφαρμογής λυμάτων. Συγκεκριμένα, στο βάθος 0–60 cm το pH μειώθηκε κατά 12,5% όταν τα λύματα εφαρμόστηκαν μέσω συστήματος άρδευσης με αυλάκια, ενώ υπό συνθήκες στάγδην άρδευσης η μείωση ανήλθε σε 6,9% σε σύγκριση με τις αρχικές τιμές πριν από την έναρξη της μελέτης.

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Jou & Asadi (2015), οι τιμές του pH στο έδαφος τείνουν να αυξάνονται με το βάθος, ενώ στην επιφανειακή στρώση παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση σε σχέση με τα βαθύτερα στρώματα. Η τάση αυτή ενδέχεται να αποδίδεται στη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα οξυγόνου στην επιφανειακή στρώση του εδάφους, η οποία ευνοεί την επιτάχυνση της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης. Διεργασίες όπως η νιτροποίηση, που λαμβάνουν χώρα υπό αερόβιες συνθήκες, οδηγούν στην απελευθέρωση ιόντων υδρογόνου (H^+) κατά την οξείδωση του αμμωνιακού αζώτου, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του pH του εδάφους (Jou & Asadi, 2015).

4.1.2 Αλατότητα και λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR)

Σύμφωνα με μελέτες, η χρήση λυμάτων αντί για νερό γεώτρησης προκάλεσε αύξηση της αλατότητας του εδάφους σε βάθος 0–60 cm (Jou & Asadi, 2015). Συγκεκριμένα, η αλατότητα αυξήθηκε κατά 35,11% στο σύστημα στάγδην και κατά 44,67% στο σύστημα με αυλάκια. Δεδομένου ότι η αλατότητα των λυμάτων ήταν περίπου διπλάσια από την αρχική αλατότητα του εδάφους, η παρατηρούμενη αύξηση αποδίδεται στην εφαρμογή τους (Jou & Asadi, 2015). Η τάση αυτή έχει επιβεβαιωθεί και από προηγούμενες μελέτες, οι οποίες αναφέρουν αύξηση της αλατότητας του εδάφους κατόπιν άρδευσης με λύματα (Mojiri, 2011).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους που αρδεύεται με λύματα συνδέεται με την υψηλή συγκέντρωση κατιόντων, όπως το Na^+ , που περιέχονται σε αυτά, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Kaschl et al., 2002). Επιπλέον, η σύγκριση των μέσων τιμών αλατότητας σε διαφορετικά βάθη υποδεικνύει ότι η αλατότητα τείνει να μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος του εδάφους (Jou & Asadi, 2015).

Σύμφωνα με τη μελέτη των Jou & Asadi (2015), η άρδευση με λύματα αυξάνει την οργανική ύλη στην επιφανειακή στρώση του εδάφους. Ο περιορισμένος χρόνος αποδόμησης της σε συνδυασμό με τη μείωση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους, περιορίζει τη μετακίνηση των λυμάτων σε μεγαλύτερα βάθη, ευνοώντας τη συσσώρευση αλάτων στην επιφάνεια. Σε

συμφωνία, οι McLaren et al. (2004) αναφέρουν ότι το επίπεδο οργανικής ύλης στα λύματα επηρεάζει σημαντικά τη διηθητική ικανότητα, καθώς η αύξησή της προκαλεί απόφραξη των πόρων του εδάφους και μειώνει τη διείσδυση των λυμάτων σε μεγαλύτερο βάθος.

Ακόμη, η αύξηση του βάθους του εδάφους σχετίζεται με μείωση του Δείκτη SAR. Η τάση αυτή αποδίδεται στη μεγαλύτερη συγκέντρωση κατιόντων στο επιφανειακό εδαφικό διάλυμα σε σύγκριση με τα βαθύτερα στρώματα (Jou & Asadi, 2015). Επιπλέον, η άρδευση με λύματα, σε σχέση με νερό γεώτρησης, αυξάνει σημαντικά τον Δείκτη SAR, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε νάτριο. Το νάτριο αντικαθιστά άλλα κατιόντα, κυρίως ασβέστιο και μαγνήσιο, που βρίσκονται στις ανταλλάξιμες θέσεις του εδάφους, διαταράσσοντας τη φυσική ισορροπία και οδηγώντας στην αύξηση του Δείκτη SAR (Jou & Asadi, 2015).

Ο δείκτης SAR αποτελεί την κύρια παράμετρο για τον χαρακτηρισμό των εδαφών που επηρεάζονται από άλατα, καθώς προσφέρει πληροφορίες για τις σχετικές συγκεντρώσεις μαγνησίου (Mg), νατρίου (Na), και ασβεστίου (Ca) στο εδαφικό διάλυμα και, κατ' επέκταση, για τις συνθήκες στις οποίες εκτίθεται το ριζικό σύστημα (Munshower, 1994). Η χρήση του δείκτη SAR επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης του νατρίου, λαμβάνοντας υπόψη ότι η παρουσία ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου δρα εξισορροπητικά, μετριάζοντας τις πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις (Sacks & Bernstein, 2011). Όπως επισημαίνεται στη βιβλιογραφία (Munshower, 1994), όταν ο δείκτης SAR υπερβαίνει τις τιμές 12 έως 15, προκαλούνται σοβαρά φυσικά προβλήματα στο έδαφος, όπως μειωμένη διαπερατότητα, που δυσχεραίνουν την απορρόφηση νερού από τα φυτά (Sacks & Bernstein, 2011).

Σύμφωνα με τους Sacks & Bernstein (2011), η άρδευση με δευτεροβάθμια επεξεργασμένα υγρά απόβλητα προκάλεσε μια μικρή αύξηση στις τιμές SAR (λιγότερο από 1,5 μονάδα), χωρίς ωστόσο ο δείκτης να υπερβεί το 5. Οι χαμηλές αυτές τιμές υποδεικνύουν ότι δεν επηρεάστηκαν ουσιαστικά η δομή του εδάφους και η παραγωγικότητα της καλλιέργειας. Επιπλέον, η σύγκριση των μεθόδων άρδευσης δείχνει ότι η άρδευση με αυλάκια παρουσιάζει κατά 9,5% υψηλότερες τιμές SAR σε σχέση με τη στάγδην άρδευση υπό χρήση λυμάτων (Jou & Asadi, 2015).

4.1.3 Άζωτο και αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων (NUE)

Το άζωτο (N) είναι βασικό θρεπτικό στοιχείο και κύριος δείκτης ποιότητας γεωργικών εδαφών (J. Chen et al., 2021). Η εφαρμογή λυμάτων στο έδαφος συνεπάγεται σημαντική προσθήκη αζώτου, η οποία εξαρτάται από το επίπεδο αζώτου στα λύματα και τον όγκο τους. Ωστόσο, τα

νιτρικά ιόντα (NO_3^-), λόγω του αρνητικού τους φορτίου, παρουσιάζουν υψηλή κινητικότητα (Jou & Asadi, 2015). Εάν δεν απορροφηθούν από τα φυτά ή τους μικροοργανισμούς, η παρουσία τους ενδέχεται να δημιουργήσει κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία (Hosseiniour et al., 2008).

Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι η άρδευση με λύματα σε αγροτεμάχια, είτε με άρδευση με αυλάκια είτε με στάγδην άρδευση, συνδέεται με σημαντική αύξηση των νιτρικών ιόντων στο έδαφος σε βάθος 0–60 cm, κατά περίπου 86,1% και 79,9% αντίστοιχα, σε σύγκριση με την περίοδο πριν από την εφαρμογή των λυμάτων. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων με το βάθος. Η υψηλότερη συγκέντρωση στην επιφάνεια του εδάφους φαίνεται να οφείλεται στην αυξημένη περιεκτικότητα οργανικής ύλης, καθώς η αποσύνθεση της και η απελευθέρωση αμμωνίου οδηγούν σε αύξηση των νιτρικών μέσω της διαδικασίας της νιτροποίησης (Jou & Asadi, 2015).

Η τμηματική εφαρμογή αζώτου κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της καλλιέργειας μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των φυτών και να βελτιώσει την αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων (NUE). Μελέτες έχουν δείξει ότι η τμηματική εφαρμογή μειωμένων δόσεων αζώτου βελτιώνει την πρόσληψή του, τον δείκτη συγκομιδής αζώτου, την αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων και την απόδοση καλλιεργειών όπως τη γλυκοπατάτα (Z. Zhang et al., 2021; X. Du et al., 2019). Επιπλέον, η τμηματική λίπανση αποτρέπει την υπερβολική λίπανση στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης και εξασφαλίζει επαρκή θρεπτικά στοιχεία στα μεταγενέστερα στάδια (Lu et al., 2021).

Η χρήση ανακτημένου νερού έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει την αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων σε σύγκριση με το καθαρό νερό, κυρίως λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε φώσφορο (P), άζωτο (N) και κάλιο (K), που ενισχύουν την παραγωγή βιομάζας (Leonel & Tonetti, 2021; Nagi et al., 2020). Αρκετές μελέτες ανέφεραν σημαντική αύξηση στο ολικό άζωτο, στο διαθέσιμο φώσφορο και στο ολικό κάλιο του εδάφους αρδευόμενου με ανακτημένο νερό σε σχέση με καθαρό νερό (Li YanFeng et al., 2014; Wei et al., 2017).

Παράλληλα, η εφαρμογή τεχνικών όπως η στάγδην άρδευση βρέθηκε ότι μειώνει σημαντικά την έκπλυση νιτρικών και αυξάνει την αποδοτικότητα χρήσης αζώτου και την αποδοτικότητα χρήσης νερού άρδευσης σε σύγκριση με την άρδευση με αυλάκια (Aujla et al., 2007; Sun et al., 2013). Η κύρια υπόθεση αυτής της μελέτης είναι ότι η χρήση ανακτημένου νερού με

ορισμένες τεχνικές άρδευσης μπορεί να μειώσει τη χρήση καθαρού νερού χωρίς να επηρεάσει την απόδοση και τις ιδιότητες του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων της εδαφικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, του εδαφικού pH και των συγκεντρώσεων οργανικής ύλης (Hashem et al., 2024).

Η υπόγεια στάγδην άρδευση έχει καταγραφεί ως πιο αποτελεσματική σε σχέση με την άρδευση με αυλάκια όσον αφορά την αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων, καθώς βελτιώνει την απόδοση καρπών και επιτρέπει έγκαιρο προγραμματισμό της υδρολίπανσης, περιορίζοντας τις απώλειες αζώτου (Hashem et al., 2024). Ανάλογα ευρήματα έχουν δημοσιευθεί από τους Li YanFeng et al. (2014), οι οποίοι έδειξαν ότι η στάγδην άρδευση μειώνει την εισροή νερού και την έκπλυση νιτρικών, αυξάνοντας παράλληλα την αποδοτικότητα χρήσης θρεπτικών στοιχείων.

Η υπόγεια στάγδην άρδευση περιορίζει τον διαβρεχόμενο όγκο στη ριζική ζώνη, γεγονός που ενισχύει τη συγκέντρωση νιτρικών κοντά στις ρίζες και αυξάνει την αποδοτικότητα πρόσληψης αζώτου (J. Li et al., 2003; Singandhupe et al., 2003). Αυτή η τεχνική αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική σε συνδυασμό με την εφαρμογή τμηματικής λίπανσης και την κατάλληλη διαχείριση άρδευσης (Hashem et al., 2024).

4.1.4 Φώσφορος και το φαινόμενο του ευτροφισμού

Ο φώσφορος αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους θρεπτικούς παράγοντες που συνδέονται με την εμφάνιση του φαινομένου του ευτροφισμού, μειώνοντας την ποιότητα του νερού όταν μεταφέρεται σε επιφανειακά ή υπόγεια ύδατα. Στη βιβλιογραφία, η συγκέντρωση του φωσφόρου στο έδαφος αξιολογείται συχνά με βάση τα φωσφορικά ιόντα. Παρατηρήσεις από μελέτες δείχνουν ότι η εφαρμογή λυμάτων οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα φωσφορικών ιόντων σε σχέση με τις αρχικές συγκεντρώσεις που είχαν καταγραφεί πριν από την έναρξη της άρδευσης (Jou & Asadi, 2015). Συγκεκριμένα, στη μελέτη των Jou & Asadi (2015) στο σύστημα άρδευσης με αυλάκια παρατηρήθηκε αύξηση κατά 86,4% σε βάθος 0–60 cm, ενώ στο σύστημα στάγδην άρδευσης η αύξηση ήταν περίπου 68,7%. Λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή κινητικότητα του φωσφόρου στο έδαφος, η συγκέντρωσή του στα επιφανειακά στρώματα θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική (Nguyen et al., 2008). Επιπλέον, η ανάλυση των μέσων τιμών φωσφορικών ιόντων σε διαφορετικά βάθη υποδεικνύει ότι η συγκέντρωση μειώνεται με το βάθος (Jou & Asadi, 2015).

4.1.5 Οργανική ύλη και ολικός οργανικός άνθρακας

Η παρουσία διαλυτών οργανικών ουσιών στο έδαφος υποδηλώνει την ύπαρξη μικροβιακών ενώσεων καθώς και οργανικών ενώσεων ανθεκτικών στη διαδικασία αποσύνθεσης. Οι ενώσεις αυτές ενδέχεται να συσσωρεύονται στο περιβάλλον και να παρουσιάζουν τοξικότητα για τους μικροοργανισμούς του εδάφους και τα φυτά, ενώ ορισμένες από αυτές μπορεί να έχουν και δυνητικά καρκινογόνες επιδράσεις στον άνθρωπο (Jou & Asadi, 2015).

Η οργανική ύλη προσφέρει πολλαπλά οφέλη για το έδαφος, όπως βελτίωση της δομής και αύξηση της γονιμότητας. Ωστόσο, η παρουσία συνολικού διαλυτού οργανικού άνθρακα μπορεί να επηρεάσει τη μετακίνηση των βαρέων μετάλλων προς βαθύτερα στρώματα και να μεταβάλει το δυναμικό οξείδωσης του εδάφους. Επιπλέον, οι διαλυτές οργανικές ενώσεις τείνουν να συνδεθούν κυρίως με ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου, οδηγώντας σε αυξημένη διασπορά των σωματιδίων του εδάφους (Jou & Asadi, 2015). Τα αποτελέσματα της έρευνας των Jou & Asadi (2015) συμφωνούν με τη μελέτη των McLaren et al. (2004), οι οποίοι ανέφεραν ότι η αύξηση του βάθους του εδάφους συνοδεύεται από μείωση του ολικού οργανικού άνθρακα. Ο οργανικός άνθρακας θεωρείται μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν την ποιότητα και τη γονιμότητα του εδάφους (Sepaskhah & Karizi, 2011). Συνεπώς, η άρδευση με λύματα φαίνεται να οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα ολικού οργανικού άνθρακα σε σύγκριση με την άρδευση με νερό γεώτρησης.

Παρόμοια ευρήματα αναφέρουν οι Najafi & Nasr (2009), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η εφαρμογή αστικών λυμάτων σε εδάφη οδήγησε σε σημαντική αύξηση του οργανικού άνθρακα σε σύγκριση με τα εδάφη ελέγχου, τα οποία λάμβαναν χημικά λιπάσματα. Συγκεκριμένα, η συγκέντρωση του ολικού οργανικού άνθρακα αυξήθηκε κατά 41% στα εδάφη που δέχθηκαν αστικά λύματα σε σχέση με τα αντίστοιχα εδάφη αναφοράς.

Τέλος, οι Jou & Asadi (2015) συνέκριναν την επίδραση των δύο μεθόδων άρδευσης, στάγδην και με αυλάκια, στον ολικό οργανικό άνθρακα του εδάφους και παρατήρησαν ότι η άρδευση με αυλάκια οδήγησε σε υψηλότερες τιμές σε βάθος 0–60 cm, περίπου 25,9% μεγαλύτερες σε σύγκριση με τη στάγδην άρδευση.

4.1.6 Βαρέα μέταλλα

Τα βαρέα μέταλλα χρησιμοποιούνται ευρέως σε αστικές, γεωργικές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Η παρουσία βαρέων μετάλλων στα λύματα μπορεί να έχει αρνητικές

επιπτώσεις στην ποιότητα των γεωργικών προϊόντων, στη γονιμότητα του εδάφους και στα υπόγεια ύδατα (Hosseiniipour et al., 2008).

Η μεταφορά και η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στο έδαφος εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, η κοκκομετρική σύσταση, ο βαθμός επεξεργασίας των λυμάτων και η εφαρμοζόμενη μέθοδος άρδευσης. Η συσσώρευση βαρέων μετάλλων στο έδαφος κατά την άρδευση με λύματα εξαρτάται επίσης από τη συγκέντρωσή τους στα λύματα, τη διάρκεια εφαρμογής της άρδευσης με λύματα, τη δομή του εδάφους, το pH και την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ύλη (Jou & Asadi, 2015).

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι, υπό την εφαρμογή λυμάτων μέσω των δύο μεθόδων άρδευσης, η σύγκριση των μέσων τιμών των βαρέων μετάλλων σε διαφορετικά βάθη του εδάφους υποδεικνύει μείωση της συγκέντρωσής τους όσο αυξάνεται το βάθος. Ωστόσο, οι Hosseiniipour et al. (2008) αναφέρουν ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων μπορεί να είναι υψηλότερη σε μεγαλύτερα βάθη σε σύγκριση με την επιφανειακή στρώση του εδάφους. Σύμφωνα με τους Jou & Asadi (2015), η μεταφορά των βαρέων μετάλλων σε βάθος 30–60 cm υποδηλώνει ότι η δομή του εδάφους αποτελεί έναν από τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη μετακίνησή τους προς βαθύτερα στρώματα.

Επιπροσθέτως, στα εδάφη με μεγάλο πορώδες, παρατηρείται επιτάχυνση της μεταφοράς των βαρέων μετάλλων λόγω της δέσμευσής τους σε αιωρούμενα σωματίδια. Η έκπλυση κολλοειδών και σωματιδίων αργίλου μέσω των μεγάλων πόρων του εδάφους αποτελεί τον κύριο μηχανισμό μετακίνησης αυτών των στοιχείων, οδηγώντας στην περαιτέρω διασπορά τους στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους και στα υπόγεια ύδατα (Jou & Asadi, 2015). Συναφώς, οι Kaschl et al. (2002) επισήμαναν ότι η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων σε εδάφη με αλκαλικό pH αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που αποδίδεται στη δέσμευσή τους με διαλυτή οργανική ύλη.

Συμπερασματικά, ενώ τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα αποτελούν μια πολύτιμη πηγή θρεπτικών συστατικών για τη γεωργική λίπανση, η μακροχρόνια εφαρμογή τους απαιτεί προσεκτική διαχείριση, ούτως ώστε να αποφευχθεί η υποβάθμιση του εδάφους. Η στάγδην άρδευση παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα ως μέθοδος άρδευσης με υγρά απόβλητα, καθώς μετριάξει σημαντικά τις δυσμενείς επιπτώσεις στις χημικές ιδιότητες του εδάφους σε σύγκριση με την άρδευση με αυλάκια. Συγκεκριμένα, η άρδευση με αυλάκια οδηγεί σε εντονότερη αύξηση της αλατότητας και σε μεγαλύτερη μείωση του pH του εδάφους. Επιπλέον,

η μέθοδος άρδευσης με αυλάκια έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη συσσώρευση βαρέων μετάλλων, καθώς και την υπερβολική συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων όπως ο φώσφορος, η οποία αυξάνει τον κίνδυνο περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως ο ευτροφισμός. Ως εκ τούτου, η στάγδην άρδευση προκρίνεται ως η πλέον βιώσιμη πρακτική, καθώς επιτρέπει την αξιοποίηση των λυμάτων περιορίζοντας ταυτόχρονα τους κινδύνους για την ποιότητα του εδάφους και τη δημόσια υγεία.

ΕΝΟΤΗΤΑ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ (ΕΜ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΓΑΛΑΚΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Η γαλακτοβιομηχανία παράγει μεγάλες ποσότητες υγρών αποβλήτων με υψηλό οργανικό φορτίο, αιωρούμενα στερεά και θρεπτικά στοιχεία, τα οποία, εάν διατεθούν χωρίς επεξεργασία, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως ευτροφισμό και υποβάθμιση των υδάτινων οικοσυστημάτων (Aagosh Verma et al., 2012; Al-Wasify et al., 2017). Στο πλαίσιο αυτό, οι ενεργοί μικροοργανισμοί (ΕΜ) (Εικόνα 17) έχουν αναδειχθεί ως μια υποσχόμενη βιολογική μέθοδος επεξεργασίας, λόγω του χαμηλού λειτουργικού τους κόστους, της εύκολης εφαρμογής τους και του χαμηλού περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος (Ali et al., 2021).

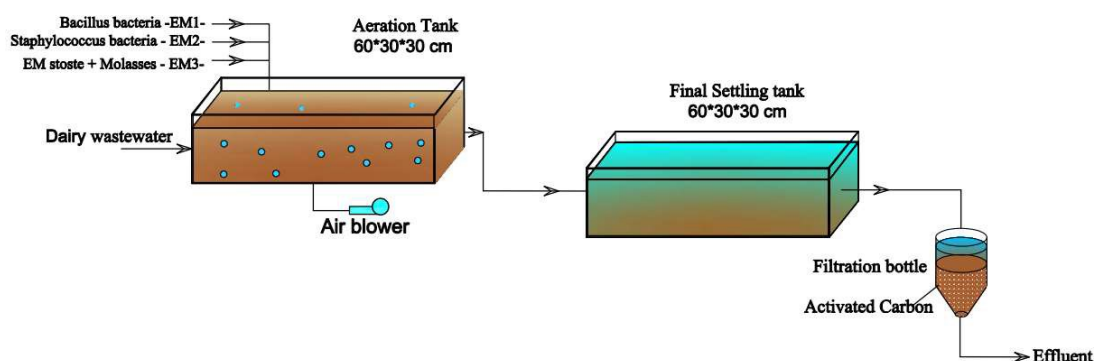


Εικόνα 17: ΕΜ μικροοργανισμοί. Ίδια λήψη

Η εφαρμογή τους πραγματοποιείται συνήθως σε ολοκληρωμένα συστήματα επεξεργασίας που περιλαμβάνουν διαδοχικά το στάδιο αερισμού, όπου επιτυγχάνεται η βιολογική αποδόμηση του οργανικού φορτίου, το στάδιο καθίζησης για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, καθώς και ένα τελικό στάδιο φιλτραρίσματος με ενεργό άνθρακα, το οποίο συμβάλλει στην περαιτέρω μείωση του ρυπαντικού φορτίου (Ali et al., 2021).

Σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα, έρευνας που διεξάχθηκε στην Αίγυπτο, η χρήση διαφορετικών τύπων ΕΜ, όπως Bacillus, Staphylococcus και μείγμα EM stoste με μελάσα (Εικόνα 18), οδηγεί σε σημαντική μείωση βασικών δεικτών ρύπανσης. Ειδικότερα, η εφαρμογή του Bacillus παρουσίασε τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, επιτυγχάνοντας

ποσοστά μείωσης έως 96.2% για το BOD, 95.9% για το COD και 93% για τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS). Παράλληλα, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των θρεπτικών στοιχείων, όπως του ολικού αζώτου και του ολικού φωσφόρου, της τάξεως 94% και 64% αντίστοιχα. Ως αποτέλεσμα, οι τελικές συγκεντρώσεις των παραμέτρων αυτών κυμάνθηκαν εντός των ορίων που προβλέπει η αιγυπτιακή νομοθεσία για την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων σε αρδευτικούς σκοπούς (Ali et al., 2021).



Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με χρήση μικροοργανισμών EM (Ali et al., 2021)

Συνεπώς, η αξιοποίηση των EM μικροοργανισμών βελτιώνει την ποιότητα των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, καθιστώντας τα κατάλληλα για επαναχρησιμοποίηση, κυρίως για άρδευση, μειώνοντας παράλληλα την πίεση στους φυσικούς υδάτινους πόρους (Ali et al., 2021).

ΕΝΟΤΗΤΑ 6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

6.1 Αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού (IWUE) υπό επιφανειακή και στάγδην άρδευση

Πολλές ερευνητικές μελέτες έχουν καταδείξει ότι οι στρατηγικές ελλειμματικής άρδευσης, καθώς και η τεχνική της εναλλασσόμενης μερικής άρδευσης της ριζικής ζώνης, είναι πιο αποτελεσματικές στη βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού σε σύγκριση με την πλήρη άρδευση (M. Cheng et al., 2021; Hashem et al., 2018). Ειδικότερα, πολλές μελέτες έχουν αναφέρει αυξημένες τιμές αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού στην καλλιέργεια τομάτας υπό συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης (J. Chen et al., 2013; Hashem et al., 2018). Σύμφωνα με τους Kirda et al. (2004), η εφαρμογή της τεχνικής της εναλλασσόμενης μερικής άρδευσης της ριζικής ζώνης οδήγησε σε βελτίωση της της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού κατά 11,5%, ενώ η ελλειμματική άρδευση γενικότερα συμβάλλει στη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας του νερού (Nangare et al., 2016).

Η αυξημένη αποδοτικότητα χρήσης νερού υπό πρακτικές ελλειμματικής άρδευσης αποδίδεται κυρίως σε φυσιολογικούς μηχανισμούς των φυτών, όπως το μερικό κλείσιμο των στομάτων. Η διαδικασία αυτή μειώνει τον ρυθμό διαπνοής χωρίς να προκαλεί σημαντικές μεταβολές στην υδατική κατάσταση των φυτών, οδηγώντας έτσι σε πιο αποδοτική χρήση του διαθέσιμου νερού (Hashem et al., 2019). Παράλληλα, οι Cheng et al. (2021) διαπίστωσαν ότι η απόδοση καλλιεργειών όπως η τομάτα και η πατάτα υπό εφαρμογή της εναλλασσόμενης μερικής άρδευσης της ριζικής ζώνης δεν διέφερε σημαντικά από εκείνη της πλήρους άρδευσης, ενώ η αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού ήταν σημαντικά υψηλότερη. Η επίδραση της τεχνικής της εναλλασσόμενης μερικής άρδευσης της ριζικής ζώνης σχετίζεται επίσης με την παραγωγή αμπισικού οξέος από τις ξηρές ρίζες, το οποίο μεταφέρεται στα φύλλα και συμβάλλει στη μείωση των απωλειών νερού μέσω της διαπνοής (El-Sadek, 2014).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αυξημένη η αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού υπό μειωμένη άρδευση συνδέεται με τη ρύθμιση της λειτουργίας των στομάτων (Pazzagli et al., 2016), καθώς και με την πιο αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εδαφικού νερού στη ριζική ζώνη (Liu et al., 2013). Αντίθετα, στην πλήρη άρδευση, μέρος του εφαρμοζόμενου νερού δεν αξιοποιείται από τα φυτά, αλλά συσσωρεύεται στο εδαφικό προφίλ και διηθείται πέρα από

τη ριζική ζώνη, μειώνοντας έτσι τη συνολική αποδοτικότητα χρήσης νερού (Hashem et al., 2024).

Όσον αφορά τις μεθόδους άρδευσης, η στάγδην άρδευση θεωρείται μία από τις πιο αποδοτικές τεχνικές για καλλιέργειες λαχανικών, καθώς περιορίζει σημαντικά τις απώλειες νερού λόγω αποστράγγισης και εξάτμισης μέσω της εφαρμογής μικρών και συχνών ποσοτήτων νερού, με αποτέλεσμα την αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού (G. Zhang et al., 2017). Πράγματι, μελέτες έχουν δείξει ότι η αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού είναι υψηλότερη υπό στάγδην άρδευση σε σύγκριση με την επιφανειακή άρδευση, ακόμη και όταν εφαρμόζεται ο ίδιος ρυθμός αζωτούχου λίπανσης (Hassanli et al., 2016; Mehmood et al., 2019).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η υπόγεια στάγδην άρδευση, η οποία συμβάλλει περαιτέρω στην αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης αρδευτικού νερού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης της εξάτμισης, της ομοιόμορφης κατανομής του νερού και των θρεπτικών στοιχείων, του περιορισμού της βαθιάς διήθησης, καθώς και της άμεσης διαθεσιμότητας νερού και θρεπτικών στοιχείων στη ριζική ζώνη των φυτών (S. K. Jha et al., 2019; Khawla et al., 2019).

Παράλληλα, η χρήση ανακτημένου νερού αποτελεί μία ακόμη σημαντική παράμετρο που ενισχύει την αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού. Έχει παρατηρηθεί ότι φυτά που αρδεύονται με ανακτημένο νερό παρουσιάζουν υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης νερού από εκείνα που αρδεύονται με καθαρό νερό, ανεξάρτητα από την ποσότητα εφαρμοζόμενου νερού (Alkhamisi et al., 2011; Demir & Sahin, 2017). Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στην αυξημένη περιεκτικότητα του ανακτημένου νερού σε θρεπτικά στοιχεία και οργανική ύλη, τα οποία συμβάλλουν τόσο στην αύξηση της παραγωγής όσο και στη βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης νερού (Hassanli et al., 2010).

Τέλος, ο συνδυασμός της χρήσης ανακτημένου νερού με πρακτικές ελλειμματικής άρδευσης μπορεί να επιφέρει σημαντική εξοικονόμηση υδάτινων πόρων και περαιτέρω βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης νερού (Al-Hadidi & Sweity, 2022; Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021). Συνολικά, η εφαρμογή τεχνικών όπως η εναλλασσόμενη μερική άρδευση της ριζικής ζώνης σε συνδυασμό με τη χρήση ανακτημένου νερού σε ξηρές και ημι-ξηρές περιοχές με περιορισμένους υδάτινους πόρους αποτελεί μία ιδιαίτερα αποτελεσματική στρατηγική για την ενίσχυση της αποδοτικότητας χρήσης νερού και τη βελτίωση της βιωσιμότητας της γεωργίας.

6.2 Οικονομική Αξιολόγηση και Συγκριτική Ανάλυση Μεθόδων Άρδευσης

6.2.1. Οικονομική Βιωσιμότητα: Επιλογή Συστημάτων Άρδευσης και Παράγοντες Κέρδους

Η οικονομική βιωσιμότητα μιας γεωργικής εκμετάλλευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή του συστήματος άρδευσης, με τη μετάβαση από την παραδοσιακή άρδευση με αυλάκια προς τη στάγδην άρδευση να αποτελεί βασικό αντικείμενο διερεύνησης. Τα πιθανά οφέλη αυτής της μετάβασης περιλαμβάνουν την αυξημένη απόδοση της καλλιέργειας, τη μειωμένη κατανάλωση νερού, τη λιγότερη χρήση λιπασμάτων και το χαμηλότερο κόστος κατεργασίας του εδάφους (Hanson et al., 1997). Ειδικότερα, η χρήση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων, εφόσον συνοδεύεται από ορθή διαχείριση, λειτουργεί ως μια μορφή λιπάσματος που μειώνει την ανάγκη για χημικά λιπάσματα, οδηγώντας σε σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής (Ait-Mouheb et al., 2022).

Η αξιοποίηση τέτοιων συστημάτων επεξεργασίας και ανακύκλωσης είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε ξηρές και ημι-ξηρές περιοχές, καθώς η χρήση επεξεργασμένου νερού συμβάλλει στην εξοικονόμηση υδάτινων πόρων, στη μείωση του κόστους άρδευσης και στον περιορισμό της χρήσης λιπασμάτων στο έδαφος (Jou & Asadi, 2015). Ωστόσο, η υιοθέτηση της στάγδην άρδευσης συνοδεύεται από σημαντικές οικονομικές προκλήσεις που πρέπει να συνεκτιμηθούν. Το βασικότερο μειονέκτημα εντοπίζεται στο υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης του συστήματος, το οποίο αυξάνεται περαιτέρω στην περίπτωση της υπόγειας στάγδην άρδευσης (Tripathi et al., 2016). Παρόλο που το κόστος αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί εν μέρει από τη μείωση των δαπανών για ξεχορτάρισμα και ανόργανα λιπάσματα (Tripathi et al., 2016), υπάρχουν επιπλέον επιβαρύνσεις που αφορούν το ενεργειακό κόστος του συστήματος, καθώς και τις δαπάνες συντήρησης (Hanson et al., 1997). Ένα επιπρόσθετο, συχνά «κρυφό» κόστος, είναι η αυξημένη ανάγκη διαχείρισης που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία και συντήρηση ενός συστήματος στάγδην άρδευσης σε σύγκριση με την απλούστερη μέθοδο της άρδευσης με αυλάκια (Hanson et al., 1997).

Σε τελικό επίπεδο, η κερδοφορία της στάγδην άρδευσης εξαρτάται και από τις ιδιαιτερότητες κάθε τοποθεσίας. Τα ερευνητικά δεδομένα δείχνουν ότι η μετάβαση από τα αυλάκια στη στάγδην άρδευση δεν οδηγεί απαραίτητα σε αύξηση των εσόδων, εάν οι διαφορές στην απόδοση της καλλιέργειας παραμένουν μικρές (Hanson et al., 1997). Η επίτευξη υψηλότερων κερδών

καθίσταται δυνατή μόνο εάν η εξοικονόμηση στο κόστος νερού, λιπασμάτων και καλλιεργητικών εργασιών είναι τέτοιου μεγέθους ώστε να υπερκαλύπτει το κόστος κεφαλαίου, ενέργειας και συντήρησης. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση όπου η μείωση του κόστους νερού δεν επαρκεί για να αντισταθμίσει τις κεφαλαιουχικές και ενεργειακές απαιτήσεις, με αποτέλεσμα η άρδευση με αυλάκια να παραμένει η οικονομικά προτιμότερη λύση (Hanson et al., 1997). Συνεπώς, η επιλογή του συστήματος απαιτεί μια ενδελεχή μελέτη κόστους-οφέλους που θα λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων και των ευκαιριών εξοικονόμησης από τη μείωση των καλλιεργητικών εργασιών που συχνά δεν συνυπολογίζονται στην αρχική εκτίμηση (Hanson et al., 1997).

6.2.2 Κόστος Λειτουργίας, Συντήρησης και Χρήση Νερού

Η ανάλυση αυτή των παραμέτρων κόστους-οφέλους εξειδικεύεται περαιτέρω αν εξεταστούν οι επιμέρους λειτουργικές δαπάνες. Ειδικότερα, έχει παρατηρηθεί ότι τα συστήματα στάγδην άρδευσης, ακόμη και όταν πρόκειται για χαμηλού κόστους εφαρμογές, συνεπάγονται σταθερές δαπάνες συντήρησης και λειτουργίας, οι οποίες εκτιμώνται ενδεικτικά ως ποσοστό του αρχικού κόστους του εξοπλισμού, λαμβάνοντας υπόψη φθορές, επισκευές και αποσβέσεις (Maisiri et al., 2005).

Πέραν των δαπανών εξοπλισμού, ένα κρίσιμο στοιχείο που διαφοροποιεί τα δύο συστήματα είναι η απαίτηση σε εργασία. Αν και η στάγδην άρδευση συχνά θεωρείται τεχνολογία εξοικονόμησης εργασίας, στην πράξη, ιδιαίτερα σε απλά ή μη αυτοματοποιημένα συστήματα, μπορεί να εμφανίζει αυξημένες ανάγκες χειρισμού και διαχείρισης. Στη συγκεκριμένη η εφαρμογή, η χειροκίνητη πλήρωση των δεξαμενών οδήγησε σε αυξημένη ένταση εργασίας, χωρίς να παρατηρείται ουσιαστική εξοικονόμηση σε σχέση με την άρδευση με αυλάκια (Maisiri et al., 2005).

Αντίθετα, τα συστήματα άρδευσης με αυλάκια παρουσιάζουν διαφορετική οικονομική δομή, καθώς χαρακτηρίζονται από απλούστερη λειτουργία και μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης εξοπλισμού, γεγονός που περιορίζει το άμεσο λειτουργικό κόστος. Ωστόσο, η χαμηλότερη αποδοτικότητα χρήσης νερού οδηγεί σε αυξημένες απώλειες μέσω εξάτμισης και βαθιάς διήθησης, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη συνολική κατανάλωση νερού σε σχέση με τη στάγδην άρδευση (Maisiri et al., 2005). Συγκεκριμένα, στη μελέτη των Maisiri et al. (2005) για την ίδια καλλιεργητική περίοδο, η ποσότητα νερού που χρησιμοποιήθηκε ήταν περίπου τριπλάσια σε σχέση με τη στάγδην άρδευση, γεγονός που επηρεάζει άμεσα το συνολικό κόστος, ιδιαίτερα

σε περιπτώσεις όπου το νερό αποτελεί περιορισμένο πόρο. Η διαφοροποίηση αυτή επιβεβαιώνεται και από άλλες μελέτες, όπου αναφέρεται ότι η αποδοτικότητα εφαρμογής της επιφανειακής άρδευσης μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σύγκριση με τη στάγδην άρδευση (Postel, 2000).

Σε επίπεδο συνολικής οικονομικής αξιολόγησης, προκύπτει ότι τα συστήματα στάγδην άρδευσης μπορούν να επιτύχουν υψηλότερα επίπεδα ακαθάριστου κέρδους, κυρίως λόγω της βελτιωμένης διαχείρισης του νερού και της δυνατότητας συνδυασμού με υδρολίπανση. Παρόλα αυτά, όταν η ανάλυση επικεντρώνεται στον λόγο απόδοσης προς το μεταβλητό κόστος, τα συστήματα επιφανειακής άρδευσης ενδέχεται να εμφανίζουν μεγαλύτερη οικονομική αποδοτικότητα, ιδιαίτερα σε συνθήκες περιορισμένου κεφαλαίου (Maisiri et al., 2005).

Συνεπώς, η σύγκριση μεταξύ των δύο συστημάτων δεν οδηγεί σε ένα καθολικό συμπέρασμα υπεροχής, αλλά αναδεικνύει ότι η οικονομική βιωσιμότητα εξαρτάται από ένα σύνολο παραμέτρων, όπως το κόστος εγκατάστασης, οι απαιτήσεις συντήρησης, η διαθεσιμότητα και το κόστος του νερού, καθώς και η ένταση εργασίας. Η στάγδην άρδευση εμφανίζει σαφή πλεονεκτήματα σε όρους εξοικονόμησης πόρων και συνολικής παραγωγικότητας, ενώ η άρδευση με αυλάκια διατηρεί πλεονέκτημα απλότητας και χαμηλότερου αρχικού κόστους, γεγονός που την καθιστά ανταγωνιστική σε συγκεκριμένα αγρονομικά και οικονομικά πλαίσια (Maisiri et al., 2005).

ΕΝΟΤΗΤΑ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τη σημασία της ορθολογικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων στη σύγχρονη γεωργία και ιδιαίτερα τον ρόλο που μπορεί να διαδραματίσει η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην αντιμετώπιση της λειψυδρίας. Η αυξανόμενη ζήτηση νερού, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και την πίεση στους φυσικούς υδάτινους πόρους, καθιστούν αναγκαία την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών άρδευσης που να εξασφαλίζουν τόσο την παραγωγικότητα των καλλιεργειών όσο και την προστασία του περιβάλλοντος. Μέσα από τη συγκριτική αξιολόγηση της στάγδην άρδευσης και της άρδευσης με αυλάκια, διαπιστώθηκε ότι η επιλογή του κατάλληλου αρδευτικού συστήματος επηρεάζει καθοριστικά την αποδοτικότητα χρήσης νερού, την ποιότητα των καλλιεργειών, αλλά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων.

Η στάγδην άρδευση αναδείχθηκε ως η πλέον αποδοτική και περιβαλλοντικά ασφαλής μέθοδος, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Η στοχευμένη εφαρμογή νερού και θρεπτικών στοιχείων στη ριζόσφαιρα των φυτών συμβάλλει στη μείωση των απωλειών λόγω εξάτμισης και βαθιάς διήθησης, περιορίζει την έκπλυση θρεπτικών στοιχείων και μειώνει τον κίνδυνο επιφανειακής απορροής και ρύπανσης των υδάτινων σωμάτων. Παράλληλα, η δυνατότητα συνδυασμού της με υδρολίπανση επιτρέπει την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των θρεπτικών στοιχείων που περιέχονται στα επεξεργασμένα λύματα, μειώνοντας την ανάγκη χρήσης χημικών λιπασμάτων και ενισχύοντας τη βιωσιμότητα της γεωργικής παραγωγής. Αντίθετα, η άρδευση με αυλάκια, αν και χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και απλούστερη εφαρμογή, παρουσιάζει μειωμένη αποδοτικότητα χρήσης νερού και αυξημένο κίνδυνο συσσώρευσης αλάτων, απωλειών θρεπτικών στοιχείων και ρύπανσης υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, ιδιαίτερα όταν η διαχείριση του συστήματος δεν είναι επαρκής.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων, η εργασία ανέδειξε και τις προκλήσεις που συνοδεύουν την εφαρμογή της πρακτικής αυτής. Η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών, βαρέων μετάλλων, αλάτων, φαρμακευτικών ενώσεων και άλλων ρυπαντών μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του εδάφους, την ασφάλεια των παραγόμενων προϊόντων και τη δημόσια υγεία, εάν δεν εφαρμόζονται κατάλληλες διαδικασίες

επεξεργασίας και παρακολούθησης. Επομένως, η αποτελεσματική επαναχρησιμοποίηση λυμάτων προϋποθέτει αυστηρό έλεγχο της ποιότητας του νερού, σωστή επιλογή καλλιεργειών και αρδευτικών τεχνικών, καθώς και συνεχή παρακολούθηση των φυσικοχημικών και μικροβιολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους και των φυτών.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην περαιτέρω διερεύνηση των μακροχρόνιων επιπτώσεων της άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα στο έδαφος, στη μικροβιακή του ισορροπία και στη συσσώρευση ρυπαντών στις καλλιέργειες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της συμπεριφοράς αναδυόμενων ρύπων, όπως τα μικροπλαστικά και οι φαρμακευτικές ουσίες, καθώς και των πιθανών επιπτώσεών τους στην τροφική αλυσίδα και στα οικοσυστήματα. Επιπλέον, απαιτούνται περισσότερες έρευνες σχετικά με την ανάπτυξη και εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών άρδευσης ακριβείας, όπως η υπόγεια στάγδην άρδευση και τα αυτοματοποιημένα συστήματα παρακολούθησης της εδαφικής υγρασίας και της ποιότητας του νερού, με στόχο τη βελτιστοποίηση της χρήσης των υδατικών πόρων. Τέλος, ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται η πραγματοποίηση μελλοντικών μελετών που θα εξετάζουν τον βαθμό αποδοχής των γεωργικών προϊόντων που παράγονται με χρήση επεξεργασμένων λυμάτων από τους καταναλωτές, αλλά και τον ρόλο οικονομικών και θεσμικών εργαλείων, όπως κρατικές ενισχύσεις, επιχορηγήσεις και ευρωπαϊκά προγράμματα, στη στήριξη της εφαρμογής πιο αποδοτικών αλλά και υψηλότερου κόστους τεχνολογιών, ώστε η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα να καταστεί περισσότερο βιώσιμη, ασφαλής και ευρύτερα εφαρμόσιμη στη σύγχρονη γεωργία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aagosh Verma, A. V., Singh, A., Mathur, N., & Atri, R. (2012). *Physico-chemical analysis of effluent from dairy industry*.
- Abdalla, K. Z., & Hammam, G. (2014). Correlation between biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand for various wastewater treatment plants in Egypt to obtain the biodegradability indices. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 13(1), 42–48.
- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A., & Ibraheem, I. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275.
- Abd-Elwahed, M. S. (2018). Influence of long-term wastewater irrigation on soil quality and its spatial distribution. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(2), 191–199.
- Abou Seeda, M., Yassen, A., Abou El-Nour, E., & Hammad, S. (2020). Management of furrow irrigation technology and its risk assessments: A review. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 10(4), 590–616.
- Abou Zakhem, B., Al Ain, F., & Hafez, R. (2019). Assessment of field water budget components for increasing water productivity under drip irrigation in arid and semi-arid areas, Syria. *Irrigation and Drainage*, 68(3), 452–463.
- Adewumi, J. R., Ilembade, A. A., & Van Zyl, J. E. (2010). Treated wastewater reuse in South Africa: Overview, potential and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.012>
- Agriopoulou, S., Stamatelopoulou, E., Sachadyn-Król, M., & Varzakas, T. (2020). Lactic acid bacteria as antibacterial agents to extend the shelf life of fresh and minimally processed fruits and vegetables: Quality and safety aspects. *Microorganisms*, 8(6), 952.
- Ahmed, M., Alouba, A. M., & Kheiralla, K. M. (2024). *Linking Groundwater Protection and Wastewater Reuse in West Omdurman, Sudan: A Framework for Urban Water Resources Management*.
- Ait-Mouheb, N., Bahri, A., Thayer, B. B., Benyahia, B., Bourrie, G., Cherki, B., Condom, N., Declercq, R., Gunes, A., & Héran, M. (2018). The reuse of reclaimed water for irrigation around the Mediterranean Rim: A step towards a more virtuous cycle? *Regional Environmental Change*, 18(3), 693–705.
- Ait-Mouheb, N., Mange, A., Froment, G., Lequette, K., Bru-Adan, V., Maihol, J.-C., Molle,

- B., & Wery, N. (2022). Effect of untreated or reclaimed wastewater drip-irrigation for lettuces and leeks on yield, soil and fecal indicators. *Resources, Environment and Sustainability*, 8, 100053.
- Ajdary, K., Singh, D. K., Singh, A. K., & Khanna, M. (2007). Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. *Agricultural Water Management*, 89(1), 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.12.014>
- Akap, P. T., & Aşık, Ş. (2025). Use of treated wastewater with different irrigation methods on pepper crops: Evaluation of the impact on yield, quality and soil conditions. *Irrigation Science*, 43(6), 1543–1557.
- Al Arni, S., Amous, J., & Ghernaout, D. (2019). On the perspective of applying of a new method for wastewater treatment technology: Modification of the third traditional stage with two units, one by cultivating microalgae and another by solar vaporization. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 16, 555934.
- Al-Hadidi, L., & Sweity, A. (2022). Effect of deficit irrigation using treated wastewater on eggplant yields, water productivity, fruit quality and mineral contents. *Russian Agricultural Sciences*, 48(2), 63–73.
- Ali, M. N., Youssef, T. F., Aly, M. M., & Abuzaid, A. G. (2021). Application of effective microorganisms technology on dairy wastewater treatment for irrigation purposes. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(4), 2917.
- Alkhamisi, S. A., Abdelrahman, H., Ahmed, M., & Goosen, M. (2011). Assessment of reclaimed water irrigation on growth, yield, and water-use efficiency of forage crops. *Applied Water Science*, 1(1), 57–65.
- Al-Lahham, O., El Assi, N., & Fayyad, M. (2003). Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit. *Agricultural Water Management*, 61(1), 51–62.
- Al-Wasify, R. S., Ali, M. N., & Hamed, S. R. (2017). Biodegradation of dairy wastewater using bacterial and fungal local isolates. *Water Science and Technology*, 76(11), 3094–3100.
- Amoo, O., & Aremu, A. (2012). Treatability of Institutional Wastewater Using Waste Stabilization Pond System. *J. Appl. Technol. Environ. Sanit*, 2, 217–222.
- Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B. E., & Tchobanoglous, G. (2018). Water reuse: From ancient to modern times and the future. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 26.

- Armon, R., Gold, D., Brodsky, M., & Oron, G. (2002). Surface and subsurface irrigation with effluents of different qualities and presence of *Cryptosporidium* oocysts in soil and on crops. *Water Science and Technology*, 46(3), 115–122.
- Assouline, S., & Narkis, K. (2013). Effect of long-term irrigation with treated wastewater on the root zone environment. *Vadose Zone Journal*, 12(2), vzj2012-0216.
- Aujla, M., Thind, H., & Buttar, G. (2007). Fruit yield and water use efficiency of eggplant (*Solanum melongena* L.) as influenced by different quantities of nitrogen and water applied through drip and furrow irrigation. *Scientia Horticulturae*, 112(2), 142–148.
- Ayars, J. E., Fulton, A., & Taylor, B. (2015). Subsurface drip irrigation in California—Here to stay? *The Jim Oster Special Issue*, 157, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.001>
- Aziz, F., & Farissi, M. (2014). Reuse of treated wastewater in agriculture: Solving water deficit problems in arid areas. *Annals of West University of Timisoara: Series of Biology*, 17(2).
- Bahri, A., Drechsel, P., Raschid-Sally, L., & Redwood, M. (2009). *Wastewater Irrigation and Health: Assessing and mitigating risk in low-income countries*. Routledge.
- Banik, B., Korav, S., Guin, A., & Unjia, D. (2024). Impact of drip irrigation on crop growth, yield, water productivity, and weed dynamics: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(4), 739–749.
- Bansal, G., Mahajan, A., Verma, A., & Bandhu Singh, D. (2021). A review on materialistic approach to drip irrigation system. *International Conference on Technological Advancements in Materials Science and Manufacturing*, 46, 10712–10717. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.546>
- Bar-Yosef, B. (1999). Advances in Fertigation. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 65, pp. 1–77). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60910-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60910-4)
- Bastos, R., & Mara, D. (1995). The bacterial quality of salad crops drip and furrow irrigated with waste stabilization pond effluent: An evaluation of the WHO guidelines. *Water Science and Technology*, 31(12), 425–430.
- Becerra-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., & Nunes, O. C. (2015). Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment International*, 75, 117–135. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.001>

- Ben-Hur, M. (2004). Sewage water treatments and reuse in Israel. In *Water in the Middle East and in North Africa: Resources, protection and management* (pp. 167–180). Springer.
- Bernstein, N. (2009). *Contamination of soils with microbial pathogens originating from effluent water used for agricultural irrigation*. 8537.
- Bernstein, N., Chaimovitch, D., & Dudai, N. (2009). Effect of irrigation with secondary treated effluent on essential oil, antioxidant activity, and phenolic compounds in oregano and rosemary. *Agronomy Journal*, 101(1), 1–10.
- Bernstein, N., & Kafkafi, U. (2002). Root growth under salinity stress. In *Plant roots* (pp. 1222–1250). CRC Press.
- Bernstein, N., Sela, S., & Neder-Lavon, S. (2007). Assessment of contamination potential of lettuce by *Salmonella enterica* serovar Newport added to the plant growing medium. *Journal of Food Protection*, 70(7), 1717–1722.
- Bhatnagar, J., & Awasthi, S. (2000). *Prevention of food adulteration act (act no. 37 of 1954) alongwith central & state rules (as amended for 1999)*. Ashoka Law House.
- Biel-Maeso, M., Corada-Fernández, C., & Lara-Martín, P. A. (2018). Monitoring the occurrence of pharmaceuticals in soils irrigated with reclaimed wastewater. *Environmental Pollution*, 235, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.085>
- Bingham, F., Strong, J., Rhoades, J., & Keren, R. (1985). An application of the Maas-Hoffman salinity response model for boron toxicity. *Soil Science Society of America Journal*, 49(3), 672–674.
- Botía, P., Navarro, J. M., Cerdá, A., & Martínez, V. (2005). Yield and fruit quality of two melon cultivars irrigated with saline water at different stages of development. *European Journal of Agronomy*, 23(3), 243–253.
- Camp, C. (1998). Subsurface drip irrigation: A review. *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1353–1367.
- Camp, C., Lamm, F., Evans, R., & Phene, C. (2000). *Subsurface drip irrigation—Past, present and future*. 14–16.
- Cao, X., Zheng, H., Wang, J., Li, H., Feng, Y., & Yue, X. (2020). *Effects of subsurface drip irrigation with micro-nano bubble water on rhizosphere soil nutrients and yield of alfalfa*.
- Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 174–182.

- <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>
- Center, B. M., Kottkamp, J., Governor, L., & Sole, M. W. (2008). Florida Department of Environmental Protection. *DEP*, 850, 245–8736.
- Chang, D., & Ma, Z. (2012). Wastewater reclamation and reuse in Beijing: Influence factors and policy implications. *Desalination*, 297, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.04.019>
- Chen, J., Kang, S., Du, T., Qiu, R., Guo, P., & Chen, R. (2013). Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages. *Agricultural Water Management*, 129, 152–162.
- Chen, J., Wang, G., Hamani, A. K. M., Amin, A. S., Sun, W., Zhang, Y., Liu, Z., & Gao, Y. (2021). Optimization of Nitrogen fertilizer application with climate-smart agriculture in the North China Plain. *Water*, 13(23), 3415.
- Chen, W., Lu, S., Zhang, W., Yi, L., & Jiao, W. (2014). Ecological risks and sustainable utilization of reclaimed water and wastewater irrigation. *Acta Ecol. Sin*, 34(1), 163–172.
- Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Zhang, S., Liao, Z., Zhang, F., & Wang, Y. (2021). A global meta-analysis of yield and water use efficiency of crops, vegetables and fruits under full, deficit and alternate partial root-zone irrigation. *Agricultural Water Management*, 248, 106771.
- Cheng, X., Xu, D., & Zhang, H. (1999). A summary of development and application situations for subsurface drip irrigation technique. *Water Saving Irrigation*, 4, 13–15.
- Chuanjie, Y., Yi, L., Lin, S., & Na, W. (2015). Effect of deficit irrigation on the growth, water use characteristics and yield of cotton in arid Northwest China. *Pedosphere*, 25(6), 910–924.
- Cirelli, G. L., Consoli, S., Licciardello, F., Aiello, R., Giuffrida, F., & Leonardi, C. (2012). Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. *Agricultural Water Management*, 104, 163–170.
- Cizmas, L., Sharma, V. K., Gray, C. M., & McDonald, T. J. (2015). Pharmaceuticals and personal care products in waters: Occurrence, toxicity, and risk. *Environmental Chemistry Letters*, 13(4), 381–394. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0524-4>
- CMD. (2011). (Common Ministerial Decision). *Measures, Limits and Procedures for Reuse of Treated Wastewater; No. 145116; Ministry of Environment, Energy and Climate*

Change: Athens, Greece.

- Codex, A. (1984). Codex Alimentarius Commission Contaminants. Joint FAO. WHO “Food Standards Program, Rome.
- Connor, R., United Nations Economic and Social Commission for Western Asia, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, & United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean. (2017). *The united nations world water development report 2017. Wastewater: The untapped resource.*
- Cui, B.-J., Niu, W.-Q., Du, Y.-D., & Zhang, Q. (2020). *Effects of nitrogen application and aerated irrigation on soil environment and yield in cucumber root area.*
- De Carlo, L., Battilani, A., Solimando, D., & Caputo, M. C. (2020). Application of time-lapse ERT to determine the impact of using brackish wastewater for maize irrigation. *Journal of Hydrology*, 582, 124465. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124465>
- Deepa, K., & Krishnaven, M. (2015). Reuse options of reclaimed waste water in Chennai city. *Int. J. Comp. Eng. Res*, 5, 2250–3005.
- Demir, A. D., & Sahin, U. (2017). Effects of different irrigation practices using treated wastewater on tomato yields, quality, water productivity, and soil and fruit mineral contents. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32), 24856–24879.
- Dionisi, D. (2017). *Biological wastewater treatment processes: Mass and heat balances*. CRC press.
- Disciglio, G., Gatta, G., Libutti, A., Gagliardi, A., Carlucci, A., Lops, F., Cibelli, F., & Tarantino, A. (2015). Effects of irrigation with treated agro-industrial wastewater on soil chemical characteristics and fungal populations during processing tomato crop cycle. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(3), 765–780.
- Drechsel, P., Bahri, A., McCornick, P., Abaidoo, R., Attia, F., & El-Guindy, S. (2007). Agricultural Use of Marginal-Quality Water: Opportunities and Challenges. *IWMI: Colombo, Sri Lanka*, 425–457.
- Drechsel, P., & Evans, A. E. V. (2010). Wastewater use in irrigated agriculture. *Irrigation and Drainage Systems*, 24(1), 1–3. <https://doi.org/10.1007/s10795-010-9095-5>
- Du, X., Xi, M., & Kong, L. (2019). Split application of reduced nitrogen rate improves nitrogen uptake and use efficiency in sweetpotato. *Scientific Reports*, 9(1), 14058.
- Du, Y.-D., Cao, H.-X., Liu, S.-Q., Gu, X.-B., & Cao, Y.-X. (2017). Response of yield, quality, water and nitrogen use efficiency of tomato to different levels of water and nitrogen

- under drip irrigation in Northwestern China. *J. Integr. Agric*, 16(5), 1153–1161.
- Du, Z., Zhao, S., She, Y., Zhang, Y., Yuan, J., Rahman, S. U., Qi, X., Xu, Y., & Li, P. (2022). Effects of different wastewater irrigation on soil properties and vegetable productivity in the North China Plain. *Agriculture*, 12(8), 1106.
- Elgallal, M., Fletcher, L., & Evans, B. (2016). Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. *Agricultural Water Management*, 177, 419–431. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.027>
- El-Sadek, A. (2014). Water use optimisation based on the concept of Partial Rootzone Drying. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(1), 55–62.
- El-Sayed, M., Khalifa, Y. A., & Elglaly, A. (2020). Effect of water irrigation management and nitrogen fertilizer sources on water productivity and quality of some Egyptian cotton cultivar. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 37(3), 297–312.
- Ensink, J. H., Blumenthal, U. J., & Brooker, S. (2008). Wastewater quality and the risk of intestinal nematode infection in sewage farming families in Hyderabad, India. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 79(4), 561.
- European Commission. (2020). Farm to fork strategy: For a fair, healthy and environmentally-friendly food system. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*, 381, 1–9.
- FAO. (1985a). *Irrigation Water Management: Irrigation Methods*. https://www.fao.org/4/s8684e/s8684e00.htm?utm_source=chatgpt.com
- FAO. (1985b). *Water Quality for Agriculture; FAO Irrigation and Drainage Volume 29, Paper 29 (Rev. 1); Ayers, R.S., Westcot, D.W., Eds.; The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome, Italy*.
- FAO. (1989). *Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems*. <https://www.fao.org/4/t0231e/t0231e04.htm#2.2.2%20border%20irrigation>
- FAO. (1992). *Waste-Water Treatment and Use in Agriculture; Soils Bull. No. 47; FAO: Rome, Italy*.
- FAO. (2003). *User's Manual for Irrigation with Treated Wastewater; FAO Regional Office for the Near East: Cairo, Egypt*.
- FAO. (2023). *Scheme Water Management. Rome, Italy*. <https://www.fao.org/land->

water/water/watermanagement/ zh/

- Farhadkhani, M., Nikaeen, M., Yadegarfar, G., Hatamzadeh, M., Pourmohammadbagher, H., Sahbaei, Z., & Rahmani, H. R. (2018). Effects of irrigation with secondary treated wastewater on physicochemical and microbial properties of soil and produce safety in a semi-arid area. *Water Research*, 144, 356–364.
- Feigen, A., Ravina, I., & Shalhevet, J. (1991). *Effect of irrigation with treated sewage effluent on soil, plant and environment. Irrigation with treated sewage effluent: Management for environmental protection.*
- Fernández-Gómez, R., Mateos, L., & Giráldez, J. (2004). Furrow irrigation erosion and management. *Irrigation Science*, 23(3), 123–131.
- Flores, J. H. N., Faria Lessandro Coll, Rettore Neto Osvaldo, Diotto Adriano Valentin, & Colombo Alberto. (2021). Methodology for Determining the Emitter Local Head Loss in Drip Irrigation Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(1), 06020014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001516](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001516)
- Friedman, H., Bernstein, N., Bruner, M., Rot, I., Ben-Noon, Z., Zuriel, A., Zuriel, R., Finkelstein, S., Umiel, N., & Hagiladi, A. (2007). Application of secondary-treated effluents for cultivation of sunflower (*Helianthus annuus* L.) and celosia (*Celosia argentea* L.) as cut flowers. *Scientia Horticulturae*, 115(1), 62–69.
- Fukai, S., & Mitchell, J. (2022). Factors determining water use efficiency in aerobic rice. *Crop and Environment*, 1(1), 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.03.008>
- Ganjegunte, G., Ulery, A., Niu, G., & Wu, Y. (2018). Organic carbon, nutrient, and salt dynamics in saline soil and switchgrass (*Panicum virgatum* L.) irrigated with treated municipal wastewater. *Land Degradation & Development*, 29(1), 80–90.
- Gao, L., Li, J., Huang, H., Xiang, B., Li, S., & Li, S. (2022). *Effects of aerated irrigation on soil habitat factors and yield of winter potato under trip irrigation in Yunnan.*
- Gebremeskel, G., Gebremicael, T. G., Hagos, H., Gebremedhin, T., & Kifle, M. (2018). Farmers' perception towards the challenges and determinant factors in the adoption of drip irrigation in the semi-arid areas of Tigray, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 4(3), 527–537. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0137-0>
- Gharaibeh, M. A., Ghezzehei, T. A., Albalasmeh, A. A., & Alghzawi, M. Z. (2016). Alteration of physical and chemical characteristics of clayey soils by irrigation with treated waste water. *Geoderma*, 276, 33–40.

- Gheraout, D. (2018). Increasing trends towards drinking water reclamation from treated wastewater. *World Journal of Applied Chemistry*, 3(1), 1–9.
- Gheraout, D., Elboughdiri, N., & Al Arni, S. (2019). Water Reuse (WR): Dares, restrictions, and trends. *Applied Engineering*, 3(2), 159–170.
- Globalex. (n.d.). *Sewage Treatment Plant*. Retrieved <https://globalex.ac/sewage-treatment-plant/>
- Goldberg, S., Shouse, P., Lesch, S., Grieve, C., Poss, J., Forster, H., & Suarez, D. (2003). Effect of high boron application on boron content and growth of melons. *Plant and Soil*, 256(2), 403–411.
- Gros, M., Petrović, M., Ginebreda, A., & Barceló, D. (2010). Removal of pharmaceuticals during wastewater treatment and environmental risk assessment using hazard indexes. *Environment International*, 36(1), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.09.002>
- Gu, X., Xiao, Y., Yin, S., Liu, H., Men, B., Hao, Z., Qian, P., Yan, H., Hao, Q., & Niu, Y. (2019). Impact of long-term reclaimed water irrigation on the distribution of potentially toxic elements in soil: An in-situ experiment study in the North China Plain. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(4), 649.
- Guo, X., Van Iersel, M. W., Chen, J., Brackett, R. E., & Beuchat, L. R. (2002). Evidence of association of salmonellae with tomato plants grown hydroponically in inoculated nutrient solution. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(7), 3639–3643.
- Guterres, A. (2017). *The Sustainable Development Goals Report 2017; United Nations: New York, NY, USA*.
- Hajjami, K., Ennaji, M., Fouad, S., Oubrim, N., Khallayoune, K., & Cohen, N. (2012). Assessment of helminths health risk associated with reuse of raw and treated wastewater of the Settat City (Morocco). *Resources and Environment*, 2(5), 193–201.
- Hamson, A. R. (1952). *Measuring firmness of tomatoes in a breeding program*.
- Hanson, B., Schwankl, L., Schulbach, K., & Pettygrove, G. (1997). A comparison of furrow, surface drip, and subsurface drip irrigation on lettuce yield and applied water. *Agricultural Water Management*, 33(2–3), 139–157.
- Hashem, M. S., El-Abedin, T. Z., & Al-Ghobari, H. M. (2018). Assessing effects of deficit irrigation techniques on water productivity of tomato for subsurface drip irrigation system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4), 156–167.

- Hashem, M. S., El-Abedin, T. Z., & Al-Ghobari, H. M. (2019). Rational water use by applying regulated deficit and partial root-zone drying irrigation techniques in tomato under arid conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(1), 75–88.
- Hashem, M. S., Guo, W., Qi, X.-B., Li, P., She, Y., Cui, J., & Li, T. (2024). Effect of using reclaimed water via furrow and subsurface drip systems under alternate partial root-zone irrigation mechanism on crops growth and soil properties. *Irrigation Science*, 42(5), 919–936.
- Hashem, M. S., & Qi, X. (2021). Treated wastewater irrigation—A review. *Water*, 13(11), 1527.
- Hassanli, A. M., Ahmadi-rad, S., & Beecham, S. (2010). Evaluation of the influence of irrigation methods and water quality on sugar beet yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 97(2), 357–362.
- Hassanli, A. M., Ahmadi-rad, S., & Beecham, S. (2016). Monitoring sugar beet rooting depth irrigated with recycled waste water and different irrigation methods for water savings in an arid climate. *Iran Agricultural Research*, 35(1), 21–26.
- Havelaar, A., Butler, M., & Farrah, S. (1991). *Bacteriophages as model viruses in water quality control*.
- Helmecke, M., Fries, E., & Schulte, C. (2020). Regulating water reuse for agricultural irrigation: Risks related to organic micro-contaminants. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0283-0>
- Hobson, G. (1965). The firmness of tomato fruit in relation to polygalacturonase activity. *Journal of Horticultural Science*, 40(1), 66–72.
- Hosseini-pour, A., Haghnia, G., Alizadeh, A., & Fotovat, A. (2008). Transport of some elements to depth of a soil following irrigation with raw and treated municipal wastewaters under continuous and intermittent flood conditions. *Water and Soil*, 22(2).
- Hussain, M. I., Muscolo, A., Farooq, M., & Ahmad, W. (2019). Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. *Agricultural Water Management*, 221, 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.014>
- ISO. (2015). *Guidelines for Treated Wastewater Use for Irrigation Projects—Part 1–3; ISO 16075-1-32015; Beuth Verlag: Berlin, Germany*.
- Jamieson, R., Gordon, R., Sharples, K., Stratton, G., & Madani, A. (2002). Movement and

- persistence of fecal bacteria in agricultural soils and subsurface drainage water: A review. *Canadian Biosystems Engineering*, 44(1), 1–9.
- Jamjoum, K., & Khattari, S. (1986). Effect of wastewater and sludge application on soil, corn plant composition and production in Zizia Region. *Dirasat*, 15(11), 29–44.
- Jeong, H., Jang, T., Seong, C., & Park, S. (2014). Assessing nitrogen fertilizer rates and split applications using the DSSAT model for rice irrigated with urban wastewater. *Agricultural Water Management*, 141, 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.009>
- Jha, B., Mali, S., Naik, S., Kumar, A., & Singh, A. (2015). *Optimal Planting Geometry and Growth Stage Based Fertigation in Vegetable Crops*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1717.6564>
- Jha, S. K., Ramatshaba, T. S., Wang, G., Liang, Y., Liu, H., Gao, Y., & Duan, A. (2019). Response of growth, yield and water use efficiency of winter wheat to different irrigation methods and scheduling in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 217, 292–302.
- Jia, B., & Fu, J. (2020). Critical nitrogen dilution curve of drip-irrigated maize at vegetative growth stage based on leaf area index. *Nongye Gongcheng Xuebao*, 36(6), 66–73.
- Johannessen, G. S., Wennberg, A. C., Nesheim, I., & Tryland, I. (2015). Diverse land use and the impact on (irrigation) water quality and need for measures—A case study of a Norwegian river. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6979–7001.
- Jou, P. H., & Asadi, R. (2015). *Effects of using wastewater on soil chemical properties under drip and furrow irrigation methods*.
- Kahlon, M., Josan, A., Khera, K., & Choudhary, O. (2007). Effect of drip and furrow methods of irrigation on tomato under two irrigation levels. *Indian Journal of Agricultural Research*, 41(4), 282.
- Kaschl, A., Römheld, V., & Chen, Y. (2002). The influence of soluble organic matter from municipal solid waste compost on trace metal leaching in calcareous soils. *Science of the Total Environment*, 291(1–3), 45–57.
- Kasrawi, M., Snobar, B., & Suwan, M. (1981). Tomato fruit firmness for 17 tomato cultivars (*Lycopersicum esculentum* mill) grown under rainfed and irrigated land conditions of Jordan [yield]. *Dirasat*, 8.

- Kesalkar, V., Khedikar, I. P., & Sudame, A. (2012). Physico-chemical characteristics of wastewater from paper industry. *Int. J. Eng. Res. Appl*, 2(4), 137–143.
- Khan, Z. M., Asif Kanwar, R. M., Farid, H. U., Sultan, M., Arsalan, M., Ahmad, M., Shakoor, A., & Ahson Aslam, M. M. (2019). Wastewater Evaluation for Multan, Pakistan: Characterization and Agricultural Reuse. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(4).
- Khawla, K., Besma, K., Enrique, M., & Mohamed, H. (2019). Accumulation of trace elements by corn (*Zea mays*) under irrigation with treated wastewater using different irrigation methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 530–537.
- Kirda, C., Çetin, M., Dasgan, Y., Topçu, S., Kaman, H., Ekici, B., Derici, M. R., & Ozguven, A. (2004). Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 69(3), 191–201.
- Kiymaz, S., & Ertek, A. (2015). Yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) at different water and nitrogen levels under the climatic conditions of Kırşehir, Turkey. *Agricultural Water Management*, 158, 156–165.
- Kiziloglu, F., Turan, M., Sahin, U., Kuslu, Y., & Dursun, A. (2008). Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. Botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. Rubra) grown on calcareous soil in Turkey. *Agricultural Water Management*, 95(6), 716–724.
- Lazarova, V. (2013). Global milestones in water reuse: Keys to success and trends in development. *Water*, 15, 12–22.
- Leal, C. S., Mesquita, D. P., Amaral, A. L., Amaral, A. M., & Ferreira, E. C. (2020). Environmental impact and biological removal processes of pharmaceutically active compounds: The particular case of sulfonamides, anticonvulsants and steroid estrogens. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(7), 698–742. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1642831>
- Leonel, L. P., & Tonetti, A. L. (2021). Wastewater reuse for crop irrigation: Crop yield, soil and human health implications based on giardiasis epidemiology. *Science of the Total Environment*, 775, 145833.
- Levy, G., Fine, P., & Bar-Tal, A. (2011). *Treated wastewater in agriculture: Use and impacts on the soil environment and crops*. John Wiley & Sons.
- Li, B., Cao, Y., Guan, X., Li, Y., Hao, Z., Hu, W., & Chen, L. (2019). Microbial assessments

- of soil with a 40-year history of reclaimed wastewater irrigation. *Science of the Total Environment*, 651, 696–705.
- Li, J., Pan, Y., Jiao, X., Hu, W., & Liu, Y. (2021). Effects of aerated irrigation rice growth and soil reducibility under wheat straw returning conditions. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach*, 52(9), 250–259.
- Li, J., Zhang, J., & Ren, L. (2003). Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. *Irrigation Science*, 22(1), 19–30.
- Li JiuSheng, Du ZhenHua, & Li YanFeng (2008). *Field evaluation of fertigation uniformity for subsurface drip irrigation systems*.
- Li, M. (2022). Effects of different irrigation modes on physiological growth, yield and water use efficiency of maize. *Shaanxi Water Resour*, 38, 38–41.
- Li, X., Tian, D., Guo, K., Xu, B., & Zhao, S. (2016). Influence of mulch drip irrigation on wheat root distribution characteristics. *J. Irrig. Drain. Eng*, 34, 545–552.
- Li, Y., Zhou, B., & Yang, P. (2018). Research advances in drip irrigation emitter clogging mechanism and controlling methods. *J. Hydraul. Eng*, 49(1), 103–114.
- Li YanFeng, Li JiuSheng, & Zhang Hang (2014). *Effects of chlorination on soil chemical properties and nitrogen uptake for tomato drip irrigated with secondary sewage effluent*.
- Liang, P., Jingan, X., & Liying, S. (2022). The effects of reclaimed water irrigation on the soil characteristics and microbial populations of plant rhizosphere. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 17570–17579.
- Liang, Q., Gao, R., Xi, B., Zhang, Y., & Zhang, H. (2014). Long-term effects of irrigation using water from the river receiving treated industrial wastewater on soil organic carbon fractions and enzyme activities. *Agricultural Water Management*, 135, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.003>
- Libutti, A., Gatta, G., Gagliardi, A., Vergine, P., Pollice, A., Beneduce, L., Disciglio, G., & Tarantino, E. (2018). Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 196, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.015>
- Licata, M., Farruggia, D., Iacuzzi, N., Leto, C., Tuttolomondo, T., & Di Miceli, G. (2022). Effect of irrigation with treated wastewater on bermudagrass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) production and soil characteristics and estimation of plant nutritional input. *Plos*

One, 17(7), e0271481.

- Lim, S.-L., Chu, W.-L., & Phang, S.-M. (2010). Use of *Chlorella vulgaris* for bioremediation of textile wastewater. *Bioresource Technology*, 101(19), 7314–7322. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.092>
- Liu, X., Shao, L., Sun, H., Chen, S., & Zhang, X. (2013). Responses of yield and water use efficiency to irrigation amount decided by pan evaporation for winter wheat. *Agricultural Water Management*, 129, 173–180.
- Lower, R., & Thompson, A. (1966). *Sampling variation of acidity and solids in tomatoes*.
- Lu, J., Hu, T., Geng, C., Cui, X., Fan, J., & Zhang, F. (2021). Response of yield, yield components and water-nitrogen use efficiency of winter wheat to different drip fertigation regimes in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 255, 107034.
- Lyu, S., Chen, W., Zhang, W., Fan, Y., & Jiao, W. (2016). Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges. *40th Anniversary of RCEES*, 39, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.11.012>
- Ma, T., Gao, F., Liu, C., Hu, C., Cui, B., Cui, E., & Hao, Y. (2022). *Spatial distribution of added selenium in soil as affected by different irrigations using reclaimed water*.
- Maas, E. (1990). Crop salt tolerance. *Agricultural Salinity Assessment and Management Manual*, 262–304.
- Mahmoudi, M., Khelil, M. N., Ghrib, R., Douh, B., & Boujelben, A. (2020). Assessment of growth and yield of okra (*Abelmoschus esculentus*) under surface and subsurface drip irrigation using treated waste water. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 9(4).
- Maisiri, N., Senzanje, A., Rockstrom, J., & Twomlow, S. (2005). On farm evaluation of the effect of low cost drip irrigation on water and crop productivity compared to conventional surface irrigation system. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(11–16), 783–791.
- Malaviya, P., & Rathore, V. (2007). Seasonal variations in different physico-chemical parameters of the effluents of Century Pulp and Paper Mill, Lal Kuan, Uttarakhand. *Journal of Environmental Biology*, 28(2), 219–224.
- Mara, D., & Kramer, A. (2008). The 2006 WHO guidelines for wastewater and greywater use in agriculture: A practical interpretation. In *Efficient Management of Wastewater: Its Treatment and Reuse in Water-Scarce Countries* (pp. 1–17). Springer.

- Mateos, L., & Giráldez, J. V. (2005). Suspended load and bed load in irrigation furrows. *Catena*, 64(2–3), 232–246.
- Maurer, M. A., Davies, F. S., & Graetz, D. A. (1995). Reclaimed Wastewater Irrigation and Fertilization of Mature Redblush Grapefruit Trees on Spodosols in Florida. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120(3), 394–402.
- McLaren, R., Clucas, L., Taylor, M., & Hendry, T. (2004). Leaching of macronutrients and metals from undisturbed soils treated with metal-spiked sewage sludge. 2. Leaching of metals. *Soil Research*, 42(4), 459–471.
- Meena, R., Datta, S., Golui, D., Dwivedi, B., & Meena, M. (2016). Long-term impact of sewage irrigation on soil properties and assessing risk in relation to transfer of metals to human food chain. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(14), 14269–14283.
- Mehmood, F., Wang, G., Gao, Y., Liang, Y., Chen, J., Si, Z., Ramatshaba, T. S., Zain, M., & Duan, A. (2019). Nitrous oxide emission from winter wheat field as responded to irrigation scheduling and irrigation methods in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 222, 367–374.
- Metcalf, E. (2003). Physical unit process. *Waste Water Engineering Treatment and Reuse, Fourth Ed., Tat-McGraw Hill, New York*.
- Metcalf, E., & Eddy, M. (1991). Wastewater Engineering—Treatment, Disposal, Reuse. McGraw-Hill. Inc., New York.
- Mishra, S., Kumar, R., & Kumar, M. (2023). Use of treated sewage or wastewater as an irrigation water for agricultural purposes- Environmental, health, and economic impacts. *Total Environment Research Themes*, 6, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100051>
- Mojiri, A. (2011). Effects of municipal wastewater on physical and chemical properties of saline soil. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 5(14).
- Montemurro, N., Postigo, C., Chirón, S., Barcelò, D., & Pérez, S. (2019). Analysis and fate of 14 relevant wastewater-derived organic pollutants in long-term exposed soil. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 411(12), 2687–2696. <https://doi.org/10.1007/s00216-019-01715-3>
- Moursy, M. A. M., ElFetyany, M., Meleha, A. M. I., & El-Bialy, M. A. (2023). Productivity and profitability of modern irrigation methods through the application of on-farm drip

- irrigation on some crops in the Northern Nile Delta of Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 62, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.06.063>
- Munshower, F. F. (1994). *Practical handbook of disturbed land revegetation*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Muthuraman, L., & Ramaswamy, S. (2019). *Solid Waste Management*. MJP Publisher.
- Muttamara, S. (1996). Wastewater characteristics. *Pollution Control and Management and Environmental Toxicology*, 16(1), 145–159. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00052-6](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00052-6)
- Nagi, M., He, M., Li, D., Gebreluel, T., Cheng, B., & Wang, C. (2020). *Utilization of tannery wastewater for biofuel production: New insights on microalgae growth and biomass production*. *Sci Rep* 10:1–14.
- Najafi, P. (2006). Effects of using subsurface drip irrigation and treated municipal waste water in irrigation of tomato. *Pakistan J. Biol. Sci*, 9, 2672–2676.
- Najafi, P., & Nasr, S. (2009). *Comparison effects of wastewater on soil chemical properties in three irrigation methods*.
- Nakayama, F. S., & Bucks, D. A. (1991). Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science*, 12(4), 187–192. <https://doi.org/10.1007/BF00190522>
- Nangare, D., Singh, Y., Kumar, P. S., & Minhas, P. (2016). Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis. *Agricultural Water Management*, 171, 73–79.
- Narayanamoorthy, A. (2009). *Drip and sprinkler irrigation in India: Benefits, potential and future directions*. International Water Management Institute.
- Nathanson, J. A., & Ambulkar, A. (2026). *Wastewater treatment*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment>.
- Neilsen, G., Stevenson, D., Fitzpatrick, J., & Brownlee, C. (1989). Nutrition and yield of young apple trees irrigated with municipal waste water. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114(3), 377–383.
- Nguyen, M. K., Pham, T. T., Nguyen, C. V., & Ingrid, O. (2008). Effects of using wastewater as nutrient sources on soil chemical properties in peri-urban agricultural systems. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 24(2).
- Nirit, B., Asher, B. T., Haya, F., Pini, S., Ilona, R., Amram, C., & Marina, I. (2006). Application of treated wastewater for cultivation of roses (*Rosa hybrida*) in soil-less culture.

- Scientia Horticulturae*, 108(2), 185–193.
- NRMMC-EPHC. (2006). *National Water Quality Management Strategy, Document 21: Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks; NRMMC-EPHC: Canberra, Australia.*
- Nuwarapaksha, T. D., Udumann, S. S., Dissanayaka, N. S., Dilshan, R., & Atapattu, A. J. (2025). Revolutionizing agriculture by advanced water and irrigation management technologies. In *Emerging trends and technologies in water management and conservation* (pp. 285–318). IGI Global Scientific Publishing.
- Ofori, S., Puškáčová, A., Růžicková, I., & Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of the Total Environment*, 760, 144026.
- OJFR. (2021). *Decree n_0153 du 4 of July 2014 Page 11059 Text No. 29. (Official J. French).* Available online: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000029186641?r=YL4iQxYcIQ,2014>.
- Ombwayo, N. L. (2019). *Factors Influencing Management of Slaughterhouse Waste in Nairobi, Kiambu, Kajiado and Machakos Counties.*
- Onesios, K. M., Yu, J. T., & Bouwer, E. J. (2009). Biodegradation and removal of pharmaceuticals and personal care products in treatment systems: A review. *Biodegradation*, 20(4), 441–466. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9237-8>
- Oyonarte, N., & Mateos, L. (2003). Accounting for soil variability in the evaluation of furrow irrigation. *Transactions of the ASAE*, 46(1), 85.
- Pathik, B., Khan, M., & Hye, A. K. (2014). *An approach for the economical evaluation of solar irrigation in Bangladesh* (p. 6). <https://doi.org/10.1109/IGBSG.2014.6835160>
- Pazzagli, P. T., Weiner, J., & Liu, F. (2016). Effects of CO₂ elevation and irrigation regimes on leaf gas exchange, plant water relations, and water use efficiency of two tomato cultivars. *Agricultural Water Management*, 169, 26–33.
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J. J., Koukoulakis, P., & Asano, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1233–1241. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.003>
- Pei, Y., Li, Y., Liu, Y., Zhou, B., Shi, Z., & Jiang, Y. (2014). Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation. *Irrigation Science*, 32(2), 141–157. <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0420-2>

- Peng, L., Cai, W., Cao, Z., Gan, Y., & Yang, B. (2022). *Effects of reduced fertilization on main agronomic traits, yield and fertilizer utilization rate of sugarcane under mulched drip fertigation system. Chin. J. Trop. Crops.*
- Postel, S. (2000). *Redesigning irrigated agriculture.*
- Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Khoshravesht, M., & Azamathulla, H. M. (2021). Improving rice water productivity using alternative irrigation (case study: North of Iran). *Water Supply*, 21(3), 1216–1227.
- Qadir, M., Mateo-Sagasta, J., Jiménez, B., Siebe, C., Siemens, J., & Hanjra, M. A. (2015). Environmental Risks and Cost-Effective Risk Management in Wastewater Use Systems. In P. Drechsel, M. Qadir, & D. Wichelns (Eds.), *Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World* (pp. 55–72). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9545-6_4
- Qian, Y. L., & Mecham, B. (2005). Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways. *Agronomy Journal*, 97(3), 717–721.
- Rahman, M. (n.d.). *A presentation on border irrigation system.* Retrieved <https://www.slideshare.net/slideshow/a-presentation-on-border-irrigation-system-by-mostafijur-rahman/242220443#6>
- Rahman, M. M., & Kabir, K. B. (2010). Wastewater treatment options for paper mills using recycled paper/imported pulps as raw materials: Bangladesh perspective. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 14(1), 65–68.
- Rai, R. K., Singh, V. P., & Upadhyay, A. (2017). Chapter 10—Irrigation Methods. In *Planning and Evaluation of Irrigation Projects* (pp. 353–363). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811748-4.00010-8>
- Rattan, R., Datta, S., Chhonkar, P., Suribabu, K., & Singh, A. (2005). Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—A case study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 109(3–4), 310–322.
- Reid, R. J., Hayes, J. E., Post, A., Stangoulis, J. R., & Graham, R. D. (2004). A critical analysis of the causes of boron toxicity in plants. *Plant, Cell & Environment*, 27(11), 1405–1414.
- Ren, Y., Wang, S., Xie, L., & Dong, X. (2012). Effects of irrigation methods on water use efficiency and fruit quality of jujube in arid area. *Transactions of the Chinese Society*

- of Agricultural Engineering*, 28(22), 95–102.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2018). Water use and stress. *Our World in Data*.
- Rizzo, L., Gernjak, W., Krzeminski, P., Malato, S., McArdell, C. S., Perez, J. A. S., Schaar, H., & Fatta-Kassinos, D. (2020). Best available technologies and treatment trains to address current challenges in urban wastewater reuse for irrigation of crops in EU countries. *Science of The Total Environment*, 710, 136312. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136312>
- Sacks, M., & Bernstein, N. (2011). Utilization of reclaimed wastewater for irrigation of field-grown melons by surface and subsurface drip irrigation. *Israel Journal of Plant Sciences*, 59(2–4), 159–169.
- SafeRack. (n.d.). *Wastewater Treatment*. Retrieved <https://saferack.com/industries/wastewater/>
- Santos, A. F., Alvarenga, P., Gando-Ferreira, L. M., & Quina, M. J. (2023). Urban wastewater as a source of reclaimed water for irrigation: Barriers and future possibilities. *Environments*, 10(2), 17.
- Santos, J. L., Aparicio, I., Callejón, M., & Alonso, E. (2009). Occurrence of pharmaceutically active compounds during 1-year period in wastewaters from four wastewater treatment plants in Seville (Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 164(2), 1509–1516. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.073>
- Seow, T. W., Lim, C. K., Nor, M. H. M., Mubarak, M. F. M., Lam, C. Y., Yahya, A., & Ibrahim, Z. (2016). Review on wastewater treatment technologies. *Int. J. Appl. Environ. Sci*, 11(1), 111–126.
- Sepaskhah, A. R., & Karizi, A. (2011). Effects of alternate use of wastewater and fresh water on soil saturated hydraulic conductivity. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(2), 149–158.
- Shaaban, A., Haroun, B., & Ibraheem, I. (2004). *Assessment of impact of Microcystis aeruginosa and Chlorella vulgaris in the uptake of some heavy metals from culture media*. 28–29.
- Shakir, E., Zahraw, Z., & Al-Obaidy, A. H. M. J. (2017). Environmental and health risks associated with reuse of wastewater for irrigation. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1), 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.01.003>
- Shannon, M., & Francois, L. (1978). Salt Tolerance of Three Muskmelon Cultivars1. *Journal*

- of the American Society for Horticultural Science, 103(1), 127–130.
- Sharma, R. K., Agrawal, M., & Marshall, F. M. (2009). Heavy metals in vegetables collected from production and market sites of a tropical urban area of India. *Food and Chemical Toxicology*, 47(3), 583–591.
- Shi, W. (2020). Factors affecting the application of micro-irrigation integrated with water and medicine and optimization of the applicator. *Northwest A & F University, Yangling*.
- Shock, C. (2007). *Subsurface drip irrigation for seed production of intermountain forbs*. 19–20.
- Singandhupe, R., Rao, G., Patil, N., & Brahmanand, P. (2003). Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.). *European Journal of Agronomy*, 19(2), 327–340.
- Singh, R., Singh, P., Gupta, R., & Singh, R. (2018). *Biotechnology for sustainable agriculture*.
- Sinha, S., Gupta, A., Bhatt, K., Pandey, K., Rai, U., & Singh, K. (2006). Distribution of metals in the edible plants grown at Jajmau, Kanpur (India) receiving treated tannery wastewater: Relation with physico-chemical properties of the soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 115(1), 1–22.
- Siyal, A. A., Bristow, K. L., & Šimůnek, J. (2012). Minimizing nitrogen leaching from furrow irrigation through novel fertilizer placement and soil surface management strategies. *Agricultural Water Management*, 115, 242–251.
- Smith, R., Raine, S. R., & Minkevich, J. (2005). Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton. *Agricultural Water Management*, 71(2), 117–130.
- Soltani-Gerdefaramarzi, S., Beik-Khormizi, V., Azizian, A., & Yarami, N. (2021). Effect of deficit irrigation with treated wastewater on water use efficiency, nutrient uptake, and growth of pistachio seedlings in an arid area. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 2153–2163.
- Spanu, A., Langasco, I., Mara, A., & Sanna, G. (2024). Sprinkler irrigation: An efficient and eco-friendly approach to produce safe rice. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17, 101254. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101254>
- Stauffer, & Spuhler. (2012). *Applicability, advantages and disadvantages of sprinkler irrigation*. https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/iwrm/Implementation/technical_measures/Irrigation-

systems/sprinkler/applicability_advantages_disadvantages/index.html

- Sun, Y., Chen, Z., Wu, G., Wu, Q., Zhang, F., Niu, Z., & Hu, H.-Y. (2016). Characteristics of water quality of municipal wastewater treatment plants in China: Implications for resources utilization and management. *Journal of Cleaner Production*, 131, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.068>
- Sun, Y., Hu, K., Fan, Z., Wei, Y., Lin, S., & Wang, J. (2013). Simulating the fate of nitrogen and optimizing water and nitrogen management of greenhouse tomato in North China using the EU-Rotate_N model. *Agricultural Water Management*, 128, 72–84.
- Syukor, A. A., Sulaiman, S., Siddique, M. N. I., Zularisam, A., & Said, M. (2016). Integration of phytogreen for heavy metal removal from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3124–3131.
- Teklehaimanot, G. Z., Kamika, I., Coetzee, M. A. A., & Momba, M. (2015). Seasonal variation of nutrient loads in treated wastewater effluents and receiving water bodies in Sedibeng and Soshanguve, South Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(9), 595.
- Thomas, B. O., Lechner, S. L., Ross, H. C., Joris, B. R., Glick, B. R., & Stegelmeier, A. A. (2024). Friends and foes: Bacteria of the hydroponic plant microbiome. *Plants*, 13(21), 3069.
- Tian, D.-L., Hou, C.-L., Ren, J., Hao, L., & Li, Z.-K. (2022). *Effects of different irrigation methods and fertilizer amount on wheat yield and utilization of water, fertilizer and medicine*.
- Torun, B., Kalayci, M., Ozturk, L., Torun, A., Aydin, M., & Cakmak, I. (2002). Differences in Shoot Boron Concentrations, Leaf Symptoms, and Yield of Turkish Barley Cultivars Grown on Boron-Toxic Soil in Field. *Journal of Plant Nutrition*, 26(9), 1735–1747.
- Tripathi, V. K., Rajput, T. B. S., & Patel, N. (2016). Biometric properties and selected chemical concentration of cauliflower influenced by wastewater applied through surface and subsurface drip irrigation system. *Journal of Cleaner Production*, 139, 396–406.
- Uhlig, E., Kjellström, A., Nurminen, N., Olsson, C., Oscarsson, E., Canaviri-Paz, P., Mogren, L., Alsanius, B., Molin, G., & Håkansson, Å. (2021). Use of bacterial strains antagonistic to *Escherichia coli* for biocontrol of spinach: A field trial. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74, 102862.
- Urbano, V. R., Mendonça, T. G., Bastos, R. G., & Souza, C. F. (2017). Effects of treated

- wastewater irrigation on soil properties and lettuce yield. *Agricultural Water Management*, 181, 108–115.
- USEPA. (2004). *Guidelines for Water Reuse; US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.*
- USEPA. (2012). *Guidelines for Water Reuse; United States Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.*
- Uyttendaele, M., Jaykus, L., Amoah, P., Chiodini, A., Cunliffe, D., Jaxsens, L., Holvoet, K., Korsten, L., Lau, M., & McClure, P. (2015). Microbial hazards in irrigation water: Standards, norms, and testing to manage use of water in fresh produce primary production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(4), 336–356.
- Ventura, D., Consoli, S., Barbagallo, S., Marzo, A., Vanella, D., Licciardello, F., & Cirelli, G. L. (2019). How to overcome barriers for wastewater agricultural reuse in Sicily (Italy)? *Water*, 11(2), 335.
- Veolia. (2022). *Wastewater Reuse, a Second Life for an Essential Resource.* <https://www.veolia.com/en/solution/wastewater-reuse-recycling-water-stress>
- Virga, G., Sabatino, L., Licata, M., Tuttolomondo, T., Leto, C., & La Bella, S. (2020). Effects of irrigation with different sources of water on growth, yield and essential oil compounds in oregano. *Plants*, 9(11), 1618.
- Von Sperling, M. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. IWA publishing.
- Wang, G., Du, Z., Ning, H., Liu, H., Abubakar, S. A., & Gao, Y. (2021). Changes in GHG emissions based on irrigation water quality in short-term incubated agricultural soil of the north china plain. *Agriculture*, 11(12), 1268.
- Wang, Y., Liu, F., De Neergaard, A., Jensen, L. S., Luxhøi, J., & Jensen, C. R. (2010). Alternate partial root-zone irrigation induced dry/wet cycles of soils stimulate N mineralization and improve N nutrition in tomatoes. *Plant and Soil*, 337(1), 167–177.
- Wang, Z., Li, J., & Li, Y. (2017). Using reclaimed water for agricultural and landscape irrigation in China: A review. *Irrigation and Drainage*, 66(5), 672–686.
- Wei, G., Andersen, M. N., Ping, L., & Yuan, Z. (2017). Effects of reclaimed water irrigation and nitrogen fertilization on the chemical properties and microbial community of soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(3), 679–690.
- WHO. (1973). *Reuse of Effluents-Methods of Wastewater Treatment and Health Safeguards, Report of a WHO Meeting of Experts; World Health Organization: Geneva,*

Switzerland.

- WHO. (1989). *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture: Report of a WHO scientific group [meeting held in Geneva from 18 to 23 November 1987]*. World Health Organization.
- WHO. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater* (Vol. 4). World Health Organization.
- Wikipedia. (n.d.). *Drip Irrigation*. https://doi.org/https://en.wikipedia.org/wiki/Drip_irrigation
- Winpenney, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernández, F., & Torricelli, R. (2010). The wealth of waste, the economics of wastewater use in agriculture, FAO Water Report 35. *Food and Agriculture Organization, Rome*.
- Wolf, I., Schwartau, C., Thompson, D., Zottola, E., & Davis, D. (1979). The pH of 107 varieties of Minnesota-grown tomatoes. *Journal of Food Science*, 44(4), 1008–1010.
- Xu, J., Wu, L., Chang, A. C., & Zhang, Y. (2010). Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1–3), 780–786.
- Yang, P., Wu, L., Cheng, M., Fan, J., Li, S., Wang, H., & Qian, L. (2023). Review on drip irrigation: Impact on crop yield, quality, and water productivity in China. *Water*, 15(9), 1733.
- Yoseftabar, S. (2012). Effect of split application of nitrogen fertilizer on leaf color chart values in hybrid rice (GRH1). *International Journal of Biology*, 5(1), 79.
- Zang, M., Lei, H., Liu, X., Pan, H., & Xu, J. (2020). Oxygenation promotes soil oxygen diffusion rate and nutrient utilization of winter wheat. *Acta Agric. Nucl. Sin*, 34, 1070–1078.
- ZHAI, Y., Ma, K., Jia, B., Wei, X., YUN, B., MA, J., Zhang, H., Ji, L., & LI, J. (2023). Soil nitrate-N distribution, leaching loss and nitrogen uptake and utilization of maize under drip irrigation in different precipitation years. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 31(5), 765–775.
- Zhang, G., Liu, C., Xiao, C., Xie, R., Ming, B., Hou, P., Liu, G., Xu, W., Shen, D., & Wang, K. (2017). Optimizing water use efficiency and economic return of super high yield spring maize under drip irrigation and plastic mulching in arid areas of China. *Field Crops Research*, 211, 137–146.
- Zhang, M. (2021). *Effects of straw returning and irrigation methods on water and nitrogen use efficiency and soil quality in root soil layer of spring maize*.

- Zhang, Y., & Shen, Y. (2019). Wastewater irrigation: Past, present, and future. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(3), e1234.
- Zhang, Z., Yu, Z., Zhang, Y., & Shi, Y. (2021). Split nitrogen fertilizer application improved grain yield in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) via modulating antioxidant capacity and ¹³C photosynthate mobilization under water-saving irrigation conditions. *Ecological Processes*, 10(1), 21.
- Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L., & Leusch, F. D. L. (2017). Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water Research*, 112, 93–99.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.042>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.