



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
Τμήμα Πολιτικών Δημόσιας Υγείας

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑ

2020 – 2022

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ, ΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΣΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ
ΥΓΕΙΑ**

ΣΠΑΡΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

A.M.: MDY20036

Αθήνα, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
Τμήμα Πολιτικών Δημόσιας Υγείας

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑ

2020 - 2022

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ, ΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΣΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ
ΥΓΕΙΑ**

ΣΠΑΡΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

A.M.: MDY20036

Επιβλέπων: Αλκιβιάδης Βατόπουλος, Καθηγητής Μικροβιολογίας της Δημόσιας Υγείας

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

1. Αλκιβιάδης Βατόπουλος, Καθηγητής Μικροβιολογίας της Δημόσιας Υγείας
2. Γεωργία Μανδηλαρά, Επίκουρη Καθηγήτρια Μικροβιολογίας Δημόσιας Υγείας – Μοριακής Μικροβιολογίας
3. Ιωάννα Δαμικούκα, Επίκουρη Καθηγήτρια Ρύπανσης υδάτων με έμφαση στην προστασία της Δημόσιας Υγείας

Αθήνα, Σεπτέμβριος, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑ

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ: 2020-2022

Η ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ, ΟΙ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
ΚΑΙ ΣΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑ

Αλκιβιάδης Βατόπουλος, Γεωργία Μανδηλαρά, Ιωάννα Δαμικούκα

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Αλκιβιάδης Βατόπουλος	Καθηγητής Μικροβιολογίας της Δημόσιας Υγείας	
2	Γεωργία Μανδηλαρά	Επίκουρη Καθηγήτρια Μικροβιολογίας Δημόσιας Υγείας – Μοριακής Μικροβιολογίας	
3	Ιωάννα Δαμικούκα	Επίκουρη Καθηγήτρια Ρύπανσης υδάτων με έμφαση στην προστασία της Δημόσιας Υγείας	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος *Σπυρίδων Σπάρος* του *Δημητρίου*, με αριθμό μητρώου MDY20036 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Δημόσια Υγεία του Τμήματος Πολιτικών Δημόσιας Υγείας της Σχολής Δημόσιας Υγείας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

**Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι*

.....και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο Δηλών

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα

Σπάρος Σπυρίδων

Copyright © Σπυρίδων Σπάρος, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Δημόσια Υγεία του Τμήματος Πολιτικών Δημόσιας Υγείας της Σχολής Δημόσιας Υγείας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η έγκρισή της δεν υποδηλώνει απαραίτητως και την αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος Πολιτικών Δημόσιας Υγείας.

Βεβαιώνω ότι η παρούσα Διπλωματική Εργασία είναι αποτέλεσμα δικής μου δουλειάς και δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής. Στις δημοσιευμένες ή μη δημοσιευμένες πηγές που αναφέρω έχω χρησιμοποιήσει εισαγωγικά όπου απαιτείται και έχω παραθέσει τις πηγές τους στο τμήμα της βιβλιογραφίας.

Υπογραφή:Σπάρος Σπυρίδων.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της αύξησης του προβλήματος τόσο των αποβλήτων όσο και των λυμάτων έχει διενεργηθεί μεγάλος αριθμός μελετών και ερευνών που έχουν ως στόχο τη μείωση των επιπτώσεων καθώς και τη διατήρηση ή ακόμη και τη βελτίωση των υδάτινων πόρων μέσω της επεξεργασίας των λυμάτων για την παραγωγή ποιοτικού ανακυκλωμένου νερού.

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια ανάλυσης των παραπάνω προβληματισμών. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία πλήρης και λεπτομερής αναφορά στα λύματα , στις κατηγορίες αυτών καθώς και στις μεθόδους επεξεργασίας που εφαρμόζονται.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφεται η αξιοποίηση των λυμάτων τόσο ως επαναχρησιμοποιούμενο νερό ως και άλλων μορφών αξιοποίησης, όπως της ανάκτησης των θρεπτικών στοιχείων, της ενέργειας κ.τ.λ.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επιπτώσεις της χρήσης του ανακυκλωμένου νερού για τη γεωργική άρδευση, είτε θετικές ή αρνητικές στο περιβάλλον, κυρίως στο έδαφος, στα φυτά, στους υδάτινους πόρους, στην οικονομία καθώς και οι πιθανοί κίνδυνοι στη δημόσια υγεία.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πολιτικές και τα μέτρα πρόληψης που εφαρμόζονται για την προστασία της δημόσιας υγείας.

Ακολουθούν τα Συμπεράσματα και η Βιβλιογραφία.

Λέξεις - κλειδιά: “wastewater”, “reuse”, “recycling”, “wastewater treatment”, “water scarcity”, “sludge”, “soil contamination”, “toxicity”, “heavy metals”, “health risk”

ABSTRACT

In recent decades, due to the increase in the problem of both waste and wastewater, a large number of studies and researches have been carried out with the aim of reducing the impact as well as preserving or even improving the water resource through the treatment of wastewater with the production quality recycled water. In this paper, an attempt was made to analyze the above concerns.

In the first chapter there is a complete and detailed reference to wastewater, its categories as well as the treatment methods applied.

The following chapter describes the utilization of wastewater both as reused water and other forms of utilization, such as nutrients recovery and energy, etc.

The third chapter presents the impacts of the use of recycled water for agricultural irrigation, either positive or negative on the environment, mainly on soil, plants, water resources, economic parameters and potential risks to public health.

The final chapter presents the policies and prevention measures implemented to protect public health.

The Conclusions and Bibliography follow.

Key-words: “wastewater”, “reuse”, “recycling”, “wastewater treatment”, “water scarcity”, “sludge”, “soil contamination”, “toxicity”, “heavy metals”, “health risk”

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT.....	ii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	viii
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	ix
Συντομογραφίες στα Αγγλικά	ix
Συντομογραφία στα Ελληνικά	xii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ.....	2
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ	2
ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	3
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΛΥΜΑΤΑ.....	4
1.1 Γενικά.....	4
1.2 Ιστορική ανασκόπηση της επεξεργασίας των λυμάτων και της άρδευσης των αγροτικών καλλιεργειών	4
1.1 Τύποι λυμάτων	7
1.2 Χαρακτηριστικά των λυμάτων.....	8
1.3 Διαδικασία επεξεργασίας λυμάτων	13
1.4 Επίπεδα επεξεργασίας λυμάτων.....	14
1.5 Μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων	16

1.5.1	Συμβατικές μέθοδοι.....	16
1.5.2	Μη συμβατικές μέθοδοι	22
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ Η ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ..	24
2.1	Γενικά.....	24
2.2	Η ανάκτηση πόρων από τα επεξεργασμένα λύματα	26
2.2.1	Βιομάζα	27
2.2.2	Θρεπτικά συστατικά και λιπάσματα	30
2.2.3	Ενέργεια	32
2.2.4	Πτητικά λιπαρά οξέα-VFAs	35
2.2.5	Πολυδροξυαλκανοϊκά-PHAs	36
2.2.6	Εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες-EPS.....	38
2.3	Η επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού των λυμάτων	40
2.3.1	Η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων από τη βιομηχανία τροφίμων για την άρδευση των καλλιεργειών	41
2.3.2	Γεωργική Άρδευση.....	42
2.4	Ανάπτυξη προτύπων ποιότητας για ασφαλή επαναχρησιμοποίηση.....	47
2.4.1	Κατευθυντήριες γραμμές και κριτήρια ποιότητας για την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων στη γεωργία	47
2.4.2	Πρότυπα ποιότητας ανακυκλωμένου νερού.....	53
2.4.3	Πρόσφατες εξελίξεις, τρέχουσα κατάσταση και η νομοθεσία στην Ελλάδα	54
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ	57
3.1	Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των επεξεργασμένων λυμάτων στη γεωργική άρδευση	57

3.1.1	Οι επιπτώσεις στο έδαφος.....	57
3.1.2	Μικροβιακές επιπτώσεις.....	67
3.1.3	Επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών.....	70
3.1.4	Επιπτώσεις στους υδάτινους πόρους.....	72
3.2	Επιπτώσεις στη δημόσια υγεία.....	74
3.2.1	Χημικοί κίνδυνοι.....	74
3.2.2	Μικροβιακοί κίνδυνοι.....	82
3.3	Οικονομικές επιπτώσεις.....	87
3.3.1	Δαπάνες και έσοδα των αγροτικών καλλιεργειών.....	88
3.3.2	Οικονομικά οφέλη για τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.....	89
3.3.3	Επιπρόσθετο κόστος επένδυσης.....	90
3.3.4	Η αξία των λυμάτων.....	91
3.3.5	Προκλήσεις στην αξιοποίηση των πόρων ανάκτησης από τα λύματα.....	93
3.4	Ζητήματα των συστημάτων άρδευσης που χρησιμοποιούνται στην ανάκτηση των λυμάτων.....	94
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑΣ.....	96
4.1	Παρεμβάσεις βιοφυσικής διαχείρισης για τη μείωση του κινδύνου.....	97
4.1.1	Βελτίωση της ποιότητας του νερού.....	97
4.1.2	Έλεγχος της ανθρώπινης έκθεσης.....	98
4.1.3	Διαχείριση των επεξεργασμένων λυμάτων σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης.....	99
4.1.4	Παρεμβάσεις στη συγκομιδή και μετά τη συγκομιδή.....	102
4.2	Πολιτικές και θεσμικά ζητήματα.....	103

4.2.1	Θεώρηση των λυμάτων ως πόρο που απαιτεί ορθή διαχείριση.....	104
4.2.2	Εφαρμογή οικονομικών κινήτρων.....	104
4.2.3	Βελτίωση της οικονομικής διαχείρισης.....	105
4.2.4	Προστασία και αποζημίωση των χαμηλών κοινωνικοοικονομικών στρωμάτων...	105
4.2.5	Εκτεταμένες διαβουλεύσεις με άτομα και οργανισμούς.....	106
4.2.6	Διεξαγωγή προγραμμάτων ευαισθητοποίησης του κοινού	106
4.2.7	Υποστήριξη της έρευνας, της ανάπτυξης και της προβολής.....	107
4.2.8	Ενίσχυση της πολιτικής βούλησης και των επενδύσεων σε υποδομές	108
4.2.9	Ελαχιστοποίηση του κινδύνου και της αβεβαιότητας.....	108
ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....		109
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....		112
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ		115
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....		115
Ελληνική Βιβλιογραφία		134

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Κατηγορίες Λυμάτων	7
Σχήμα 1.2: Τυπική εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων.....	13
Σχήμα 1.3: Σύστημα ενεργής ιλύος.....	17
Σχήμα 1.4: Χαλικοδυλιστήρια/ Trickling Filters	19
Σχήμα 1.5: Περιστερόμενοι βιολογικοί δίσκοι	20
Σχήμα 1.6: Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης.....	22
Σχήμα 2.1: Από τα λύματα στην ανάκτηση πόρων.....	26
Σχήμα 2.2: Παράμετροι ποιότητας του αγροτικού νερού	53
Σχήμα 3.1: Κλίμακα προτάσεων της αγοραστικής αξίας των λυμάτων ανάλογα με το επίπεδο επεξεργασίας και τον σκοπό επαναχρησιμοποίησης τους	92
Σχήμα 3.2: Προκλήσεις στην επιτυχή ανάκτηση πόρων από τα λύματα	93
Σχήμα 4.1: Η προσέγγιση των πολλαπλών παρεμβάσεων για τη μείωση των κινδύνων σχετικά με την κατανάλωση κατά μήκος της τροφικής αλυσίδας, όπως εφαρμόζεται στην άρδευση με επεξεργασμένα λύματα	96

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των λυμάτων και οι πηγές τους προέλευσης.....	9
Πίνακας 1.2: Ρυπαντές υψηλού κινδύνου στην επεξεργασία λυμάτων	10
Πίνακας 2.1: Ποσότητα των πόρων ανάκτησης από τις γραμμές νερού και ιλύος.....	27
Πίνακας 2.2: Παραγωγή, συλλογή και επεξεργασία λυμάτων σε ορισμένες χώρες σχετικά με τις καλλιεργούμενες εκτάσεις.....	44

Πίνακας 2.3: Κατευθυντήριες γραμμές του FAO για την ποιότητα του νερού της γεωργικής άρδευσης	49
Πίνακας 2.4: Υφιστάμενα και υπό εξέλιξη νομοθετικά πλαίσια για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του ανακυκλωμένου νερού στη γεωργία, στη βιομηχανία και για ανθρώπινη κατανάλωση	52
Πίνακας 3.1: Ορισμένες υδατογενείς ασθένειες που σχετίζονται με τα λύματα.....	83

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 2.1: Αγροτικές εκτάσεις γης που αρδεύονται με λύματα ανά χώρα (χιλιάδες εκτάρια)	46
--	----

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Συντομογραφίες στα Αγγλικά

adj.SAR: adjusted Sodium Absorption Ratio

AGS: Aerobic Granular Sludge

ARB: Antibiotic Resistance Bacteria

ARG: Antibiotic Resistance Genes

BOD: Biological Oxygen Demand

BOD₅: (five days) Biological Oxygen Demand

CBOD₅: (five days) Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand

CEC: Cation Exchange Capacity

CECs: Contaminants of Emergency Concern

COD: Chemical Oxygen Demand

CW: Constructed Wetland

DALYs: Disability Adjusted Life Years

DEWATS: Decentralized Wastewater Treatment Systems

DO: Dissolved Oxygen

DOC: Dissolved Organic Carbon

EC: Electric Conductivity

ECs: Emerging Contaminants

EDs: Endocrine Disruptors

ENVI: European Parliament's Committee on Environment, Public Health and Food Safety

EPA: Environmental Protection Agency

EPS: Extracellular Polymeric Substances

ESBL: Extended Spectrum Beta-Lactamase

ESP: Exchangeable Sodium Percentage

FAO: Food and Agriculture Organization

FC: Fecal Coliforms

GHG: Greenhouse Gas

HACCP: Hazard Analysis Critical Control Point

HM: Heavy Metals

ISO: International Organization for Standardization

LCA: Life Cycle Assessment

MBR: Membrane Bioreactor

MFC: Microbial Fuel Cell

MLSS: Mixed Liquor Suspended Solids

MPR: Photocatalytic Membrane Reactor

MPs: Microplastics

NPs: Nanoparticles

OM: Organic Matter

PhACs: Pharmaceutical Active Compounds

PPY: Person Per Year

PHAs: Polyhydroxyalkaloids

POPs: Persistent Organic Pollutants

PPCPs: Pharmaceutical and Personal Care Products

RAS: Recirculating Aquaculture Systems

RBC: Rotating Biological Contractor

RO: Reverse Osmosis

RSC: Residual Sodium Carbonate

SAR: Sodium Absorption Ratio

SBR: Sequencing Batch Reactor

sEPS: structural Extracellular Polymeric Substances

SCP: Single Cell Protein

SS: Suspended Solids

SSP: Soluble Sodium Percentage

TC: Total Coliforms

TDS: Total Dissolved Solids

TOC: Total Organic Carbon

TS: Total Solids

TSS: Total Suspended Solids

UF: Ultra Filtration

VFAs: Volatile Fatty Acids

VOC: Volatile Organic Compounds

WHO: World Health Organization

WWTP: Wastewater Treatment Plant

WRRF: Water Resource Recovery Facility

WSP: Waste Stabilization Pond

Συντομογραφία στα Ελληνικά

ΠΟΥ: Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έλλειψη των αποθεμάτων του γλυκού νερού που παρατηρείται παγκοσμίως λόγω της αύξησης του πληθυσμού, της κλιματικής αλλαγής και της υπέρμετρης κατανάλωσης για αστικές, βιομηχανικές και αγροτικές χρήσεις (Ganjegunte et al.,2017) οδηγεί στην αναζήτηση εναλλακτικών πηγών νερού κυρίως για τη γεωργία καθώς υπολογίζεται πως το 70% των αποθεμάτων καταναλώνεται για την άρδευση των αγροτικών καλλιεργειών (Alexandratos and Bruinsma,2012).

Στις μέρες μας η επεξεργασία και η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων θεωρείται ως μία αξιόπιστη εναλλακτική πηγή νερού για γεωργική χρήση και κυρίως για την άρδευση (Mainardiset al.,2022). Η συγκεκριμένη πρακτική εμφανίζει θετικές και αρνητικές επιπτώσεις όσον αφορά την αγροτική χρήση καθώς επίσης και στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής μόλυνσης και τοξικολογίας. Παρόλο που τα λύματα περιέχουν ουσιώδη θρεπτικά συστατικά για τα φυτά είναι πιθανόν να προκύψουν αρκετοί περιβαλλοντικοί, υγειονομικοί και κίνδυνοι δημόσια υγείας λόγω της παρουσίας τοξικών ρύπων και μικροβίων στην σύστασή τους (Khalid et al.,2018).

Οι πηγές παραγωγής των λυμάτων περιλαμβάνουν διαφορετικές ανθρώπινες δραστηριότητες όπως τις βιομηχανικές, τις εμπορικές και τις οικιακές δραστηριότητες. Τα λύματα των δήμων διακρίνονται μερικές φορές σε αστικές, επαρχιακές και αγροτικές περιοχές-πηγές. Με την ραγδαία αύξηση του πληθυσμού, των πόλεων, της βιομηχανίας και των οικιακών αποθεμάτων νερού η ποσότητα της παραγωγής των λυμάτων αυξάνεται με την ίδια αναλογία (Kalavrouziotis,2015). Ο μέσος όγκος των λυμάτων που παράγεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της ποσότητας του νερού στο σπίτι, τον πολιτιστικό επίπεδο/τύπο, το κόστος του νερού και τις οικονομικές συνθήκες (Alobaidy et al.,2010).

Οι μονάδες διαχείρισης των λυμάτων (Wastewater Treatment Plants-WWTPs) παίζουν σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία και στην ασφαλή επιστροφή των λυμάτων στον κύκλο του νερού. Ο βασικός σκοπός των μονάδων είναι να παράγουν υψηλής ποιότητας νερό που θα εκρέει στο περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό η χημική σύσταση, οι ρύποι (όπως τα παθογόνα) και οι αισθητικές ιδιότητες του επεξεργασμένου νερού πρέπει να εξετάζονται ώστε να περιορίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των λυμάτων που απορρίπτονται.

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για περισσότερο βιώσιμη επεξεργασία έχει οδηγήσει σε αλλαγή στον τομέα διαχείρισης του νερού συντελώντας στον μετασχηματισμό των λυμάτων από ένα ανεπιθύμητο ρέμα αποβλήτων σε μια πολύτιμη πηγή (Kehrein et al.,2020) που μπορεί να μετατρέψει την επεξεργασία των λυμάτων από μία δαπανηρή υπηρεσία σε πιο βιώσιμη μέσω της υιοθέτησης των αρχών της κυκλικής οικονομίας που προωθούν την στρατηγική μείωσης-επαναχρησιμοποίησης-ανακύκλωσης (Duque et al.,2021).

ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Ο σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι η ανάδειξη καινοτόμων προτάσεων μέσω της αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων και του περιορισμού των μειονεκτημάτων που θα μεγιστοποιούν τα οφέλη της επαναχρησιμοποίησης του νερού των λυμάτων για την άρδευση των αγροτικών καλλιεργειών.

Στόχοι είναι η παρουσίαση των επιπτώσεων της επαναχρησιμοποίησης του νερού των λυμάτων στο περιβάλλον, στη δημόσια υγεία, η σύγκριση της δυνατότητας επεξεργασίας των λυμάτων ανάμεσα στις αναπτυσσόμενες και τις ανεπτυγμένες χώρες, η εκτίμηση των οικονομικών παραμέτρων της επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης, καθώς και προτάσεις για τη μετατροπή των μονάδων διαχείρισης των λυμάτων σε μια βιώσιμη πηγή που θα ενισχύει την οικονομία.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ

Για τη συγγραφή της συγκεκριμένης μελέτης πραγματοποιήθηκε εκτενή ανασκόπηση της υπάρχουσας ξενόγλωσσης βιβλιογραφίας στο διαδίκτυο χρησιμοποιώντας τις λέξεις κλειδιά “wastewater”, “reuse”, “recycling”, “wastewater treatment”, “water scarcity”, “sludge”, “soil contamination”, “toxicity”, “heavy metals”, “health risk”. Η αναζήτηση διενεργήθηκε ηλεκτρονικά μέσω των μηχανών αναζήτησης “PubMed”, “GoogleScholar” και “Scopus”. Επίσης η ανασκόπηση επεκτάθηκε και σε άλλες επίσημες ιστοσελίδες όπως η “Sciencedirect.com”.

ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που αναμένονται από την συγκεκριμένη μελέτη είναι η κατανόηση των επιπτώσεων της επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων στο περιβάλλον και συγκεκριμένα στο έδαφος, στις πηγές του νερού, στην ανάπτυξη των φυτών και στη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους. Η κατανόηση της επίδρασης στη δημόσια υγεία κυρίως μέσω της έκθεσης στους παθογόνους μικροοργανισμούς και στα βαρέα μέταλλα καθώς και στις οικονομικές επιπτώσεις που έχει η επεξεργασία των λυμάτων για επαναχρησιμοποίηση μέσω των επενδύσεων στις μονάδες διαχείρισης του νερού των λυμάτων και στα έσοδα και έξοδα των αγροτικών καλλιεργειών όπου χρησιμοποιούνται. Η αποσαφήνιση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των επιπτώσεων σε κάθε τομέα θα αναδείξει τις προτάσεις που πρέπει να υλοποιηθούν ώστε η κοινωνία να επωφεληθεί της χρήσης του νερού των επεξεργασμένων λυμάτων καθιστώντας το ταυτόχρονα ασφαλές για τη δημόσια υγεία.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΛΥΜΑΤΑ

1.1 Γενικά

Η ταχεία αστικοποίηση και η εκβιομηχάνιση συνέβαλαν στην παραγωγή τεράστιων όγκων λυμάτων με αποτέλεσμα την εμφάνιση αρνητικών επιπτώσεων. Ως λύματα ορίζεται το νερό που έχει επηρεαστεί από την ανθρώπινη χρήση. Δηλαδή, τα λύματα είναι «το νερό που χρησιμοποιείται από οποιοδήποτε μείγμα οικιακών, μηχανικών, επαγγελματικών ή γεωργικών εφαρμογών, επιφανειακής υπερχείλισης ή όμβριων υδάτων και οποιασδήποτε εισροής ή διείσδυσης υπονόμων» (Suhad et al., 2018). Εξαιτίας των αρνητικών επιπτώσεων της παραγωγής λυμάτων καθώς και το πλέον έντονο φαινόμενο της λειψυδρίας θεωρείται απαραίτητη η χρήση μη συμβατικών πηγών νερού για την αντιμετώπιση των εντατικών αναγκών σε νερό (Bichai et al, 2012).

Εντούτοις, τα λύματα παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία λόγω των διαφορετικών πηγών προέλευσης και των ποικίλων συγκεντρώσεων σε ανόργανες και οργανικές ενώσεις, με αποτέλεσμα η επεξεργασία τους να εξαρτάται από τον τύπο των λυμάτων και τα χαρακτηριστικά αυτών (FAO, 2003).

1.2 Ιστορική ανασκόπηση της επεξεργασίας των λυμάτων και της άρδευσης των αγροτικών καλλιεργειών

Η άρδευση με λύματα έχει μακροχρόνια ιστορία που εκτείνεται στους αιώνες. Εφαρμόστηκε από προϊστορικούς πολιτισμούς (όπως τους αρχαίους Αιγυπτίους, τους Μεσοποτάμιους, τους Μινωίτες και από τις κοινωνίες της κοιλάδας του Ινδού ποταμού). Σύμφωνα με σημαντικές ιστορικές μαρτυρίες, οι αρχαίοι Μινωίτες πιθανότατα χρησιμοποιούσαν τα λύματα για την άρδευση των χωραφιών από το 3500 π.Χ. (Tzanakakis et al., 2007). Λόγω της λειψυδρίας, χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά για την άρδευση των αγροτικών εκτάσεων ώστε να διασφαλιστεί η παροχή των θρεπτικών συστατικών και να αυξηθεί η απόδοση των καλλιεργειών. Η πρακτική της χρήσης των λυμάτων για την άρδευση και τη λίπανση των καλλιεργειών και των οπωροφόρων δέντρων ανάγεται στο έτος 1700 π.Χ. στην Κρήτη. Με βάση την αρχαιολογική έρευνα, έχει

παρατηρηθεί ότι η χρήση του γνώρισε σημαντική άνοδο ξεκινώντας από το 2600 π.Χ. (Raschid-Sally et al., 2010).

Οι λεκάνες συλλογής των λυμάτων που βρίσκονταν εκτός των πόλεων έκαναν την εμφάνιση τους στους ελληνοιστικούς χρόνους, περίπου το 500 π.Χ., νοτιοανατολικά της Ακρόπολης και είχαν ως στόχο την άρδευση των καλλιεργειών. Στη συνέχεια, τα λύματα χρησιμοποιήθηκαν από τους Ρωμαίους και οι φάρμες που αρδεύονταν με λύματα δημιουργήθηκαν ήδη από το 1531 στη Γερμανία και πιο πρόσφατα το 1650 στη Σκωτία (σύγχρονοι καιροί). Από τις αρχές του περασμένου αιώνα, πριν από την ανάπτυξη των τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων, τα λύματα απορρίπτονταν στα χωράφια για να αποφευχθεί η ρύπανση των υδάτινων πόρων (Bahri, 2015).

Το 1900 ,στο Παρίσι, τα μερικώς επεξεργασμένα λύματα χρησιμοποιούνταν συνήθως για την άρδευση. Στην Αυστραλία, ένα μεγάλο αγρόκτημα που ιδρύθηκε το 1897 χρησιμοποίησε τα λύματα για την άρδευση περίπου 10.000 εκταρίων γης μέσω λιμνών σταθεροποίησης. Το 1904 η Πόλη του Μεξικού εγκατέστησε την πρώτη μεγάλη μονάδα διαχείρισης λυμάτων στην περιοχή της άνυδρης κοιλάδας του Μεξικού για τη διάθεση μεγάλων όγκων ακατέργαστων λυμάτων που προέρχονταν από το αποχετευτικό σύστημα της πόλης (Zhang and Shen, 2017).

Παρόλο που τα συστήματα αποχέτευσης κατασκευάστηκαν πολύ πριν από τον δέκατο ένατο αιώνα, η επεξεργασία των λυμάτων αποτελεί μια αρκετά νέα πρακτική. Πριν από αυτό το διάστημα, το «νυχτερινό χώμα» τοποθετούνταν σε κουβάδες κατά μήκος των δρόμων και οι εργάτες τα άδειαζαν σε δεξαμενές «μελιτοφόρων». Αυτό μεταφερόταν στις αγροτικές περιοχές και διατίθετο στις αγροτικές εκτάσεις. Τον δέκατο ένατο αιώνα, οι τουαλέτες με καζανάκι οδήγησαν σε αύξηση του όγκου των απορριμμάτων στις συγκεκριμένες αγροτικές εκτάσεις. Εξαιτίας των προκλήσεων για τη μεταφορά των λυμάτων, οι πόλεις άρχισαν να χρησιμοποιούν αποχετεύσεις και φρεάτια για να μεταφέρουν τα λύματα σε υδάτινα σώματα ενάντια στη σύσταση του Edwin Chadwick το 1842 ότι « η βροχή στο ποτάμι και τα λύματα στο έδαφος». Ως αποτέλεσμα η απόρριψη των αποβλήτων στα υδάτινα ρεύματα προκάλεσε σοβαρή ρύπανση και προβλήματα υγείας στους μεταγενέστερους χρήστες.

Το 1842, ο Άγγλος μηχανικός Lindley κατασκεύασε το πρώτο «σύγχρονο» σύστημα αποχέτευσης για τη μεταφορά των λυμάτων στο Αμβούργο της Γερμανίας. Η ανάπτυξη

του συστήματος Lindley στηρίζεται στα βελτιωμένα υλικά και στην ενσωμάτωση των φρεατίων και εξαρτημάτων αποχέτευσης — οι αρχές του Lindley εξακολουθούν να τηρούνται μέχρι σήμερα. Η επεξεργασία των λυμάτων έγινε απαραίτητη αφού εξαντλήθηκε η ικανότητα αφομοίωσης των υδάτινων πόρων και τα προβλήματα υγείας έγιναν αφόρητα. Από τα τέλη του 1800 έως τις αρχές του 1900, δοκιμάστηκαν διάφορες επιλογές μέχρι που το 1920 τέθηκαν σε εφαρμογή οι διαδικασίες που έχουμε σήμερα. Ωστόσο, ο σχεδιασμός του ήταν εμπειρικός μέχρι τα μέσα του αιώνα. Σχεδιάστηκαν και ενθαρρύνθηκαν τα κεντρικά συστήματα αποχέτευσης. Το κόστος της επεξεργασίας των λυμάτων επιβαρύνει τις κοινότητες που απορρίπτουν στη μονάδα.

Σήμερα έχουν γίνει μεγάλες πρόοδοι για την παραγωγή μεταφερόμενου νερού από τα λύματα. Πρόσφατα, ανεξάρτητα από τη χωρητικότητα του ρέματος υποδοχής, απαιτείται ένα ελάχιστο επίπεδο επεξεργασίας πριν χορηγηθεί η άδεια απόρριψης. Επίσης, επί του παρόντος, η προσοχή μετατοπίζεται από τα κεντρικά συστήματα σε μια πιο βιώσιμη αποκεντρωμένη επεξεργασία λυμάτων (DEWATS) ειδικά για τις αναπτυσσόμενες χώρες (όπως η Γκάνα), όπου οι υποδομές επεξεργασίας λυμάτων βρίσκονται σε άσχημη κατάσταση και οι συμβατικές μέθοδοι είναι δύσκολο να διαχειριστούν (Amoatey and Bani, 2011).

Τα τελευταία χρόνια, η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς . Οι όγκοι επαναχρησιμοποίησης λυμάτων αυξήθηκαν κατά 10–29% ετησίως στην Ευρώπη, στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Κίνα και έως και 41% στην Αυστραλία. Την τελευταία δεκαετία περίπου, χάρη στην ταχεία πρόοδο και την αυξανόμενη αποδοχή των μεθόδων επεξεργασίας λυμάτων, η χρήση του ανακτημένου νερού στις ανεπτυγμένες χώρες έχει διευρυνθεί σημαντικά. Τώρα χρησιμοποιείται όχι μόνο για σκοπούς άρδευσης αλλά και για έμμεση και άμεση επαναχρησιμοποίηση, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης ως πόσιμο νερό (Rodriguez et al., 2009).

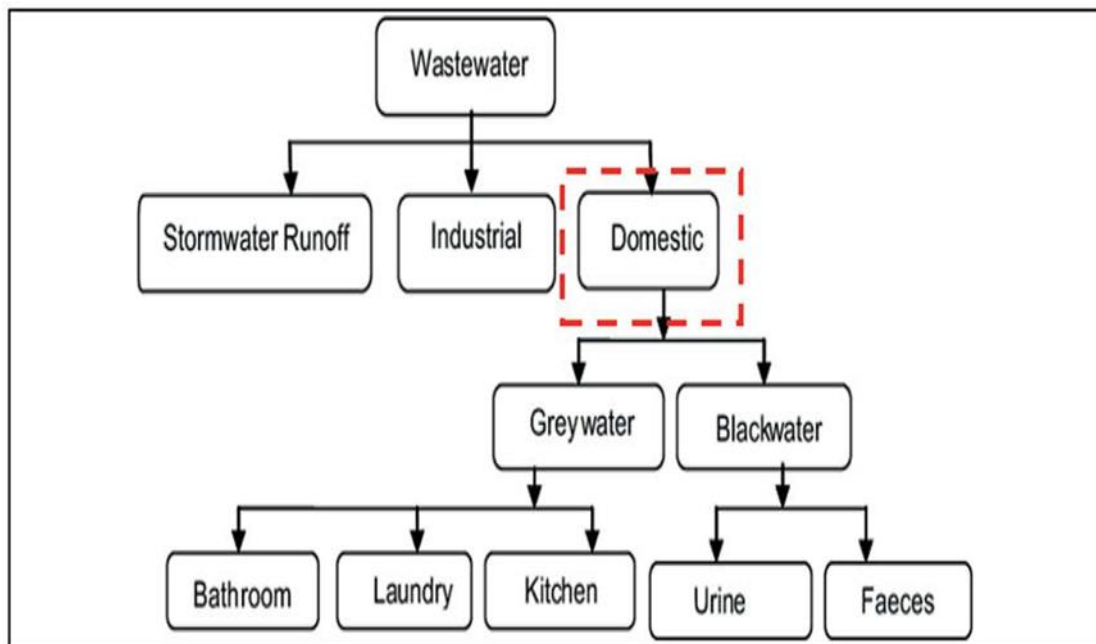
Σύμφωνα με την έρευνα των Bixio et al., (2006) , περισσότερες από 3.300 εγκαταστάσεις ανάκτησης νερού έχουν εντοπιστεί παγκοσμίως, με πάνω από 2600 να βρίσκονται στην Ιαπωνία και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτό φανερώνει ένα τεράστιο χάσμα μεταξύ των αναπτυσσόμενων και των ανεπτυγμένων χωρών και από αυτή την άποψη πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή στη χρήση των λυμάτων για τη γεωργία στις αναπτυσσόμενες χώρες. Με τη συνεχή αύξηση του πληθυσμού και τις αυξανόμενες απαιτήσεις σιτηρών, οι

αναπτυσσόμενες χώρες πρέπει να κάνουν περισσότερα για να καλύψουν αυτό το χάσμα. (Zhang and Shen, 2017).

1.1 Τύποι λυμάτων

Τα λύματα μπορούν να περιγραφούν όπως στο παρακάτω σχήμα:

Σχήμα 1.1: Κατηγορίες Λυμάτων



Πηγή: Amoatey and Bani, 2011

Την απορροή των όμβριων υδάτων αποτελούν το νερό από τους δρόμους, την ανοιχτή αυλή κ.λπ. ύστερα από βροχοπτώσεις που διαρρέουν στις αποχετεύσεις και στους υπονόμους. Τα βιομηχανικά λύματα είναι τα υγρά απόβλητα που προέρχονται από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπως τα εργοστάσια, τις μονάδες παραγωγής κ.λπ. Τα οικιακά λύματα γνωστά και ως αστικά λύματα είναι βασικά τα λύματα από τις κατοικίες, τα επαγγελματικά κτίρια (π.χ. ξενοδοχεία) και τα ιδρύματα (π.χ. πανεπιστήμια). Επίσης το νερό των λυμάτων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε γκρίζο (greywater) και μαύρο (blackwater) νερό.

Το γκρίζο νερό γνωστό και ως λάσπη είναι τα υγρά απόβλητα που προέρχονται από τις τουαλέτες, τα πλυντήρια, τις κουζίνες που δεν περιέχουν ανθρώπινα ή ζωικά περιττώματα. Το μαύρο νερό αφορά τα λύματα που παράγονται στις τουαλέτες και εκτός

από ούρα και κόπρανα (εκκρίματα) μπορεί επίσης να περιέχει λίγο νερό έκπλυσης. Τα ούρα και τα κόπρανα μαζί αναφέρονται μερικές φορές ως νυχτερινό χώμα (Amoatey and Bani, 2011).

1.2 Χαρακτηριστικά των λυμάτων

Τα χαρακτηριστικά των λυμάτων ταξινομούνται ευρέως ανάλογα τις φυσικές, χημικές και βιολογικές τους ιδιότητες . Επίσης ότι το υγρό μέρος των λυμάτων αποτελείται από ένα σύνθετο μείγμα ορυκτών και οργανικής ύλης (OM) σε πολλές μορφές, συμπεριλαμβανομένων μεγάλων και μικρών σωματιδίων, επιπλέοντων και αιωρούμενων καθώς και κολλοειδούς. Τα λύματα εμπεριέχουν ορισμένα δηλητηριώδη στοιχεία όπως για παράδειγμα , αρσενικό, κάδμιο, χρώμιο, μόλυβδο, χαλκό, ψευδάργυρο, υδράργυρο κ.λπ. Το συγκεκριμένο νερό περιέχει μια ποικιλία οργανικών ουσιών, όπως φυτοφάρμακα, υδατάνθρακες, λίπη, πρωτεΐνες, συνθετικά απορρυπαντικά, φαρμακευτικά προϊόντα και σύνθετα αζωτούχα προϊόντα οργανικής ύλης (Cizmas et al., 2015).

Επιπλέον στα λύματα βρίσκονται μικροπλαστικά, πολυμερείς ίνες, τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο, πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο και πολυστερένιο. Τα μικροπλαστικά μπορούν να έχουν αρνητική επίδραση στην παραγωγή και στην ανάπτυξη των φυτών (Ziajahromi et al., 2017). Ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχει δηλώσει ότι το επεξεργασμένο νερό περιέχει φαρμακευτικά ενεργές ενώσεις (PhACs) . Τα χημικά και βιολογικά συστατικά και οι φυσικές ιδιότητες των λυμάτων όπως επίσης και οι πηγές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1. Επιπλέον, στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι σημαντικοί ρυπαντές που αφορούν την επεξεργασία των λυμάτων.

Πίνακας 1.1: Φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των λυμάτων και οι πηγές τους προέλευσης

Characteristic	Sources
Physical properties	
Color	Domestic and industrial wastes, natural decay of organic materials
Odor	Decomposing wastewater, industrial wastes
Solids	Domestic water supply, domestic and industrial wastes, soil erosion, inflow infiltration
Temperature	Domestic and industrial wastes
Chemical constituents:	
Organic	
Carbohydrates	Domestic, commercial, and industrial wastes
Fats, oils, and grease	Domestic, commercial, and industrial wastes
Pesticides	Agricultural wastes
Phenols	Industrial wastes
Proteins	Domestic, commercial, and industrial wastes
Priority pollutants	Domestic, commercial, and industrial wastes
Surfactants	Domestic, commercial, and industrial wastes
Volatile organic compounds	Domestic, commercial, and industrial wastes
Other	The natural decay of organic materials
Inorganic	
Alkalinity	Domestic wastes, domestic water supply, groundwater infiltration
Chlorides	Domestic wastes, domestic water supply, groundwater infiltration, water softeners
Heavy metals	Industrial wastes
Nitrogen	Domestic and agricultural wastes
Acidity	Domestic, commercial, and industrial wastes
Phosphorus	Domestic, commercial, and industrial wastes natural runoff
Sulfur	Domestic water supply, domestic and industrial wastes
Toxic compounds	Industrial wastes
Gases	
Hydrogen sulfide	Decomposition of domestic wastes
Methane	Decomposition of domestic wastes
Oxygen	Domestic water supply, surface-water infiltration
Biological constituents:	
Animals	Open watercourses and treatment plants
Plants	Open watercourses and treatment plants
Bacteria	Domestic wastes, surface water infiltration, treatment plants
Archae	Domestic wastes, surface-water infiltration, treatment plants
Protista	Domestic wastes, treatment plants
Viruses	Domestic wastes

Πηγή: Hashem and Qi.,2017

Πίνακας 1.2: Ρυπαντές υψηλού κινδύνου στην επεξεργασία λυμάτων

Contaminants	Reason for Importance
Suspended solids	Suspended solids can lead to the development of sludge deposits and anaerobic conditions when untreated wastewater is discharged into the aquatic environment.
Biodegradable organics	Composed principally of proteins, carbohydrates, and fats, biodegradable organics are measured most commonly in terms of BOD (biochemical oxygen demand) and COD (chemical oxygen demand). If discharged untreated to the environment, their biological stabilization can lead to the depletion of natural oxygen resources and the development of septic conditions.
Pathogens	Infectious diseases can be transmitted by the pathogenic organisms in wastewater.
Nutrients	Both nitrogen and phosphorus, along with carbon, are essential nutrients for growth. When discharged to the aquatic environment, these nutrients can lead to the growth of undesirable aquatic life. When discharged in excessive amounts on land, they can also lead to the pollution of groundwater.
Refractory organics	These organics tend to resist conventional methods of wastewater treatment. Typical examples include surfactants, phenols, and agricultural pesticides.
Heavy metals	Heavy metals are usually added to wastewater from commercial and industrial activities and may have to be removed if the wastewater is to be reused.
Dissolved inorganic solids	Inorganic constituents such as calcium, sodium, and sulfate are added to the original domestic water supply as a result of water use and may have to be removed if the wastewater is to be reused.

Πηγή: Hashem and Qi.,2017

Οι MetCalf and Eddy (2003) ανέφεραν ότι τα χαρακτηριστικά των λυμάτων που γίνονται αντιληπτά από τα ανθρώπινα αισθητήρια όργανα ονομάζονται φυσικά χαρακτηριστικά. Τα πιο σημαντικά φυσικά χαρακτηριστικά των λυμάτων είναι η περιεκτικότητά τους σε στερεά, καθώς επηρεάζουν την αισθητική, τη διαύγεια και το χρώμα του νερού. Άλλες φυσικές παράμετροι είναι η θερμοκρασία και οι οσμές που δεν μεταβάλλονται συνήθως σε μια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων. Η θερμοκρασία των λυμάτων είναι σημαντική κυρίως επειδή επηρεάζει την υδρόβια και βιολογική ζωή των υδάτινων σωμάτων στα οποία απορρίπτονται. Οι υψηλές θερμοκρασίες μειώνουν τη διαλυτότητα του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό.

Ο Muttamara (1996) ανέφερε ότι αιωρούμενα στερεά σωματίδια μπορούν να προκαλέσουν αύξηση στον όγκο της λάσπης που συγκεντρώνεται στο νερό που εκρέουν και έντονη θολερότητα κάτι που προκαλεί ανεπιθύμητες συνθήκες. Επίσης κατά την

επεξεργασία και τη χρήση του νερού μπορεί να προστεθεί μια σημαντική ποσότητα διαλυμένων στερεών .

Η χημική σύνθεση των λυμάτων ποικίλει και είναι πιο συμπυκνωμένη καθώς περιέχει διάφορα οξέα, χημικές προσμίξεις αλκαλίων, λάδι, χονδροειδή στερεά και άλλα συστατικά. Τα ανόργανα συστατικά περιλαμβάνουν τις υψηλές συγκεντρώσεις ασβεστίου, νατρίου, καλίου, χλωρίου, φωσφορικών, θείου, διττανθρακικών, αλάτων αμμωνίου και βαρέων μετάλλων (HM) (Lim et al., 2010) . Το επεξεργασμένο νερό περιέχει πολλά από τα μικροθρεπτικά συστατικά που χρειάζονται τα φυτά, όπως χαλκό, σίδηρο, μαγγάνιο, ψευδάργυρο, βόριο, μολυβδαίνιο, κοβάλτιο και νικέλιο . Οι χημικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με τη χρήση των λυμάτων οφείλονται στην περιεκτικότητά τους σε βαρέα μέταλλα (HM), οργανικής ύλης(OM), αλατιού, θρεπτικών συστατικών και τοξικών ενώσεων (Qadir et al., 2015).

Ο όρος βιολογικά χαρακτηριστικά του νερού αναφέρεται στην υδρόβια ζωή και στους ιούς που βρίσκονται στο νερό. Η ποιότητα του νερού επηρεάζεται σημαντικά από αυτά τα χαρακτηριστικά. Τα φύκια, για παράδειγμα, προκαλούν γεύση και οσμή. Μερικοί τύποι φυκιών φράζουν τα φίλτρα της άμμου. Άλλα παράγουν γλοιώδεις αναπτύξεις που προκαλούν βλάβες στον εξοπλισμό, στις δεξαμενές και στα τοιχώματα των δεξαμενών. Επιπλέον, ορισμένα μικροφύκη παράγουν ισχυρές τοξικές ουσίες που είναι επιβλαβείς για τους ζωντανούς οργανισμούς .

Η μικροβιολογική δραστηριότητα στο νερό, όπως τα βακτήρια, οι ιοί και πρωτόζωα, μπορεί να προκαλέσει διάφορες ασθένειες . Το περιβάλλον των λυμάτων θεωρείται ιδανικό για την ανάπτυξη ιών, βακτηρίων και πρωτόζωων. Στην πλειοψηφία τους είναι αβλαβής, αλλά τα λύματα περιέχουν επίσης παθογόνους μικροοργανισμούς . Αρκετοί ερευνητές έχουν υποδείξει ότι τα συστήματα βιολογικής οξείδωσης που χρησιμοποιούνται στη δευτερογενή επεξεργασία των λυμάτων μπορούν να απομακρύνουν τα περισσότερα παθογόνα βακτήρια από το νερό των λυμάτων (Hashem and Qi, 2021).

Σε γενικές γραμμές , ορισμένοι δείκτες που υπολογίστηκαν για την εξακρίβωση αυτών των ρύπων περιλαμβάνουν:

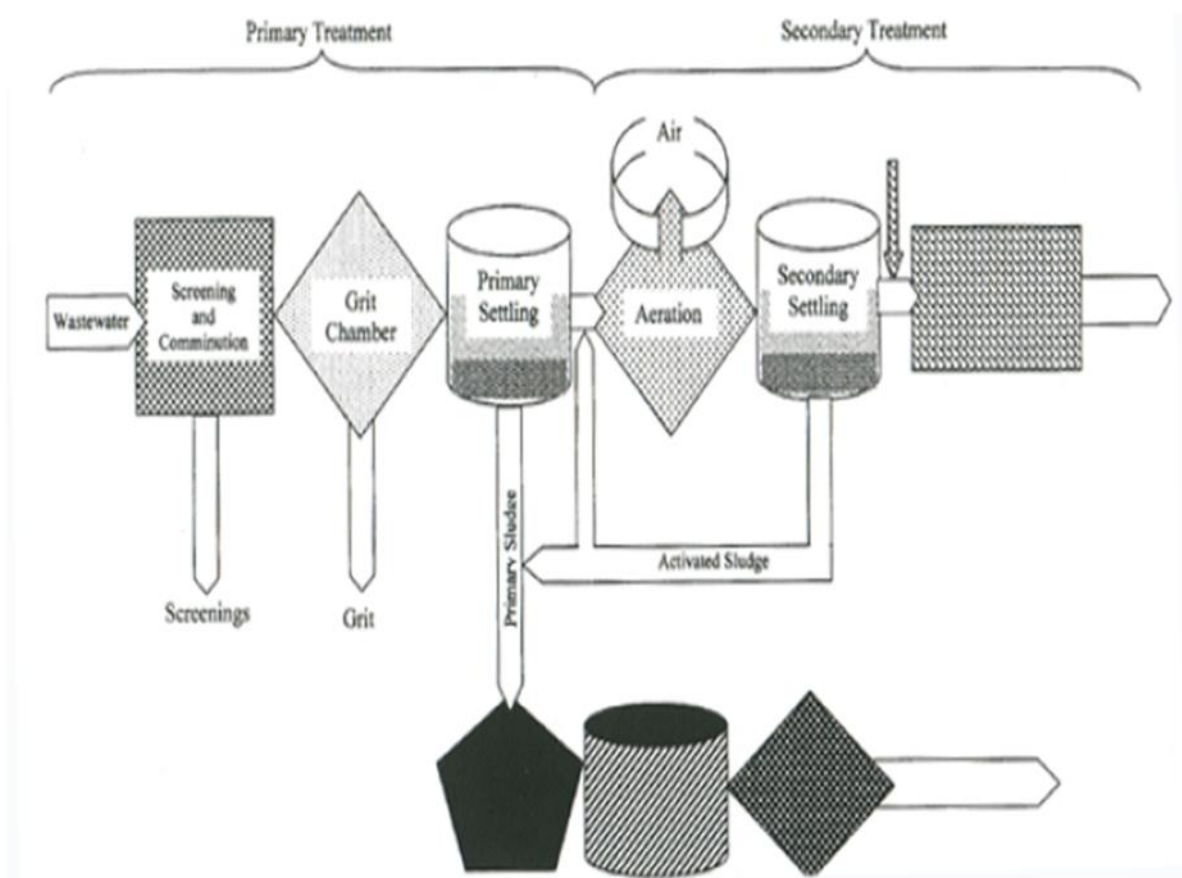
- 1) τους φυσικούς όπως:
 - η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) η οποία υποδεικνύει την περιεκτικότητα σε αλάτι,

- τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) που περιλαμβάνουν τα ανόργανα άλατα και τις μικρές ποσότητες οργανικής ύλης που βρίσκονται διαλυμένες στο νερό και
 - τα αιωρούμενα στερεά (SS) που περιλαμβάνουν τα στερεά σωματίδια που αιωρούνται αλλά δεν είναι διαλυμένα στο νερό.
- 2) τους χημικούς όπως:
- το διαλυμένο οξυγόνο (DO) το οποίο υποδεικνύει την ποσότητα του οξυγόνου στο νερό,
 - το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD) που υποδεικνύει την ποσότητα οξυγόνου που χρειάζονται οι αερόβιοι μικροοργανισμοί για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης σε ένα δείγμα νερού σε μια καθορισμένη χρονική περίοδο,
 - το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) που αντιπροσωπεύει την ποσότητα του οξυγόνου που χρειάζεται για την οξείδωση της οργανικής ύλης σε ένα δείγμα όταν εκτίθεται σε ένα ισχυρό χημικό οξειδωτικό,
 - η Ολική Οργανική Ένωση (TOC),
 - το αμμώνιο(NH₄-N) και το νιτρικό άζωτο (NO₃-N) τα οποία δείχνουν την ποσότητα του διαλυμένου αζώτου (N) αντίστοιχα,
 - το ολικό άζωτο κατά Kjeldhal το οποίο είναι μια μέτρηση του οργανικά συνδεδεμένου αζώτου αμμωνίας,
 - ο ολικός φώσφορος (Total-P) που αντανακλά την ποσότητα όλων των μορφών φωσφόρου σε ένα δείγμα και
- 3) τους βιολογικούς όπως:
- τα ολικά κολοβακτηρίδια (TC) τα οποία περιλαμβάνουν κολοβακτηρίδια κοπράνων καθώς και κοινούς μικροοργανισμούς του εδάφους και αποτελούν έναν ευρύ δείκτη πιθανής μόλυνσης του νερού,
 - τα κολοβακτηρίδια κοπράνων (FC) που είναι ένας δείκτης μόλυνσης του νερού με περιττώματα. Ο κοινός δείκτης μολύβδου είναι το βακτήριο *Escherichia coli* (E. Coli) και
 - η ανάλυση των ελμινθών που αναζητά τα αυγά των σκουληκιών στο νερό (Obuobie et al., 2006).

1.3 Διαδικασία επεξεργασίας λυμάτων

Η μονάδα επεξεργασίας λυμάτων (WWTP) περιλαμβάνει διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπου διενεργούνται μια σειρά από μηχανικές, φυσικές, χημικές και βιολογικές διαδικασίες για την εξάλειψη των ρύπων από τα εισερχόμενα λύματα. Οι στρατηγικές ή οι τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τους συγκεκριμένους ρύπους που υπάρχουν, ιδιαίτερα στην περίπτωση των βιομηχανικών λυμάτων (Εικόνα 1.2) (Hreiz et al., 2015).

Σχήμα 1.2: Τυπική εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων



Πηγή: Amoatey and Bani, 2011

Λόγω της φύσης των ρύπων που υπάρχουν στα λύματα –φυσικοί, χημικοί και βιολογικοί– οι λειτουργίες και οι διεργασίες της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων κατηγοριοποιούνται επίσης αντίστοιχα και συνοψίζονται ως εξής:

1. Οι λειτουργίες της φυσικής μονάδας που περιλαμβάνουν :

- τη διαλογή,
- τον θρυμματισμό,

- την εξισορρόπηση ροής,
 - την καθίζηση,
 - την επίπλευση και
 - την κοκκιώδη-μέτρια διήθηση.
2. Οι λειτουργίες των χημικών μονάδων που περιλαμβάνουν:
- την χημική καθίζηση,
 - την προσρόφηση,
 - την απολύμανση,
 - την αποχλωρίωση,
 - άλλες χημικές εφαρμογές και
3. Οι λειτουργίες των βιολογικών μονάδων όπως:
- τη διεργασία της ενεργούς ιλύος,
 - τις αεριζόμενες λίμνες,
 - τα φίλτρα ροής,
 - τους περιστρεφόμενους βιολογικούς δίσκους,
 - τις λίμνες σταθεροποίησης και
 - την αναερόβια χώνευση (Amoatey and Bani, 2011).

1.4 Επίπεδα επεξεργασίας λυμάτων

Υπάρχουν τρία επίπεδα επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται ευρέως: η πρωτοβάθμια, η δευτεροβάθμια και η τριτοβάθμια επεξεργασία. Μερικές φορές, η προκαταρκτική επεξεργασία προηγείται της πρωτοβάθμιας.

Κατά την προκαταρκτική επεξεργασία αφαιρούνται τα μεγάλα στερεά υλικά από τα ακατέργαστα λύματα που μεταφέρονται από τους υπονόμους που θα μπορούσαν να εμποδίσουν την απόρριψη ή να προκαλέσουν ζημιά στον εξοπλισμό, όπως τα ξύλα, τα κουρέλια, το κοπρανώδες υλικό και τα βαρύτερα κοκκιώδη σωματίδια (Hashem and Qi, 2021). Αυτά μπορούν να αφαιρεθούν με το κοσκίνισμα και από τους θαλάμους άμμου αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη διαδικασία βελτιώνει τη λειτουργία και τη συντήρηση των επόμενων μονάδων επεξεργασίας. Οι συσκευές μέτρησης ροής, τα συχνά κανάλια των στάσιμων κυμάτων, είναι απαραίτητα σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας (FAO, 2006).

Κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία αφαιρούνται τα αιωρούμενα στερεά (SS) και οι επιπλέουσες ουσίες. (Hashem and Qi, 2021). Σε αυτό το στάδιο μπορούν να αφαιρεθούν έως και 50% βιοχημικού απαιτούμενου οξυγόνου (BOD₅), 70% αιωρούμενα στερεά και 65% γράσο και λάδι. Αφαιρούνται επίσης, μερικώς, οργανικό άζωτο, οργανικός φώσφορος και βαρέα μέταλλα. Ωστόσο, τα κολλοειδή και τα διαλυμένα συστατικά δεν αφαιρούνται σε αυτό το στάδιο. Τα λύματα από τις μονάδες πρωτογενούς καθίζησης αναφέρονται επίσης ως πρωτογενή απόβλητα (FAO, 2006).

Η δευτερογενής επεξεργασία περιλαμβάνει την πρόσθετη επεξεργασία των πρωτογενών λυμάτων προκειμένου να εξαλειφθούν αποτελεσματικά τυχόν υπολείμματα οργανικής ύλης και αιωρούμενων σωματιδίων. Η δευτεροβάθμια επεξεργασία είναι η περαιτέρω επεξεργασία των πρωτογενών λυμάτων για την απομάκρυνση των υπολειμματικών οργανικών και αιωρούμενων στερεών. Η βιοαποικοδομήσιμη διαλυμένη και κολλοειδής οργανική ύλη απομακρύνεται με τη χρήση των αερόβιων διεργασιών της βιολογικής επεξεργασίας. Η απομάκρυνση της οργανικής ύλης γίνεται καθώς αφαιρούνται οι ενώσεις του αζώτου και του φωσφόρου και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί (Amoatey and Bani, 2011). Η διαδικασία της δευτερογενούς επεξεργασίας στοχεύει στη μείωση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD), του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), των αιωρούμενων σωματιδίων (SS) και του συνόλου άλλων παραμέτρων που προκαλούν βλάβη με την απομάκρυνση ή τη μείωση των υπολειμματικών ιζηματοποιημένων στερεών και επιπλέοντων υλικών από την πρωτογενή επεξεργασία (Hashem and Qi, 2021).

Η τριτοβάθμια και/ή προηγμένη επεξεργασία εφαρμόζεται όταν είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν ορισμένα συστατικά των λυμάτων που δεν μπορούν να εξαλειφθούν μόνο μέσω της δευτερογενούς επεξεργασίας. Η προεπεξεργασία εξαλείφει αποτελεσματικά σημαντικές ποσότητες αζώτου, φωσφόρου, βιοδιασπώμενης οργανικής ύλης, βακτηρίων, και βαρέων μετάλλων. Δύο είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά για το φιλτράρισμα των δευτερογενών λυμάτων - το παραδοσιακό φίλτρο άμμου (ή παρόμοια μέσα) και τα νεότερα υλικά μεμβράνης. Ορισμένα φίλτρα έχουν βελτιωθεί και τόσο τα φίλτρα όσο και οι μεμβράνες αφαιρούν επίσης τους ελμίνθους. Την πιο σύγχρονη μέθοδο αποτελεί η διήθηση δίσκων στην οποία χρησιμοποιούνται μεγάλοι δίσκοι υφασμάτων μέσων προσαρτημένων σε περιστρεφόμενα τύμπανα για διήθηση (FAO, 2006) εξυγιαίνοντας το νερό ώστε να πληρεί τα τρέχοντα διεθνή πρότυπα για την αγροτική και αστική επαναχρησιμοποίηση (Amoatey and Bani, 2011).

Σε γενικές γραμμές, η επιλογή ενός κατάλληλου συστήματος άρδευσης και μεθόδου καλλιέργειας, η εφαρμογή της αποτελεσματικής διαχείρισης της άρδευσης, η τακτική παρακολούθηση της ποιότητας του νερού, του εδάφους και των φυτών καθώς και η επιμελής αντιμετώπιση των παθογόνων οργανισμών μπορούν να μετριάσουν σημαντικά τις αρνητικές επιπτώσεις των επεξεργασμένων λυμάτων (Hashem and Qi, 2021).

1.5 Μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων

Υπάρχουν συμβατικές και μη συμβατικές μέθοδοι για την επεξεργασία των λυμάτων που έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές. Οι συμβατικές μέθοδοι σε σύγκριση με τις μη συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας έχουν σχετικά υψηλό επίπεδο αυτοματισμού. Συνήθως έχουν απαιτήσεις άντλησης και ισχύος και απαιτούν εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό για τη λειτουργία και τη συντήρηση του συστήματος.

1.5.1 Συμβατικές μέθοδοι

Παραδείγματα των συμβατικών μεθόδων της επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν η ενεργός ιλύς, τα χαλικοδυλιστήρια και οι μέθοδοι των περιστρεφόμενων βιολογικών δίσκων. Τα χαλικοδυλιστήρια και οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι είναι ευαίσθητοι στη θερμοκρασία, αφαιρούν λιγότερο BOD και τα χαλικοδυλιστήρια κοστίζουν περισσότερο από την κατασκευή των συστημάτων ενεργούς ιλύος. Τα συστήματα ενεργής ιλύος είναι πολύ πιο ακριβά στη λειτουργία τους, επειδή απαιτείται ενέργεια για τη λειτουργία αντλιών και φυσητήρων (Amoatey and Bani, 2011). Οι συγκεκριμένοι μέθοδοι αναλύονται λεπτομερώς στις επόμενες ενότητες.

1.5.1.1 Ενεργός ιλύς/ Activated Sludge

Στο σύστημα ενεργής ιλύος εντός της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων πραγματοποιείται ο συνδυασμός δύο επιπέδων επεξεργασίας, δηλαδή, η πρωτογενής και η δευτερογενής. Η πρωτογενής επεξεργασία εξασφαλίζει την απομάκρυνση των ρυπογόνων σωματιδίων όπως π.χ. άμμου, υπολειμμάτων, λίπους, λαδιών και άλλων αποβλήτων. Τα υλικά αυτά διαχωρίζονται από τα λύματα μέσω της μεθόδου βαρύτητας σε μια μεγάλη δεξαμενή που ονομάζεται πρωτοβάθμια καθίζηση. Τα στερεά υπολείμματα που παράγονται στην πρωτοβάθμια καθίζηση αναφέρονται ως πρωτογενής λάσπη. Κατά το στάδιο της δευτερογενούς επεξεργασίας τα διαλυμένα και τα κολλοειδή συστατικά απομακρύνονται

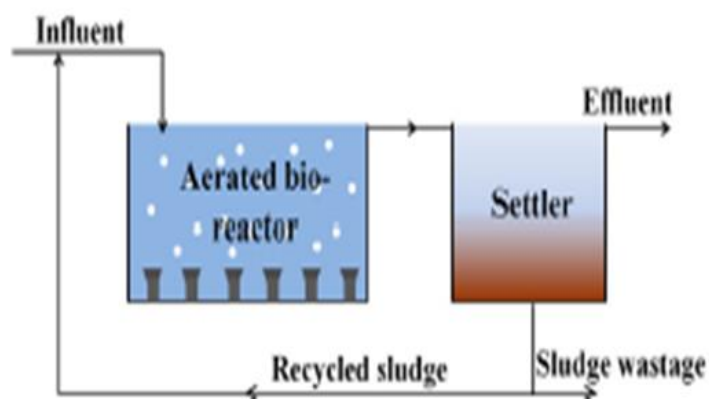
προς τον δευτερεύοντα διαυγαστή ή τη δεξαμενή καθίζησης, με αποτέλεσμα την παραγωγή της δευτερογενούς λάσπης (Anjum et al., 2016).

Τα πρωτογενή απόβλητα (ή η εισροή της εγκατάστασης) αναμιγνύονται με την ενεργή ιλύς που επιστρέφει για να σχηματιστεί το ανάμεικτο υγρό το οποίο αερίζεται για καθορισμένο χρονικό διάστημα. Με τον αερισμό του συστήματος, οι οργανισμοί της ενεργής ιλύος χρησιμοποιούν τη διαθέσιμη οργανική ύλη ως τροφή, παράγοντας έτσι σταθερά στερεά και περισσότερους οργανισμούς. Τα αιωρούμενα στερεά που παράγονται από τη διαδικασία και οι πρόσθετοι οργανισμοί γίνονται μέρος της ενεργής ιλύος. Στη συνέχεια, τα στερεά διαχωρίζονται από τα λύματα στη δεξαμενή καθίζησης και επιστρέφουν στην εισροή της δεξαμενής αερισμού (επιστροφή ενεργούς ιλύος) (Hreiz et al., 2015).

Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, οι ρυθμοί επιστροφής, η ποσότητα του διαθέσιμου οξυγόνου, η ποσότητα της διαθέσιμης οργανικής ύλης, το pH, οι ρυθμοί αποβλήτων, ο χρόνος αερισμού και η τοξικότητα των λυμάτων επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος επεξεργασίας ενεργής ιλύος. Επομένως, πρέπει να διατηρείται μια ισορροπία μεταξύ της ποσότητας της τροφής (οργανικής ύλης), των οργανισμών (ενεργής ιλύος) και του διαλυμένου οξυγόνου.

Τα συστήματα ενεργής ιλύος απαιτούν λιγότερο χώρο σε σύγκριση με το φίλτρο ροής και έχουν υψηλή ποιότητα εκροής. Το μειονέκτημα είναι ότι το BOD είναι υψηλότερο στο ένα άκρο της δεξαμενής από το άλλο (Amoatey and Bani, 2011).

Σχήμα 1.3: Σύστημα ενεργής ιλύος



Πηγή: Hreiz et al., 2015

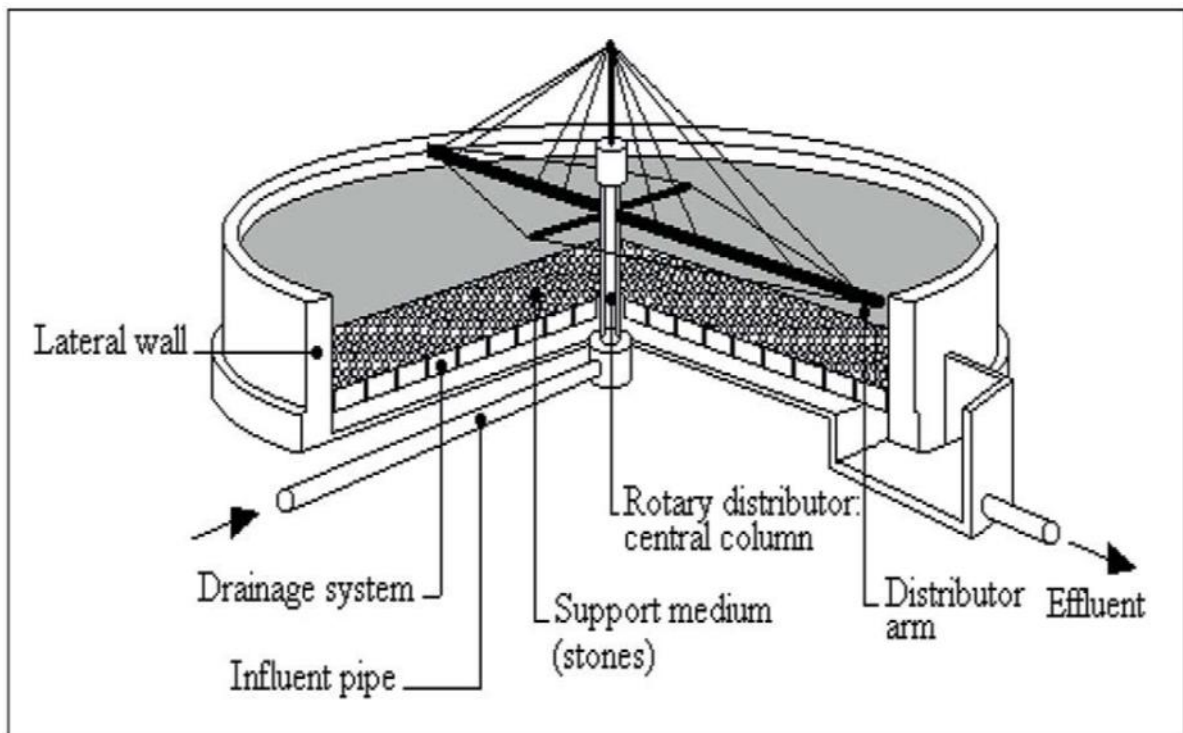
1.5.1.2 Χαλικοδιωλιστήρια/ Trickling Filters

Τα χαλικοδιωλιστήρια επίσης γνωστά ως φίλτρα ροής ή βιοφίλτρα, αποτελούνται από μια λεκάνη ή πύργο που απαρτίζεται από μέσα στήριξης όπως πέτρες, πλαστικά σχήματα ή ξύλινες ράγες. Τα λύματα εφαρμόζονται κατά διαστήματα ή περιστασιακά συνεχώς πάνω από τα μέσα στήριξης. Οι μικροοργανισμοί, συμπεριλαμβανομένων αερόβιων, αναερόβιων, βακτηρίων, μυκήτων, φυκιών και πρωτόζωων, προσκολλώνται στα μέσα και δημιουργούν ένα βιολογικό στρώμα ή σταθερό φιλμ πάχους περίπου 0,1 έως 0,2 mm. Αυτό το στρώμα βοηθά σημαντικά στην απορρόφηση των λυμάτων (Εικόνα 1.4) (Pescod, 1992).

Στο εξωτερικό μέρος της στιβάδας της λάσπης λαμβάνει μέρος η αποικοδόμηση του οργανικού υλικού από τους αερόβιους μικροοργανισμούς. Καθώς το στρώμα γίνεται παχύτερο λόγω της μικροβιακής ανάπτυξης, η μεσαία όψη γίνεται απροσπέλαστη από το οξυγόνο και οι αναερόβιοι οργανισμοί αρχίζουν να ευδοκιμούν. Το βιολογικό φιλμ συνεχίζει να διαστέλλεται τόσο πολύ που οι μικροοργανισμοί κοντά στην επιφάνεια δεν μπορούν να προσκολληθούν στο μέσο, με αποτέλεσμα ένα τμήμα του στρώματος της λάσπης να αποκολληθεί από το φίλτρο. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως "sloughing". Τα αποκολλημένα στερεά στη συνέχεια συλλέγονται από το σύστημα υποστράγγισης και μεταφέρονται σε έναν διαυγαστή για απομάκρυνση από τα λύματα (USEPA, 2000).

Τα φίλτρα ροής είναι αποτελεσματικά καθώς η ποιότητα των λυμάτων όσον αφορά το BOD και την αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών είναι υψηλή. Το κόστος λειτουργίας τους είναι σχετικά χαμηλό λόγω των χαμηλών απαιτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία είναι απλούστερη σε σύγκριση με τη διαδικασία της ενεργής ιλύος ή ορισμένες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Ωστόσο, οι απαιτήσεις για τη λειτουργία και τη συντήρησή τους είναι υψηλές λόγω της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για την εύρυθμη λειτουργία των χαλικοδιωλιστηρίων απαιτείται εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό ώστε να εξασφαλίζεται η επαρκής έκπλυση, η αποτροπή του φραξίματος, και ο έλεγχος για την ύπαρξη εντόμων. Είναι κατάλληλα για ορισμένες σχετικά πλούσιες και πυκνοκατοικημένες περιοχές που διαθέτουν σύστημα αποχέτευσης και κεντρική επεξεργασία λυμάτων καθώς επίσης και για την επεξεργασία του γκρίζου νερού. Ακόμη χρειάζονται μεγαλύτερο χώρο σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και υπάρχουν οι πιθανότητες για την ανάπτυξη οσμών και την εμφάνιση εντόμων (Amoatey and Bani, 2011).

Σχήμα 1.4: Χαλικοδυλιστήρια/ Trickling Filters



Πηγή: Vianna et al., 2012

1.5.1.3 Περιστεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι/ Rotating Biological Contactors

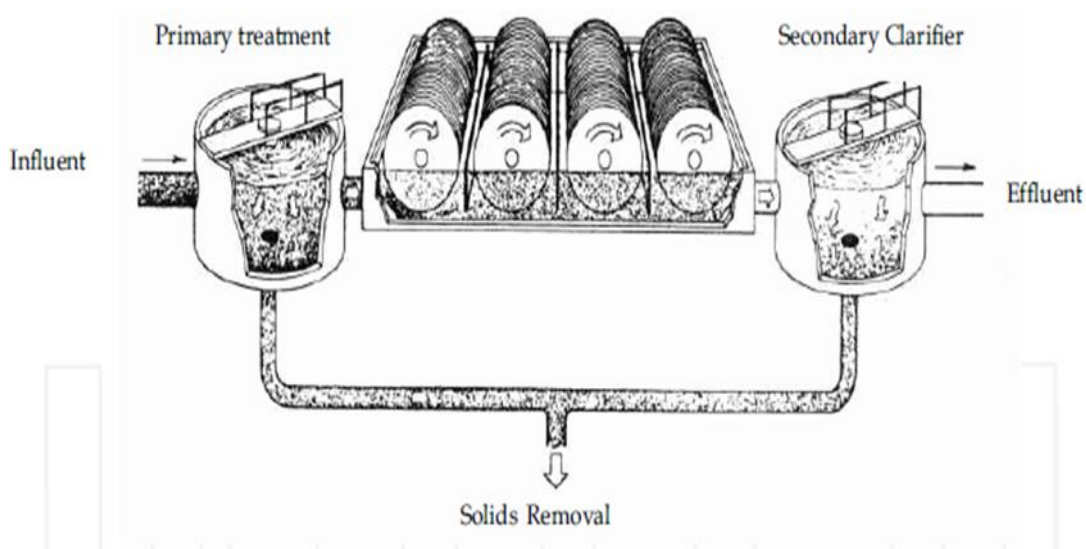
Οι περιστεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι (RBCs) είναι αντιδραστήρες μεμβράνης που λειτουργούν παρόμοια με τα βιοφίλτρα, καθώς οι οργανισμοί παραμένουν προσκολλημένοι στα μέσα υποστήριξης. Στην περίπτωση των RBC, το μέσο στήριξης αποτελείται από δίσκους που περιστρέφονται ήπια, μερικώς βυθισμένοι στα λύματα που εισέρχονται στον αντιδραστήρα (Εικόνα 1.5). Κατά την περιστροφή των δίσκων, το προσαρτημένο βιοφίλμ λαμβάνει οξυγόνο από τον αέρα όταν εκτίθεται και από το υγρό όταν βυθίζεται, μεταφέροντας οξυγόνο στα απόβλητα λόγω των επιφανειακών αναταράξεων που δημιουργούνται. Τα κομμάτια που απορρίπτονται από το βιοφίλμ αφαιρούνται με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται για τα βιοφίλτρα (Pescod, 1992).

Η μεγάλη επιφάνεια επιτρέπει την ανάπτυξη ενός μεγάλου και σταθερού πληθυσμού βιομάζας, με την περίσσεια ανάπτυξη να απορρίπτεται και να αφαιρείται συνεχώς και αυτόματα προς το κατάντη φίλτρο καθαρισμού. Το πάχος του βιοφίλμ μπορεί να φτάσει τα 2 – 4 mm ανάλογα με την ισχύ των λυμάτων και την ταχύτητα περιστροφής του δίσκου.

Το σύστημα RBC επεκτείνεται άνετα εάν παραστεί ανάγκη και περικλείεται επίσης πολύ εύκολα εάν καταστεί απαραίτητος ο περιορισμός του πτητικού οργανικού περιεχομένου.

Οι RBC έχουν σχετικά χαμηλές απαιτήσεις ισχύος και μπορούν ακόμη και να τροφοδοτηθούν από πεπιεσμένο αέρα που μπορεί επίσης να αερίσει το σύστημα. Ακολουθούν απλές διαδικασίες λειτουργίας και επομένως απαιτούν εργατικό δυναμικό μέτριας εξειδίκευσης. Ωστόσο, είναι ακριβοί στην εγκατάσταση και ευαίσθητοι στη θερμοκρασία (Amoatey and Bani, 2011).

Σχήμα 1.5: Περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι



Πηγή: Amoatey and Bani, 2011

1.5.1.4 Βιοαντιδραστήρες μεμβράνης/ Membrane BioReactor

Σε αυτή τη μέθοδο εκτελούνται περισσότερα από ένα στάδια επεξεργασίας. Τα συστήματα βιοαντιδραστήρων μεμβράνης (MBR) αποτελούν τις μοναδικές διεργασίες, οι οποίες συνδυάζουν ανοξική και αερόβια βιολογική επεξεργασία με ένα ενσωματωμένο σύστημα μεμβράνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με τα περισσότερα συστήματα βιολογικής επεξεργασίας παρακράτησης (Amoatey and Bani, 2011).

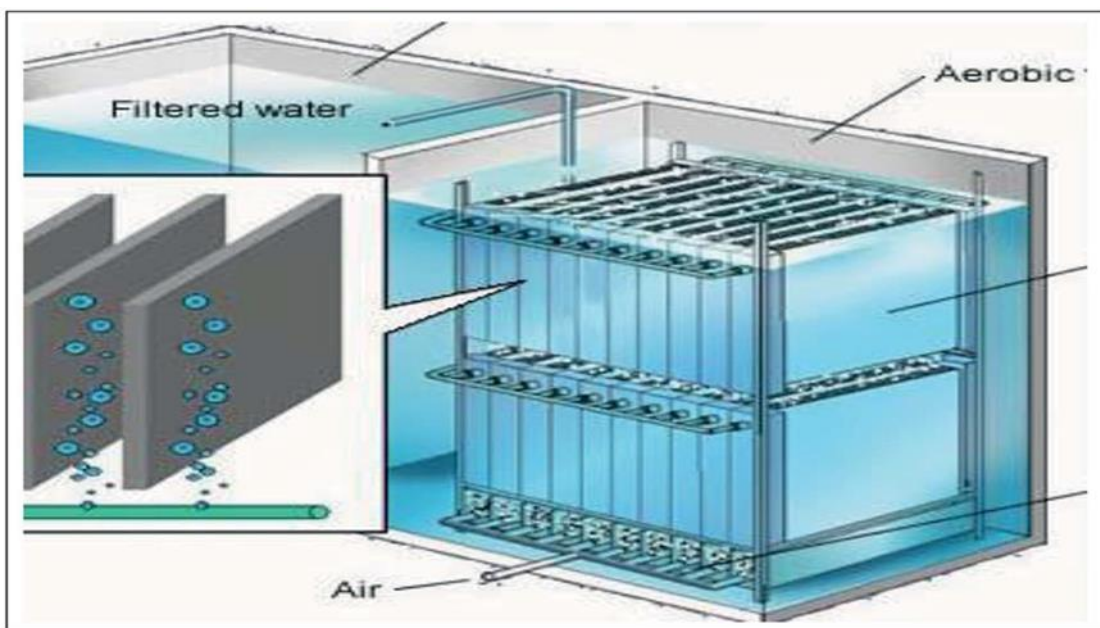
Τα συστήματα MBR αποτελούνται από έναν βιολογικό αντιδραστήρα παρακράτησης σε συνδυασμό με μια μονάδα μεμβράνης που βρίσκεται είτε εξωτερικά του βιοαντιδραστήρα -πλευρικό ρεύμα- είτε βυθισμένο απευθείας σε αυτό (εμβαπτισμένο). Η διάταξη του πλευρικού ρεύματος πραγματοποιείται από την εγκάρσια ροή υγρού που κινείται σε υψηλή ταχύτητα προερχόμενο από την αντλία ανακυκλοφορίας που έχει σχεδιαστεί για να

μειώνει την εναπόθεση των αιωρούμενων στερεών στην επιφάνεια της μεμβράνης (Σχήμα 1.6).

Αν και η διάταξη είναι απλή και παρέχει πιο άμεσο υδροδυναμικό έλεγχο της ρύπανσης, απαιτεί υψηλή ενέργεια. Το εμβαπτισμένο σύστημα, από την άλλη πλευρά, βασίζεται στον αερισμό με χονδρόκοκκες φυσαλίδες για την παραγωγή της ανακυκλοφορίας στη δεξαμενή και την καταστολή της ρύπανσης. Αν και η ενεργειακή ζήτηση του εμβαπτισμένου συστήματος μπορεί να είναι έως και δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερη από εκείνη των συστημάτων πλευρικού ρεύματος, λειτουργούν με χαμηλότερη ροή και επομένως απαιτούν περισσότερη επιφάνεια μεμβράνης (Chang et al., 2002).

Τα συστήματα MBR καλύπτουν μια μικρή έκταση γης καθώς δεν απαιτούν δευτερεύοντα φίλτρα καθαρισμού κάτι που ισοδυναμεί με τεράστια εξοικονόμηση τόσο στον χώρο όσο και στο κόστος της γης. Μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες συγκεντρώσεις βιομάζας (MLSS) από ότι οι συμβατικές διαδικασίες επεξεργασίας. Επίσης η εγκατάσταση μπορεί να επεκταθεί με την απλή προσθήκη περισσότερων μεμβρανών στις υπάρχουσες λεκάνες χωρίς να απαιτείται η επέκταση σε περισσότερο έδαφος. Για τη διασφάλιση της ποιότητας επαναχρησιμοποίησης, δεν απαιτείται τριτοβάθμια επεξεργασία, προσθήκη πολυμερούς ή άλλες διαδικασίες επεξεργασίας ώστε να πληρούνται τα πρότυπα. Αυτή η μείωση στον αριθμό των διεργασιών βελτιώνει περαιτέρω την αξιοπιστία του συστήματος και μειώνει τις δραστηριότητες λειτουργίας. Η γενικά υψηλή ποιότητα των λυμάτων που παράγονται μειώνει την επιβάρυνση της απολύμανσης κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας (Amoatey and Bani, 2011).

Σχήμα 1.6: Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης



Πηγή: Amoatey and Bani, 2011

1.5.2 Μη συμβατικές μέθοδοι

Οι συγκεκριμένες μέθοδοι επεξεργασίας είναι χαμηλού κόστους, χαμηλής τεχνολογίας και διαθέτουν λιγότερο εξελιγμένα συστήματα λειτουργίας και συντήρησης για τον βιολογικό καθαρισμό των αστικών λυμάτων. Αν και αυτά τα συστήματα απαιτούν αρκετή έκταση σε γη συγκριτικά με τις συμβατικές βιολογικές διεργασίες υψηλής ταχύτητας, ο σωστός σχεδιασμός των συστημάτων και η αποφυγή της υπερφόρτωσης τα καθιστά συχνά πιο αποτελεσματικά στην απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών κάνοντας το αξιόπιστα και συνεχώς (FAO, 2006).

Ορισμένες από τις μη συμβατικές μεθόδους περιλαμβάνουν τις λίμνες σταθεροποίησης (WSP) που αποτελούνται από μία σειρά ή πολλές σειρές αναερόβιων λιμνών, επαμφοτερίζοντων λιμνών ή λιμνών ωρίμανσης (αερόβιες) και αναφέρονται συχνότερα ως λίμνες οξείδωσης ή λιμνοθάλασσες όπου διενεργείται μια φυσική δευτερογενή επεξεργασία λυμάτων. Τους τεχνητούς υγροτόπους (CWs) που κατασκευάζονται για να χρησιμοποιούν τη βλάστηση των υγροτόπων (μακρόφυτα) ώστε να βοηθήσουν στην επεξεργασία των λυμάτων σε ένα πιο ελεγχόμενο περιβάλλον από ό,τι συμβαίνει στους φυσικούς υγροτόπους (DTIE, 2004) και ανάλογα με τη στάθμη του νερού στο σύστημα διακρίνονται είτε ως υγροτόποι ελεύθερης επιφανειακής ροής είτε ως υπόγειας ροής,

καθώς και κάθετης ροής σύμφωνα με την κατεύθυνση της κίνησης του νερού στο σύστημα (Vymazal, 2014).

Τα τυπικά συστήματα τάφρους οξείδωσης που αποτελούνται από μια διάταξη ενός ή πολλαπλών καναλιών μέσα σε έναν δακτύλιο ή σχήματος οβάλ στα οποία λαμβάνει μέρος μια τροποποιημένη διαδικασία βιολογικής επεξεργασίας ενεργού ιλύος που χρησιμοποιεί υδραυλικό χρόνο συγκράτησης 24 - 48 ωρών και ιλύς ηλικίας 12-20 ημερών για την αφαίρεση των βιοδιασπώμενων οργανικών ουσιών.

Και τα συστήματα επεξεργασίας εδάφους-υδροφορείς που κατασκευάζονται σε οποιοδήποτε σημείο που οι συνθήκες του εδάφους και των υπόγειων υδάτων ευνοούν τη τεχνητή αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων μέσω λεκανών διήθησης και μπορεί να επιτευχθεί υψηλής ποιότητας αναβάθμιση επιτρέποντας στα μερικώς επεξεργασμένα λύματα να διεισδύσουν στο έδαφος και να μετακινηθούν προς τα υπόγεια ύδατα (Amoatey and Bani, 2011).

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ Η ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

2.1 Γενικά

Το επεξεργασμένο νερό αναφέρεται στα αστικά λύματα που έχουν υποστεί επεξεργασία ώστε να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας νερού για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση τους σε ωφέλιμους σκοπούς . Με την αύξηση του πληθυσμού, της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και την αύξηση της βιομηχανικής παραγωγής αυξήθηκε η κατανάλωση του οικιακού νερού με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής των λυμάτων. Τα λύματα που απορρίπτονται στο περιβάλλον παγκοσμίως εκτιμώνται περίπου σε 0,4 τρισεκατομμύρια m³ ετησίως μολύνοντας περίπου 5,5 τρισεκατομμύρια m³ νερού κάθε χρόνο . Επομένως, όλες οι χώρες θα πρέπει να ανησυχούν για την επεξεργασία αυτών των μεγάλων ποσοτήτων λυμάτων και, στη συνέχεια, την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση τους. Επομένως κρίνεται αναγκαία η προώθηση της χρήσης του ανακυκλωμένου νερού σε παγκόσμιο επίπεδο (Assouline and Narkis, 2013).

Τα κύρια προβλήματα που σχετίζονται με αυτό το θέμα περιλαμβάνουν τους κινδύνους για τη δημόσια υγεία και τους οικολογικούς κινδύνους, τις τεχνολογικές, θεσμικές, κοινωνικό-πολιτιστικές πτυχές και τις πτυχές της βιωσιμότητας . Επομένως, η επεξεργασία των λυμάτων και η χρήση τους καθίσταται εξαιρετικά αναγκαία. Για παράδειγμα, ο ρυθμός επεξεργασίας των λυμάτων στην Κίνα (ο λόγος του ποσού του επεξεργασμένου νερού προς τη συνολική ποσότητα απόρριψης λυμάτων) αυξήθηκε σε 86% το 2014, 3,4 φορές περισσότερο από αυτό του 1999 (Hashem and Qi, 2021).

Η ανάγκη για μια πιο βιώσιμη ανάπτυξη, συμπεριλαμβανομένης της κυκλικής χρήσης των πόρων καθώς και η ανεπάρκεια των πόρων των σημερινών πρακτικών επεξεργασίας των λυμάτων οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα σε αλλαγή νοοτροπίας όσον αφορά την εξεύρεση λύσεων για τη διαχείριση των λυμάτων. Επί του παρόντος γίνεται πρόταση για να μετατοπιστεί η προσοχή από την αφαίρεση ρύπων στην ανάκτηση πόρων. Σε αυτή την πρόταση, τα λύματα αναγνωρίζονται ως πολύτιμος πόρος αντί να θεωρούνται ως ροή αποβλήτων (Guest et al., 2009).

Με την καθιέρωση της κυκλικής ροής των πόρων, ο τομέας του νερού μπορεί να συμβάλει στους εθνικούς και ευρωπαϊκούς στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης. Καθώς η μεγάλη κλίμακας κεντρικές μονάδες διαχείρισης λυμάτων αντιπροσωπεύουν επίσης τα κεντρικά σημεία συλλογής και ανάκτησης μιας μεγάλης ποικιλίας πόρων, δηλαδή νερό ενέργεια, θρεπτικά συστατικά και άλλα προϊόντα, ο επανασχεδιασμός τους από εγκαταστάσεις επεξεργασίας σε εργοστάσια ανάκτησης υδάτινων πόρων παρέχει τις δυνατότητες για την συμβολή τους σε μια πιο κυκλική οικονομία (Kehrein et al., 2020).

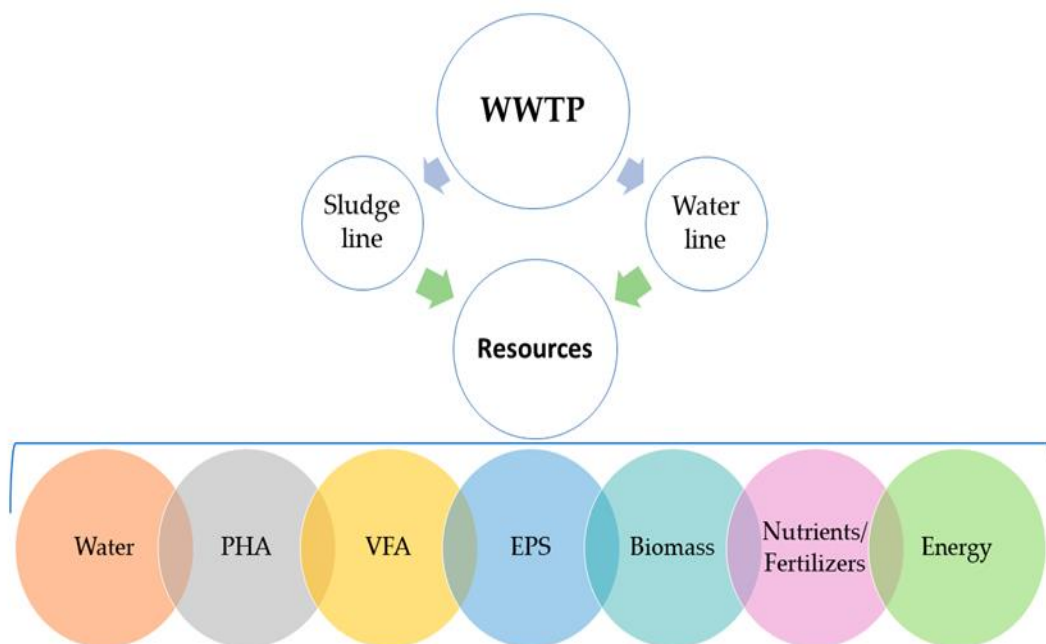
Για την αύξηση της ευαισθητοποίησης σχετικά με αυτό το ζήτημα μεταξύ των ενδιαφερομένων και των επαγγελματιών που εμπλέκονται στον σχεδιασμό, τη χρηματοδότηση και τη διαχείριση των λυμάτων (π.χ. επιχειρήσεις κοινής ωφελείας, φορείς χάραξης πολιτικής ή ακόμη και υπουργεία σχεδιασμού και οικονομικών), η Παγκόσμια Τράπεζα δημοσίευσε την έκθεση Παγκόσμιας Πρωτοβουλίας Πρακτικής για το Νερό στην οποία επισημαίνονται οι διάφορες δράσεις που πρέπει να υιοθετηθούν :

- I. την ανάπτυξη πρωτοβουλιών για τα λύματα ως μέρος ενός πλαισίου για τον σχεδιασμό λεκανών απορροής για τη μεγιστοποίηση των οφελών, τη βελτίωση της αποδοτικότητας και την κατανομή των πόρων και τη συμμετοχή των ενδιαφερομένων,
- II. την ίδρυση μελλοντικών επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας που προωθούν τη μετάβαση από τις μονάδες διαχείρισης και επεξεργασίας λυμάτων σε εργοστάσια ανάκτησης και παραγωγής υδάτινων πόρων , συνειδητοποιώντας έτσι την αξία των λυμάτων,
- III. τη διερεύνηση και την υποστήριξη της ανάπτυξης καινοτόμων χρηματοδότησης και βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων στον τομέα του νερού,
- IV. την εφαρμογή των αναγκαίων πολιτικών, θεσμικών και ρυθμιστικών πλαισίων για την προώθηση της αλλαγής νοοτροπίας (Rodriguez et al., 2020).

2.2 Η ανάκτηση πόρων από τα επεξεργασμένα λύματα

Υπό αυτό το πλαίσιο, σε αυτό το κεφάλαιο, πέρα από την περιγραφή της χρήσης του επεξεργασμένου νερού για την άρδευση των καλλιεργειών, περιγράφεται η συνολική και ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης της ανάκτησης πόρων σε πιλοτικά και πλήρους κλίμακας εργοστάσια ανάκτησης υδάτινων πόρων παγκοσμίως, με ιδιαίτερη έμφαση στην ανάκτηση νερού ως την κύρια πολύτιμη ένωση και επίσης επισημαίνεται η σημασία της ανάκτησης άλλων πόρων, συγκεκριμένα όπως της βιομάζας (ως μικροφύκη και μονοκυτταρική πρωτεΐνη), της ενέργειας (ως βιοαέριο), των θρεπτικών συστατικών (ως λιπάσματα) ή των περισσότερων νέων βιοϋλικών όπως είναι τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFA), τα πολυδροξυαλκανοϊκά (PHA) και οι εξωπολυμερείς ουσίες (EPS) (Σχήμα 2.1).

Σχήμα 2.1: Από τα λύματα στην ανάκτηση πόρων



Πηγή: Duque et al., 2021

Η επεξεργασία των λυμάτων με παραδοσιακές (ενεργή ιλύς) ή νέες τεχνολογίες (όπως συστήματα βιοφίλμ π.χ. η κοκκώδης λάσπη) που βασίζεται στη χρήση βιολογικών διεργασιών συχνά προτιμάται σε σύγκριση με τις φυσικοχημικές διεργασίες λόγω των φθηνότερων λειτουργικών τους αναγκών (δηλ. δεν απαιτούνται χημικά) και των χαμηλότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για το λόγο αυτό, η ανάκτηση των

πολύτιμων προϊόντων σε βάση βιολογικών διεργασιών μπορεί να γίνει άμεσα από τα λύματα (γραμμή νερού) ή έμμεσα από την λυματολάσπη που παράγεται (γραμμή ιλύος).

Η σκοπιμότητα των τεχνολογιών που εφαρμόζονται σε μεγαλύτερη κλίμακα για την ανάκτηση των προϊόντων προστιθέμενης αξίας διαφέρει μεταξύ των γραμμών του νερού και της ιλύος (Πίνακας 2.1). Συνήθως, οι οργανικές (δηλαδή, VFA, PHA, EPS) και οι ανόργανες (δηλ., θρεπτικά συστατικά) ενώσεις που υπάρχουν στα λύματα φαίνεται ότι είναι προτιμότερο να συγκεντρώνονται στη λάσπη ώστε να ληφθούν στη συνέχεια τα βιοϋλικά και τα εμπλουτισμένα με θρεπτικά συστατικά ρεύματα από αυτή τη λάσπη (Duque et al., 2021).

Πίνακας 2.1: Ποσότητα των πόρων ανάκτησης από τις γραμμές νερού και ιλύος

	Water line	Sludge line
Water	+++	+
Biomass	+++	+++
Nutrients/fertilizers	++	+++
Energy	++	+++
VFA	++	+++
PHA	+	++
EPS	n.r.	++

n.r. – not reported

Πηγή: Duque et al., 2021

2.2.1 Βιομάζα

Η ιλύς των αποβλήτων είναι συνήθως ένα ετερογενές στερεό υλικό που αποτελείται από νερό, μικροοργανισμούς, οργανική ύλη, ανόργανες και οργανικές ενώσεις. Επομένως αυτή η σύνθεση προσφέρει μεγάλες δυνατότητες αξιοποίησης, οι οποίες μπορούν στη συνέχεια να μετατρέψουν τη διάθεση της ιλύος των αποβλήτων από ένα σημαντικό κόστος σε πηγή κέρδους για τις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Η οδηγία 2008/98/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου προτείνει πως προτεραιότητα για τη διαχείριση των αποβλήτων ιλύος αποτελεί η μείωση της παραγωγής των αποβλήτων,

ακολουθούμενη από τη χρήση των αποβλήτων για επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση ή άλλες μορφές ανάκτησης, και τέλος θα πρέπει να εξετάζεται μόνο η διάθεση των αποβλήτων υλός. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές για την επίτευξη της αξιοποίησης της υλός περιλαμβάνουν τη χρήση της ως προϊόν ή ως πηγή ανάκτησης πόρων, όπως για άζωτο, φώσφορο ή άνθρακα (π.χ. με τη μορφή VFAs, PHAs ή μεθανίου-CH₄) (Kacprzak et al., 2017). Η αξιοποίηση της υλός των αποβλήτων μέσω της παραγωγής προϊόντων προστιθέμενης αξίας είναι ένα σημαντικό βήμα προς μια πιο βιώσιμη κοινωνία, με την προσδοκία ότι στο εγγύς μέλλον οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων θα μπορούν να μετατραπούν σε βιοδυλιστήρια στα οποία η "παραγωγή" του επεξεργασμένου νερού δεν θα αποτελεί τη μοναδική προϋπόθεση (Duque et al.,2021).

2.2.1.1 Βιομάζα μικροφυκών

Τα συστήματα με βάση τα μικροφύκη αποτελούν φιλικές προς το περιβάλλον και βιώσιμες επιλογές επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων λόγω της αποτελεσματικής ικανότητάς τους να επεξεργάζονται τόσο τα αστικά όσο και τα βιομηχανικά λύματα, ενώ παράλληλα επιτρέπουν τη δέσμευση CO₂, την εξοικονόμηση των εισροών των θρεπτικών ουσιών και την παραγωγή βιομάζας μικροφυκών, η οποία αποτελεί πηγή μυριάδων βιοπροϊόντων και βιοϋλικών που παράγονται από τα φύκη και έχουν προστιθέμενη αξία (Duque et al.,2021). Τα μικροφύκη μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο ευτροφισμού με την απομάκρυνση των συστατικών φωσφόρου (P) και αζώτου (N). Τα συστήματα με μικροφύκη θεωρούνται ως εναλλακτικές λύσεις με πολλαπλές λειτουργίες για τη βιολογική επεξεργασία, μετατρέποντας τα ανεπιθύμητα ανόργανα και οργανικά συστατικά σε πολύτιμη βιομάζα. Επιπλέον, τα μικροφύκη που συλλέγονται από ορισμένες λίμνες επεξεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή τροφής και πρώτη ύλη για πολλαπλά προϊόντα και να διαδραματίσουν ποικίλους ρόλους σε διάφορες βιομηχανίες (Abdelfattah et al.,2022).

Πιο πρόσφατα, οι διεργασίες με βάση τα μικροφύκη και τα βακτήρια έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον λόγω της αμοιβαίας και συμβιωτικής σχέσης που μπορούν να αναπτύξουν τα μικροφύκη με τα βακτήρια. Το οξυγόνο που παράγεται μέσω της φωτοσύνθεσης από τα κύτταρα των μικροφυκών μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα βακτήρια για την οξειδωση της οργανικής ύλης, επιτρέποντας έτσι τη συνεργασία μεταξύ των μικροφυκών και των αερόβιων βακτηρίων στο ίδιο σύστημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρο, καθώς μπορεί

να μειώσει το κόστος του αερισμού και μπορεί επίσης να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Duque et al.,2021).

Λόγω των εφαρμογών της βιομάζας των μικροφυκών σε διάφορους τομείς, υπάρχουν τεράστιες προοπτικές για την ανάπτυξη βιώσιμων διεργασιών όπου η παραγωγή μικροφυκών μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τα βιομηχανικά λύματα. Οι Kumar et al. (2020) αξιολόγησαν την τεχνοοικονομική δυνατότητα ενός συστήματος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων από γαλακτοκομικά προϊόντα με βάση τα μικροφύκη για την ταυτόχρονη παραγωγή βιομάζας μικροφυκών και καθαρού νερού. Η λίμνη μεγάλου όγκου σε σχήμα V που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη φάνηκε να είναι ένα αποδοτικό από άποψη κόστους και έκτασης σύστημα καλλιέργειας μικροφυκών, επιτρέποντας την ετήσια παραγωγή 504 τόνων φυκών με 0,482 USD/kg μαζί με την παραγωγή περίπου 240.000 m³ επεξεργασμένου καθαρού νερού .

2.2.1.2 Μονοκυτταρικές πρωτεΐνες

Η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για την προμήθεια των τροφίμων, ιδίως των πρωτεϊνών, ανάγκασε την αναζήτηση νέων τρόπων για την απόκτησή τους. Πρόσφατα, αυξήθηκε το ενδιαφέρον για την ανάκτηση των μονοκυτταρικών πρωτεϊνών (SCP) μέσω της ανακύκλωσης των οργανικών και θρεπτικών ουσιών που περιέχονται στα υγρά απόβλητα. Η ιλύς των λυμάτων αποτελεί πολύτιμη πηγή πρωτεϊνών λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των συστατικών αυτών στη σύνθεση της ιλύος (περίπου 61% πρωτεΐνες, 11% υδατάνθρακες, 1% λιπίδια και 27% άλλα συστατικά) (Chen et al., 2007). Δεδομένου ότι περίπου το 50% του ξηρού βάρους των βακτηριακών κυττάρων αποτελείται από πρωτεΐνη, το εκχύλισμα πρωτεΐνης που μπορεί να ληφθεί από την ιλύ λυμάτων παρουσιάζει μεγάλες προοπτικές. Ωστόσο, εκτός από τις βακτηριακές καλλιέργειες, η μονοκυτταρικές πρωτεΐνες μπορεί επίσης να ληφθεί από άλλους τύπους βιομάζας, όπως τα μικροσκοπικά φύκη, τις ζύμες ή τους μύκητες . Οι φωτοτροφικοί οργανισμοί, όπως τα μικροφύκη ή τα πορφυρά φωτοτροφικά βακτήρια, εμφανίζονται ως η καλύτερη λύση λόγω των υψηλών αποδόσεων σε άνθρακα και των υψηλών δυνατοτήτων δέσμευσης των θρεπτικών συστατικών (Duque et al.,2021).

Οι πρωτεΐνες αυτές, που χρησιμοποιούνται ως ζωοτροφή , θα μπορούσε να μετριάσουν την πίεση που υφίστανται οι εκτάσεις γης για την μετατροπή τους σε καλλιέργειες ζωοτροφών, δεδομένου ότι περίπου το 80% των αγροτικών εκτάσεων χρησιμοποιείται για την

καλλιέργεια ζωοτροφών. Ωστόσο σε περίπτωση που η πρωτεΐνη που λαμβάνεται χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές τροφίμων, η αποδοχή από τους καταναλωτές θα αποτελούσε ζήτημα (Kehrein et al.,2019). Οι διάφορες νομοθεσίες διαφέρουν μεταξύ των τροφίμων για τον άνθρωπο και για τα ζώα, και σε αυτή την τελευταία κατηγορία, μεταξύ των οικόσιτων ζώων και των ζώων συντροφιάς. Υπάρχουν επίσης διαφορές μεταξύ των τροφίμων, των πρόσθετων υλών των ζωοτροφών και των ιατρικών ζωοτροφών. Ως εκ τούτου, η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών, ξενοβιοτικών, μετάλλων κ.λπ. που υπάρχουν στα περισσότερα ρεύματα των υγρών αποβλήτων από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων, έχει ως αποτέλεσμα την εφαρμογή της παραγωγής των μονοκύτταρων πρωτεϊνών κατά προτίμηση σε ρεύματα υγρών αποβλήτων που παράγονται από τις βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων (Duque et al.,2021).

2.2.2 Θρεπτικά συστατικά και λιπάσματα

Η ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών (αζώτου και φωσφόρου) από τα υγρά απόβλητα για να χρησιμοποιηθούν ως λιπάσματα αποτελεί μια καλή εναλλακτική επιλογή για την αποφυγή της ανεξέλεγκτης απόρριψης των υγρών αποβλήτων, ενώ παράλληλα επιλύει το πρόβλημα της ανεπαρκούς πρόσβασης σε χημικά συνθετικά λιπάσματα, ιδίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, λόγω του υψηλού κόστους τους.

Όσον αφορά τον φώσφορο που περιέχεται στα λύματα, περίπου το 95% μεταφέρεται στην ιλύ από τις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Η ανάκτηση του φωσφόρου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολλαπλά τμήματα μιας μονάδας επεξεργασίας μέσω τριών κύριων οδών: από την υγρή φάση (δηλαδή, στην υδατική φάση από το υπερκείμενο υγρό του χωνευτήρα, ως διαλυμένος φώσφορος στην αναερόβια χώνευση και στην εκροή), από την ιλύ των λυμάτων (άμεση γεωργική αξιοποίηση) και από τις στάχτες αποτέφρωσης της ιλύος των λυμάτων (Egle et al., 2016). Οι αναμενόμενες μελλοντικές ελλείψεις ωθούν την έρευνα και την εξέλιξη της απομάκρυνσης του φωσφόρου από τα λύματα. Οι τεχνολογίες ανάκτησης φωσφόρου λειτουργούν σε πλήρη κλίμακα σε διάφορες τοποθεσίες. Σε ορισμένες χώρες της ΕΕ, όπως η Γερμανία, η νομοθεσία που δημοσιεύθηκε το 2017/10 υποχρεώνει ήδη τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ορισμένου μεγέθους να ανακτούν ένα ελάχιστο ποσό του εισερχόμενου φορτίου φωσφόρου (Environment and Natural Resources Department, 2022).

Αντίθετα με τον φώσφορο, ο οποίος είναι ένας σπάνιος και μη ανανεώσιμος πόρος, το άζωτο είναι ευρέως διαθέσιμο στην ατμόσφαιρα σε μια εξαιρετικά σταθερή και μη αντιδραστική κατάσταση, γνωστή ως αέριο άζωτο (N₂). Από την εφεύρεση της διαδικασίας Haber-Bosch το 1909, η οποία κατάφερε να μετατρέψει το ατμοσφαιρικό άζωτο σε αμμωνία, τα αζωτούχα λιπάσματα έχουν συνεισφέρει στη μεγαλύτερη αύξηση του όγκου παραγωγής των τροφίμων στην ιστορία. Η αυξημένη παραγωγή τροφίμων που επιτεύχθηκε με τη χρήση των αζωτούχων λιπασμάτων είχε ως αποτέλεσμα την αποβολή του αζώτου (κυρίως ως ουρία και αμμώνιο) από τον άνθρωπο στα υγρά απόβλητα. Ως αποτέλεσμα, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων πρέπει σήμερα να χρησιμοποιούν ενεργοβόρες μεθόδους για την απομάκρυνση του αζώτου ώστε να αποφεύγεται ο ευτροφισμός των υδάτων που δέχονται τα λύματα και να τηρούνται τα όρια συγκέντρωσης των λυμάτων (Environment and Natural Resources Department, 2022).

Η συγκέντρωση αμμωνίου στις πηγές των υγρών αποβλήτων ποικίλλει ανάλογα με την προέλευσή τους. Για παράδειγμα, στις αστικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, η κύρια γραμμή περιέχει περίπου 100 mg αζώτου ανά λίτρο, ενώ το νερό απόρριψης από την αναερόβια χώνευση έχει περίπου 1000 mg αζώτου ανά λίτρο. Σύμφωνα με τους Ye et al. (2018), υπάρχουν τρεις κύριοι μηχανισμοί ανάκτησης αμμωνίου: η καταβύθιση του στρουβίτη, η απογύμνωση της αμμωνίας σε συνδυασμό με την προσρόφηση και τη συγκέντρωση στη μεμβράνη. Ο στρουβίτης είναι το φωσφορικό αμμώνιο του μαγνησίου (MgNHP₄·6H₂O), ένα ορυκτό που σχηματίζεται συνήθως στους σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων μέσω της αυθόρμητης καταβύθισης εάν οι συγκεντρώσεις Mg είναι αρκετά υψηλές, αν και συχνά αυτό δεν συμβαίνει (Kehrein et al., 2020).

Η καταβύθιση του στρουβίτη είναι πιο συμφέρουσα, καθώς, εκτός από το αμμώνιο, ανακτά ταυτόχρονα και φωσφορικό άλας. Ο στρουβίτης (εξαϋδρικό εναμμώνιο-φωσφορικό μαγνήσιο) προτιμάται πιο συχνά από τα ορυκτά φωσφορούχα λιπάσματα, καθώς είναι λιγότερο διαλυτός στο νερό και όταν εφαρμόζεται στο έδαφος, επιτρέπει την αργή απελευθέρωση του φωσφόρου, η οποία είναι πιο ευεργετική για την ανάπτυξη των φυτών (Duque et al., 2021).

Ωστόσο, παρά τις σημαντικές τεχνολογικές προόδους στην ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών από τα λύματα και την ιλύ, οι επιχειρηματικές ευκαιρίες παραμένουν περιορισμένες, κυρίως λόγω της έλλειψης αγορών. Η χαμηλή περιεκτικότητα των

βιοστερεών σε θρεπτικά συστατικά, ιδίως σε άζωτο (N), δεν επιτρέπει κερδοφόρες πωλήσεις στην αγορά. Μόνο το 5-15% του διαθέσιμου αζώτου που βρίσκεται στα υγρά απόβλητα μπορεί να ανακτηθεί, ενώ η δέσμευση του φωσφόρου (P) στα υγρά απόβλητα είναι δυνατή ως 45-90% (Drechsel et al., 2015).

2.2.3 Ενέργεια

Τα υγρά απόβλητα περιέχουν ενέργεια σε διάφορες μορφές (συγκεκριμένα χημική, θερμική και υδραυλική). Αυτοί οι τύποι ενέργειας που μπορούν να ληφθούν από τα λύματα περιλαμβάνουν το βιοαέριο από την αναερόβια χώνευση (το πιο συνηθισμένο), την ηλεκτρική ενέργεια (από τις βιοηλεκτροχημικές διεργασίες κατά την επεξεργασία), τα ανανεώσιμα καύσιμα από την επεξεργασία της ιλύος, τη θερμική ενέργεια και την υδροηλεκτρική ενέργεια χαμηλής στάθμης (Duque et al., 2021). Ωστόσο, η ανάκτηση ενέργειας από τα λύματα συνήθως λαμβάνει υπόψη μόνο τη χημική ενέργεια με τη μορφή βιοαερίου που παράγεται από την αναερόβια χώνευση της ιλύος των λυμάτων.

Ωστόσο, οι εκτιμήσεις της ανακτώμενης ενέργειας που αφομειώνεται στα αστικά λύματα δείχνουν ότι το δυναμικό για τη θερμική ενέργεια (80% της ανακτώμενης ενέργειας) είναι πολύ υψηλότερο από ό,τι για τη χημική ενέργεια (20%), ενώ μόνο ένα πολύ μικρό ποσό (λιγότερο από 1%) της αφομοιωμένης ενέργειας βρίσκεται με τη μορφή υδραυλικής ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι ένα σημαντικό μέρος της ανακτήσιμης ενέργειας που βρίσκεται στα υγρά απόβλητα παραμένει επί του παρόντος ανεκμετάλλευτο (Environment and Natural Resources Department, 2022).

Η πλειονότητα της χημικής ενέργειας στα υγρά απόβλητα περιέχεται σε οργανικές ενώσεις που μετρώνται ως χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) ή/και βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD). Η ανάκτηση της χημικής ενέργειας περιλαμβάνει τη μετατροπή των συστατικών των υγρών αποβλήτων σε αέρια, υγρά ή στερεά καύσιμα. Το βιοαέριο είναι μία από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μπορεί να παραχθεί σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

Η οργανική ύλη από την ιλύ των λυμάτων μετατρέπεται με αναερόβια χώνευση σε βιοαέριο, όπως μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να αναβαθμιστεί ενεργειακά και να χρησιμοποιηθεί για τη συνδυαστική παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας σε μονάδες συμπαραγωγής. Παραδοσιακά, η

αναερόβια χώνευση πραγματοποιείται από μια συνεργατική μικροβιακή κοινοπραξία σε τέσσερα διαδοχικά στάδια (την υδρόλυση, την οξεογένεση, την ακετογένεση και τη μεθανογένεση), όπου τα προϊόντα που προκύπτουν από το ένα στάδιο χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως υπόστρωμα για τα επόμενα στάδια και καταλήγουν στην παραγωγή του βιοαερίου. Η συγχώνευση της ιλύος με άλλα οργανικά απόβλητα (όπως τα απόβλητα τροφίμων) είναι μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται τόσο για την επεξεργασία των αποβλήτων όσο και για την ενίσχυση της παραγωγής βιοαερίου. Τα συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών εφαρμόζονται σε μεγάλο βαθμό στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων πλήρους κλίμακας και το δυναμικό της βιομάζας των μικροφυκών ως πρώτη ύλη για τα βιοκαύσιμα είναι πολύ ελκυστικό λόγω της υψηλότερης θερμογόνου δύναμης και του γρήγορου ρυθμού ανάπτυξής τους. (Duque et al.,2021).

Μια άλλη πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για την παραγωγή ενέργειας είναι η τεχνολογία των μικροβιακών κυψελών καυσίμου (MFC). Στην περίπτωση αυτή, το οργανικό φορτίο που υπάρχει στα λύματα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από τα βακτήρια. Οι MFC είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, αλλά η κλιμάκωσή της έχει αντιμετωπίσει ορισμένες προκλήσεις λόγω της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης και των διαδικασιών λειτουργίας, καθώς και άλλων μηχανικών και περιβαλλοντικών παραγόντων (Duque et al.,2021).

Άλλα καύσιμα μπορούν επίσης να ανακτηθούν από τα ρεύματα των αστικών λυμάτων. Το συνθετικό αέριο (syngas) μπορεί επίσης να ληφθεί από την ιλύ των αστικών λυμάτων με τη χρήση διεργασιών κρίσιμης σημασίας κατά την επεξεργασία του νερού. Το υδρογόνο μπορεί επίσης να ανακτηθεί από τα λύματα με βιολογικά μέσα, δηλαδή με μια διεργασία αναερόβιας επεξεργασίας ιλύος δύο σταδίων που περιορίζεται στην υδρόλυση και την οξεογενή ζύμωση από τους φωτοτροπικούς ή/και λιθοτροφικούς μικροοργανισμούς. Το βιοντίζελ είναι ένα άλλο καύσιμο που μπορεί επίσης να παραχθεί από την ιλύ με τη συγκομιδή της πλούσιας σε λιπίδια βιομάζας απομακρύνοντας απλά την επιφάνεια των αντιδραστήρων της επεξεργασίας λυμάτων αποτελώντας έτσι την πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ υψηλής απόδοσης.

Αζωτούχα καύσιμα μπορούν επίσης να ανακτηθούν από τα λύματα. Μια διαδρομή για το σκοπό αυτό είναι η διαδικασία CANDO, η οποία περιλαμβάνει τρία στάδια:

- i. τη νιτροποίηση της NH_4^+ (κατιόν αμμωνίου) σε NO_2^- , (διοξειδίο του αζώτου)
- ii. τη μερική ανοξική αναγωγή του NO_2^- (διοξειδίο του αζώτου) σε N_2O (υποξειδίο του αζώτου) και
- iii. τη χημική μετατροπή του N_2O σε N_2 (διάζωτο) με ανάκτηση ενέργειας (Kehrein et al.,2020).

Η θερμική ενέργεια με τη μορφή θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί από τα λύματα χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνολογίες (όπως τους εναλλάκτες και τις αντλίες θερμότητας) που είναι απλές, αποδεδειγμένες και φιλικές προς το περιβάλλον. Η θερμική ενέργεια από τα λύματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τηλεθέρμανση/ψύξη, στα αγροτικά θερμοκήπια καθώς και για την ξήρανση της ιλύος (Environment and Natural Resources Department, 2022).

Η θερμική ενέργεια που βρίσκεται στα απόβλητα των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων προέρχεται από τη θέρμανση του νερού των νοικοκυριών και των βιομηχανιών και, οριακά, από τη θερμότητα των μικροβιακών αντιδράσεων που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας των λυμάτων. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία των λυμάτων παρουσιάζει σχετικά μικρές εποχιακές διακυμάνσεις σε σύγκριση με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, μπορεί να χρησιμεύσει ως σταθερή πηγή θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί με τη χρήση των αντλιών θερμότητας (Kehrein et al.,2020) . Οι Cecconet et al, (2019) σχεδίασαν ένα σύστημα με εναλλάκτες θερμότητας και αντλίες με το οποίο η ενέργεια που περιέχεται στα λύματα ανακτήθηκε για τη θέρμανση και την ψύξη ενός κτιρίου με εκτιμώμενες ενεργειακές ανάγκες 957 MWh ετησίως, γεγονός που επέτρεψε τη μείωση κατά 59% των τιμών αυτών.

Ωστόσο, όπως και με την επαναχρησιμοποίηση του νερού, οι περιορισμοί στην ανάκτηση και αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας από τα λύματα δεν βασίζονται σε τεχνικές δυσκολίες, αλλά συνδέονται μάλλον με τις αποστάσεις παροχής από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και τις κυβερνητικές πολιτικές. Η πιθανή ασυμφωνία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης από άποψη χρόνου και τοποθεσίας αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα (Kehrein et al.,2020).

Η υδραυλική ενέργεια μπορεί να λάβει τη μορφή της υψομετρικής διαφοράς (ή τη σχετική θέση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μεταξύ της εισροής και της εκροής),

υψομετρικής πίεσης (σε ορισμένες διεργασίες υπό πίεση, όπως είναι η αντίστροφη όσμωση) και της υψομετρικής ταχύτητας (που σχετίζεται με την κινητική ενέργεια του κινούμενου ρευστού). Γενικά, οι υδραυλικοί στρόβιλοι για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση της δυναμικής υδραυλικής ενέργειας που εμπεριέχεται στα λύματα. Παρά την απλή τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση της υδραυλικής ενέργειας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, ορισμένα πιθανά εμπόδια αποτελούν τροχοπέδη για την εκμετάλλευση αυτής της ενέργειας. Τα εμπόδια αυτά περιλαμβάνουν την έλλειψη πλεονάζοντος ύψους, τις εποχιακές διακυμάνσεις του ρυθμού ροής και την αστοχία του στρόβιλου λόγω φραξίματος ή βλάβης από τα σωματίδια που υπάρχουν στα λύματα, ιδίως στα ακατέργαστα λύματα κατά την είσοδο της εγκατάστασης. Ωστόσο, υπό ορισμένες συνθήκες, για παράδειγμα στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων με υψηλό ρυθμό ροής και αποδεκτή υψομετρική διαφορά, η υδροηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει σημαντική ανανεώσιμη πηγή παραγωγής ενέργειας (Environment and Natural Resources Department, 2022).

Η οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης ενός υδροστρόβιλου, όπως και κάθε άλλη οδός ανάκτησης ενέργειας, επηρεάζεται από μη τεχνικούς παράγοντες, όπως είναι οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, οι φόροι, τα οικονομικά κίνητρα και το κόστος σύνδεσης στο δίκτυο. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για να είναι η μονάδα οικονομικά βιώσιμη, απαιτείται υψηλή συχνότητα παροχής (Kehrein et al., 2020).

2.2.4 Πτητικά λιπαρά οξέα-VFAs

Τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs) είναι πολύτιμες ενώσεις με υψηλή ζήτηση στην αγορά και με διάφορες εφαρμογές, συγκεκριμένα ως πρόδρομες ουσίες για τα βιοπλαστικά (π.χ. πολυϋδροξυαλκανοϊκά (PHA)), το βιοαέριο, το βιοϋδρογόνο και την παραγωγή βιοντίζελ, καθώς και για την απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών. Τα VFA είναι λιπαρά οξέα μικρής αλυσίδας με χαμηλό μοριακό βάρος που αποτελούνται από δύο έως έξι άτομα άνθρακα και τα οποία προέρχονται κυρίως από ορυκτά καύσιμα με χημικές οδούς, οδηγώντας σε σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις για την υγεία και το περιβάλλον. Έτσι, η αντικατάσταση αυτών των διεργασιών από βιολογικές διεργασίες, όπως είναι η χρήση καθαρών ή μικτών μικροβιακών καλλιεργειών ή η χρήση ανανεώσιμων πηγών άνθρακα, κερδίζει όλο και μεγαλύτερη προσοχή. Η συγκεκριμένη στρατηγική αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική επιλογή για την παραγωγή των πτητικών λιπαρών οξέων (Duque et al., 2021).

Γενικά, η μετατροπή του οργανικού περιεχομένου των αποβλήτων σε πτητικά λιπαρά οξέα είναι μια αναερόβια διαδικασία που περιλαμβάνει την υδρόλυση και την οξεογένεση (η τελευταία είναι επίσης γνωστή ως οξεογενής ζύμωση ή σκοτεινή ζύμωση). Ωστόσο, αποτελεί κοινή πρακτική ότι η υδρόλυση και η οξεογένεση διεξάγονται ταυτόχρονα σε έναν ενιαίο αναερόβιο αντιδραστήρα. Επιπλέον, οι παράμετροι λειτουργίας, όπως το pH, η θερμοκρασία, ο χρόνος παραμονής, ο ρυθμός οργανικής φόρτωσης, καθώς και τα χρησιμοποιούμενα πρόσθετα έχουν μεγάλη επίδραση στη συγκέντρωση, την απόδοση και τη σύνθεση των VFA που παράγονται από τα απόβλητα (Lee et al., 2014).

Η οδηγία 2008/98/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 19ης Νοεμβρίου 2008, ενθαρρύνει τη χρήση φιλικών προς το περιβάλλον υλικών που παράγονται από τα βιοαπόβλητα, στα οποία μπορεί να περιλαμβάνονται και τα πτητικά λιπαρά οξέα τα οποία παράγονται από τα απόβλητα και τα λύματα. Στο εγγύς μέλλον, η νομοθεσία που θα ρυθμίζει τα προϊόντα από την αξιοποίηση των αποβλήτων και των υγρών αποβλήτων θα εμφανιστεί σίγουρα ως απάντηση στην ανάγκη για βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις (Duque et al., 2021).

2.2.5 Πολυδροξυαλκανοϊκά-PHAs

Μια δυνατότητα για τη βελτίωση των πτητικών λιπαρών οξέων είναι η μετατροπή τους σε πολυδροξυαλκανοϊκά (PHAs), τα οποία είναι πλήρως βιοδιασπώμενοι βιοπολυεστέρες που μπορούν να αντικαταστήσουν τα πολυμερή που προέρχονται από τα ορυκτά καύσιμα. (Kehrein et al., 2020). Εξαιτίας των παρόμοιων ιδιοτήτων τους, τα PHAs αναφέρονται συχνά ως βιοπλαστικά και εφαρμόζονται εκτενώς σε πολλούς τομείς, συγκεκριμένα στον ιατρικό τομέα (π.χ. μηχανική ιστών, βιοεμφυτεύματα, χορήγηση φαρμάκων, χειρουργικές εφαρμογές, ιατρικές συσκευές) και στη ναυτεχνολογία (π.χ. βιοσύνθετα για εφαρμογές σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, όπως στη συσκευασία, τη γεωργία, την αυτοκινητοβιομηχανία και την οικοδομή) (Duque et al., 2021).

Τα πολυδροξυαλκανοϊκά δρουν ως πολυμερή αποθήκευσης του άνθρακα και της ενέργειας για πάνω από 300 είδη βακτηρίων και αρχαίων. Τα είδη αυτά μπορούν να παράγουν και να αποθηκεύουν υψηλές συγκεντρώσεις ενός PHA στο εσωτερικό των κυττάρων τους (Kehrein et al., 2020).

Οι βιομηχανικές διεργασίες για την παραγωγή των πολυδροξυαλκανοϊκών βασίζονται επί του παρόντος σε καθαρές καλλιέργειες και καθαρά υποστρώματα (π.χ. Biomec-Γερμανία, Tianan-Κίνα). Για να γίνει η διαδικασία αυτή πιο αποδοτική και ανταγωνιστική, έχουν αναπτυχθεί διεργασίες χαμηλού κόστους όπως είναι η χρήση των μικτών μικροβιακών καλλιεργειών. Η παραγωγή PHAs από τις μικτές καλλιέργειες από υγρά απόβλητα και άλλα ρεύματα οργανικών αποβλήτων επιτυγχάνεται επί του παρόντος με τη χρήση μιας διαδικασίας που αποτελείται από τρία στάδια:

- (i) το στάδιο της οξεογονικής ζύμωσης,
- (ii) το στάδιο της επιλογής καλλιέργειας και
- (iii) το στάδιο της παραγωγής PHA (Duque et al., 2021).

Στο πρώτο στάδιο το COD ζυμώνεται σε οξεογενή αντιδραστήρα για την παραγωγή των πτητικών λιπαρών οξέων. Στο δεύτερο στάδιο, η βιομάζα που παράγει τα πολυδροξυαλκανοϊκά εγκαθίσταται και διατηρείται σε έναν ξεχωριστό αντιδραστήρα και τέλος στο τρίτο στάδιο η βιομάζα τροφοδοτείται με τα πτητικά λιπαρά οξέα VFAs σε έναν τρίτο αντιδραστήρα μέχρι να μεγιστοποιηθεί η περιεκτικότητα της επιλεγμένης κοινότητας σε PHAs (Kehrein et al., 2020).

Ωστόσο, η απόδοση των πολυδροξυαλκανοϊκών στο υπόστρωμα και η αποτελεσματικότητα της μεταγενέστερης επεξεργασίας οδηγούν σε κόστος 20-80% υψηλότερο από εκείνο της απόδοσης των πετροχημικών πολυμερών παρόμοιας ποιότητας. Η δημιουργία αξίας από τα PHAs που παράγονται από τα υγρά απόβλητα εξαρτάται από την ασφάλεια της προμήθειας των πολυμερών τόσο από άποψη ποσότητας όσο και από άποψη ποιότητας, αλλά μέχρι πρόσφατα καμία μελέτη δεν είχε δώσει σαφή απάντηση στο ερώτημα αν μια διαδικασία μικτής καλλιέργειας θα μπορούσε να εκπληρώσει αυτά τα κριτήρια (Pratt et al., 2019). Τα ανακτώμενα βιοπλαστικά δεν είναι ακόμη ανταγωνιστικά ως προς το κόστος και, ως εκ τούτου, έχουν περιορισμένες δυνατότητες στην αγορά. Η ανάπτυξη νέων οδών αξιοποίησης των PHAs και των εμπορεύσιμων εφαρμογών τους παραμένει πρόκληση για το μέλλον (Kehrein et al., 2020).

Επιπλέον, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στην εμπορική χρήση των πολυδροξυαλκανοϊκών που προέρχονται από τα απόβλητα λόγω της έλλειψης νομοθεσίας. Πρόσφατα τα PHAs δεν θεωρήθηκαν ως φυσικά πολυμερή και, ως εκ τούτου, δεν θεωρήθηκαν κατάλληλα για πλαστικά προϊόντα μίας χρήσης (Οδηγία (ΕΕ) 2019/904

του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 5ης Ιουνίου 2019, για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ορισμένων πλαστικών προϊόντων). Ωστόσο, αναμένεται ότι τα επόμενα χρόνια θα προκύψει η νέα νομοθεσία σχετικά με τις βιώσιμες επιλογές για τα παραδοσιακά πλαστικά όπως για παράδειγμα η εφαρμογή προϊόντων που προέρχονται από απόβλητα και λύματα, στο πλαίσιο του σχεδίου δράσης για την κυκλική οικονομία (Ευρωπαϊκή Επιτροπή 2020) (Duque et al.,2021).

2.2.6 Εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες-EPS

Οι εξωκυτταρικές ή εξωκυττάριες πολυμερείς ουσίες (EPS) είναι υπεύθυνες για τη φυσική και χημική δομή των κόκκων, είναι κολλώδη πολυμερή που εκκρίνονται από τα βακτήρια και αποτελούνται από πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες, φωσφολιπίδια, λιπίδια και χουμικά οξέα, τα οποία προκαλούν κυτταρική προσκόλληση και οδηγούν στο σχηματισμό αερόβιων κόκκων. Τα EPS βρίσκονται στο εξωτερικό της επιφάνειας των βακτηριακών κυττάρων και πιστεύεται ότι η παραγωγή και η σύνθεσή τους ελέγχονται από διάφορες διεργασίες, όπως η ενεργός έκκριση, η αποβολή του υλικού της κυτταρικής επιφάνειας, η κυτταρική λύση και η προσρόφηση από το περιβάλλον (Kehrein et al.,2020) .

Η παρουσία των EPS στην ιλύ συμβάλλει στη συσσωμάτωση των βακτηριακών κυττάρων σε κροκάλες και βιοφίλμ (π.χ. κοκκώδης ιλύς), στην προστασία των βακτηρίων που λειτουργεί ως φραγμός έναντι των επιβλαβών ουσιών, στην ικανότητα δέσμευσης του νερού και στην ενζυμική δράση, όπως η πέψη των σύνθετων μακρομορίων για την απόκτηση των θρεπτικών συστατικών. Επιπλέον, οι εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες θεωρούνται επί του παρόντος ως δυνητικοί πόροι και, ως εκ τούτου, αποτελούν τους βασικούς παράγοντες του παραδείγματος της μετάβασης από τις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων σε εργοστάσια παραγωγής και ανάκτησης υδάτινων πόρων (Lotti et al., 2019).

Οι πρώτες μελέτες σχετικά με την ανάκτηση των εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών που διεξήχθησαν σε βιομάζα της ενεργού ιλύος από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων πλήρους κλίμακας κατέδειξαν ορισμένες ενδιαφέρουσες ιδιότητες αυτών των βιοπολυμερών, όπως είναι η ικανότητα βιοκροκίδωσης και η ικανότητα βιοαπορρόφησης των μετάλλων . Πιο πρόσφατα, αυτές οι ενδιαφέρουσες ιδιότητες έχουν επίσης βρεθεί σε EPS που εξάγονται από την κοκκώδη βιομάζα, όπως η αερόβια κοκκώδης ιλύς (AGS) και οι κόκκοι anammox (Duque et al.,2021).

Τα τελευταία χρόνια, η διεργασία της αερόβιας κοκκώδους ιλύος (AGS) - γνωστή ως διεργασία NEREDA - έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε αρκετές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων πλήρους κλίμακας σε όλο τον κόσμο. Η διεργασία AGS μπορεί να περιγραφεί ως αυτό-ακίνητοποιημένες βακτηριακές κοινότητες. Ο σχηματισμός της μπορεί να πυροδοτηθεί με την ασυνεχή τροφοδοσία εισροής. Η εξαγωγή των EPS από την διεργασία AGS μπορεί να αποτελέσει στο μέλλον μια πιθανή οδό ανάκτησης των πόρων που θα αποδώσουν προϊόντα υψηλής αξίας. Στις Κάτω Χώρες έχουν εκπονηθεί σχέδια για δύο συστήματα επίδειξης πλήρους κλίμακας για εμπορικά βιώσιμη και βιώσιμη ανάκτηση εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών (Kehrein et al.,2020).

Τα συστήματα που βασίζονται στην κοκκώδη ιλύ υιοθετούνται όλο και περισσότερο παγκοσμίως, γεγονός που οφείλεται εν μέρει στις υψηλές επιδόσεις τους και στο μικρό τους μέγεθος. Προηγούμενες μελέτες έχουν αποκαλύψει ότι ένα συγκεκριμένο κλάσμα των εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών, το οποίο ονομάζεται δομικό EPS (sEPS), έχει χαρακτηριστικά παρόμοια με τα αλγινικά πολυμερή και μπορεί να εξαχθεί από τη διεργασία AGS με απόδοση 20-30% κ.β. ως πτητικά στερεά (VS) (Duque et al.,2021). Πρόσφατα, η ονομασία "Kaumera" καταχωρήθηκε ως ονομασία προϊόντος για τις EPS που προέρχονται από τη διεργασία AGS. Ωστόσο, σε περίπτωση υποκατάστασης των αλγινικών πολυμερών με εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες που προέρχονται από τα υγρά απόβλητα, θα πρέπει να παράγονται με χαμηλότερο κόστος από ότι τα συμβατικά αλγινικά, κυρίως επειδή το σημερινό επίπεδο παραγωγής -δηλαδή 30 000 τόνοι ετησίως- εκτιμάται ότι είναι μόνο το 10% του υλικού που μοιάζει με το αλγινικό και μπορεί δυνητικά να ληφθεί από τα υγρά απόβλητα (Kehrein et al.,2020).

Η ανάκτηση των εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών θα οδηγήσει σε μείωση της ποσότητας της ιλύος των αποβλήτων που πρέπει να διατεθεί, προωθώντας έτσι την αλλαγή του παραδείγματος από τις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων σε εργοστάσια παραγωγής και ανάκτησης υδάτινων πόρων. Επιπλέον, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ανακτημένων EPS τα καθιστούν ως πόρους που πρέπει να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερο. Επί του παρόντος, υπάρχουν πολυάριθμες εφαρμογές για τις EPS που ανακτώνται από τα απόβλητα της βιομάζας. Οι EPS θα μπορούσαν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν μεταξύ άλλων στους τομείς της χημικής βιομηχανίας, της γεωργίας ή της οικοδομής (Duque et al.,2021).

Η ικανότητα σχηματισμού υδρογέλης του δομικού των εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών (sEPS) επιτρέπει την πιθανή εφαρμογή του ως βιομηχανική επίστρωση χαρτιού για την ανάπτυξη των αδιάβροχων ιδιοτήτων . Καθώς το sEPS με βάση τη διεργασία AGS έχουν υδρόφιλα χαρακτηριστικά, μπορούν να εφαρμοστούν εμπορικά για τη βελτίωση της σκλήρυνσης του τσιμέντου . Ο μηχανισμός σχετίζεται με τη μείωση της απώλειας υγρασίας από την επιφάνεια των υλικών με βάση το τσιμέντο, η οποία είναι θεμελιώδης στη μηχανική των κατασκευών . Επιπλέον, οι κοκκώδεις EPS με βάση την ιλύ έχουν αποδειχθεί ότι είναι ένα οικονομικά αποδοτικό βιοαπορροφητικό υλικό για διάφορες επεξεργασίες νερού, καθώς είναι ικανές να δεσμεύουν μεταλλικά ιόντα (Ni_2^+ , Pb_2^+ , Cd_2^+) ή οργανικές ενώσεις (Suh and Kim, 2000).

Μια άλλη ιδιότητα του sEPS με βάση την διεργασία AGS αφορά τη δυνατότητά τους να χρησιμοποιηθούν ως επιβραδυντικά φλόγας βιολογικής προέλευσης για τα υφάσματα από λινάρι, λόγω του αποτελεσματικού σχηματισμού του σε άνθρακα . Οι EPS έχουν αυτοσβενόμενες ιδιότητες που τις καθιστούν κατάλληλες για την εφαρμογής τους ως υλικά επικάλυψης. Μέχρι σήμερα, η αγορά επιβραδυντικών φλόγας περιλαμβάνει σχεδόν 31% αλογονωμένα υλικά, παρόλο που έχουν επικίνδυνες επιπτώσεις στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Σε αυτό το πλαίσιο, οι EPS που εξάγονται από την κοκκώδη ιλύ θα μπορούσε να αποτελέσουν μια "πράσινη" βιολογική εναλλακτική λύση, μειώνοντας την κατανάλωση των αλογονωμένων υλικών (Duque et al.,2021).

2.3 Η επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού των λυμάτων

Οι εφαρμογές της επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων στην Ευρώπη περιλαμβάνουν την χρήση των αστικών λυμάτων ως πόσιμο νερό , ως νερό ψύξης στη βιομηχανία και για την άρδευση στη γεωργία, καθώς επίσης και τη χρήση των λυμάτων από τη βιομηχανία των τροφίμων για την άρδευση των αγροτικών και κηπευτικών καλλιιεργειών (Dingemans et al., 2020).

2.3.1 Η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων από τη βιομηχανία τροφίμων για την άρδευση των καλλιεργειών

Ο τομέας των ποτών και τροφίμων έχει αναπόφευκτα αντίκτυπο στο περιβάλλον, καθώς καταναλώνει σημαντικούς πόρους, όπως νερό και ενέργεια με συνέπεια να παράγει απόβλητα και λύματα. Η ευρωπαϊκή βιομηχανία ποτών και τροφίμων είναι υπεύθυνη για περίπου το 1,8% της συνολικής χρήσης νερού στην Ευρώπη. Το νερό αποτελεί το βασικό στοιχείο, ως συστατικό, ως βασικό στοιχείο επεξεργασίας και ως ψυκτικός παράγοντας σε πολλές παραγωγικές διαδικασίες. Τα λύματα είναι τα πιο κοινά απόβλητα και χαρακτηρίζονται από οργανική μόλυνση και γενικά υφίστανται βιολογική επεξεργασία πριν από την απόρριψη (Valta et al., 2015).

Στο δυτικό τμήμα της επαρχίας του Noord-Brabant, κοντά στην ακτογραμμή των νοτιοδυτικών εκβολών της Ολλανδίας, βρίσκεται υπό ανάπτυξη ένα σύμπλεγμα θερμοκηπίων υψηλής τεχνολογίας έκτασης 220εκταρίων. Με τα αποθέματα των γλυκών υπογείων υδάτων να βρίσκονται σε έλλειψη στο γενικά υφάλμυρο σύστημα των υπόγειων υδάτων και τις απορρίψεις στους ποταμούς να είναι ήδη σε χαμηλά επίπεδα, η αξιόπιστη και βιώσιμη παροχή του γλυκού νερού για τους τυπικούς μήνες ζήτησης (Απρίλιος-Αύγουστος) αποτελούσε μια μεγάλη πρόκληση για την ανάπτυξη αυτού του συμπλέγματος θερμοκηπίων. Τη λύση έδωσε το διπλανό εργοστάσιο ζάχαρης, το οποίο παράγει ζάχαρη από ζαχαρότευτλα την περίοδο της συγκομιδής (από Σεπτέμβριο έως Ιανουάριο του κάθε έτους). Τα λύματα (πάνω από 1 Mm³ /έτος) που προέρχονται από αυτό το εργοστάσιο ζάχαρης επεξεργάζονται εκτενώς πριν από τη διάθεσή τους στον ποταμό Dintel. Με την προσθήκη ενός σταδίου στίλβωσης και ενός συνδυασμού μεμβρανών εμβαπτισμένης υπερδιήθησης (UF) και αντίστροφης όσμωσης (RO), ένα μέρος των λυμάτων (έως 0,3 Mm³ /έτος) αναβαθμίζεται σε υψηλής ποιότητας, ουσιαστικά σε απιονισμένο νερό άρδευσης (EC: 0,01 ms /εκ) (Zurbier et al., 2018).

Το εργοστάσιο ζυθοποιίας Bavaria Beer Brewery που βρίσκεται στα νότια της Ολλανδίας αντλεί μεγάλο όγκο υπογείων υδάτων και απορρίπτει τα επεξεργασμένα λύματα σε τοπικά επιφανειακά ύδατα που μεταφέρουν γρήγορα το νερό έξω από την περιοχή. Σε αυτή την περιοχή, ασκείται αυξανόμενη πίεση στη διαθεσιμότητα των αποθεμάτων των

περιφερειακών υπόγειων και επιφανειακών υδάτων με αποτέλεσμα οι τοπικοί αγρότες να επενδύουν σε συστήματα άρδευσης για να διατηρήσουν τη φυτική τους παραγωγή σε περιόδους ξηρασίας. Στο πλαίσιο μιας πιλοτικής μελέτης, έχει εγκατασταθεί ένα σύστημα υπόγειας άρδευσης, με τη χρήση υπόγειων αποχετεύσεων με διασύνδεση μέσω της αποχέτευσης του συλλέκτη και συνδέεται με τη λεκάνη εισόδου που ελέγχει την είσοδο των επεξεργασμένων λυμάτων στο σύστημα αποχέτευσης. Σε αυτή τη μελέτη, τα πλεονάζοντα λύματα διατίθενται στη ζώνη του ριζικού υποστρώματος των φυτών μέσω της υπόγειας άρδευσης με συστήματα αποστράγγισης. Η υπόγεια άρδευση είναι μια μέθοδος άρδευσης που μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική από τις κλασσικές, υπέργειες μεθόδους που χρησιμοποιούν τις εγκαταστάσεις καταιονισμού (Bartholomeus et al., 2017).

2.3.2 Γεωργική Άρδευση

Στις μέρες μας ο μεγαλύτερος όγκος του επεξεργασμένου νερού των λυμάτων χρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Επομένως παρουσιάζονται σημαντικές προοπτικές για την επαναχρησιμοποίηση του νερού τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες. Σε περίπου 44 χώρες παγκοσμίως, 15 εκατομμύρια m³ επεξεργασμένου νερού επαναχρησιμοποιούνται καθημερινά για την άρδευση των καλλιεργειών και επίσης περίπου 20 εκατομμύρια εκτάρια καλλιεργούμενων εκτάσεων αρδεύονται με λύματα σε σχεδόν 50 χώρες (Hashem and Qi, 2021).

Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων για γεωργικές δραστηριότητες αποτελεί μια ευκαιρία για την εξοικονόμηση των αποθεμάτων των υδάτινων πόρων και των συμβατικών λιπασμάτων. Η μετάβαση στη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων ως λίπασμα αντιπροσωπεύει ένα βήμα προς την επίτευξη της βιώσιμης φυτικής παραγωγής, ενώ μειώνει την πίεση όχι μόνο στον τομέα του νερού, αλλά και στην ενέργεια του τομέα των τροφίμων, καθώς η επαναχρησιμοποίηση αποτελεί ευκαιρία για τη μείωση της ζήτησης σε ενεργοβόρα εμπορικά λιπάσματα και σε συμβατική παροχή νερού, η οποία μπορεί επίσης να εμπεριέχει υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια και να ενισχύσει την απόδοση των καλλιεργειών. Στην πραγματικότητα, τα λύματα, είτε αραιωμένα είτε επεξεργασμένα, έχουν υψηλότερη συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών σε σύγκριση με τους συμβατικούς υδάτινους πόρους (Lahlou et al., 2021).

Η διεθνής βιβλιογραφία βρίθει από πολυάριθμες πειραματικές μελέτες τα ευρήματα των οποίων δείχνουν πως τα λύματα επαναχρησιμοποιούνται επιτυχώς για την άρδευση

διαφόρων γεωργικών καλλιεργειών, όπως το μαρούλι, οι ντομάτες, οι πατάτες, τα καρότα, τα ραπανάκια, τα αγγούρια, το σπανάκι, τα κρεμμύδια, ο μάραθος, τα σπαράγγια, οι μελιτζάνες, το μπρόκολο, το λάχανο, το παντζάρι (*Beta vulgaris* L.), το αβοκάντο, τα αρωματικά (γαστρονομικά) βότανα, το σταφύλι, οι μηλιές, τα νεκταρίνια, οι μπανανιές, οι λεμονιές, οι πορτοκαλιές, οι ελιές, το καλαμπόκι, το σιτάρι, το ρύζι, τα φιστίκια, ο ηλιάνθος, η μηδική (το πολυετές τριφύλλι), το σόργο, ο κόκκινος αμάρανθος, το χόρτο Napier, το switchgrass, το *Jatropha curcas* L., η ψάθα (*Typha latifolia*), η καλαμιά (*Arundo donax*) και το καλάμι (*Phragmites australis*), τα άνθη, τα κωνοφόρα, ο ευκάλυπτος και η λεύκα (Ungureanu et al., 2020).

Το 2010, περίπου το 16% της καλλιεργούμενης γης στον κόσμο ήταν εξοπλισμένο με συστήματα άρδευσης, με τα μερίσματα να αντιστοιχούν: 70% σε 15 ασιατικές χώρες, 16% στην Αμερική, 8% στην Ευρώπη, 5% στην Αφρική και 1% στην Ωκεανία. Από όσο γνωρίζουμε, ο FAO δεν έχει δημοσιεύσει μέχρι στιγμής χάρτες με βάση πιο πρόσφατα ή σημαντικά διαφορετικά δεδομένα από αυτά του 2011. Ο FAO ανέφερε ότι από τα 219 εκατομμύρια εκτάρια που αρδεύονταν τότε στις αναπτυσσόμενες χώρες, τα 40 εκατομμύρια εκτάρια ήταν σε άνυδρες και υπέρ-άνυδρες περιοχές, οι οποίες θα μπορούσε να αυξηθούν σε 43 εκατομμύρια εκτάρια έως το 2050. Παγκοσμίως, έως το 2050, ο όγκος του νερού που αποσύρεται για άρδευση θα αυξηθεί σε 2,9 χιλιάδες km³, με το μεγαλύτερο μέρος της καθαρής αύξησης να προκύπτει σε χώρες χαμηλού εισοδήματος και οι καθαρές παγκοσμίως αρδευόμενες εκτάσεις θα συνεχίσει να αυξάνονται κατά τουλάχιστον 20 εκατομμύρια εκτάρια, σχεδόν εξ ολοκλήρου στις αναπτυσσόμενες χώρες όπου υπάρχει έλλειψη γης (Ungureanu et al., 2020).

Διεθνώς, η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα παρουσιάζει αύξηση περίπου 10–29% ετησίως στην Ευρώπη, την Κίνα, τις ΗΠΑ και περίπου 41% στην Αυστραλία. Ο Πίνακας 2.2 δείχνει το σύνολο των λυμάτων που παράγονται, συγκεντρώνονται, υποβάλλονται σε επεξεργασία και χρησιμοποιούνται στην άρδευση σε ορισμένες χώρες. Ο πρωταρχικός στόχος της επεξεργασίας λυμάτων είναι η διασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας ελαχιστοποιώντας τα αιωρούμενα στερεά, την οργανική ύλη και τις επιβλαβείς χημικές και βιολογικές ουσίες στο νερό που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τις καλλιέργειες και την ανθρώπινη υγεία (Wang et al., 2017).

Πίνακας 2.2: Παραγωγή, συλλογή και επεξεργασία λυμάτων σε ορισμένες χώρες σχετικά με τις καλλιεργούμενες εκτάσεις

Country	Total Area (1000 ha)	Agricultural Area (1000 ha)	Total Agricultural Area (%)	Generated Municipal Wastewater ($10^9 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$)	Collected Municipal Wastewater ($10^9 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$)	Treated Municipal Wastewater ($10^9 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$)	Treated Wastewater Used for Irrigation ($10^9 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$)
Australia	774,122	47,307	6.11	-	-	2	0.28
Brazil	851,577	86,589	10.1	-	-	3.1	0.008
China	960,001	122,524	12.7	48.51	31.14	42.37	1.26
Germany	35,738	12,074	33.7	-	5.287	5.213	5.183
India	328,726	169,360	51.5	-	-	4.416	-
Italy	30,134	9121	30.2	3.926	-	3.902	0.087
Jordan	8932	322	3.6	-	0.115	0.113	0.103
Pakistan	79,610	31,252	39.2	3.06	-	-	-
South Africa	121,909	12,913	10.5	3.542	2.769	1.919	-
Turkey	78,535	23,944	30.4	4.297	-	3.483	-
UK	24,361	6279	25.7	4.089	4.048	4.048	-
USA	983,151	157,205	15.9	60.41	47.24	45.35	-
Canada	998,467	50,846	5.09	6.613	5.819	5.632	-
Sweden	44,742	2608	5.82	0.671	-	0.436	-

Πηγή: Hashem and Qi, 2021

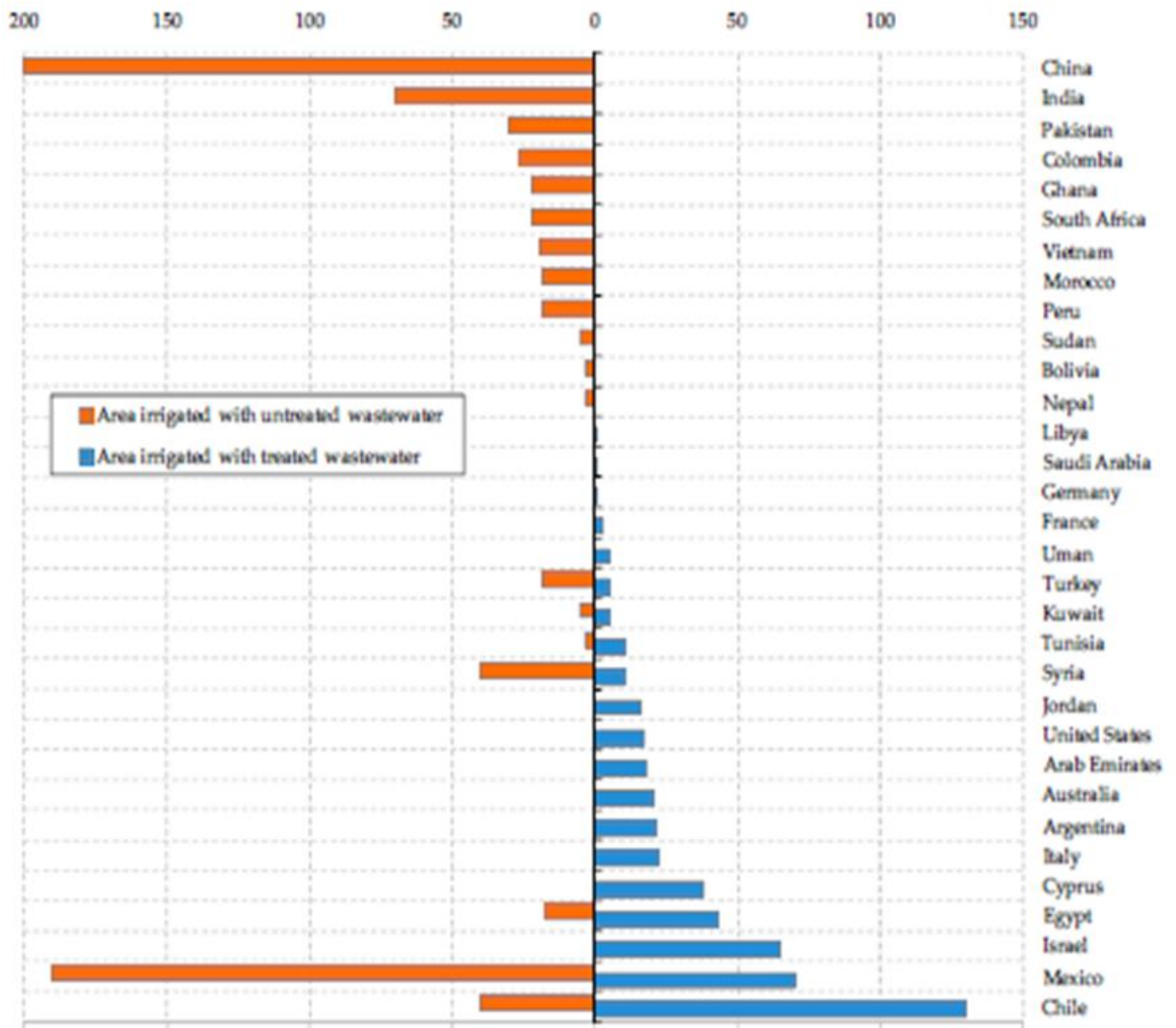
Στην Ευρώπη, μόνο το 2,4% των επεξεργασμένων λυμάτων ($700 \text{ Mm}^3/\text{έτος}$) επαναχρησιμοποιείται κάτι που ισοδυναμεί με 0,5% της ετήσιας απόσυρσης των αποθεμάτων του γλυκού νερού. Σύμφωνα με στοιχεία από το ερευνητικό έργο LIFE+ REQpro, στην Ευρώπη, το 52% του συνολικού όγκου του ανακυκλωμένου νερού χρησιμοποιείται για την άρδευση, με το 32% για τη γεωργική άρδευση και το 20% για την άρδευση τοπίου. Στη Νότια Ευρώπη, όπου η λειψυδρία θα επεκταθεί στο μέλλον, από τις 15 χώρες, μόνο η Ελλάδα, η Ιταλία, η Πορτογαλία και η Ισπανία έχουν ήδη υιοθετήσει εθνικούς κανονισμούς για την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων. Αυτό αποδίδεται εν μέρει στις σημαντικές δαπάνες που σχετίζονται με τα συστήματα επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων, καθώς και στην απουσία ευρέως συμφωνημένων περιβαλλοντικών και υγειονομικών κανονισμών για την επαναχρησιμοποίηση του νερού καθώς υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τους πιθανούς κινδύνους για την υγεία και την ασφάλεια, ιδιαίτερα για τα γεωργικά προϊόντα που αρδεύονται με ανακυκλωμένο νερό. Συνεπώς, θα μπορούσαν να υπάρξουν πιθανές προκλήσεις σχετικά με την απεριορίστη διανομή των

συγκεκριμένων προϊόντων. Εάν ολόκληρος ο όγκος των επεξεργασμένων λυμάτων στην Ευρώπη επαναχρησιμοποιούνταν, θα εξασφάλιζε το 44% των απαιτήσεων της γεωργικής άρδευσης και θα μείωνε το 13% της απόσυρσης των αποθεμάτων του γλυκού νερού από τις φυσικές πηγές (Ungureanu et al., 2020).

Ο FAO αναφέρει πως περίπου το 10% του συνόλου των εκτάσεων που αρδεύονται παγκοσμίως εφαρμόζονται επί του παρόντος ακατέργαστα ή μερικώς επεξεργασμένα λύματα, τα οποία καλύπτουν την επιφάνεια 20 εκατομμυρίων εκταρίων σε 50 χώρες. Ωστόσο, οι Jiménez και Asano (2008) βρήκαν ότι οι συγκεκριμένες περιοχές που αρδεύονται με λύματα διαφέρουν ανάλογα με τη χώρα και την κατάσταση της επεξεργασίας που υπόκεινται τα υγρά απόβλητα. Σχετικά με τον όγκο των υγρών αποβλήτων που προορίζεται για γεωργική χρήση, οι Bixio et al., (2006) διαπίστωσαν πως στην Ευρώπη επαναχρησιμοποιούνται 963 Mm³/έτος μη επεξεργασμένα λύματα. Επίσης, στη Λατινική Αμερική, απορρίπτονται περίπου 400 m³/s ακατέργαστων λυμάτων και στη συνέχεια επαναχρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς σε διάφορες καλλιέργειες.

.Στη μελέτη των Jiménez and Asano (2008), παρουσιάζονται οι κορυφαίες χώρες που επαναχρησιμοποιούν τα ακατέργαστα λύματα ως πηγή νερού για την άρδευση των αγροτικών καλλιεργειών με την Κίνα να βρίσκεται στην πρώτη θέση (με 200 χιλιάδες εκτάρια αρδευόμενα με λύματα), ακολουθούμενη από το Μεξικό (με περίπου 190 χιλιάδες εκτάρια) και την Ινδία (με περίπου 70 χιλιάδες εκτάρια). Μεταξύ των χωρών που αρδεύουν λιγότερα από 50 χιλιάδες εκτάρια με ακατέργαστα λύματα αναφέρονται το Πακιστάν, η Κολομβία, η Χιλή, η Συρία, η Νότια Αφρική, η Γκάνα, η Τουρκία κ.λπ. Σύμφωνα με την ίδια μελέτη, η Χιλή και το Μεξικό καταλαμβάνουν τις δύο πρώτες θέσεις στην κορυφή της λίστας των χωρών που επαναχρησιμοποιούν τα επεξεργασμένα λύματα ως νερό για την άρδευση στη γεωργία ακολουθούμενες από το Ισραήλ, την Αίγυπτο, την Κύπρο, την Ιταλία, την Αργεντινή και άλλες (Γράφημα 2.1).

Γράφημα 2.1: Αγροτικές εκτάσεις γης που αρδεύονται με λύματα ανά χώρα (χιλιάδες εκτάρια)



Πηγή : Jiménez and Asano, 2008.

Ωστόσο, τα λύματα ήδη επαναχρησιμοποιούνται συχνά έμμεσα (de facto) για την άρδευση των αγροτικών καλλιεργειών μαζί με τα επιφανειακά ύδατα στα οποία απορρίπτονται και αραιώνονται τα επεξεργασμένα οικιακά λύματα. Για αρκετές περιοχές της Ευρώπης με γεωργική άρδευση, η επίδραση των λυμάτων στην ποιότητα του νερού της άρδευσης έχει εκτιμηθεί ότι είναι σημαντική. Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει υπολογιστεί ότι περίπου το 65% των αρδευόμενων καλλιεργειών κατάντη των αστικών περιοχών βρίσκονταν σε λεκάνες απορροής που επηρεάζονταν από τις ροές των αστικών λυμάτων. Οι κύριοι παράγοντες για τη σκόπιμη επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων είναι η μείωση

της στάθμης των υπόγειων υδάτων και η αντιμετώπιση των παρατεταμένων ξηρασιών. (Dingemans et al., 2020).

Ωστόσο, εκτός από τα ευεργετικά αποτελέσματα, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί επίσης να επηρεάσει αρνητικά το περιβάλλον και την υγεία, εξαιτίας της παραμονής των ρύπων στα υγρά απόβλητα ακόμη και αφού υποβληθούν σε επεξεργασία διεισδύοντας σε όλους τους ζωντανούς οργανισμούς μέσω της τροφικής αλυσίδας. Η περιβαλλοντική ρύπανση και οι αυξημένοι κίνδυνοι για την υγεία θεωρούνται τα κύρια μειονεκτήματα της επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων (Hashem and Qi, 2021).

2.4 Ανάπτυξη προτύπων ποιότητας για ασφαλή επαναχρησιμοποίηση

Ως εκ τούτου, οι εγκαταστάσεις της επεξεργασίας λυμάτων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ασφαλή επιστροφή του νερού στον κύκλο του νερού. Στην Ευρώπη, η υιοθέτηση της Οδηγίας για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων το 1991 (Οδηγία του Συμβουλίου 91/271/EEC) προώθησε τη βελτίωση της επεξεργασίας των αστικών λυμάτων, αυξάνοντας την κατασκευή εγκαταστάσεων συλλογής και το ποσοστό του πληθυσμού που συνδέεται με αυτές. Στην πραγματικότητα, το 2017, για τις περισσότερες από τις χώρες της ΕΕ-27, τουλάχιστον το 80% του εθνικού τους πληθυσμού ήταν συνδεδεμένο με αστικές μονάδες επεξεργασίας. Ο κύριος σκοπός των μονάδων είναι η παραγωγή νερού υψηλής ποιότητας που θα απορρίπτεται στο περιβάλλον. Για το σκοπό αυτό, η χημική σύνθεση, οι ρύποι που σχετίζονται με την υγεία (π.χ. παθογόνοι μικροοργανισμοί) και οι αισθητικές ιδιότητες του επεξεργασμένου νερού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη μείωση των δυσμενών επιπτώσεων στο περιβάλλον λόγω της απόρριψης των λυμάτων σε αυτό (Duque et al., 2021).

2.4.1 Κατευθυντήριες γραμμές και κριτήρια ποιότητας για την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων στη γεωργία

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) έδωσε τρεις κατευθυντήριες γραμμές το 1973, το 1989 και το 2006 για την ασφαλή χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση ώστε να διασφαλιστεί η προστασία της δημόσιας υγείας από τους κινδύνους που προκύπτουν από τη χρήση των λυμάτων για την άρδευση καθώς και για τη διευκόλυνση

της ορθολογικής χρήσης αυτού του νερού, Το πρώτο έγγραφο δημοσιεύθηκε το 1973 με τίτλο « Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων: οι μέθοδοι επεξεργασίας των λυμάτων και τα μέτρα προστασίας για την υγεία», αργότερα, ο ΠΟΥ ενημέρωσε την προηγούμενη κατευθυντήρια γραμμή του το 1989 εφαρμόζοντας μια πλήρη ανάλυση επιδημιολογικών μελετών. Σε αυτή την έκδοση, με τίτλο «Οδηγίες υγείας για τη χρήση των λυμάτων στη γεωργία και την υδατοκαλλιέργεια», ο ΠΟΥ επικεντρώθηκε στη μικροβιολογική ποιότητα του ανακυκλωμένου νερού για την άρδευση. Επιπλέον, συμπεριλήφθηκαν η αξιολόγηση του κινδύνου και απαραίτητες πληροφορίες για τον προσδιορισμό των ανεκτών επιπέδων κινδύνου για τις κοινωνίες.

Η τελική κατευθυντήρια γραμμή του ΠΟΥ δημοσιεύθηκε το 2006, με τίτλο « Η ασφαλής χρήση των λυμάτων, των εκκρίσεων και του γκρίζου νερού», για να συμβάλει στη διαμόρφωση των κυβερνητικών κατευθυντήριων γραμμών, προτύπων και των κανονισμών σχετικά με τη διαχείριση των λυμάτων για κάθε χώρα σχετικά με τη συγκεκριμένη κατάστασή της. Υπάρχουν σημαντικές βελτιώσεις σχετικά με την αξιολόγηση του κινδύνου σε αυτήν την κατευθυντήρια γραμμή, συμπεριλαμβανομένης της μικροβιολογικής ανάλυσης, με βάση τις πληροφορίες που συλλέγονται από τα παρόντα παθογόνα και τη διαχείριση του κινδύνου για την υγεία. Οι εκτιμήσεις έγιναν με βάση το άτομο ανά έτος (PPY) και το έτος ζωής προσαρμοσμένο στην αναπηρία (DALY) (Shoushtarian and Negahban-Azar,2020) .

Ο FAO εξέδωσε δύο κατευθυντήριες γραμμές για την επαναχρησιμοποίηση του νερού το 1987 και το 1999. Η πρώτη ταξινόμησε το νερό της άρδευσης σε τρεις ομάδες με βάση την αλκαλίωση του εδάφους, την αλατότητα του νερού, την τοξικότητα και τους διαφορετικούς κινδύνους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3. Αυτή η ταξινόμηση αποκαλύπτει τα πιθανά προβλήματα της φυτικής παραγωγής που συνδέονται με τη χρήση των συμβατικών πηγών νερού (Hashem and Qi, 2021).

Στην τελευταία έκδοση, ο FAO χωρίζει την εφαρμογή του ανακυκλωμένου νερού στη γεωργία σε τρεις κατηγορίες:

1. της άρδευσης των καλλιεργειών που τα προϊόντα τους είναι πιθανό να καταναλωθούν ωμά, των αθλητικών γηπέδων και των δημόσιων πάρκων,
2. της άρδευσης των καλλιεργειών όπως δημητριακών, των βιομηχανικών καλλιεργειών, τις καλλιέργειες ζωοτροφών, τα βοσκοτόπια και τα δέντρα και

3. τη τοπική άρδευση των καλλιεργειών της κατηγορίας (B), εάν δεν υπάρχει έκθεση των εργαζομένων και του κοινού.

Επιπλέον, τα επίπεδα των χαμηλότερων ορίων των ιχνοστοιχείων για τη φυτική παραγωγή εισάγονται από τον FAO στην τελευταία του οδηγία το 1999 (Sushtarian and Negahban-Azar, 2020).

Πίνακας 2.3: Κατευθυντήριες γραμμές του FAO για την ποιότητα του νερού της γεωργικής άρδευσης

Possible Irrigation Problem	Units	Degree of Restriction on Use		
		None	Slight to Moderate	Severe
Salinity (Affects Crop Water Availability)				
EC _w ¹	dS m ⁻¹	<0.7	0.7–3	>3
(or)				
Total dissolved solids (TDS)	mg L ⁻¹	<450	450–2000	>2000
Infiltration (affects infiltration rate of water into the soil. Evaluate using EC_w and SAR together)				
SAR	=0–3 and EC	>0.7	0.7–0.2	<0.2
	=3–6	>1.2	1.2–0.3	<0.3
	=6–12	>1.9	1.9–0.5	<0.5
	=12–20	>2.9	2.9–1.3	<1.3
	=20–40	>5	5–2.9	<2.9
Specific Ion Toxicity (affects sensitive crops)				
Sodium (Na)				
surface irrigation	SAR	<3	3–9	>9
sprinkler irrigation	me L ⁻¹	<3	>3	
Chloride (Cl)				
surface irrigation	me L ⁻¹	<4	4–10	>10
sprinkler irrigation	me L ⁻¹	<3	>3	
Boron (B)	mg L ⁻¹	<0.7	0.7–3	>3
Trace Elements				
Miscellaneous Effects (affects susceptible crops)				
Nitrogen (NO ₃ -N) ²	mg L ⁻¹	<5	5–30	>30
Bicarbonate (HCO ₃) (overhead sprinkling only)	me L ⁻¹	<1.5	1.5–8.5	>8.5
pH		Normal Range 6.5–8.4		

¹ EC_w is water electrical conductivity in deci Siemens per meter (dS m⁻¹) at 25 °C. ² NO₃-N means nitrate-nitrogen reported in terms of elemental nitrogen (NH₄-N and Organic-N should be included when wastewater is being tested).

Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) εξέδωσε τέσσερις κατευθυντήριες γραμμές για την επαναχρησιμοποίηση του νερού κατά τα έτη 1980, 1992, 2004 και 2012. Η πρώτη κατευθυντήρια γραμμή εκδόθηκε το 1980, ως έκθεση τεχνικής έρευνας. Αργότερα το 1992, η EPA ενημέρωσε την πρώτη έκδοση συμπεριλαμβάνοντας την τοξικότητα στις καλλιέργειες που αρδεύονταν με λύματα . Αυτή η έκδοση παρασχέθηκε για τους σχεδιαστές έργων και τους κρατικούς ρυθμιστικούς υπαλλήλους προκειμένου να αναπτύξουν συστήματα επαναχρησιμοποίησης του νερού σε διαφορετικές πολιτείες. Η EPA περιέλαβε δύο νέα πεδία στην επικαιροποιημένη κατευθυντήρια γραμμή της το 2004, τα οποία αποτελούνταν από την «έμμεση επαναχρησιμοποίηση πόσιμου» και τη «βιομηχανική επαναχρησιμοποίηση».

Επίσης στο έγγραφο του 2004 αναπτύχθηκαν νέες τεχνολογίες επεξεργασίας και απολύμανσης, σχετικά με παθογόνα και τις αναδύμενες χημικές ουσίες, πληροφορίες για την οικονομία, ερευνητικές δράσεις, εναλλακτικές λύσεις για τη χρηματοδότηση και πηγές δεδομένων . Η τελευταία έκδοση θεωρείται επικαιροποίηση της κατευθυντήριας γραμμής του 2004 και αποσκοπεί στην προώθηση της επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων χρησιμεύοντας ως αξιόπιστη αναφορά για την επαναχρησιμοποίηση του νερού με βάση τη συλλογή παγκόσμιων εμπειριών . Γενικά, η νέα κατευθυντήρια γραμμή είναι αυστηρότερη από την προηγούμενη όσον αφορά τη διατήρηση του περιβάλλοντος και της υγείας (Shushtarian and Negahban-Azar, 2020) .

Οι οδηγίες του ΠΟΥ, της EPA και του FAO θεωρούνται οι βάσεις για τη δημιουργία των κανονισμών σε διάφορες χώρες παγκοσμίως. Επομένως, εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμες εθνικές κατευθυντήριες γραμμές σε καμία χώρα, προτείνονται ως λύση οι οδηγίες των παραπάνω οργανισμών (Hashem and Qi, 2021).

Το πρώτο πρότυπο ISO για την επαναχρησιμοποίηση του νερού εκδόθηκε το 2010 με βάση ένα αίτημα του Ισραήλ για την επαναχρησιμοποίηση νερού στη γεωργία, με τίτλο PC 253 . Το επόμενο πρότυπο ISO για την επαναχρησιμοποίηση του νερού προτάθηκε από την Ιαπωνία για να καθιερωθεί μαζί με το Ισραήλ και την Κίνα το 2015, με τίτλο TC 282. Οι κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ (2006), οι εθνικοί κανονισμοί επαναχρησιμοποίησης του νερού της Αυστραλίας (2006), οι κανονισμοί του Ισραήλ για την άρδευση των αγροτικών προϊόντων (1978, 1999 και 2005), και ο Κώδικας Κανονισμών της Καλιφόρνια (Τίτλος 22, τμήμα 4, κεφάλαιο 3, κριτήρια ανακύκλωσης νερού , 2000) αποτέλεσαν τις

αναφορές για τη θέσπιση του προτύπου ISO . Το πρότυπο ISO αποτελείται από τρεις ενότητες:

1. τη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση,
2. τη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων σε αστική περιοχή και
3. την αξιολόγηση του κινδύνου και της απόδοσης των συστημάτων επαναχρησιμοποίησης νερού.

Στην πρώτη ενότητα, το ISO εισάγει 5 κατηγορίες ποιότητας νερού για τις εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης του νερού για την άρδευση:

- i. επεξεργασμένα λύματα πολύ υψηλής ποιότητας,
- ii. επεξεργασμένα λύματα υψηλής ποιότητας,
- iii. επεξεργασμένα λύματα καλής ποιότητας,
- iv. επεξεργασμένα λύματα μεσαίας ποιότητας και
- v. εκτεταμένα επεξεργασμένα λύματα (Sushtarian and Negahban-Azar, 2020).

Στης 26 Ιουνίου 2023 στην Ευρωπαϊκή Ένωση τέθηκε σε ισχύ η εφαρμογή του κανονισμού (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Μαΐου 2020 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων ο οποίος είναι δεσμευτικός ως προς όλα τα μέρη του και ισχύει άμεσα σε κάθε κράτος μέλος.

Ο κανονισμός θεσπίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για την ποιότητα και παρακολούθηση των υδάτων και έχει ως στόχο την εγγύηση της ασφάλειας του ανακτημένου νερού για τη γεωργική άρδευση διασφαλίζοντας έτσι το υψηλό επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος και της υγείας των ανθρώπων και των ζώων, προάγοντας την κυκλική οικονομία, στηρίζοντας την κλιματική αλλαγή και συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων της οδηγίας 2000/60/ΕΚ μέσω της αντιμετώπισης με συντονισμένο τρόπο σε ολόκληρη την Ένωση, της λειψυδρίας και της επακόλουθης πίεσης που υφίστανται οι υδάτινοι πόροι, συμβάλλοντας επίσης στην αποτελεσματική λειτουργία της εσωτερικής αγοράς (EUR-Lex, 2023).

Ο κανονισμός της ΕΕ για την άμεση επαναχρησιμοποίηση των οικιακών λυμάτων για την άρδευση απαιτεί λεπτομερή κατανόηση των οφελών και των κινδύνων της επαναχρησιμοποίησης για γεωργικές πρακτικές για κάθε πρόγραμμα

επαναχρησιμοποίησης. Ο συγκεκριμένος κανονισμός ορίζει ότι απαιτείται ένα σχέδιο πρόληψης διαχείρισης του κινδύνου από την επαναχρησιμοποίηση του νερού για τις τοποθεσίες αποκατάστασης καθώς και για τη διαχείριση των μικροβιακών και χημικών κινδύνων. Επομένως προτείνονται ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας για διαφορετικούς τύπους γεωργικής επαναχρησιμοποίησης, ανάλογα με την κατηγορία της καλλιέργειας και τη μέθοδο άρδευσης (Dingemans et al., 2020).

Άλλα νομοθετικά πλαίσια που σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση του νερού αναπτύσσονται παγκοσμίως (Πίνακας 2.4) τα οποία επιτρέπουν τη διεθνή ανταλλαγή γνώσης και εμπειρίας. Καθώς νέοι ρυπαντές και νέες τεχνολογίες επεξεργασίας θα συνεχίσουν να εμφανίζονται, μια ολοκληρωμένη ερευνητική ατζέντα στον τομέα της επαναχρησιμοποίησης του νερού θα υποστηρίξει την αποτελεσματική απόκτηση των απαραίτητων γνώσεων με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων προς την κατάλληλη κατεύθυνση. Πρέπει επομένως να αναπτυχθούν φιλικά προς τον χρήστη εργαλεία μαζί με τους τελικούς χρήστες που ενσωματώνουν αυτή τη γνώση και θα επιτρέπουν στους ενδιαφερόμενους να την εφαρμόσουν και σε μη επιστημονικό περιβάλλον (Dingemans et al., 2020).

Πίνακας 2.4: Υφιστάμενα και υπό εξέλιξη νομοθετικά πλαίσια για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του ανακυκλωμένου νερού στη γεωργία, στη βιομηχανία και για ανθρώπινη κατανάλωση

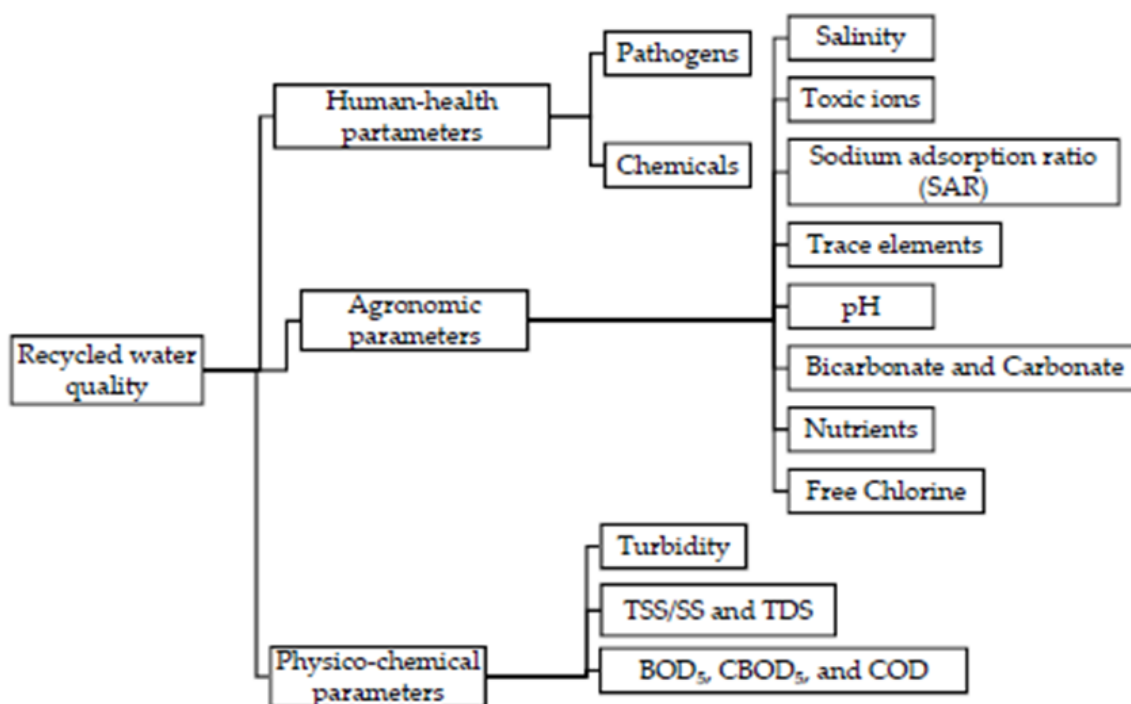
ISO Guidelines 20426, 20468, 20469 (2018)
WHO Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater (2006, revision ongoing)
WHO's Guidance of potable reuse (2017)
USEPA Guidelines for water reuse (2012)
US and California's Title 22 (updated in 2015)
Colorado incorporated water reuse in regulatory framework (no other states or US federal rules)
US federal regulation Food Safety Modernisation Act (2017) (relevant for crop irrigation in Latin America)
Australian Guidelines for Water Recycling (2006)
Oman national guidelines for water reuse
National standards of EU Member States (e.g. Spain Royal Decree 1620/2007)
EU Minimum requirements for water reuse in agriculture (legislation in consultation phase)
United Arab Emirates develops legal framework for water reuse (feasibility studies ongoing)
Saudi Arabia restructured water-related organizations and ministries to clarify responsibilities

Πηγή: Dingemans et al., 2020

2.4.2 Πρότυπα ποιότητας ανακυκλωμένου νερού

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι κανονισμοί και οι κατευθυντήριες γραμμές για την επαναχρησιμοποίηση του νερού για την άρδευση περιλαμβάνουν τρεις κατηγορίες: της ποιότητας του νερού, των διεργασιών της επεξεργασίας και των τεχνολογιών άρδευσης [1]. Η ποιότητα του ανακυκλωμένου νερού μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις ομάδες συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων της ανθρώπινης υγείας, των αγρονομικών παραμέτρων και των φυσικοχημικών παραμέτρων, καθεμία από τις οποίες αποτελείται από πολλές συγκεκριμένες παραμέτρους ποιότητας νερού (Σχήμα 2.2) (Lazarova and Bahri, 2005).

Σχήμα 2.2: Παράμετροι ποιότητας του αγροτικού νερού



Πηγή: Shoushtarian and Negahban-Azar, 2020

Οι παράμετροι της ανθρώπινης υγείας έχουν εξέχουσα σημασία για τις πρακτικές της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης του νερού για γεωργική χρήση. Η υγεία των αγροτών, των εργαζομένων, των καταναλωτών και των ανθρώπων που ζουν κοντά σε αγροκτήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τις ασφαλείς πρακτικές επαναχρησιμοποίησης του νερού στο γεωργικό τομέα. Αυτό το ζήτημα έχει αντιμετωπιστεί κυρίως με τη συμπερίληψη μικροβιακών και χημικών παραμέτρων ποιότητας του νερού που σχετίζονται με την ανθρώπινη υγεία. Οι αγρονομικές παράμετροι έχουν εξέχουσα σημασία στις πρακτικές

ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης του νερού. Η ποιότητα και η απόδοση των καλλιεργειών, η παραγωγικότητα του εδάφους και η υγεία του οικοσυστήματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στις πρακτικές ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης του νερού για γεωργική χρήση. Οι φυσικοχημικές παράμετροι περιλαμβάνουν τη θολερότητα, τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS/SS και TS), το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5), το βιοχημικά ανθρακούχο απαιτούμενο οξυγόνο ($CBOD_5$) και το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) (Shushtarian και Negahban-Azar, 2020).

Επίσης, οι διάφορες παράμετροι όπως είναι το pH, η EC, η αναλογία προσρόφησης νατρίου (SAR), το προσαρμοσμένο SAR (adj SAR), το ποσοστό διαλυτού νατρίου (SSP), το ανταλλάξιμο ποσοστό νατρίου (ESP), το υπολειπόμενο ανθρακικό νάτριο (RSC) και η πιθανή παρουσία τοξινών χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού που θα χρησιμοποιηθεί στη γεωργική άρδευση. Επιπλέον, υπάρχουν και άλλοι δείκτες ποιότητας που επιδρούν στην ποιότητα του εδάφους και επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών, συμπεριλαμβανομένων των βιολογικών δεικτών (όπως τα περιττώματα ή τα ολικά κολοβακτηρίδια (FC ή TC)), το *Escherichia coli*, τα αυγά ελμινθών, τα επίπεδα των θρεπτικών συστατικών, η συγκέντρωση βορίου, η περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα και η παρουσία φυτοτοξικών ενώσεων (Hashem and Qi, 2021).

Ως εκ τούτου, προτείνεται ο συνεχής και τακτικός έλεγχος αυτών των παραμέτρων, καθώς ασκούν επιρροή στο έδαφος, στα φυτά και στο περιβάλλον γενικότερα. Όπως αναφέρθηκε από τον FAO (2003), οι βασικές παράμετροι του νερού που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αξιολόγηση και τη ρύθμιση της ποιότητας της άρδευσης είναι η αλατότητα, η αλκαλικότητα, τα επίπεδα των θρεπτικών ουσιών στα επεξεργασμένα λύματα, η περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα και η ειδική τοξικότητα ιόντων.

2.4.3 Πρόσφατες εξελίξεις, τρέχουσα κατάσταση και η νομοθεσία στην Ελλάδα

Σύμφωνα με το άρθρο 17 της οδηγίας 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων, κάθε κράτος μέλος οφείλει να συντάσσει κάθε δύο χρόνια την αντίστοιχη έκθεση εφαρμογής, στην οποία περιγράφονται η συλλογή, η επεξεργασία και η διάθεση των σχετικών δεδομένων για τα υγρά απόβλητα. Με βάση την πιο πρόσφατη έκθεση του 2017, η οποία αναφέρεται στο έτος 2014, το 91% του πληθυσμού της χώρας είναι συνδεδεμένο με 254 αστικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίες επεξεργάζονται σχεδόν $1,74 \times 10^6$ m³/ημέρα. Οι μονάδες αυτές παρέχουν δευτερογενή

βιολογική επεξεργασία, με το 83% να παρέχει βιολογική απομάκρυνση αζώτου, το 57% να παρέχει (επιπλέον) βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου και το 93% να παρέχει (τριτογενή) απολύμανση των λυμάτων.

Το 2012, δημιουργήθηκε μια Εθνική Βάση Δεδομένων από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, με την πρωτοβουλία και υποστήριξη της Γενικής Διεύθυνσης Περιφερειακής και Αστικής Πολιτικής Ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η εν λόγω βάση δεδομένων έχει αναβαθμιστεί και εμπλουτίζεται έκτοτε, παρουσιάζοντας όλες τις σχετικές πληροφορίες σε ένα προηγμένο Γεωγραφικό Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), εύκολα προσβάσιμο από κάθε ενδιαφερόμενο μέσω της αντίστοιχης ιστοσελίδας ("SSW-Wastewater Treatment Plants"). Στο πλαίσιο της βάσης δεδομένων, αποθηκεύονται και βρίσκονται διαθέσιμες σε ηλεκτρονική μορφή συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με τη τοποθεσία, τη δυναμικότητα, την απόδοση, τα μέσα διάθεσης ή επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων και της ύλης, καθώς και τους Περιβαλλοντικούς Όρους κάθε μονάδας επεξεργασίας (Prochaska and Zouboulis, 2020).

Η διαχείριση των αστικών λυμάτων ρυθμίζεται από την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ «για την επεξεργασία και διάθεση των αστικών λυμάτων», όπως τροποποιήθηκε από την Οδηγία 98/15/ΕΕ. Στην Ελλάδα, η εν λόγω οδηγία έχει ενσωματωθεί στο εθνικό δίκαιο μέσω της Κ.Υ.Α. 5673/400/1997 (Φ.Ε.Κ. 192B/14-3-1997) με τίτλο «Μέτρα και Όροι επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων». Η Οδηγία περιγράφει την απαραίτητη τεχνική υποδομή που πρέπει να διαθέτουν οι πόλεις και οι οικισμοί στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τα δίκτυα αποχέτευσης και τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Αυτό εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος του πληθυσμού και τον τύπο του δέκτη νερού στον οποίο απελευθερώνονται τα επεξεργασμένα λύματα. Η οδηγία θέτει επίσης όρια για την ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων που πρέπει να πληρούν οι εκροές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Επιπλέον, καθορίζει συγκεκριμένες προθεσμίες για την ολοκλήρωση της απαιτούμενης υποδομής συλλογής, επεξεργασίας και διάθεσης αστικών λυμάτων για τους οικισμούς που εμπίπτουν στις διατάξεις της (ΥΠΠΕΝ, 2023).

Επίσης, στις 8 Μαρτίου 2011, τέθηκε σε ισχύ η υπ' αριθμόν 145116/2011 Κοινή Υπουργική Απόφαση για τον καθορισμό μέτρων, όρων και διαδικασιών για την

επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις η οποία όμως τροποποιήθηκε με νέα ΚΥΑ υπ' αριθμόν 191002/2013 στις 9 Σεπτεμβρίου 2013.

Ο σκοπός της παρούσας απόφασης είναι:

- A. η προώθηση της αξιοποίησης των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για την εξοικονόμηση των υδατικών πόρων, η οποία θα συμβάλλει σημαντικά στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων από:
- i. την προϊούσα λειψυδρία και ξηρασία στην περιοχή της Μεσογείου, καθώς και την αναμενόμενη επιδείνωση του προβλήματος λόγω της κλιματικής αλλαγής, όπως και από
 - ii. την έντονη ταπείνωση ή/και υφαλμύριση των υπόγειων υδροφορέων σε ορισμένες περιοχές της χώρας από την υπεράντληση, την προϊούσα λειψυδρία και την είσοδο του θαλάσσιου μετώπου σε παραλιακές περιοχές,
- B. και επίσης η βελτίωση του υδατικού ισοζυγίου μέσω της τροφοδότησης των υπογείων υδροφορέων.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων είναι η διασφάλιση της Δημόσιας Υγείας (ΕΛΙΝΥΑΕ, 2023)

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

3.1 Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των επεξεργασμένων λυμάτων στη γεωργική άρδευση

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων για τη γεωργική άρδευση προσφέρει πολυάριθμα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και παρουσιάζει επίσης ορισμένες προκλήσεις. Οι επιπτώσεις ποικίλλουν ανάλογα με την ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων και άλλους εξωτερικούς παράγοντες. Η ποιότητα των υγρών αποβλήτων καθορίζεται από τη φυσικοχημική και μικροβιακή τους σύνθεση (Qadir and Scott, 2010). Σύμφωνα με τους Elgallal et al. (2016), το επίπεδο των επιπτώσεων επηρεάζεται από τη χημική σύνθεση και τη συγκέντρωση των λυμάτων, καθώς και από τη διαλυτότητα και την τοξικότητα των συστατικών τους. Πρόσθετοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι ο ρυθμός και η συχνότητα της άρδευσης, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και οι κλιματικές συνθήκες.

3.1.1 Οι επιπτώσεις στο έδαφος

3.1.1.1 Η παροχή των θρεπτικών συστατικών

Η άρδευση με υγρά απόβλητα συνεισφέρει σημαντικές ποσότητες βασικών μακρο- και μικροθρεπτικών συστατικών στο έδαφος. Τα υγρά απόβλητα αποτελούν πολύτιμο πόρο καθώς περιέχουν άζωτο (N), κάλιο (K), φώσφορο (P), ψευδάργυρο (Zn), σίδηρο (Fe), μαγγάνιο (Mn) και χαλκό (Cu) λόγω της σύνθεσής τους (Qadir και Scott, 2010). Διάφορες μελέτες έχουν δείξει μια αξιοσημείωτη αύξηση στα μακρο- και μικροθρεπτικά συστατικά του εδάφους μετά την εφαρμογή υγρών αποβλήτων για τους σκοπούς της άρδευσης. Οι Ganjegunte et al. (2017) παρατήρησαν βελτίωση της περιεκτικότητας του εδάφους σε θρεπτικά συστατικά ύστερα από μια εξαετή περίοδο άρδευσης και ανέφεραν αύξηση τόσο των νιτρικών όσο και του καλίου. Η συγκέντρωση των νιτρικών στο εδαφικό διάλυμα πριν από τη μελέτη κυμαινόταν από 269 έως 321 mg/L και αυξήθηκε σε ένα εύρος 910

έως 2271 mg/L μετά τη μελέτη. Αύξηση από 59 mg/L σε 195 mg/L παρατηρήθηκε επίσης για το κάλιο.

Πολλοί ερευνητές κατέδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε αποτελεσματικό φώσφορο (P), ολικό άζωτο (N) και ολικό κάλιο (K) αυξήθηκε σημαντικά στα εδάφη που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα λύματα σε σύγκριση με τα εδάφη που είχαν αρδευτεί με γλυκό νερό. Οι Xu et al. (2010) ανέφεραν ότι το ολικό άζωτο (N) αυξήθηκε στο ανώτερο στρώμα του εδάφους όταν αρδεύτηκε με υγρά απόβλητα για οκτώ και 20 χρόνια. Παρόμοια τάση παρατηρήθηκε με τον διαθέσιμο φώσφορο (P) και το διαθέσιμο κάλιο (K). Ωστόσο, σε ένα πείραμα που διεξήχθη από τους Peng et al. (2006) παρατήρησαν ότι δεν υπήρξε εμφανής αύξηση του αζώτου, του φωσφόρου ή του καλίου στο έδαφος μετά από βραχυπρόθεσμη άρδευση με επεξεργασμένα λύματα. Αυτά τα αντιφατικά αποτελέσματα μπορεί να οφείλονται στη συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών στα επεξεργασμένα λύματα ή στη χρονική διάρκεια που χρησιμοποιήθηκε αυτός ο τύπος νερού για την άρδευση.

Πάνω από το 90% της παραγωγής των τροφίμων στον κόσμο προέρχεται από το έδαφος, είτε άμεσα είτε έμμεσα (FAO, 2015). Οποιαδήποτε μείωση των επιπέδων στα θρεπτικά συστατικά του εδάφους μπορεί να επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στη φυτική παραγωγή (Morgan and Connolly, 2013). Η διαθεσιμότητα των απαραίτητων θρεπτικών συστατικών στα λύματα είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών καθώς υποστηρίζουν τις διεργασίες που συμβάλλουν στη φυσιολογική και μορφολογική ανάπτυξη των φυτών (Ofori et al., 2021).

Το άζωτο παίζει καθοριστικό ρόλο στην υποστήριξη των φυσιολογικών και βιοχημικών διεργασιών των φυτών. Βοηθά στην προώθηση της ανάπτυξης σε διάφορα μέρη του φυτού και επίσης επηρεάζει την απορρόφηση του φωσφόρου και του καλίου. Στο έδαφος, το άζωτο βρίσκεται τόσο σε οργανικές (πρωτεΐνες, αμινοξέα, αμινοσάκχαρα κ.λπ.) όσο και σε ανόργανες πηγές (αμμώνιο, νιτρώδη, νιτρικά κ.λπ.), με την οργανική μορφή να είναι πιο κοινή. Ωστόσο, η ανόργανη μορφή είναι πιο σημαντική όταν πρόκειται για την απορρόφηση των καλλιεργειών και τη γονιμότητα του εδάφους. Η διασφάλιση της παρουσίας αζώτου είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη βασικών γενετικών φορέων και βιολογικών μορίων (Aczel, 2019).

Το άζωτο αποτελεί το σημαντικότερο συστατικό της χλωροφύλλης, της πράσινης χρωστικής ουσίας στην οποία βασίζονται τα φυτά για να απορροφούν το φως και συνεισφέρει στον μηχανισμό της φωτοσύνθεσης. Κατά συνέπεια, παίζει ζωτικό ρόλο στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, η οποία είναι απαραίτητη για την παραγωγή τροφής στα φυτά. Ωστόσο, όταν υπάρχει έλλειψη αζώτου στο έδαφος (γνωστή ως ανεπάρκεια αζώτου), μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στις καλλιέργειες, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης των καλλιεργειών. Τα ανεπαρκή επίπεδα αζώτου στο έδαφος μπορεί να οδηγήσουν σε αναστολή της ανάπτυξης, κιτρίνισμα των φύλλων (χλώρωση), χαμηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες στους σπόρους, πρόωρη ωρίμανση των καλλιεργειών και μειωμένη αποτελεσματικότητα στη χρήση του ηλιακού φωτός για την ανάπτυξη (Quemada et al., 2016).

Η εφαρμογή των επεξεργασμένων λυμάτων στην άρδευση των καλλιεργειών ως εναλλακτική πηγή λιπάσματος έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την περιεκτικότητα του εδάφους σε άζωτο, καθώς χρησιμεύει ως πολύτιμη πηγή ανόργανου αζώτου (ειδικά αμμωνίου και νιτρικού άλατος). Κατά συνέπεια, η χρήση υγρών αποβλήτων μπορεί να συμβάλει στην αυξημένη διαθεσιμότητα αζώτου στο έδαφος. Επιπλέον, η χρήση των υγρών αποβλήτων για άρδευση επιταχύνει την ανοργανοποίηση και προωθεί την πρόσληψη αζώτου από τις καλλιέργειες (Quemada et al., 2016). Έχει παρατηρηθεί ότι η απουσία πρόσθετης παροχής αζώτου στο έδαφος θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει στην απώλεια του ενός τρίτου της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων (Aczel, 2019).

Το αμμώνιο και τα νιτρικά άλατα είναι οι κύριες μορφές συστατικών που απορροφώνται από τα φυτά, εκτός από ορισμένες οργανικές ενώσεις του αζώτου. Πιστεύεται γενικά ότι τα νιτρικά είναι ένα ενδιάμεσο προϊόν κατά τη μετατροπή του αμμωνίου σε νιτρικό στο έδαφος, όπου η μετατροπή των νιτρικών σε νιτρικά άλατα είναι σημαντική, καθώς οι σχετικά μικρές ποσότητες μπορεί να έχουν τοξική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών. Αυτά τα ενδιάμεσα προϊόντα σύνθετων οργανικών ουσιών του αζώτου μπορούν να απορροφηθούν από τα φυτά. Η διατροφή με οργανικό άζωτο μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του φυτικού προϊόντος και τον μεταβολισμό των φυτών. Ομοίως, υπό υπερβολική εφαρμογή αζώτου (από λίπασμα, λύματα ή άλλη πηγή), τα λαχανικά μπορούν να συσσωρεύσουν υψηλά επίπεδα νιτρικών και, όταν καταναλώνονται από έμβια όντα, μπορεί να προκληθούν σοβαροί κίνδυνοι για την υγεία. Επίσης μια άλλη επίδραση είναι η

συσσώρευση ανόργανου Ν στο έδαφος που μπορεί να επηρεάσει τη βιοαποικοδόμηση των ενώσεων του άνθρακα (Jaramillo and Restrepo, 2017).

Ο φώσφορος παίζει καθοριστικό ρόλο στην υποστήριξη της ανάπτυξης και της παραγωγικότητας των καλλιεργειών ως απαραίτητο θρεπτικό συστατικό. Στο έδαφος, δεσμεύεται κυρίως μέσω διεργασιών όπως η προσρόφηση, με αποτέλεσμα μόνο ένα μικρό μέρος του να είναι απορροφήσιμο από τις καλλιέργειες. Λόγω της συμμετοχής του σε διάφορες βιολογικές διεργασίες των φυτών, ο φώσφορος θεωρείται μία τις σημαντικότερες θρεπτικές ουσίες στο έδαφος (Delgado et al., 2016). Είναι ζωτικής σημασίας για σημαντικές λειτουργίες όπως η βλάστηση των σπόρων, ο μεταβολισμός των υδατανθράκων, η κυτταρική διαίρεση και η ανάπτυξη των ριζών και των στελεχών στα φυτά. Επιπλέον, οι καλλιέργειες χρησιμοποιούν τον φώσφορο για να δημιουργήσουν μόρια υψηλής ενέργειας για τον σχηματισμό της φωτοσύνθεσης και να διατηρήσουν τις δομές της μεμβράνης. Είναι επίσης βασικό συστατικό των φυτικών πρωτεϊνών, των νουκλεϊκών οξέων και των συνενζύμων και παίζει κρίσιμο ρόλο στις μεταβολικές αντιδράσεις, ιδιαίτερα στις αντιδράσεις της φωσφορυλίωσης. Τα φυτά απορροφούν κυρίως την ανόργανη μορφή του διόξινου φωσφορικού άλατος, η οποία είναι άμεσα διαθέσιμη σε αυτά (Ofori et al., 2021).

Η ανεπάρκεια φωσφόρου ενδέχεται να περιορίσει τη φωτοσύνθεση και να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ικανότητα των ψυχανθών να εξάγουν αποτελεσματικά το άζωτο από το έδαφος. Καθώς ο φώσφορος είναι πολύ ευκίνητος στα φυτά, τα αρχικά σημάδια ανεπάρκειας παρατηρούνται στα γηραιότερα φύλλα, τα συμπτώματα των οποίων μπορεί να επιδεινωθούν πρόωρα. Η παρουσία μιας μωβ απόχρωσης στα φύλλα, που προκαλείται από τη συσσώρευση των χρωστικών της ανθοκυανίνης, χρησιμεύει ως δείκτης των ανεπαρκών επιπέδων φωσφόρου στα φυτά (Delgado et al., 2016). Επομένως η εφαρμογή των λυμάτων στο έδαφος έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει την περιεκτικότητα σε φώσφορο και να προωθήσει την ανάπτυξη των φυτών. Αυτή η πρακτική μπορεί να αυξήσει αποτελεσματικά τη διαθεσιμότητα του φωσφόρου για απορρόφηση από τα φυτά και να αποτρέψει οποιαδήποτε πιθανή ανεπάρκεια. Επιπλέον, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση μπορεί να θεωρηθεί ως μια έμμεση μέθοδος ανακύκλωσης του φωσφόρου του εδάφους (Ofori et al., 2021).

Το κάλιο, παρομοίως με τον φώσφορο, θεωρείται θρεπτικό στοιχείο του εδάφους το οποίο δεν κινείται εύκολα. Υπάρχουν τρεις μορφές καλίου στο έδαφος: το διαλυτό, το ανταλλάξιμο και το μη ανταλλάξιμο. Οι μορφές του καλίου που είναι διαθέσιμες για χρήση από τα φυτά είναι οι διαλυτές και ανταλλάξιμες μορφές, οι οποίες απορροφώνται ενεργά από τα φυτά στην κατιονική τους μορφή. Μόλις απορροφηθούν, κατανέμονται στους νεαρούς ιστούς του φυτού (Delgado et al., 2016). Το κάλιο έχει διάφορες επιδράσεις στις καλλιέργειες, όπως να ενισχύει την ικανότητά τους να αντιστέκονται στις ασθένειες και να αντέχουν το στρες που προκαλείται από την ξηρασία. Παίζει επίσης ρόλο στη ρύθμιση της όσμωσης και στον έλεγχο της λειτουργίας των στομάτων. Επιπλέον, υποστηρίζει έμμεσα τη φωτοσύνθεση και συμμετέχει στην ενεργοποίηση και την μεταφορά σημαντικών ενζύμων. Ως το πιο άφθονο κατιόν που βρίσκεται στα φυτικά κύτταρα, το κάλιο βοηθά στη διατήρηση της ισορροπίας των κυτταρικών ανιόντων. Η ανεπαρκής διαθεσιμότητα καλίου προκαλεί συμπτώματα όπως χλώρωση και μαύρισμα των φύλλων καθώς και καθυστέρηση στην ανάπτυξη (Morgan and Connolly, 2013).

Τα μικροθρεπτικά συστατικά, ωστόσο, χρειάζονται σε μικρότερες ποσότητες και χρησιμεύουν ως ενεργοποιητές και καταλύτες για τα ένζυμα. Παίζουν ζωτικό ρόλο σε διαδικασίες όπως η δέσμευση του αζώτου, η σύνθεση της χλωροφύλλης, η ρύθμιση των συστημάτων οξειδωσης-αναγωγής και των μεταβολικών δραστηριοτήτων. Από τα δεκαεπτά θρεπτικά συστατικά που συμβάλλουν στην ανάπτυξη και απόδοση της φυτικής παραγωγής, τα δεκατέσσερα μπορούν να ληφθούν από το έδαφος. Κατά συνέπεια, η συμπλήρωση θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος μέσω της άρδευσης με υγρά απόβλητα βοηθά σημαντικά στη διατήρηση της γεωργίας διασφαλίζοντας ότι τα κρίσιμα θρεπτικά συστατικά διατίθενται για απορρόφηση από τα φυτά (Ofori et al., 2021).

3.1.1.2 Οργανικός άνθρακας/ύλη

Η παρουσία οργανικού άνθρακα/ύλης στα λύματα είναι αυξημένη σε σχέση με άλλες πηγές του γλυκού νερού, όπως για παράδειγμα τα υπόγεια ύδατα. Ως αποτέλεσμα, η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων αποτελεί πολύτιμο και περισσότερο βιώσιμο πόρο οργανικού άνθρακα για τα εδάφη, προάγοντας έτσι την ανάπτυξη των φυτών. Οι Galavi et al. (2010) διαπίστωσαν ότι το έδαφος που ποτίζεται με υγρά απόβλητα παρουσίασε αύξηση στο ποσοστό του οργανικού άνθρακα/ύλης σε σύγκριση με το έδαφος που δεν υποβλήθηκε σε επεξεργασία. Παρόμοια ευρήματα έχουν παρατηρηθεί και σε άλλες μελέτες (Becerra-Castro et al., 2015).

Η παρουσία του οργανικού άνθρακα στο έδαφος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα βασικά χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως είναι η σταθερότητα, το χρώμα και η ικανότητα συγκράτησης των θρεπτικών ουσιών και η ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών. Επιπλέον, η οργανική ύλη παίζει κρίσιμο ρόλο στην αποθήκευση των θρεπτικών ουσιών και στη διατήρηση της υγιούς δομής του εδάφους. Μέσω της δημιουργίας και της σταθεροποίησης των συσσωματωμάτων (άμμος, ασβέστης και άργιλος), η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία συμβάλλει στην ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί το νερό, επηρεάζοντας τις ιδιότητες αποστράγγισης και την αντίσταση στη συμπίεση (Julca-Otiniano et al., 2006).

Η οργανική ουσία αποτελεί επίσης πηγή σημαντικών μακρο- και μικροθρεπτικών συστατικών (N, P και S) που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών, συμβάλλοντας στην ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) και, κατά συνέπεια, στη γονιμότητα του εδάφους. Ανάλογα με την ποσότητα της οργανικής ύλης που παρέχεται, διάφορες μελέτες έχουν αναφέρει την αύξηση της περιεκτικότητας του συνολικού οργανικού άνθρακα (TOC) και του αζώτου (N) στα εδάφη που αρδεύονται με οικιακά λύματα. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί επίσης αύξηση της διαθεσιμότητας της οργανικής ύλης και κατά συνέπεια, μπορεί να ευνοηθεί η παρουσία συγκεκριμένων πληθυσμών βακτηρίων στο έδαφος. Μεταξύ 40% και 70% των βακτηρίων του εδάφους συνδέονται με σταθερά συσσωματώματα (σωματίδια αργίλου) (Jaramillo and Restrepo, 2017).

Σύμφωνα με μια ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε από τον Murphy (2015), η αύξηση της οργανικής ύλης του εδάφους βελτιώνει τη συμπιεστότητα, τη διαβρωσιμότητα και τη ρυθμιστική ικανότητα του εδάφους έναντι της οξίνισης ενισχύοντας επίσης την ανακύκλωση και της διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων (άζωτο, φώσφορος, θείο).

3.1.1.3 Αυξημένος λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR)

Ο λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR) υποδεικνύει την καταλληλότητα του νερού που θα χρησιμοποιηθεί για την άρδευση του εδάφους. Προσδιορίζεται αξιολογώντας τα επίπεδα των ιόντων ασβεστίου, του νατρίου και του μαγνησίου στο έδαφος ή στο νερό άρδευσης (Oster et al., 2016). Το SAR συνδέεται στενά με την αναλογία του ανταλλάξιμου νατρίου, καθιστώντας τον έναν πολύτιμο δείκτη νατρίωσης του εδάφους. Στην ουσία, το SAR καταδεικνύει μόνο την επίδραση των ιόντων νατρίου στη σύνθεση του εδάφους. Έρευνες έχουν δείξει ότι τα εδάφη που αρδεύονται με υγρά απόβλητα έχουν υψηλότερες τιμές SAR σε σύγκριση με εκείνα που αρδεύονται με γλυκό νερό (Ofori et al., 2021). Αυτή η αύξηση

έχει αποδοθεί από ορισμένους ερευνητές στη σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε νάτριο ή SAR στο νερό άρδευσης (Ganjegunte et al., 2017). Η αλατότητα αξιολογείται λαμβάνοντας υπόψη τους δείκτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και SAR, οι οποίοι και οι δύο υποδεικνύουν την έκταση του κορεσμού νατρίου και τα προβλήματα διήθησης στο έδαφος.

Στη μελέτη που διεξήχθη από τους Farhadkhani et al. (2018) για τη διερεύνηση των πιθανών επιπτώσεων από τη χρήση των δευτερογενώς επεξεργασμένων λυμάτων για αρδευτικούς σκοπούς, τα ευρήματα έδειξαν ότι η εφαρμογή τους δεν είχε σημαντικές δυσμενείς επιπτώσεις στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους. Εξαιρέση αποτέλεσαν τα ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα EC και SAR στα δείγματα του εδάφους που εφαρμόστηκαν τα επεξεργασμένα λύματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι παράγοντες όπως η σύνθεση των λυμάτων, ο τύπος και η συχνότητα άρδευσης, ο τύπος του εδάφους και οι γεωργικές πρακτικές μπορούν να επηρεάσουν το SAR των εδαφών που αρδεύονται με λύματα (Hashem and Qi, 2021).

Η παρουσία υψηλών επιπέδων SAR στο νερό της άρδευσης ενδέχεται να έχει αρνητικές συνέπειες τόσο στις καλλιέργειες όσο και στο έδαφος. Όταν τα επίπεδα SAR είναι αυξημένα, τα φυτά μπορεί να εμφανίσουν ανεπάρκεια ασβεστίου λόγω αύξησης του νατρίου στο μέσο της ρίζας, το οποίο με τη σειρά του περιορίζει τη διαθεσιμότητα ασβεστίου. Επιπλέον, η άρδευση των καλλιεργειών με λύματα έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την περιεκτικότητα σε νάτριο του εδάφους, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της πρόσληψης του διαλυμένου οργανικού άνθρακα. Αυτή η μείωση μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη γονιμότητα του εδάφους και να εμποδίσει τις αποδόσεις των καλλιεργειών (Ofori et al., 2021).

Μια ιδιότητα του εδάφους που ενέχει τον κίνδυνο βλάβης λόγω του υψηλού SAR είναι η δομική σταθερότητα. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι η χαλάρωση και η μετακίνηση του αργίλου σε υψηλές τιμές SAR μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της δομικής σταθερότητας του εδάφους. Επιπλέον, η αύξηση των επιπέδων SAR μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διαπερατότητας του εδάφους ή της υδραυλικής αγωγιμότητας (Oster et al., 2016). Αυτό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ικανότητα του εδάφους να παρέχει αποτελεσματικά το νερό στη ζώνη των ριζών, προκαλώντας έτσι τον θάνατο των φυτών, ειδικά για τα φυτά με βαθιές ρίζες. Επιπλέον, η διείσδυση του νερού μέσω του προφίλ του εδάφους μπορεί να

παρεμποδιστεί, επηρεάζοντας έτσι δυσμενώς την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία (Ofori et al., 2021).

3.1.1.4 Αλάτωση εδάφους

Η αλάτωση του εδάφους είναι η διαδικασία της συσσώρευσης των υδατοδιαλυτών ειδών ή των αλάτων στο έδαφος. Αυτά τα διαλυτά είδη περιλαμβάνουν κατιόντα όπως το νάτριο, το μαγνήσιο, τον σίδηρο και το ασβέστιο, καθώς και ανιόντα όπως το χλώριο (Rojas et al., 2016). Η αλάτωση αποτελεί έναν σημαντικό προσδιοριστικό παράγοντα της καταλληλότητας του νερού για τη γεωργική άρδευση. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (EC) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αλατότητας του εδάφους και εκφράζεται ως ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) (Shakir et al., 2017).

Τα λύματα που χρησιμοποιούνται για την άρδευση μπορούν να προωθήσουν την αλάτωση του εδάφους (αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυτών αλάτων) ή τη νατρίωση (περίσσεια εναλλάξιμου νατρίου σε σχέση με άλλα κατιόντα). Τα προβλήματα αλατότητας εμφανίζονται όταν τα διαλυτά άλατα συγκεντρώνονται στη ζώνη των ριζών, προκαλώντας έτσι οσμωτικό στρες που περιορίζει την ικανότητα των φυτών να απορροφούν το νερό και τα θρεπτικά στοιχεία. Συνεπώς, η νατρίωση επηρεάζει αρνητικά τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων και τη δομή του εδάφους, καθώς η υψηλή περιεκτικότητα σε εναλλασσόμενο νάτριο προκαλεί μείωση της διαπερατότητας. Η νατρίωση προκαλείται από τη διόγκωση και το διαμερισμό του αργίλου ως συνέπεια της καταστροφής των συσσωματωμάτων λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων Na^+ (Jaramillo and Restrepo, 2017).

Διάφορες ερευνητικές μελέτες σημείωσαν ότι οι αλλαγές στη νατρίωση προκαλούν αύξηση της συμπίεσης του εδάφους και μειώνουν το ρυθμό διήθησης του νερού. Κατά συνέπεια, η μικροβιακή χλωρίδα του εδάφους επηρεάζεται από τις μεταβολές της αλατότητας ή της νατρίωσης του εδάφους. Οι επιπτώσεις στις μικροβιακές κοινότητες σχετίζονται κυρίως με αλλαγές στη δομή του εδάφους και με μειώσεις του οσμωτικού δυναμικού (Chowdhury et al., 2011).

Η μελέτη των Yuan et al. (2007) αξιολόγησε τις επιπτώσεις της αλατότητας στη δομή, τη δραστηριότητα και την κοινότητα των μικροοργανισμών του εδάφους. Τα αποτελέσματά τους υποδηλώνουν ότι η υψηλότερη περιεκτικότητα σε αλατότητα προκαλεί στρες στο μεταβολισμό του μικροβιόκοσμου στο έδαφος. Επιπλέον, η σχέση Άνθρακα-Αζώτου της βιομάζας τείνει να είναι χαμηλότερη σε εδάφη υψηλότερης αλατότητας, γεγονός που

αντανακλά την υπεροχή των βακτηρίων στη μικροβιακή βιομάζα των εδαφών υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα (Jaramillo and Restrepo, 2017).

Το μέγεθος των επιπτώσεων της αλατότητας του εδάφους εξαρτάται από την ανθεκτικότητα των φυτών. Σε ένα μη προσαρμοσμένο στο αλάτι φυτό, η αρνητική επίδραση μπορεί να είναι επιζήμια, αλλά η επίδραση θα είναι μικρότερη σε ένα φυτό που είναι ανθεκτικό στο αλάτι. Επομένως, είναι σημαντικό να ρυθμίζεται το επίπεδο της αλατότητας των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων που εφαρμόζονται στη γεωργική άρδευση, προκειμένου να προληφθεί η αλάτωση του εδάφους (Ofori et al., 2021).

3.1.1.5 Δομή του εδάφους και υδραυλικές ιδιότητες

Η παρατεταμένη άρδευση με υγρά απόβλητα έχει αντίκτυπο στη δομή και τις ιδιότητες του εδάφους, ιδίως η μακροχρόνια. Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι είτε θετικό είτε αρνητικό ανάλογα με τη σύσταση του νερού. Η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση έχει βρεθεί ότι έχει πιο επιζήμια επίδραση στο έδαφος σε σύγκριση με το νερό της βρύσης, τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητάς τους σε αλάτι και άλλα συστατικά. Σε μια περίπτωση στο Ισραήλ, η μακροχρόνια χρήση υγρών αποβλήτων για άρδευση είχε αρνητικό αντίκτυπο στις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους και άλλαξε τη ροή του νερού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μειωμένη υδραυλική αγωγιμότητα, απορροφητικότητα και την αθροιστική διεύδυση (Assouline και Narkis, 2011).

Διάφοροι ερευνητές έχουν παρατηρήσει πως η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων έχει αρνητικό αντίκτυπο στη δομή του εδάφους. Σε μια μελέτη που διεξήχθη από τους Sou/Dakouré et al. (2013), σημειώθηκε ότι το έδαφος που αρδεύτηκε με υγρά απόβλητα παρουσίασε σημαντική μείωση του πορώδους σε σύγκριση με το έδαφος που δεν αρδεύτηκε με αυτά. Ο όγκος των πόρων μειώθηκε απότομα με την αύξηση της χύδην πυκνότητας. Ο προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη μέθοδο Beerkan απέτυχε ως αποτέλεσμα του χαμηλού ρυθμού διήθησης, ένδειξη της σοβαρότητας των επιπτώσεων. Ο μετρούμενος ρυθμός διήθησης ήταν 2,5 φορές χαμηλότερος από τον αντίστοιχο ρυθμό διήθησης του εδάφους που αρδεύτηκε με νερό βρύσης. Η εφαρμογή των λυμάτων για άρδευση είχε ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση νατρίου, των διττανθρακικών και την αύξηση του pH. Ως εκ τούτου, το δίκτυο της δομής των πόρων υπέστη

κατάρρευση και η οργανική ύλη διαλύθηκε, με αποτέλεσμα τελικά την κάλυψη της επιφάνειας του εδάφους (Ofori et al., 2021).

Η μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, της ικανότητας συγκράτησης του νερού και του ρυθμού διήθησης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θα επηρεάσει τη διαθεσιμότητα του νερού στα φυτά. Η αδυναμία συγκράτησης του νερού από το έδαφος μπορεί να περιορίσει τη διαθεσιμότητά του για τα φυτά με ρηχές ρίζες, ενώ η αδυναμία του εδάφους να διανείμει αποτελεσματικά το νερό μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες για τις καλλιέργειες με βαθιές ρίζες και την πρόσβασή τους σε αυτό. Οι επιπτώσεις μπορεί να ποικίλλουν για διαφορετικά τμήματα του προφίλ του εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη άλλες παραμέτρους όπως τις ιδιότητες πρόσληψης των φυτών (Assouline και Narkis, 2011).

Επιπλέον, η υποβάθμιση του εδάφους αυξάνεται λόγω της διάθεσης των ρύπων (μέταλλα και φαρμακευτικές ενώσεις) μέσω διαφόρων μέσων, όπως τα λύματα, τα οποία συσσωρεύονται στο έδαφος όταν χρησιμοποιούνται στην άρδευση. Συνήθως, οι συγκεντρώσεις μετάλλων σε εδάφη που δεν έχουν υποστεί ανθρωπογενείς δραστηριότητες εξαρτώνται κυρίως από το μητρικό υλικό (πέτρα) και μπορεί να υπάρχουν στο έδαφος σε μη τοξικά επίπεδα για τα έμβια όντα. Ωστόσο, η αύξηση του πληθυσμού και η εκβιομηχάνιση έχουν οδηγήσει στην αύξηση της παρουσίας τέτοιων ρυπογόνων παραγόντων στα λύματα και, κατά συνέπεια, στα αρδευόμενα εδάφη. Η παρουσία αυτών των στοιχείων στο έδαφος μπορεί να περιορίσει τη γονιμότητα και/ή να τροποποιήσει τις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους. Επηρεάζουν επίσης το δυναμικό της φυτοτοξικότητας ενός εδάφους με επακόλουθες επιπτώσεις στη ρύπανση και στην ανάπτυξη των φυτών (Becerra-Castro et al., 2015).

Άλλες λειτουργίες του οικοσυστήματος που επηρεάζονται λόγω της ρύπανσης από τα μέταλλα περιλαμβάνουν την ανοργανοποίηση της οργανικής ύλης, τις αλλαγές στη δραστηριότητα των ενζύμων του εδάφους, την αποσύνθεση των απορριμμάτων, τη μείωση της μικροβιακής βιομάζας και τις αλλαγές στη μικροβιακή δομή του εδάφους. Επιπλέον, τα μέταλλα που συσσωρεύονται σε ένα έδαφος μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τα φαρμακευτικά προϊόντα ή άλλους ρυπαντές υψηλού κινδύνου (ECs), επιδεινώνοντας τις πιθανές επιπτώσεις στο έδαφος. Αρκετές μελέτες έχουν επίσης παρατηρήσει ισχυρό συσχετισμό ανάμεσα στην παρουσία των μετάλλων σε ένα έδαφος και την ύπαρξη

ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά υπό ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (Jaramillo and Restrepo, 2017).

3.1.2 Μικροβιακές επιπτώσεις

Οι μικροβιακές κοινότητες που βρίσκονται στο έδαφος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο οικοσύστημα του εδάφους στις οποίες εξελίσσεται μια συνεχή αλληλεπίδραση ανάμεσα στις φυσικοχημικές ιδιότητες και τα βιολογικά συστατικά του εδάφους. (Becerra-Castro et al., 2015). Σε πρόσφατη έρευνα παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις στο μέγεθος και στη δομή της μικροβιακής βιομάζας του εδάφους, καθώς και αύξηση της μικροβιακής δραστηριότητας που προκαλείται από την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων για αρδευτικούς σκοπούς. Αυτές οι αλλαγές στις φυσικοχημικές παραμέτρους του εδάφους και στη μικροβιακή χλωρίδα μπορεί να έχουν αντίκτυπο στη γονιμότητα και την παραγωγικότητα του εδάφους, διαταράσσοντας δυνητικά τη βιωσιμότητα του εδάφους εξαιτίας της ανεπαρκούς άρδευσης με υγρά απόβλητα (Jaramillo and Restrepo, 2017). Οι μικροβιολογικές αλλαγές στο έδαφος περιλαμβάνουν διάφορους σύνθετους παράγοντες, όπως το κλίμα, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την ποιότητα των λυμάτων (Lopes et al., 2015).

3.1.2.1 Μικροβιακές δραστηριότητες

Οι μικροβιολογικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων των ενζυμικών δραστηριοτήτων, είναι δυνητικά χρήσιμες ως δείκτης της ποιότητας του εδάφους, καθώς οι ιδιότητες αυτές ανταποκρίνονται γρήγορα στη διαχείριση του εδάφους, στις διαδικασίες λίπανσης και στη συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων (HM). Η μικροβιακή κοινότητα του εδάφους είναι σημαντική για τη ρύθμιση του κύκλου των υλικών του οικοσυστήματος. Οι μικροοργανισμοί του εδάφους διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στην αποικοδόμηση της οργανικής ύλης, στον κύκλο των θρεπτικών στοιχείων, στη λίπανση του εδάφους και στην ανάπτυξη της δομής του εδάφους, καθώς οι μικροοργανισμοί του εδάφους παράγουν εδαφικό οργανικό άνθρακα που βελτιώνει τη γονιμότητα και την ικανότητα συγκράτησης νερού.

Τα εδαφικά ένζυμα είναι υπεύθυνα για την κατάλυση των βιοχημικών αντιδράσεων του εδάφους που είναι απαραίτητες για τις λειτουργίες της μικροβιακής ζωής. Τα ένζυμα αυξάνουν τον ρυθμό αντίδρασης με τον οποίο αποσυντίθεται η οργανική ύλη και απελευθερώνουν θρεπτικά συστατικά στο εδαφικό περιβάλλον. Τα εδαφικά ένζυμα είναι

υπεύθυνα για τη βιογεωχημική ανακύκλωση πολλών στοιχείων και οι δραστηριότητές τους αντικατοπτρίζουν την έκταση των χημικών και βιολογικών αντιδράσεων στα εδάφη . Ως εκ τούτου, η αναστολή των δραστηριοτήτων ενός ή περισσότερων βασικών ενζύμων θα μπορούσε να έχει σημαντικές συνέπειες στον ρυθμό ανακύκλωσης των στοιχείων και, κατά συνέπεια, η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των εδαφών αποδεκτών θα μπορούσε να τεθεί σε κίνδυνο (Chen et al., 2008).

Σε μια μελέτη για την άρδευση διάρκειας τεσσάρων ετών, παρατηρήθηκε υψηλότερη δραστηριότητα υδρόλυσης στο έδαφος που ποτίζεται με λύματα συγκριτικά με το αντίστοιχο έδαφος που ποτίζεται με γλυκό νερό. Αυτή η αύξηση έδειξε αρνητική συσχέτιση με τον διαλυμένο οργανικό άνθρακα στο έδαφος (DOC), υποδηλώνοντας τη μικροβιακή αποικοδόμηση του DOC. Σύμφωνα με τη μελέτη των del Mar Alguacil et al., (2012), οι δραστηριότητες ενζύμων όπως η αφυδρογονάση, η ουρεάση, η πρωτεάση, η β-γλυκοσιδάση και η αλκαλική φωσφατάση ήταν σημαντικά υψηλότερες σε εδάφη που ποτίζονται με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα σε σύγκριση με εδάφη που αρδεύονται με γλυκό νερό. Η παρουσία θρεπτικών ουσιών και οργανικής ύλης στα λύματα φαίνεται να διεγείρει διαφορετικές μεταβολικές οδούς ή μικροβιακές δραστηριότητες στο έδαφος (Becerra-Castro et al., 2015).

Τα χαρακτηριστικά και οι διεργασίες του εδάφους επιδρούν στον βαθμό τον οποίο τα επεξεργασμένα λύματα ασκούν επιρροή στις μικροβιακές δραστηριότητες. Καθώς η οργανική ύλη αποσυντίθεται, οι μικροβιακές δραστηριότητες απελευθερώνουν ρυθμιστές ανάπτυξης και θρεπτικές ουσίες, ενισχύοντας τελικά την ανάπτυξη των φυτών (Ofori et al., 2021).

3.1.2.2 Μικροβιακός πληθυσμός και ποικιλότητα

Η μικροβιακή βιομάζα του εδάφους είναι ένα από τα σημαντικότερα βιολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Αυτή η παράμετρος ρυθμίζει πολλές κρίσιμες διεργασίες του οικοσυστήματος, συμπεριλαμβανομένης της βιοφυσικής ενσωμάτωσης της οργανικής ύλης (OM) με τις στερεές, υδατικές και αέριες φάσεις του εδάφους. Ως εκ τούτου, οι αλλαγές στις μικροβιακές δραστηριότητες και τη μικροβιακή βιομάζα θα μπορούσαν να επηρεάσουν σοβαρά ορισμένες εδαφικές διεργασίες και θα μπορούσαν επίσης να αποτελούν το προειδοποιητικό σήμα για τις επιβλαβείς αλλαγές στην υγεία του εδάφους . Οι μικροβιακές κοινότητες είναι απαραίτητες για το οικοσύστημα όσον αφορά τις άμεσες

αλληλεπιδράσεις με τα φυτά, την ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών και της οργανικής ύλης (Hashem and Qi, 2021).

Διάφοροι συγγραφείς έχουν παρατηρήσει την πληθυσμιακή αύξηση και ανάπτυξη διάφορων μικροβιακών ειδών στα εδάφη που αρδεύονται με υγρά απόβλητα. Οι αλλαγές ήταν ειδικές για κάθε είδος, δηλαδή ορισμένα είδη ευνοήθηκαν ενώ άλλα όχι. Αξιολογώντας τη μικροβιακή πυκνότητα των εδαφών που αρδεύονταν μακροχρόνια με υγρά απόβλητα, οι Hidri et al. (2010) αποκάλυψαν ότι οι μικροβιακές κοινότητες στο έδαφος αυξήθηκαν σημαντικά. Η αύξηση αυτή αποδόθηκε στη χρήση των υγρών αποβλήτων για την άρδευση. Οι συγγραφείς υποστήριξαν πως σημαντικό ρόλο για την αύξηση διαδραματίζει η πλούσια περιεκτικότητα των υγρών αποβλήτων σε άνθρακα, προωθώντας έτσι την ανάπτυξη των μικροοργανισμών.

Οι Guo et al. (2017) ανέφεραν ότι τα επεξεργασμένα λύματα αύξησαν τον πληθυσμό των πρωτεοβακτηρίων στο έδαφος, ενώ το καθαρό νερό έτεινε να αυξάνει τον αριθμό των οξυβακτηρίων. Επιπλέον, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), ο ολικός φώσφορος και η ηλεκτρική αγωγιμότητα ήταν οι σημαντικοί παράγοντες που είχαν σημαντική επίδραση στη δομή της μικροβιακής κοινότητας του εδάφους υπό άρδευση με επεξεργασμένα λύματα. Τόσο οι ενζυμικές δραστηριότητες όσο και η μικροβιακή βιομάζα επηρεάστηκαν από το είδος της καλλιέργειας.

Κατά τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση, οι Mkhinini et al. (2020) διαπίστωσαν σημαντική μείωση της μικροβιακής βιομάζας σε εδάφη που αρδεύονταν βραχυχρόνια, ενώ καταγράφηκε σημαντική αύξηση σε έδαφος που αρδεύονταν για 20 χρόνια με επεξεργασμένα λύματα. Επιπλέον, οι Chen et al. (2017) και Ibekwe et al., (2018), είχαν αποδείξει ότι η μικροβιακή δραστηριότητα αυξήθηκε σημαντικά σε εδάφη που αρδεύονταν για μεγάλο χρονικό διάστημα με επεξεργασμένα λύματα.

Η αύξηση του πληθυσμού και της ποικιλομορφίας των μικροοργανισμών έχει θετικό αντίκτυπο στον ρυθμό αποικοδόμησης της κυτταρίνης και στην ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών, καθιστώντας τελικά τα θρεπτικά συστατικά απορροφήσιμα από τα φυτά. Επιπλέον, ορισμένοι μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα να δρουν ευεργετικά στην καταπολέμηση των φυτοφαρμάκων, των βαρέων μετάλλων και των αντιβιοτικών (Becerra-Castro et al., 2015), διαδραματίζοντας έτσι κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση της ακεραιότητας του εδάφους και στη βελτίωση της ποιότητας των φυτών. Αυξάνοντας τον

πληθυσμό και την ποικιλότητα των μικροβίων, προωθείται αποτελεσματικά τη ανάπτυξη των φυτών, προστατεύεται η ποιότητα του εδάφους και να θωρακίζονται τα φυτά και το έδαφος από τους επιβλαβείς ρύπους (Ofori et al., 2021).

3.1.3 Επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών

Τα επεξεργασμένα λύματα αποτελούν καλή επιλογή για την άρδευση των καλλιεργειών λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε θρεπτικά συστατικά. και πληρούν τις απαραίτητες προδιαγραφές ως νερό κατάλληλο για τη γεωργική άρδευση, οδηγώντας σε αυξημένη απόδοση των καλλιεργειών (Lu et al., 2015). Γενικά, η παροχή των θρεπτικών συστατικών ωφελεί τη ανάπτυξη των φυτών. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η συσσώρευση μεγάλης ποσότητας θρεπτικών ουσιών μπορεί δυνητικά να οδηγήσει σε φυτοτοξικότητα (Ofori et al., 2021).

Στη μελέτη που διεξήγαγαν οι Wang et al. (2007) δοκιμάστηκαν επτά καλλιέργειες (σιτάρι, σέλινο, αραβόσιτος, κεχρί, μήλα, κίτρινα φασόλια και ελαιοκράμβη). Τα ευρήματα έδειξαν ότι οι καλλιέργειες που αρδεύονται με επεξεργασμένα λύματα παρουσίασαν αξιοσημείωτη αύξηση στην παραγωγή σε σύγκριση με τις καλλιέργειες που δεν αρδεύτηκαν.

Η εφαρμογή των επεξεργασμένων λυμάτων επιτρέπει στις ρίζες των φυτών να έχουν πρόσβαση τόσο σε μακρο- όσο και σε μικροθρεπτικά συστατικά. Η απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών από τα φυτά εξαρτάται από το ριζικό σύστημα και τη συγκέντρωση των ουσιών στην επιφάνεια των ριζών. Γενικά, τα φυτά απορροφούν τα θρεπτικά συστατικά στη φορτισμένη ή ιοντική τους μορφή παρά στην αφόρτιστη ή στοιχειακή τους μορφή (Ofori et al., 2021). Οι Akronikrè et al. (2011) ανέφεραν ότι η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα είναι ευεργετική λόγω της τεράστιας ποσότητας θρεπτικών στοιχείων που είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους και την αύξηση της ανάπτυξης και της παραγωγικότητας των φυτών. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να οφείλεται στην παρουσία NH_4^- και NO_3^- , τις δύο ιοντικές μορφές αζώτου που είναι αποτελεσματικές στην αύξηση του αριθμού των μεριστωματικών κυττάρων.

Ενώ ο χαλκός, το νικέλιο, ο ψευδάργυρος και ο σίδηρος έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν την ανάπτυξη των φυτών, η υπερβολική παροχή ή πρόσληψη αυτών των στοιχείων μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στα φυτά. Ως εκ τούτου, η χρήση των υγρών αποβλήτων για την άρδευση των καλλιεργειών χρειάζεται προσεκτικό έλεγχο λόγω

της πιθανής παρουσίας ανεπιθύμητων συστατικών στην ιλύ, όπως βαρέων μετάλλων και μολυσματικών ουσιών (Ofori et al., 2021).

Τα βαρέα μέταλλα έχουν πολλές άμεσες και έμμεσες βλαβερές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών. Τα αυξανόμενα επίπεδα μετάλλων στο περιβάλλον επηρεάζουν δραστικά την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό των φυτών, οδηγώντας τελικά σε σοβαρές απώλειες στις αποδόσεις των καλλιεργειών. Το νικέλιο (Ni) ανήκει στα απαραίτητα στοιχεία, καθώς έχει υψηλή βιολογική δραστηριότητα και τοξικότητα [316]. Το κάδμιο (Cd) και ο μόλυβδος (Pb) αναγνωρίζονται ως τα πιο τοξικά μεταλλικά ιόντα λόγω των επιβλαβών επιδράσεών τους όχι μόνο στα φυτά αλλά και στον άνθρωπο, καθώς εμφανίζουν την πιο βαθιά κινητικότητα στο εδαφικό περιβάλλον. Είναι καλά τεκμηριωμένο ότι το περίσσειο Cd ή Pb αναστέλλει την ανάπτυξη των φυτών και παρεμβαίνει άμεσα ή έμμεσα στις φυσιολογικές τους διεργασίες μέσω της διαταραχής του μεταβολισμού τους (Hashem and Qi, 2021).

Οι Ju et al., (2011) ανέφεραν υψηλότερη περιεκτικότητα σε κάδμιο και μόλυβδο στον αραβόσιτο και υψηλότερη περιεκτικότητα καδμίου στο σιτάρι που αρδεύεται με επεξεργασμένα λύματα από ό,τι με γλυκό νερό. Σύμφωνα με τους Babayan et al. (2012), η εκτεταμένη χρήση των λυμάτων θα μπορούσε δυνητικά να οδηγήσει στη συσσώρευση βαρέων μετάλλων και θρεπτικών συστατικών στα σε επίπεδα που δεν είναι ευνοϊκά αυτά, μειώνοντας κατά συνέπεια τη συνολική ποιότητά τους. Έχει παρατηρηθεί ότι τα φυλλώδη λαχανικά ή τα λαχανικά με ρίζα τείνουν να συσσωρεύουν υψηλότερες ποσότητες βαρέων μετάλλων σε σύγκριση με τα καρποφόρα όργανα, καθιστώντας τα λιγότερο επιρρεπή στη συσσώρευση ιχνοστοιχείων (Hashem and Qi, 2021).

Η φυτοτοξικότητα μπορεί επίσης να συμβεί ως αποτέλεσμα της απορρόφησης και συσσώρευσης οργανικών ξενοβιοτικών ενώσεων, όπως είναι οι ενώσεις που διαταράσσουν το ενδοκρινικό σύστημα, π.χ. τα φαρμακευτικά προϊόντα και τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας και άλλα. Αυτές οι ουσίες βρίσκονται συνήθως στα επεξεργασμένα λύματα και η άρδευση παίζει σημαντικό ρόλο στην εισαγωγή αυτών των ξενοβιοτικών ουσιών στο έδαφος με αποτέλεσμα την απορρόφησή τους από τα φυτά (Becerra-Castro et al., 2015). Οι Fatta-Kassinou et al. (2011) πραγματοποίησαν μια ανασκόπηση των εργασιών άλλων ερευνητών και παρουσίασαν τις μελέτες περιπτώσεων που δείχνουν πως τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν τα ξενοβιοτικά μέσω της άρδευσης. Σε μια μελέτη, η οξυτετρακυκλίνη βρέθηκε να προκαλεί τοξικότητα στη μηδική (*Medicago sativa* L.)

αναστέλλοντας σημαντικά την ανάπτυξη των βλαστών και των ριζών, φτάνοντας έως και 61% και 85% αντίστοιχα.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχουν διεξαχθεί διάφορα πειράματα στο πεδίο για την εκτίμηση του πιθανού κινδύνου της μικροβιακής ρύπανσης των λαχανικών που αρδεύονται με επεξεργασμένα λύματα . Σε αρκετά πειράματα που διεξήχθησαν διαπιστώθηκε πως η άρδευση των καλλιεργειών τομάτας με επεξεργασμένα λύματα είναι ασφαλής όσον αφορά την παρουσία και συγκέντρωση παθογόνων μικροοργανισμών. Οι Beneduce et al. (2017) απέδειξαν ότι όταν το μπρόκολο και οι ντομάτες αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα λύματα από τη βιομηχανία τροφίμων, δεν μολύνθηκαν από παθογόνους μικροοργανισμούς σύμφωνα με τα ευρήματα της εξέτασης του εδάφους και του νερού για την παρουσία μικροβίων και δεν παρατηρήθηκαν παθογόνα σε κανένα βρώσιμο μέρος του φυτού. Οι Farhadkhani et al. (2018) έδειξαν ότι, αν και η μικροβιακή ποιότητα του εδάφους επηρεάστηκε από την εφαρμοζόμενη άρδευση με επεξεργασμένα λύματα, ανιχνεύθηκε σχετικά χαμηλή συγκέντρωση E. coli στο έδαφος, αλλά δεν παρατηρήθηκε E. coli στο συγκομιζόμενο κρεμμύδι, μαρούλι ή τον αραβόσιτο. Ωστόσο, οι Oliveira et al. (2012) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα φυτά του μαρουλιού θα μπορούσαν να μολυνθούν από E. coli που υπάρχει στο νερό άρδευσης.

Οι μεταβολές που παρατηρούνται στις καλλιέργειες όταν αρδεύονται με επεξεργασμένα λύματα μπορεί να σχετίζονται με παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά των λυμάτων, ο τύπος της καλλιέργειας και των φυτικών ειδών, η ικανότητα των φυτών να ευδοκιμούν σε περιβάλλον με έλλειψη θρεπτικών συστατικών και η ευαισθησία τους στο περιβάλλον και το κλίμα (Hashem and Qi, 2021).

3.1.4 Επιπτώσεις στους υδάτινους πόρους

Ένας από τους σημαντικότερους λόγους για την πρακτική της άρδευσης με υγρά απόβλητα είναι η δυνατότητα χρήσης των λυμάτων ως πηγή νερού. Ως εκ τούτου, τα επεξεργασμένα λύματα θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως εναλλακτική πηγή νερού για την προαγωγή της ανάπτυξης των φυτών.

Ως υδροληψία ορίζεται η διαδικασία της άντλησης του νερού από επιφανειακές και υπόγειες πηγές ή δεξαμενές αποθήκευσης (Hoekstra, 2015). Υπολογίζεται περίπου, πως το 80% του νερού που αντλείται εναποτίθεται αργότερα ως λύματα, με περίπου το 70% αυτού να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί (Yi et al., 2011). Ένας από τους κύριους λόγους

της άντλησης του νερού είναι η χρήση του για τη γεωργική άρδευση. Δεδομένης της αυξανόμενης λειψυδρίας και της υψηλής ζήτησης για την αγροτική παραγωγή, η χρήση νερού χαμηλότερης ποιότητας (όπως τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα) για την άρδευση των καλλιεργειών αποτελεί σημαντική ευκαιρία για τη μείωση της ποσότητας του νερού που χρησιμοποιείται και την μείωση της σπατάλης των πηγών του γλυκού νερού. Σε πολλές περιοχές που αντιμετωπίζουν λειψυδρία, τα υγρά απόβλητα έχουν χρησιμοποιηθεί για την άρδευση των καλλιεργειών για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτή η πρακτική χρησιμεύει ως εναλλακτική και απαραίτητη πηγή νερού για γεωργικούς σκοπούς, δεδομένης της περιορισμένης διαθεσιμότητας γλυκού νερού σε αυτές τις περιοχές (Corcoran et al., 2010).

Ωστόσο, η διάθεση των λυμάτων σε υδάτινα σώματα αυξάνει τα επίπεδα των νιτρικών, των φωσφορικών αλάτων, των μικροθρεπτικών συστατικών και περιστασιακά των βαρέων μετάλλων. Η αύξηση αυτή προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις τόσο στο υδάτινο οικοσύστημα όσο και στις κατάντη γεωργικές πρακτικές που εξαρτώνται από αυτές τις πηγές νερού. Η εφαρμογή των ορυκτών λιπασμάτων για τη βελτίωση της ποιότητας του εδάφους και την προώθηση της ανάπτυξης των φυτών ενέχει τον εγγενή κίνδυνο της ρύπανσης των πηγών του γλυκού νερού μέσω των διεργασιών της έκπλυσης και της επιφανειακής απορροής (Khan et al., 2018).

Ο ευτροφισμός είναι ένα διαδεδομένο ζήτημα που σχετίζεται με τέτοιες εκκενώσεις, οι οποίες, αν δεν αντιμετωπιστούν, μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την εξάντληση του οξυγόνου, τον θάνατο των υδρόβιων οργανισμών και σε σοβαρές περιπτώσεις, την κατάρρευση ολόκληρου του υδάτινου οικοσυστήματος (Ji, 2017).

Κατά συνέπεια, η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση των καλλιεργειών προστατεύει και βελτιώνει την ποιότητα των πόρων του γλυκού νερού ελαχιστοποιώντας τη ρύπανση των υδάτων εξαιτίας της αποφυγής της απόρριψης των λυμάτων στα υδάτινα σώματα και της μείωσης της εφαρμογής των χημικών λιπασμάτων στη γεωργία (Becerra-Castro et al., 2015). Ως εκ τούτου, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση εκτρέπει την οργανική και ανόργανη ύλη σε γεωργικές χρήσεις που, εάν απορριφθεί, μπορεί να αυξήσει τα ρυπαντικά φορτία στα ύδατα υποδοχής (Ungureanu et al., 2018).

3.2 Επιπτώσεις στη δημόσια υγεία

Σε αντίθεση με το οικιακό πόσιμο νερό τα επεξεργασμένα λύματα περιέχουν παθογόνους μικροοργανισμούς, και ρυπαντές όπως τοξίνες και βαρέα μέταλλα. Εάν δεν γίνει αποτελεσματική διαχείριση, οι χημικές ουσίες και τα παθογόνα μπορεί να απειλήσουν την υγεία των αγροτών, των εργαζομένων σε αγροκτήματα και των καταναλωτών. Οι τρόποι με τους οποίους οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και οι ρυπογόνες ουσίες μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό είναι μέσω της κατάποσης λόγω της μόλυνσης των τροφίμων και μέσω της εισπνοής από το αναπνευστικό σύστημα (Ofori et al., 2021).

3.2.1 Χημικοί κίνδυνοι

Οι κίνδυνοι από την ύπαρξη των χημικών ουσιών για την ανθρώπινη υγεία ή το περιβάλλον εξαρτώνται από τις επικίνδυνες ιδιότητες των εν λόγω χημικών ουσιών και το περιθώριο μεταξύ των ασφαλών επιπέδων έκθεσης και της πραγματικής έκθεσης που συμβαίνει. Τα επίπεδα έκθεσης μπορεί να παρακολουθούνται, αλλά σε ένα σύστημα διαχείρισης κινδύνου τα επίπεδα έκθεσης μπορεί επίσης να προβλεφθούν σε κάποιο βαθμό με βάση τα (αναμενόμενα) επίπεδα των χημικών ουσιών στα λύματα, την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας, την κατανομή και την αποικοδόμηση στο νερό, το έδαφος και τον αέρα και την απορρόφηση από τα φυτά.

Τα υγρά απόβλητα παρουσιάζουν μια συνεχώς εξελισσόμενη σύνθεση χημικών ουσιών σε πολύπλοκα μείγματα ανάλογα με τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι άνθρωποι μπορούν έτσι να εκτεθούν σε χημικές ουσίες που βρίσκονται στο ανακτημένο νερό μέσω διαφορετικών οδών έκθεσης, εν μέρει ανάλογα με τις (επαγγελματικές) δραστηριότητες των ατόμων που εκτίθενται. Για τις ανθεκτικές χημικές ουσίες, οι συγκεντρώσεις στα εδάφη που αρδεύονται από λύματα μπορεί ακόμη και να αυξάνονται αργά με κάθε διαδοχική εφαρμογή των λυμάτων (Dingemans et al., 2020).

3.2.1.1 Φαρμακευτικά προϊόντα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας

Η αξιολόγηση των πιθανών κινδύνων και της κατάληξης των κοινώς χρησιμοποιούμενων προϊόντων προσωπικής φροντίδας (PPCPs) και των φαρμακευτικών προϊόντων έγινε από τη μελέτη των Kibuye et al., (2019) που διεξήχθη σε μερικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Παράλληλα, εξετάστηκαν δεκατρία δείγματα νερού από τα υπόγεια ύδατα που βρίσκονταν κοντά στο σημείο άρδευσης με συστήματα ψεκασμού. Τα αποτελέσματα

έδειξαν την ανίχνευση ακεταμινοφαίνης και τριμεθοπρίμης σε τακτική βάση στην εισροή της μονάδας επεξεργασίας. Συγκριτικά, η συγκέντρωση των προϊόντων προσωπικής φροντίδας στο δείγμα των υπόγειων υδάτων ήταν χαμηλότερη από τις εκροές της μονάδας επεξεργασίας.

Μια αξιολόγηση τριών προηγμένων μονάδων επεξεργασίας λυμάτων για την κατανόηση της περιβαλλοντικής απόδοσης μελετήθηκε από τους Li Zhang et al., (2019) και Li Cao et al., (2019). Οι προηγμένες επεξεργασίες που υιοθετήθηκαν ήταν ο οζονισμός, η προσρόφιση κοκκώδους ενεργού άνθρακα και η αντίστροφη όσμωση οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την απομάκρυνση των PPCPs με τη βοήθεια του μοντέλου USEtox για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η οικοτοξικότητα του κύκλου ζωής εκατόν είκοσι έξι προϊόντων PPCPs αυξήθηκε και στους τρεις τύπους επεξεργασιών και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι υπό μελέτη εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων θα μπορούσαν να υιοθετήσουν έναν δείκτη προτεραιότητας για τον έλεγχο των οργανικών μικρορυπαντών (Choudri et al., 2020).

3.2.1.2 Βαρέα μέταλλα

Τα βαρέα μέταλλα δεν προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία όταν τα επεξεργασμένα ή μερικώς επεξεργασμένα οικιακά λύματα επαναχρησιμοποιούνται στην άρδευση, επειδή συνήθως βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων που απαιτείται για την ποιότητα του νερού άρδευσης και μπορούν να απομακρυνθούν αποτελεσματικά κατά τις συνήθεις διαδικασίες επεξεργασίας. Σε μικρές συγκεντρώσεις, τα βαρέα μέταλλα όπως το κάδμιο (Cd), το χρώμιο (Cr) και το νικέλιο (Ni) αποτελούν χρήσιμα θρεπτικά συστατικά για τις καλλιέργειες (Ungureanu et al., 2020).

Ωστόσο, οι Arunakumara, K., Walpola, B.C. και Yoon, (2013) δήλωσαν ότι τα βαρέα μέταλλα (HM) παραμένουν στα επεξεργασμένα λύματα και συσσωρεύονται στα εδάφη, και αυτό συνιστά απειλή για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία, ειδικά αν η πηγή προέρχεται από τα βιομηχανικά λύματα ή την ανάμειξη βιομηχανικών και οικιακών λυμάτων. Επομένως σε περίπτωση παρατεταμένης χρήσης αυτού του νερού πρέπει να εξετάζεται σοβαρά η πιθανότητα εισόδου αυτών των μετάλλων στη τροφική αλυσίδα .

Επιπλέον, η αραίωση των επεξεργασμένων λυμάτων με την ενσωμάτωση του γλυκού νερού σε αυτά μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τα επίπεδα των βαρέων μετάλλων, πέρα της μείωσης που επιτυγχάνεται μέσω των διαδικασιών της επεξεργασίας. Ωστόσο, έχει

παρατηρηθεί σημαντική συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στα ανώτερα στρώματα του εδάφους που αρδεύονταν με επεξεργασμένο νερό λυμάτων για 20 χρόνια (Hashem and Qi, 2021).

Επειδή τα βαρέα μέταλλα που βρίσκονται στα ανεπεξέργαστα λύματα δεν είναι βιοδιασπώμενα και έχουν μεγάλο βιολογικό χρόνο ημιζωής, συσσωρεύονται στο ανώτερο έδαφος (σε βάθος 20 cm), καθώς και στα φυλλώδη λαχανικά, σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στις ρίζες από ό,τι στα φύλλα με αποτέλεσμα να εισέρχονται στον ανθρώπινο και ζωικό οργανισμό με την κατανάλωση μολυσμένων τροφικών καλλιεργειών, νερού ή με την εισπνοή σωματιδίων σκόνης από τα μολυσμένα εδάφη. Τα βαρέα μέταλλα είναι ιδιαίτερα τοξικά για την υγεία των παιδιών, επειδή μειώνουν την ενδομήτρια ανάπτυξη των παιδιών, την ανοσολογική τους άμυνα και αυξάνουν τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου (Ungureanu et al., 2020). Οι δυσμενείς επιπτώσεις των βαρέων μετάλλων στην ανθρώπινη υγεία είναι ευρέως αναγνωρισμένες. Οι δυσμενείς επιπτώσεις των βαρέων μετάλλων στην ανθρώπινη υγεία είναι ευρέως αναγνωρισμένες. Για παράδειγμα, ορισμένα βαρέα μέταλλα έχουν συνδεθεί με την ανάπτυξη καρκίνου, ενώ άλλα μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά το νευρικό, το σκελετικό, το κυκλοφορικό, το ενζυμικό, το ενδοκρινικό ή το ανοσοποιητικό σύστημα καθώς και τα ζωτικά όργανα. Επιπλέον, υπάρχει ο δυνητικός κίνδυνος συνεργιστικής επίδρασης όταν πραγματοποιείται ο συνδυασμός με άλλους ρύπους, όπως τα αντιβιοτικά (Becerra-Castro et al., 2015).

Η αξιολόγηση σχετικά με τους κινδύνους για την υγεία που συνδέονται με την κατανάλωση λαχανικών που καλλιεργούνται με τη χρήση υγρών αποβλήτων στην Κίνα μελετήθηκε από τους Yuan et al., (2019). Προκειμένου να μετρήσουν τους πιθανούς κινδύνους για την υγεία, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν μοντέλα του πληκτικού επικινδυνότητας target ανά τοποθεσία και μοντέλα κινδύνου καρκίνου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα λαχανικά που καλλιεργούνταν στην περιοχή, όπως το μαρούλι καθώς και το σκόρδο, είχαν υψηλές συγκεντρώσεις μολύβδου (Pb), καδμίου (Cd) και ψευδαργύρου (Zn). Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μακροχρόνια κατανάλωση τοπικά καλλιεργούμενων λαχανικών από την περιοχή μελέτης, ιδίως το λάχανο και το μαρούλι, ενδέχεται να αυξήσει τους πιθανούς κινδύνους για την υγεία.

Η χωρική συγκέντρωση και η βιοσυσσώρευση των βαρέων μετάλλων σε καλλιέργειες τροφίμων καθώς και οι σχετικοί κίνδυνοι για την υγεία από την κατανάλωσή τους διερευνήθηκαν από τους Mehmood et al. (2019). Η μελέτη αυτή εξέτασε τους παράγοντες κινδύνου για την κατανάλωση των καλλιεργειών χρησιμοποιώντας τον δείκτη κινδύνου

για την υγεία, την ημερήσια πρόσληψη βαρέων μετάλλων και τον παράγοντα της βιοσυγκέντρωσης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν τον υψηλότερο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία που σχετίζεται με τη συγκέντρωση του καδμίου (Cd), μόλυβδου (Pb) και χρωμίου (Cr). Αυτά τα μέταλλα ήταν κυρίαρχα στη ρόκα (*Eruca sativa*) και το μαλακό σιτάρι (*Triticum aestivum*) που καλλιεργήθηκαν στην περιοχή που αρδεύτηκε από το νερό του φράγματος. Προτάθηκε η διαφύλαξη των οικοσυστημάτων των γλυκών υδάτων από την απόρριψη των υγρών αποβλήτων για την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος.

3.2.1.3 Νανοσωματίδια

Τα νανοσωματίδια που απελευθερώνονται από διάφορα νανοϋλικά που χρησιμοποιούνται στα οικιακά και βιομηχανικά προϊόντα βρίσκουν το δρόμο τους μέσω των οδών διάθεσης των αποβλήτων στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και καταλήγουν στην ιλύ των λυμάτων. Αυτές οι ειδικές ιδιότητες που καθιστούν τα νανοϋλικά χρήσιμα μπορεί επίσης να καταστήσουν μερικά νανοϋλικά επικίνδυνα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, υπό ορισμένες συνθήκες.

Τα νανοϋλικά έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τον γρήγορο ή οικονομικά αποδοτικό καθαρισμό των αποβλήτων σε σύγκριση με τις τρέχουσες συμβατικές προσεγγίσεις. Τα οφέλη της εφαρμογής προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά των νανοσωματιδίων: ενισχυμένη αντιδραστικότητα, επιφάνεια, υποεπιφανειακή μεταφορά και/ή χαρακτηριστικά δέσμευσης των νανοϋλικών. Η βιβλιογραφία είναι άφθονη με μελέτες σχετικά με την αξιοποίηση των νανοσωματιδίων για την προσρόφηση διαφόρων ρύπων, κυρίως μετάλλων και χρωστικών ουσιών (Brar et al., 2010).

Οι Desa et al., (2019) μελέτησαν την επίδραση του οξειδίου του ψευδαργύρου στην ύπαρξη των νανοσωματιδίων πολυαιθυλενογλυκόλης χρησιμοποιώντας τον φωτοκαταλυτικό αντιδραστήρα μεμβράνης (MPR). Η μελέτη αυτή διερεύνησε την αλληλεπίδραση των διαφορετικών μεμβρανών στα υγρά απόβλητα ως φωτοκαταλύτη για την αποικοδόμηση της βιομηχανικής βαφής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση των νανοσωματιδίων ZnO-PEG και της μεμβράνης UF-PPA ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματική στην επεξεργασία του MPR. Περαιτέρω, η επεξεργασία ήταν χρήσιμη για την απομάκρυνση της θολερότητας και της μείωσης του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD).

Η επίδραση της επεξεργασίας των λυμάτων με τη χρήση της συμβατικής μεθόδου στην αντιμετώπιση της συμπεριφοράς των νανοσωματιδίων αξιολογήθηκε από τους Yu et al., (2019). Η μελέτη επικεντρώθηκε στην κατανόηση του ρόλου των νανοσωματιδίων για τον μετασχηματισμό των αντιβιοτικών κατά την επεξεργασία. Για την κατανόηση της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι που βασίζονται στο ασύμμετρο πεδίο ροής και στην κλασματοποίηση ροής. Αυτό το ασύμμετρο σύστημα συνδυάστηκε με την σκέδαση φωτός για την ποσοτικοποίηση των νανοσωματιδίων που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα. Η μελέτη αποδείχτηκε αποτελεσματική για την επεξεργασία των νανοσωματιδίων και για τον έλεγχο τους στα υγρά απόβλητα ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος της μεταφοράς των αντιβιοτικών στο περιβάλλον.

Ωστόσο, σε αυτή την επιδίωξη για τον αποτελεσματικό καθαρισμό των περιβαλλοντικών διαμερισμάτων, ορισμένα από αυτά τα νανοσωματίδια εναποθέτονται σκόπιμα στο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων των λυμάτων, και στην πορεία θα καταλήξουν στα εδάφη, στα ιζήματα, στα ύδατα και τελικά θα εισέλθουν στη χλωρίδα και την πανίδα μέσω της τροφικής αλυσίδας. Πολλοί συγγραφείς έχουν δημοσιεύσει βιβλιογραφία σχετικά με τον χαρακτηρισμό, την κατάληξη και τη τοξικότητα των νανοϋλικών και έχουν προτείνει ερευνητικές στρατηγικές για την αξιολόγηση της ασφάλειας των νανοϋλικών (Jain et al., 2021).

Τα νανοϋλικά ενέχουν το δυνητικό κίνδυνο έκπλυσης στο επεξεργασμένο νερό κατά την παραγωγή, τη χρήση και την απόρριψη των προϊόντων στα οποία εμπεριέχονται. Επιπλέον, υπάρχουν υψηλότεροι ρυθμοί παραγωγής ανά έτος για τα αναδύμενα μεταλλικά νανοσωματίδια όπως του αργύρου (Ag) και του διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2). Τα συγκεκριμένα αναδύμενα νανοϋλικά προκαλούν μεγάλη ανησυχία για τις επιπτώσεις τους στο υδάτινο οικοσύστημα, καθώς στη μελέτη τους οι Kim et al., (2011) απέδειξαν την ανασταλτική επίδραση των νανοσωματιδίων Ag και TiO_2 στην ανάπτυξη της λέμνας (υδρόβιο φυτό).

Η τοξικότητα των νανοσωματιδίων εκδηλώνεται με φλεγμονή που πιθανώς οφείλεται σε οξειδωτικό στρες (Brar et al., 2010). Οι Huo et al., (2014) ανέφεραν ότι τα νανοσωματίδια (NPs) χρυσού με μέγεθος μικρότερο από 6 nm εισέρχονται αποτελεσματικά στον πυρήνα, ενώ τα μεγαλύτερα NPs μεγέθους 10-16 nm διεισδύουν μόνο μέσω της κυτταρικής μεμβράνης και έτσι βρίσκονται στο κυτταρόπλασμα. Τα NPs του διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) αναφέρεται ότι πραγματοποιούν αλλαγές στη διαμόρφωση της τουμπουλίνης και

αναστέλλουν τον πολυμερισμό της, διαταράσσοντας έτσι την ενδοκυτταρική μεταφορά, την κυτταρική διαίρεση και την κυτταρική μετανάστευση (Jain et al.,2021).

Ελάχιστες βιβλιογραφικές αναφορές αναφέρουν τις μελέτες που διερευνούν τα νανοσωματίδια από τα επεξεργασμένα λύματα και την τοξικότητά τους σε πειραματόζωα. Ορισμένες μελέτες ανέφεραν βλάβες των ζωτικών οργάνων και βλάβες στο DNA των αρουραίων, οι οποίοι προσλάμβαναν νανοσωματίδια (TiO₂) από μολυσμένο νερό. Ομοίως, τα τεχνητά νανοϋλικά αναφέρεται ότι προκαλούν κάποια ανησυχίες για την υγεία, συμπεριλαμβανομένης της πνευμονικής φλεγμονής, της γονοτοξικότητας, της καρκινογένεσης και των επιπτώσεων στο κυκλοφορικό σύστημα (De Matteis and Rinaldi, 2018).

3.2.1.4 Άλλα χημικά προϊόντα

Εκτενείς λεπτομέρειες σχετικά με τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) και τη συγκέντρωσή τους, καθώς και τις επιπτώσεις στην υγεία παρουσιάστηκαν από τους Yang et al. (2019). Η μελέτη αυτή διεξήχθη σε μια δεξαμενή αποθήκευσης επεξεργασμένων λυμάτων που βρίσκεται σε ένα εργοστάσιο πετρελαίου. Κατά τη διάρκεια της έρευνας, οι συγγραφείς εντόπισαν είκοσι μία πτητικές οργανικές ενώσεις μαζί με τις συγκεντρώσεις τους. Οι χλωριωμένες ενώσεις όπως το τριχλωροαιθυλένιο και το διχλωρομεθάνιο παρουσίασαν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις και εκτός αυτού, η χρήση ασαφούς συνθετικής ανάλυσης έδειξε την παρουσία τριχλωροαιθυλενίου. Οι συγκεκριμένες πτητικές οργανικές ενώσεις συνέβαλαν στα αυξημένα επίπεδα ρύπανσης καθώς και στους κινδύνους για την υγεία.

Άλλες ενώσεις που εμπεριέχονται στα λύματα που χρησιμοποιούνται για την άρδευση και θα μπορούσαν ενδεχομένως να είναι επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία είναι γνωστές ως αναδύμενοι μολυσματικοί παράγοντες (CECs). Οι CEC είναι μόρια που ασκούν βιολογική επιδράση σε διαφορετικούς οργανισμούς και τα χαρακτηριστικά τους καθορίζουν τον χρόνο παραμονής στο περιβάλλον και τη συσσώρευση σε ζωντανούς οργανισμούς. Μερικά παραδείγματα CEC είναι τα παυσίπονα, τα αντιυπερτασικά και τα αντιβιοτικά. Τα εμπορικά και οικιακά φαρμακευτικά προϊόντα και τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας (PPCPs) αποτελούν μερικές από τις πηγές αυτών των ουσιών στα υγρά απόβλητα.

Επιπλέον, μερικοί από τους αναδύμενους μολυσματικούς παράγοντες αντιστοιχούν σε ενδοκρινικούς διαταράκτες (EDs) . Οι EDs μπορούν να μεταβάλλουν τη διαδικασία της

αναπαραγωγής, της ανάπτυξης, τις νευρικές και ανοσολογικές λειτουργίες των οργανισμών μιμούμενοι τις ενδογενείς ορμόνες. Η ανθρώπινη απέκκριση και η απόρριψη ανεπιθύμητων φαρμάκων στα λύματα είναι μερικές από τις οδούς μέσω των οποίων οι EDs εισέρχονται στη ροή των λυμάτων (Ofori et al., 2021).

Εξαιτίας των ανεπαρκών πληροφοριών σχετικά με την παρουσία τους στο νερό, στο έδαφος, στον αέρα και στους φυτικούς και ζωικούς ιστούς, αυτές οι σύνθετες ουσίες δεν θεωρούνταν προηγουμένως ως ρύποι. Ωστόσο, από τη δεκαετία του 1990, έχει γίνει μια προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί η συγκέντρωση αυτών των ενώσεων στις πηγές του νερού. Αρκετές χώρες, όπως η Ελλάδα, η Ιταλία, η Ισπανία, η Γαλλία η Γερμανία, ο Καναδάς και η Βραζιλία έχουν υπολογίσει ότι περίπου 500 τόνοι παυσίπων έχουν απορριφθεί σε πηγές επιφανειακών υδάτων. Ως αποτέλεσμα, το σαλικυλικό οξύ και η δικλοφενάκη βρέθηκαν να έχουν συγκεντρώσεις 0,22 µg/L και 3,02 µg/L, αντίστοιχα (Jaramillo and Restrepo, 2017).

Οι αναδυόμενοι μολυσματικοί παράγοντες εισάγονται τακτικά στα υδάτινα σώματα μέσω των διαφόρων ανθρωπογενών πηγών, τα οποία μπορούν κατά συνέπεια να οδηγήσουν σε τοξικά κατάλοιπα και σε δυσμενείς επιπτώσεις στους υδρόβιους οργανισμούς και, τελικά, στον άνθρωπο. Οι εκροές από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας των αστικών λυμάτων θεωρούνται μία από τις πρωταρχικές πηγές CEC επειδή οι παραδοσιακές μέθοδοι επεξεργασίας αποτυγχάνουν να αποτρέψουν αποτελεσματικά τη διάθεση αυτών των ενώσεων στο περιβάλλον. Επιπλέον, οι τομείς της γεωργίας και της κτηνοτροφίας, που περιλαμβάνουν τη χρήση φυτοφαρμάκων και αντιβιοτικών, αντίστοιχα, θεωρούνται επίσης ως πρόσθετες πηγές CEC (Jaramillo and Restrepo, 2017).

Τα μικροπλαστικά (MPs), όπως και τα φαρμακευτικά προϊόντα προσωπικής φροντίδας (PPCP) και τους ενδοκρινικούς διαταράκτες, αποτελούν μια ομάδα αναδυόμενων ρύπων που ανιχνεύονται στα επεξεργασμένα λύματα. Αυτά τα μικροσκοπικά πλαστικά θραύσματα, με διάμετρο μικρότερη από 5 mm, προέρχονται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των υφασμάτων και των πλαστικών συσκευασιών. Μία από τις πηγές και τις οδούς απελευθέρωσης των MPs στο περιβάλλον είναι μέσω της διάθεσης των λυμάτων από τις μονάδες επεξεργασίας. Οι μελέτες σχετικά με τους εν λόγω ρύπους έχουν επικεντρωθεί κυρίως στα υδάτινα οικοσυστήματα και ιδιαίτερα στο θαλάσσιο οικοσύστημα, την παρουσία τους στα λύματα και την επεξεργασία τους, με τις μελέτες για την παρουσία τους στο έδαφος να είναι πολύ περιορισμένες (Hurley and Nizzetto, 2018).

Τα MPs μεταφέρουν και άλλες ρυπαντικές ουσίες όπως είναι οι έμμονοι οργανικοί ρύποι (POPs), τα μέταλλα, και διάφορα CECs στο έδαφος εξαιτίας της υδρόφοβης επιφάνειάς τους, η οποία τους επιτρέπει να προσροφούν άλλους ρύπους. Ως αποτέλεσμα υποβαθμίζεται η ποιότητα του εδάφους και προκαλείται τοξικότητα στα φυτά μέσω της πρόσληψης των προσροφημένων ρύπων. Οι συγκεκριμένοι ρύποι αποτελούν κίνδυνο για την υγεία τόσο των ανθρώπων όσο και των ζώων επειδή εισέρχονται στη τροφική αλυσίδα. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μαζί με τους ρύπους που προσροφώνται θα μπορούσαν να εκπλυθούν από το έδαφος στα υπόγεια ύδατα, αποτελώντας έτσι μια πιθανή οδό έκθεσης για τον άνθρωπο (Ofori et al., 2020).

3.2.1.5 Γονοτοξικότητα και κυτταροτοξικότητα

Οι Zeyad, Kumar and Malik (2019), πραγματοποίησαν την ανάλυση των βιομηχανικών λυμάτων για την παρουσία των φυτοφαρμάκων, δηλαδή οργανοχλωριωμένων και οργανοφωσφορικών. Περαιτέρω, τα δείγματα των υγρών αποβλήτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκχύλιση του διχλωρομεθανίου και του ν-εξανίου, υποβλήθηκαν σε γονοτοξική ανάλυση με τη βοήθεια της δοκιμασίας κατά θηλαστικών μικροσωμάτων Ames. Η γονοτοξική ανάλυση αποκάλυψε ότι το στέλεχος TA98 ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητο μεταξύ των εκχυλισμάτων. Τέλος, η γονοτοξικότητα των υγρών αποβλήτων επιβεβαιώθηκε με τη δοκιμασία ελέγχου του ανασυνδυασμένου πλασμιδίου (assay of plasmid nicking).

Πειράματα γονοτοξικότητας πραγματοποιήθηκαν από τους Russo et al., (2019) για τη χρήση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων εκθέτοντας τέσσερα βρώσιμα φυτά και συγκεκριμένα τα ραπανάκια (*Raphanus sativus*), το σκληρό σιτάρι (*Triticum durum*), τα ελαιοκράμβη (*Brassica rapa*) και το μαρούλι (*Lactuca sativa*). Επιπλέον, η μελέτη χρησιμοποίησε τα αντικαρκινικά φάρμακα σισπλατίνη και φθοριοουρακίλη που είναι ευρέως διαθέσιμα ως λειτουργικά γονιδιώματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα φάρμακα που χρησιμοποιούνται για τη θεραπεία των λαχανικών συνέβαλαν στις γονιδιωματικές βλάβες του ανοσοποιητικού συστήματος των κυττάρων. Οι βλάβες ήταν σε υψηλότερα επίπεδα για τα λεμφοκύτταρα, δεδομένου ότι επρόκειτο για την άμεση έκθεση σε ένα μόνο φάρμακο.

3.2.2 Μικροβιακοί κίνδυνοι

Τα παθογόνα όπως τα βακτήρια, οι ιοί και τα πρωτόζωα είναι μικροοργανισμοί που προκαλούν μολυσματικές ασθένειες. Τα ανεπεξέργαστα υγρά απόβλητα περιέχουν διάφορα είδη παθογόνων μικροοργανισμών όπως είναι η *Salmonella* spp., το *Escherichia coli* (*E. coli*), τα εντερικά νηματούδη και η *Legionella* spp. Σε περίπτωση που η απολύμανση ή η προηγμένη επεξεργασία διήθησης, όπως οι μεμβράνες, δεν αποτελούν μέρος της διαδικασίας επεξεργασίας, οι συγκεκριμένοι παθογόνοι μικροοργανισμοί εξακολουθούν να βρίσκονται στα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα σε μεγάλη ποσότητα.

Η έκθεση στους παθογόνους μικροοργανισμούς πραγματοποιείται με την άμεση επαφή με το νερό άρδευσης ή, στη χειρότερη περίπτωση, μέσω κατάποσης μολυσμένων προϊόντων διατροφής. Η τελευταία εκδοχή αποτελεί την κύρια ανησυχία του κοινού λόγω του κινδύνου που ενέχει για την υγεία και της εμφάνισης αρκετών περιπτώσεων τροφικής δηλητηρίασης στον παρελθόν (Ofori et al., 2021). Επιπλέον, οι μικροβιακές ασθένειες μπορούν να μεταδοθούν άμεσα ή έμμεσα από το νερό (Πίνακας 3). Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι ασθένειες αυτές έχουν συμβάλει σημαντικά στην πρόωρη θνησιμότητα, ιδίως στις αναπτυσσόμενες χώρες (Jaramillo and Restrepo, 2017).

Πίνακας 3.1: Ορισμένες υδατογενείς ασθένειες που σχετίζονται με τα λύματα

Disease	Cause
Typhoid fever	<i>Salmonella typhi</i>
Paratyphoid fever ²	<i>Salmonella paratyphi</i>
Gastroenteritis ¹	<i>Salmonella typhimurium</i>
Cholera ²	<i>Vibrio cholerae</i>
Bacillary dysentery ²	<i>Shigella dysenteriae</i>
Amebiasis ²	<i>Entamoeba histolytica</i>
Giardiasis ¹	<i>Giardia duodenalis</i>
Cryptosporidiosis ¹	<i>Cryptosporidium</i>
Cyclosporiasis ²	<i>Cyclospora cayentanensis</i>
Infectious hepatitis ¹	Hepatitis A
Gastroenteritis ²	Enterovirus, parvovirus, rotavirus
Infantile paralysis	Poliovirus
Leptospirosis ¹	<i>Leptospira icterohaemorrhagiae</i>
Ear infections	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Scabies	<i>Sarcoptes scabiei</i>
Trachoma	<i>Chlamydia trachomatis</i>
Schistosomiasis ²	<i>Schistosoma</i>
Malaria	<i>Plasmodium</i>
Yellow fever	Flavivirus
Dengue	Flavivirus

¹ Human and/or animal excrement, ² Human excrement; Sources: Romero [57], Von Sperling [58], Jiménez and Rose [59], Evans and Mara [60].

Πηγή: Jaramillo and Restrepo, 2017

3.2.2.1 Βακτήρια

Στις αναπτυσσόμενες χώρες, που συχνά πλήττονται από την έλλειψη συστημάτων υγιεινής και την κακή ποιότητα του πόσιμου νερού, η διάρροια είναι η δεύτερη κύρια αιτία θανάτου για 800.000 μικρά παιδιά. Οι επιδημίες χολέρας, τυφοειδούς πυρετού και σιγκέλλωσης, καθώς και οι οροθετικές αντιδράσεις για το *Helicobacter pylori*, το οποίο οδηγεί σε χρόνια λοίμωξη και ακόμη και σε καρκίνο, είναι συνέπειες της χρήσης των ανεπεξέργαστων υγρών αποβλήτων και της κατανάλωσης ανεπεξέργαστων λαχανικών από τις καλλιέργειες που αρδεύονται με υγρά απόβλητα. Η ωμή κατανάλωση των πράσινων φυλλώδων λαχανικών που συσκευάζονται ως σαλάτες αυξάνουν τον κίνδυνο έκθεσης του ανθρώπου σε επίμονα *Escherichia coli* που προέρχονται από την άρδευση με

υγρά απόβλητα προκαλώντας εντερικές ιογενείς λοιμώξεις όπως οξεία γαστρεντερίτιδα (Ungureanu et al., 2020).

Τα κολοβακτηριοειδή των κοπράνων, αντιθέτως, δεν αποτελούν παθογόνους μικροοργανισμούς, ωστόσο χρησιμοποιούνται ως δείκτες που εκφράζουν την παρουσία οργανισμών που προκαλούν μολυσματικές ασθένειες. Τα άτομα που εκτίθενται σε υγρά απόβλητα που περιέχουν υψηλή περιεκτικότητα σε κολοβακτηριοειδή διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία τους. Η παρουσία βακτηρίων-δεικτών μπορεί να υποδεικνύει την παρουσία οργανισμών που προκαλούν δυσεντερία, τυφοειδή πυρετό και βακτηριακή γαστρεντερίτιδα (Ofori et al., 2020).

Τα επαναχρησιμοποιούμενα λύματα περιέχουν γενικά περισσότερα οργανικά συστατικά, τα οποία διεγείρουν τη μικροβιακή ανάπτυξη, συμπεριλαμβανομένων ευκαιριακών παθογόνων μικροοργανισμών όπως η *Legionella*. Οι ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη της *Legionella* spp. αποτελούν μόνο τα θερμοκήπια όπου υπάρχει ο κίνδυνος αερολυματοποίησης. Πρόκειται για ένα περιβάλλον υψηλού κινδύνου για την *Legionella pneumophila*, δεδομένης της θερμοκρασίας του νερού σε αυτά τα συστήματα άρδευσης. Ωστόσο, αρκετά συστήματα αστικών λυμάτων έχουν συσχετιστεί με κρούσματα *Legionella pneumophila*, τα οποία συνδέονται ιδιαίτερα με λύματα που επηρεάζονται από τα ρεύματα αποβλήτων με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά συστατικά και υψηλή θερμοκρασία, όπως από τα ζυθοποιεία ή τις χαρτοβιομηχανίες. Επομένως η συμπερίληψη των συστημάτων επαναχρησιμοποίησης που βασίζονται σε αυτά τα νερά είναι δικαιολογημένη (Dingemans et al., 2020).

Τέλος, οι Kaixiong et al. (2019) συνέλεξαν δείγματα αέρα για να μελετήσουν τις συνθέσεις των βακτηρίων που μεταφέρονται με τον αέρα σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Η μελέτη εντόπισε ότι η μηχανική ανάδευση, το εσωτερικό περιβάλλον και οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας ήταν οι σημαντικές πηγές εκπομπών. Ειδικότερα, τα δεδομένα παρακολούθησης έδειξαν ότι το εσωτερικό περιβάλλον των εγκαταστάσεων επεξεργασίας είχε υψηλότερη συγκέντρωση βακτηρίων. Αυτές οι εκπομπές σχετίζονταν κυρίως με την ιλύ και τα ιδιαίτερα μολυσμένα λύματα. Ωστόσο, συγκριτικά, οι εξωτερικές εγκαταστάσεις παρουσίασαν υψηλότερη συγκέντρωση αερομεταφερόμενων βακτηρίων.

3.2.2.2 Ανθεκτικά στα αντιβιοτικά βακτήρια

Η παρουσία των αντιβιοτικών στο περιβάλλον οφείλεται στην εναπόθεσή τους από διάφορες πηγές, όπως είναι η απόρριψη των αχρησιμοποίητων ή ληγμένων φαρμάκων, η διάθεση των υγρών αποβλήτων από τις φαρμακευτικές βιομηχανίες ή τα νοσοκομεία και η χρήση των κτηνιατρικών φαρμακευτικών προϊόντων. Η πλειονότητα των αντιβιοτικών απεκκρίνεται με τα κόπρανα και τα ούρα (που κυμαίνεται από 30% έως 90% της πρόσληψης), είτε στην αρχική τους μορφή είτε ως υποπροϊόντα.

Μερικά από τα αντιβιοτικά που ανιχνεύονται συνήθως περιλαμβάνουν τις σουλφοναμίδες (όπως είναι η σουλφαμεθοξαζόλη και η σουλφαπυριδίνη), τη τριμεθοπρίμη, τις φθοριοκινολόνες (συμπεριλαμβανομένης της σιπροφλοξασίνης, της οφλοξασίνης και της ενοφλοξασίνης), τις τετρακυκλίνες (όπως η τετρακυκλίνη και η οξυτετραδετρακυκλίνη (ασυχροκίνη) και τα μακρολίδια (ερυθρομυκίνη). Δεδομένου ότι τα περισσότερα απόβλητα των αστικών μονάδων επεξεργασίας λυμάτων περιέχουν υπολείμματα αντιβιοτικών, ανθεκτικά στα αντιβιοτικά γονίδια (ARGs) και βακτήρια ανθεκτικά στα αντιβιοτικά (ARBs), οι μονάδες επεξεργασίας θεωρούνται ως μία από τις σημαντικότερες πηγές ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά (Marano et al., 2019).

Επομένως, η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων για την άρδευση αποτελεί σημαντική οδό μεταφοράς των αντιβιοτικών και των ARGs και ARBs στο περιβάλλον και έχει ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα να προκύψει η ανάπτυξη των γονιδίων ανθεκτικότητας έναντι των παθογόνων μικροοργανισμών με επιπτώσεις στη μικροβιακή χλωρίδα του εδάφους. Η αντίσταση μπορεί να αποκτηθεί μέσω της επαγωγής και επιλογής ή της οριζόντιας μεταφοράς γονιδίων (Ofori et al., 2021).

Επιπλέον, τα αντιβιοτικά, τα ARG και τα ARB έχουν την ικανότητα να προσροφώνται και να πολλαπλασιάζονται στο έδαφος και στη συνέχεια να απορροφώνται από τα καλλιεργούμενα φυτά. Στη συνέχεια, μπορούν να μεταφερθούν σε διάφορους φυτικούς ιστούς, συμπεριλαμβανομένων των τμημάτων που καταναλώνονται από τον άνθρωπο, εισχωρώντας έτσι στην τροφική αλυσίδα. Αυτή η κατάσταση δημιουργεί σημαντική ανησυχία για την ανθρώπινη υγεία, κυρίως όταν αυτά τα φυτά καταναλώνονται ωμά. Η συμβολή της άρδευσης των λυμάτων στη διάδοση των ARGs και ARBs στο έδαφος δεν είναι πλήρως κατανοητή και υπάρχουν διαφορετικά συμπεράσματα από διαφορετικές μελέτες (Becerra-Castro et al., 2015).

Ο ΠΟΥ έχει υποδείξει ότι η απόρριψη και η έκθεση στα ARBs μέσω των οικιακών λυμάτων πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατόν σε χαμηλότερα επίπεδα. Για να καταδειχθεί αυτό, θα ήταν ωφέλιμο να υπάρξει καθοδήγηση και να επιλεγεί ένα σημείο αναφοράς για την αντοχή στα αντιβιοτικά, όπως είναι το *E. coli* με εκτεταμένου φάσματος βήτα-λακταμάσες (ESBL), δεδομένου ότι αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο βακτήριο και ένα από τα ανθεκτικά βακτήρια που προκαλούν ανησυχία καθώς ανευρίσκεται σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις με καλές διαθέσιμες μεθόδους για την καταμέτρηση στα υγρά απόβλητα (Dingemans et al., 2020).

Τέλος, η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων πριν και μετά με την εφαρμογή γονιδίων και βακτηρίων που σχετίζονται με τα αντιβιοτικά διερευνήθηκε από τους Zhiguo et al., (2019). Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με ετερότροφα βακτήρια, τα προφίλ ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά και τα γονίδια ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή της υπεριώδους απολύμανσης ήταν εξαιρετικά αποτελεσματική στην αλλαγή της δομής της βακτηριακής κοινότητας και της ικανότητας αντίστασης στα αντιβιοτικά. Περαιτέρω, η αντοχή στα αντιβιοτικά συνδεόταν σε μεγάλο βαθμό με την κοινότητα της βακτηριακής δύναμης στα υγρά απόβλητα (Choudri et al., 2020).

3.2.2.3 Παράσιτα

Μεταξύ των ειδών εντερικών νηματωδών, οι ασκαρίδες (*Ascaris lumbricoides*), τα αγκυλόστομα (*Ancliyostoma duodenale*), (*Necator americanus*) και τα τριχίουρα (*Trichuris*) αποτελούν τον υψηλότερο κίνδυνο για την υγεία. Στις ανεπτυγμένες χώρες, το 2% των ενηλίκων και το 6-8% των παιδιών μολύνονται από πρωτοζωικές κύστεις της *Giardia*, προκαλώντας ιογενείς επιδημίες. Το κρυπτοσπορίδιο (*Cryptosporidium parvum*), είναι το δεύτερο συχνότερο υδατογενές παθογόνο παγκοσμίως και ευθύνεται για το 2% όλων των περιπτώσεων διάρροιας στις ανεπτυγμένες χώρες, συμπεριλαμβανομένου του 7% στα παιδιά και του 14% στους ασθενείς με AIDS (Ungureanu et al., 2020).

Οι Tripathi et al., (2019) αξιολόγησαν τις καλλιέργειες που αρδεύονται από τα λύματα για την παρουσία κολοβακτηριδίων. Η αξιολόγηση έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα εδάφη και τις δύο καλλιέργειες λαχανικών συγκεκριμένα για το κουνουπίδι και τη μελιτζάνα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων στο πεδίο έδειξαν την παρουσία κολοβακτηριδίων στο προφίλ του εδάφους. Η συγκέντρωση της παρουσίας κολοβακτηριδίων μειώθηκε όσον αφορά το βάθος του εδάφους. Οι ερευνητές διαπίστωσαν επίσης ότι η υπόγεια στάγδην

άρδευση έπαιξε σημαντικό ρόλο στη μείωση του φορτίου των κολοβακτηριδίων στο έδαφος. Το συμπέρασμα ήταν ότι τα εδάφη θα μπορούσαν να παρακολουθούνται για να εξασφαλιστεί η ασφαλής παραγωγή των λαχανικών ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι για την υγεία των καταναλωτών.

3.2.2.4 Ιοί

Διάφορες μελέτες επιβεβαιώνουν τη σημαντική παρουσία των εντερικών ιών στα δευτερογενή επεξεργασμένα λύματα, με τον αδενοϊό να είναι ο πιο συνηθισμένος. Η παρουσία ιών στα υγρά απόβλητα θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε διάφορα ζητήματα υγείας και στην πρόκληση ασθενειών όπως μηνιγγίτιδα, εγκεφαλίτιδα, ηπατίτιδα, καθώς και λοιμώξεις στο γαστρεντερικό και αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου (Ofori et al., 2021).

Έχει παρατηρηθεί ο υψηλός επιπολασμός των εντερικών ιών στην εκροή των δευτερογενώς επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, με τον αδενοϊό να είναι ο επικρατέστερος. Επίσης, ορισμένες ασθένειες που μπορεί να προκληθούν λόγω της παρουσίας ιών στα υγρά απόβλητα είναι η μηνιγγίτιδα, η εγκεφαλίτιδα, η ηπατίτιδα και οι λοιμώξεις του γαστρεντερικού και αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπου (Ofori et al., 2021).

Οι Wolf, et al., (2019) διεξήγαγαν μελέτη για την επεξεργασία του νερού και των υγρών αποβλήτων χρησιμοποιώντας τη διαδικασία επεξεργασίας με όζον για να ανακαλύψουν υποκατάστατα για την παρακολούθηση της αδρανοποίησης των ιών. Ο προσδιορισμός των υποκατάστατων ήταν η απομάκρυνση της απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας, της καρβαμαζεπίνης και των ρυπογόνων μικροοργανισμών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αδρανοποίηση του ιού ήταν πολύ γρήγορη και ιδιαίτερα αποτελεσματική για την επεξεργασία των επιφανειακών υδάτων σε σχέση με τα λύματα. Συνολικά, η διαδικασία της τεχνολογίας του όζοντος ήταν αποτελεσματική στην απομάκρυνση των ιών καθώς και στην παρουσία καρβαμαζεπίνης στην επεξεργασία.

3.3 Οικονομικές επιπτώσεις

Προκειμένου να αποκτηθεί μια ολοκληρωμένη αντίληψη και να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι αντισταθμιστικές επιπτώσεις της χρήσης των επεξεργασμένων λυμάτων για τους σκοπούς

της γεωργικής άρδευσης, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη το οικονομικό κόστος και τα οφέλη που συνδέονται με αυτό το σύστημα. Οι λεπτομερείς τεχνικές και οικονομικές μελέτες περίπτωσης που πραγματοποιήθηκαν από τους Verlicchi et al. (2012) και Giannoccaro et al. (2019) έχουν παράσχει πολύτιμες γνώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της τεχνικής και οικονομικής βιωσιμότητας των έργων για την άρδευση των καλλιεργειών με ανακυκλωμένο νερό (Ofori et al., 2021).

3.3.1 Δαπάνες και έσοδα των αγροτικών καλλιεργειών

Η φυτική παραγωγή χρειάζεται μια σταθερή παροχή νερού για την κάλυψη των απαιτήσεων σε νερό και την πρόληψη της υδατικής καταπόνησης των καλλιεργειών, καθώς το τελευταίο έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών οδηγώντας τελικά στη μείωση της αγροτικής παραγωγής (Sadras et al., 2016). Η χρήση των υγρών αποβλήτων για άρδευση όχι μόνο εμπλουτίζει το έδαφος με θρεπτικά συστατικά και προάγει την ανάπτυξη των καλλιεργειών, αλλά διασφαλίζει επίσης ότι οι αγρότες έχουν μια αξιόπιστη πηγή νερού για την άρδευση των καλλιεργειών τους, ακόμη και σε περιόδους ξηρασίας. Αυτό επιτρέπει στους αγρότες να διατηρούν τα βέλτιστα επίπεδα υγρασίας του εδάφους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, οδηγώντας σε σταθερές και υψηλότερες αποδόσεις των καλλιεργειών και, κατά συνέπεια, σε μεγαλύτερες οικονομικές απολαβές (Verlicchi et al., 2012).

Στην περιοχή Tiznit (Μαρόκο), η πρακτική της χρήσης των επεξεργασμένων λυμάτων για τη γεωργική άρδευση είχε θετικό αντίκτυπο στο εισόδημα και το βιοτικό επίπεδο των αγροτών. Αυτή η μέθοδος επέτρεψε στους αγρότες να μειώσουν τα έξοδά τους για χημικά λιπάσματα, βελτιώνοντας παράλληλα την απόδοση των καλλιεργειών χάρη στα ευεργετικά αποτελέσματα των επεξεργασμένων λυμάτων. Επομένως λόγω της πλούσιας περιεκτικότητας σε θρεπτικά συστατικά η εφαρμογή των υγρών αποβλήτων συμβάλλει στην εξοικονόμηση χρημάτων για τους αγρότες εφόσον αντικαθιστούν τη χρήση των χημικών λιπασμάτων (Malki et al., 2017).

Εκτός από τη δημιουργία άμεσου και έμμεσου εισοδήματος για τους αγρότες, όπως είναι οι αυξημένες πωλήσεις από τις υψηλότερες αποδόσεις και την εξοικονόμηση των λιπασμάτων, η άρδευση με λύματα παρέχει επίσης μη εμπορεύσιμα οφέλη στην κοινωνία. Αυτό συνεπάγεται με την αναγνώριση της χρηματικής αξίας στη συμβολής τους για τη διατήρηση των υδάτινων πόρων. Με τη χρησιμοποίηση των λυμάτων για την άρδευση των καλλιεργειών, μειώνεται η πίεση στα αποθέματα του γλυκού νερού και αποτρέπεται η

απόρριψη των λυμάτων στους υδάτινους πόρους. Η μη αγοραία αξία αυτής της προσέγγισης θα μπορούσε να φτάσει τα 0,31 ευρώ ανά κυβικό μέτρο νερού, δυνητικά υπερβαίνοντας το κόστος επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων. Τα οικονομικά οφέλη από την άρδευση με υγρά απόβλητα είναι σημαντικά και περιλαμβάνουν τόσο νομισματικές όσο και μη νομισματικές πτυχές, ωστόσο η τελευταία συχνά παραβλέπεται. (Alcon et al., 2010)

3.3.2 Οικονομικά οφέλη για τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων ενδέχεται να έχουν σημαντικά οικονομικά οφέλη από την άρδευση με λύματα λόγω της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Εάν οι μονάδες επεξεργασίας χρειάζεται να αντλούν τα λύματα από το χώρο επεξεργασίας προς το υδάτινο σώμα υποδοχής, υπάρχει η πιθανότητα σημαντικής εξοικονόμησης κόστους όσον αφορά τα έξοδα άντλησης.

Αυτό συνέβη στην περίπτωση της μονάδας επεξεργασίας στην πόλη Ferrara της Ιταλίας. Σύμφωνα με τεχνικές και οικονομικές αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι η μονάδα έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά το κόστος άντλησης κατά 200.000,00 € ετησίως. Η μείωση οφειλόταν στην αλλαγή της απόστασης μεταφοράς των επεξεργασμένων λυμάτων από 5 km σε 2 km ως αποτέλεσμα του έργου επαναχρησιμοποίησης (Verlicchi et al., 2012).

Επιπλέον, η μείωση του όγκου των λυμάτων που απαιτεί άντληση θα μπορούσε επίσης να συμβάλει στη μείωση των εξόδων άντλησης. Η εκτροπή μέρους της εκροής της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων για την άρδευση μπορεί να μειώσει την ποσότητα των λυμάτων που πρέπει να απορριφθούν και στη συνέχεια την απαιτούμενη ενέργεια. Για παράδειγμα, οι Giannoccaro et al., (2019) υπολόγισαν ότι περίπου 97 εκατομμύρια m³ /έτος επεξεργασμένων λυμάτων θα μπορούσαν τεχνικά να ανακτηθούν στην Απουλία (Ιταλία) για άρδευση. Είναι σαφές ότι η μείωση αυτή θα οδηγούσε σε χαμηλότερο κόστος άντλησης σε σχέση με την άμεση απόρριψη. Αντίθετα με τη δημιουργία του κόστους σχετικά με τη μεταφορά ενός τέτοιου ανακτήσιμου όγκου, η πρακτική της άρδευσης μπορεί να προσφέρει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη που μπορεί να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση ή στη μείωση αυτών των δαπανών.

Επίσης η μείωση των τελών που καταβάλλουν οι φορείς εκμετάλλευσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων στις ρυθμιστικές αρχές μπορεί να αποφέρει

σημαντικά οικονομικά οφέλη. Πρόκειται για την αρχή "ο ρυπαίνων πληρώνει", η οποία σε ορισμένες χώρες επιβάλλει στις μονάδες επεξεργασίας να καταβάλλουν ένα συγκεκριμένο τέλος για την απόρριψη σε υδάτινους πόρους. Συνήθως, τα τέλη εξαρτώνται από τον όγκο ή το φορτίο και, επομένως, η μείωση του όγκου των λυμάτων που απορρίπτονται θα μπορούσε να μεταφραστεί σε εξοικονόμηση χρημάτων (Ofori et al., 2021).

3.3.3 Επιπρόσθετο κόστος επένδυσης

Η άρδευση με λύματα δημιουργεί επιπρόσθετο κόστος τόσο στους διαχειριστές των εγκαταστάσεων της επεξεργασίας λυμάτων όσο και στους αγρότες. Αυτό περιλαμβάνει την επένδυση που προκύπτει από τη στύλωση των υγρών αποβλήτων για την εκπλήρωση των απαιτήσεων της επαναχρησιμοποίησης μαζί με το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης.

Τα υγρά απόβλητα που προορίζονται για την άρδευση των αγροτικών καλλιεργειών θα πρέπει να πληρούν ορισμένα πρότυπα ποιότητας λόγω των ανησυχιών για την ασφάλεια και τη δημόσια υγεία. Ωστόσο, πολλά βιολογικά συμβατικά επεξεργασμένα υγρά απόβλητα υπολείπονται αυτών των προτύπων και συνεπώς απαιτούν περαιτέρω στύλωση. Το κόστος αυτής της περαιτέρω επεξεργασίας μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0,13 και 0,23 ευρώ ανά κυβικό μέτρο νερού, όπως συνέβη στην περίπτωση της Μούρθια στην Ισπανία (Alcon et al., 2010).

Το κόστος μεταφοράς αποτελείται από διάφορα έξοδα όπως την εγκατάσταση δεξαμενών και σωληνώσεων μαζί με την άντληση που χρειάζονται για τη μεταφορά των επεξεργασμένων λυμάτων στον προορισμό τους. Σε περιπτώσεις όπου οι αγρότες δεν έχουν άμεση πρόσβαση στην εγκατάσταση επεξεργασίας, θα χρειαστούν την κατασκευή υποδομών μεταφοράς και αποθήκευσης. Δυστυχώς, οι τρέχουσες γραμμές διανομής πόσιμου νερού είναι ακατάλληλες για τη μεταφορά των λυμάτων στις αγροτικές περιοχές, καθιστώντας έτσι αναγκαία την κατασκευή νέων γραμμών διανομής (Ruiz-Rosa et al., 2016).

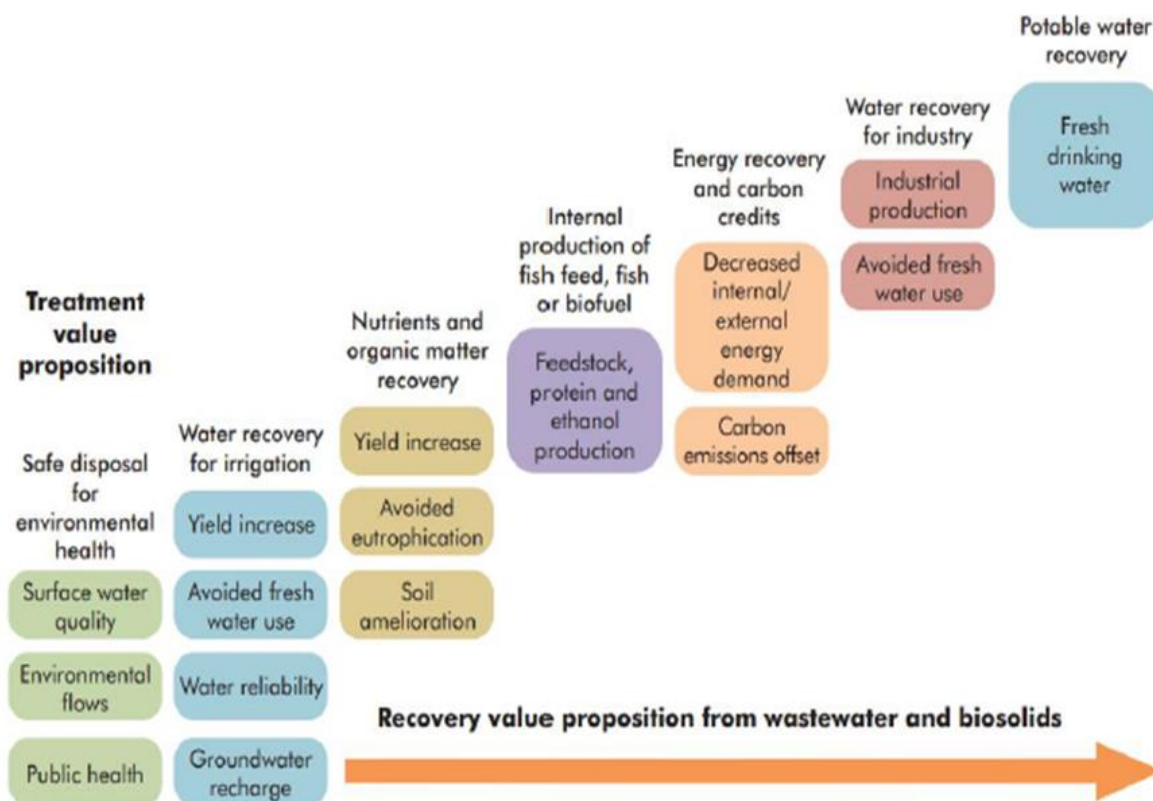
Μια άλλη επιλογή που πρέπει να εξεταστεί αντί για την κατασκευή γραμμών διανομής είναι η χρήση των βυτιοφόρων οχημάτων, τα οποία με τη σειρά τους απαιτούν την εγκατάσταση δεξαμενών αποθήκευσης στο αγρόκτημα. Η δημιουργία αυτών των δαπανηρών υποδομών μπορεί να επιφέρει οικονομική επιβάρυνση τόσο για τους τελικούς χρήστες (αγρότες) όσο και για τους διαχειριστές των σταθμών επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα σε περίπτωση απουσίας της κατάλληλης οικονομικής ενίσχυσης.

Η απουσία των κατάλληλων κινήτρων και της αγοραίας αξίας καθιστά δύσκολη την κάλυψη αυτών των πρόσθετων δαπανών για τους φορείς εκμετάλλευσης. Κατά συνέπεια, οι αγρότες μπορεί να βρεθούν αντιμέτωποι με υψηλότερες δαπάνες για το νερό άρδευσης, το οποίο θα μπορούσε να έχει αρνητικές επιπτώσεις στο εισόδημά τους (Ofori et al., 2021).

3.3.4 Η αξία των λυμάτων

Τα υψηλότερα επίπεδα επεξεργασίας αυξάνουν τις δυνατότητες εκμετάλλευσης των υγρών αποβλήτων, γεγονός που μεταφράζεται σε βελτίωση της ποιότητας του νερού και της δυνατότητας ανάκτησης των πρόσθετων πόρων και υλικών. Η ανάκτηση προϊόντων από τα υγρά απόβλητα παρέχει νέες ευκαιρίες, ενισχύει τα έσοδα και ανεβάζει την επιχείρηση στην κλίμακα πρότασης της οικονομικής αξίας, όπως περιγράφεται στο Σχήμα 3.1. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αυξημένη αξία συνοδεύεται από αυξημένο κόστος επεξεργασίας. Είναι επίσης πιθανό ότι στο μέλλον, οι αυστηρότεροι κανονισμοί σχετικά με την ποιότητα των λυμάτων θα απαιτούν την εξάλειψη των αναδυόμενων ρύπων, καθιστώντας ούτως ή άλλως αναγκαία τα προηγμένα ενεργοβόρα στάδια επεξεργασίας.

Σχήμα 3.1: Κλίμακα προτάσεων της αγοραστικής αξίας των λυμάτων ανάλογα με το επίπεδο επεξεργασίας και τον σκοπό επαναχρησιμοποίησής τους



Πηγή: Drechsel et al., 2015

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ο πιο πολύτιμος πόρος που περιέχεται στα λύματα είναι το ίδιο το νερό. Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων μπορεί να αποτελέσει σημαντική εναλλακτική πηγή γλυκού νερού σε περιοχές που αναμένεται διαρκείς ελλείψεις στο μέλλον (Drechsel et al., 2015).

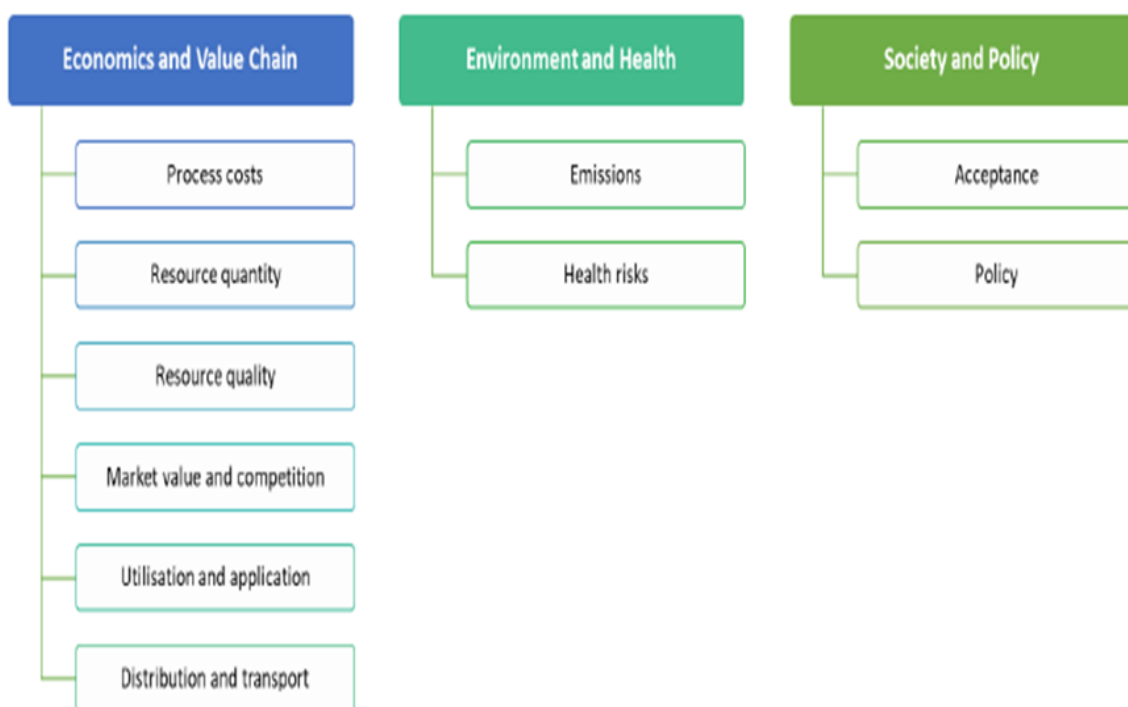
Ωστόσο, η αποτίμηση των υγρών αποβλήτων σημαίνει την αναγνώριση και την εξέταση όλων των διαφορετικών οφελών και κινδύνων που συνδέονται με αυτά, συμπεριλαμβανομένων των οικονομικών, κοινωνικών, οικολογικών παραγόντων και των παραγόντων ασφάλειας, καθώς και των πολιτιστικών και θρησκευτικών διαστάσεων. Ο καθορισμός μιας τιμής που αντικατοπτρίζει την πραγματική αξία των πόρων που ανακτώνται από τα υγρά απόβλητα είναι κρίσιμος για τη μακροπρόθεσμη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Ωστόσο, ο υπολογισμός της σωστής τιμής δεν είναι απλή υπόθεση. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το άρθρο 9 της οδηγίας-πλαισίου για τα ύδατα εισάγει την αρχή της ανάκτησης του κόστους για τις υπηρεσίες ύδατος και υποχρεώνει τα μέλη της ΕΕ να παρέχουν επαρκή κίνητρα για τη βιώσιμη χρήση των υδάτινων πόρων.

Επιπλέον, η οδηγία προωθεί την εσωτερικευση του περιβαλλοντικού κόστους και του κόστους των πόρων που προκύπτουν από τις υφιστάμενες χρήσεις των υδάτινων πόρων και των υδάτινων οικοσυστημάτων (Environment and Natural Resources Department, 2022).

3.3.5 Προκλήσεις στην αξιοποίηση των πόρων ανάκτησης από τα λύματα

Στον ακαδημαϊκό χώρο έχουν διερευνηθεί πολλά συστήματα τεχνολογιών για την ανάκτηση του νερού, της ενέργειας, των λιπασμάτων και άλλων προϊόντων από τα λύματα, ωστόσο ελάχιστες από αυτές έχουν εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα επειδή βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο καθώς και λόγω των μη τεχνικών εμποδίων που παρουσιάζει η εφαρμογή τους. Στη πρόσφατη μελέτη των Kehrein et al., (2020) που περιελάμβανε εκτεταμένη ανασκόπηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας οι ερευνητές εντόπισαν εννέα σημεία συμφόρησης που μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

Σχήμα 3.2: Προκλήσεις στην επιτυχή ανάκτηση πόρων από τα λύματα



Πηγή: Kehrein et al., 2020

Τα περισσότερα από τα εμπόδια που εντοπίστηκαν σχετίζονται με την οικονομία και την ανάπτυξη της αγοραστικής αξίας. Ειδικότερα, το δυναμικό της αγοράς και ο ανταγωνισμός

είναι οι κύριες αβεβαιότητες που περιβάλλουν το επιτυχές μοντέλο ανάκτησης πόρων από τα λύματα.

3.4 Ζητήματα των συστημάτων άρδευσης που χρησιμοποιούνται στην ανάκτηση των λυμάτων

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος άρδευσης που εξαρτάται αποκλειστικά από τα λύματα, εκτός από το υψηλό κόστος του εξοπλισμού και του εδάφους, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα λύματα παράγονται συνεχώς και ισόποσα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, αλλά η ζήτηση για την άρδευση είναι κυκλική (Muyen et al., 2011).

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες μεθόδων άρδευσης:

- η πλημμυρική άρδευση και η άρδευση με αυλάκια, όπου τα λύματα εφαρμόζονται στην επιφάνεια του εδάφους, και συνήθως εφαρμόζεται στις περιαστικές και αγροτικές καλλιέργειες,
- τα συστήματα ψεκασμού και καταιονισμού όπου τα υγρά απόβλητα εφαρμόζονται στην κορυφή των καλλιεργειών και
- η τοπική (στάγδην άρδευση) όπου τα λύματα εφαρμόζονται τοπικώς απευθείας στο έδαφος (Keraita et al., 2007).

Η πλημμυρική άρδευση μπορεί να μολύνει σοβαρά ένα ολόκληρο χωράφι, αυξάνοντας την πιθανότητα άμεσης επαφής των λυμάτων που είναι μολυσμένα με παθογόνα με τον άνθρωπο και του βρώσιμου μέρους των φυτών και, επομένως, εγκυμονεί μεγαλύτερους κινδύνους για την υγεία των καταναλωτών των τροφίμων που αρδεύονται με λύματα. Ωστόσο, θεωρείται αποτελεσματικό στον περιορισμό της συσσώρευσης των αλάτων στη ζώνη των ριζών (Ganjegunte et al., 2017).

Τα συστήματα άρδευσης με καταιονισμό μπορούν να βελτιώσουν την έκπλυση του αλατιού κάτω από τις ρίζες των φυτών, αλλά μπορούν επίσης να αυξήσουν την επίδραση της τοξικότητας των ιόντων στις ευαίσθητες καλλιέργειες, επειδή το αλάτι συσσωρεύεται στα φύλλα τους. Μια παράμετρος που πρέπει να παρακολουθείται κατά την εφαρμογή της άρδευσης με καταιονισμό είναι η συγκέντρωση του υπολειμματικού χλωρίου καθώς, στην ιδανική περίπτωση, το υπολειμματικό χλώριο πρέπει να είναι μικρότερο από 1 mg/L για να μην επηρεάσει το φύλλωμα, ενώ σε τιμές που υπερβαίνουν τα 5 mg/L έχουν παρατηρηθεί σοβαρές βλάβες στο φύλλωμα (Pedrero et al., 2010).

Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι η στάγδην άρδευση αποτελεί μια τεχνολογία εξοικονόμησης νερού με θετικές επιπτώσεις στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Η εφαρμογή των λυμάτων απευθείας στο έδαφος ελαχιστοποιεί τους κινδύνους για την υγεία και το περιβάλλον και καθιστά την στάγδην άρδευση αποτελεσματική στην αποφυγή της μόλυνσης με παθογόνους μικροοργανισμούς , διασφαλίζοντας έτσι την υγεία των εργαζομένων (Tripathi et al.,2016).

Η υπόγεια στάγδην άρδευση προωθεί την υψηλότερη απόδοση των καλλιεργειών σε σύγκριση με την επιφανειακή στάγδην άρδευση μπορεί να μειώσει τους περιβαλλοντικούς κινδύνους και να μειώσει τα ποσοστά έκπλυσης των νιτρικών αλλά έχει το μειονέκτημα ότι είναι πολύ δύσκολο να γίνει αντιληπτό όταν φράζει ένας πομπός. Η υπόγεια στάγδην άρδευση με μη επεξεργασμένα ή ανεπαρκώς επεξεργασμένα λύματα, τα οποία περιέχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις κοπρανωδών και ανθρώπινων παθογόνων μικροοργανισμών, ενέχει τον κίνδυνο μόλυνσης των υπόγειων υδάτων (Lonigro et al., 2016).

Τα αιωρούμενα στερεά, η οργανική ύλη, οι μικροοργανισμοί , η καθίζηση των ορυκτών λόγω του υψηλού pH των υγρών αποβλήτων ή η ανάπτυξη φυκιών στα υγρά απόβλητα μπορούν να φράξουν τα ακροφύσια των συστημάτων άρδευσης με σταγόνες και καταιονισμό , με το υψηλότερο ποσοστό εμφάνισης στην περίπτωση των συστημάτων με καταιονισμό (ψεκαστήρες). Το φράξιμο των ακροφυσίων και των σωλήνων σημαίνει υψηλότερο κόστος συντήρησης και μειωμένα κέρδη για τους γεωργούς. Έτσι, για την επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων, κατά την επιλογή του τύπου του εκτοξευτήρα για το σύστημα άρδευσης με σταγόνες, πρέπει να γνωρίζουμε ότι οι περιστροφικοί εκτοξευτήρες είναι πιο ευαίσθητοι στο φράξιμο από τους εκτοξευτήρες λαβυρίνθου και ότι ο κίνδυνος απόφραξης είναι μικρότερος σε εκτοξευτήρες με υψηλότερο ρυθμό εκροής από ό,τι σε παρόμοιους εκτοξευτήρες με χαμηλότερο ρυθμό εκροής (Valipour and Singh, 2016).

Όπως αναφέρουν στην εργασία τους οι Li et al., (2010), η απόφραξη των συστημάτων της στάγδην άρδευσης από την ανάπτυξη των φυκιών μπορεί να αποφευχθεί ή να αντιμετωπιστεί με τη χλωρίωση του ανακτημένου νερού. Από την άλλη πλευρά, τονίζεται η ανάγκη απολύμανσης των υγρών αποβλήτων κατά την άρδευση με καταιονισμό, καθώς η συγκεκριμένη μέθοδος άρδευσης αυξάνει τον κίνδυνο μόλυνσης των καλλιεργειών με παθογόνα, αλλά και της περιοχής κοντά στις καλλιέργειες, με βακτήρια και ιούς που μεταδίδονται εύκολα με τα αερολύματα (Kamizoulis, 2008).

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑΣ

Οι κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ του 2006 προτείνουν μια προσέγγιση με πολλαπλές παρεμβάσεις στα οποία η επεξεργασία των λυμάτων αποτελεί μόνο μία από τις διάφορες επιλογές επεξεργασίας και μη επεξεργασίας για την προστασία της δημόσιας υγείας (WHO 2006). Οι στόχοι που τέθηκαν με βάση την υγεία, εκτιμώνται από ένα τυποποιημένο μέτρο της ασθένειας που επιλέγεται σε σχέση με τα έτη ζωής προσαρμοσμένα στην αναπηρία (DALYs). Ως εκ τούτου, η επεξεργασία, όπου είναι δυνατόν, συνδυάζεται με άλλα μέτρα προστασίας της υγείας σε επίπεδο αγρότη, εμπόρου και καταναλωτή. Τα μέτρα προστασίας εφαρμόζονται σε κρίσιμα σημεία ελέγχου κατά μήκος της αλυσίδας τροφίμων από την παραγωγή έως την κατανάλωση, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κινδύνου και τη δημιουργία μιας σειράς προστατευτικών μέτρων που μπορεί να είναι αποτελεσματική ακόμη και αν ένα από αυτά αποτύχει. Για παράδειγμα, τα μέτρα μπορούν να τοποθετηθούν σε σημεία παραγωγής των υγρών αποβλήτων, στη γεωργική εκμετάλλευση, στις αγορές και στο επίπεδο του καταναλωτή (Σχήμα 4.1).

Σχήμα 4.1: Η προσέγγιση των πολλαπλών παρεμβάσεων για τη μείωση των κινδύνων σχετικά με την κατανάλωση κατά μήκος της τροφικής αλυσίδας, όπως εφαρμόζεται στην άρδευση με επεξεργασμένα λύματα



Πηγή: Amoah et al., 2007

Ενώ η συγκεκριμένη προσέγγιση φαίνεται να εφαρμόζεται περισσότερο σε χώρες χαμηλού εισοδήματος, όπου η άρδευση με ανεπεξέργαστα λύματα αποτελεί κοινή πρακτική και η επεξεργασία των λυμάτων είναι περιορισμένη, η προσέγγιση αυτή έχει ήδη θεσμοθετηθεί στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες που έχουν υιοθετήσει τις αρχές της ανάλυσης των κινδύνων και των κρίσιμων σημείων ελέγχου (HACCP) (Pic et al. 2010).

4.1 Παρεμβάσεις βιοφυσικής διαχείρισης για τη μείωση του κινδύνου

Οι κίνδυνοι από τη χρήση των ανεπεξέργαστων ή μερικώς επεξεργασμένων λυμάτων στη γεωργία μπορούν να μειωθούν με τις επιλογές της επεξεργασίας ή/και μη επεξεργασίας των λυμάτων ή με συνδυασμό και των δύο (WHO, 2006). Σε αυτές περιλαμβάνονται:

- 1) η βελτίωση της ποιότητας του νερού,
- 2) ο έλεγχος της έκθεσης του ανθρώπου,
- 3) η διαχείριση των λυμάτων σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης και
- 4) οι παρεμβάσεις στη συγκομιδή και μετά τη συγκομιδή.

4.1.1 Βελτίωση της ποιότητας του νερού

Οι αρχικές βελτιώσεις στην ποιότητα του νερού μπορούν να επιτευχθούν σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες τουλάχιστον με την πρωτογενή επεξεργασία λυμάτων, ιδίως όταν τα λύματα χρησιμοποιούνται για την άρδευση. Η δευτεροβάθμια επεξεργασία μπορεί να εφαρμοστεί με λογικό κόστος σε ορισμένες περιοχές, χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως τις λίμνες σταθεροποίησης των αποβλήτων, τους κατασκευασμένους υγροβιότοπους, τις δεξαμενές σταθεροποίησης για τη χρήση λυμάτων και άλλους σκοπούς, τη χερσαία ροή, τη διήθηση-διύλιση, τις σηπτικές δεξαμενές, τις υποθαλάσσιες και τις μεγάλες εκβολές των ποταμών διήθησης-διύλισης, και τους αντιδραστήρες της αναερόβιας ιλύος με ανερχόμενη ροή (Mara, 2003).

Οι πρόσφατες κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ παρέχουν συμπληρωματικές επιλογές για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και τον έλεγχο της ανθρώπινης έκθεσης (WHO, 2006). Η αποθήκευση του ανακτημένου νερού σε δεξαμενές βελτιώνει τη μικροβιολογική ποιότητα και παρέχει τη δυνατότητα κορυφαίας εξισορρόπησης, γεγονός που αυξάνει την

αξιοπιστία της παροχής και βελτιώνει το ποσοστό της επαναχρησιμοποίησης (Grabow and McCormick, 2007).

Η ολοκληρωμένη διαχείριση της επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων για την ελαχιστοποίηση του κόστους επεξεργασίας και την αύξηση της γεωργικής παραγωγικότητας κερδίζει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον σε πολλές χώρες. Στην Drarga του Μαρόκου, όπου απορρίπτονταν τα ανεπεξέργαστα λύματα, μολύνοντας τα αποθέματα του πόσιμου νερού, δημιουργήθηκε μια θεσμική σύμπραξη με τη συμμετοχή των τοπικών φορέων διαχείρισης των υδάτων, των αστικών χρηστών του νερού και των ομάδων χρηστών του γεωργικού νερού. Για να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα του προγράμματος της επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης επιβλήθηκαν τέλη για την παροχή οικιακού νερού και εφαρμόστηκαν άλλοι μηχανισμοί ανάκτησης του κόστους (USEPA, 2004).

Ο τεχνητός εμπλουτισμός του υπογείων υδάτων μέσω βαθιάς διήθησης μπορεί να απομακρύνει τους μικροοργανισμούς, εφόσον το έδαφος έχει τις κατάλληλες ιδιότητες και εξασφαλίζεται η αποτελεσματική διαχείριση της διαδικασίας. Τα βασικά στοιχεία περιλαμβάνουν τους κατάλληλους κύκλους κατάκλισης και ξήρανσης, τη διατήρηση επαρκών μικροβιολογικών πληθυσμών και τη διατήρηση επαρκούς απόστασης και μεταβατικού χρόνου μεταξύ των λεκανών διήθησης και των φρεατίων ύδρευσης. Επιπλέον απαιτείται συνεχής παρακολούθηση του υδροφόρου ορίζοντα για τον εντοπισμό των αναδυόμενων προβλημάτων υγείας που μπορούν να προκύψουν (Jimenez and Chávez, 2004).

Επίσης πρέπει να θεσπιστούν ουσιαστικά κριτήρια σύμφωνα με τα τοπικά, τεχνικά, οικονομικά, κοινωνικά και πολιτιστικά δεδομένα. Επιπλέον, η βελτίωση της ποιότητας των υδάτων απαιτεί νέες προσεγγίσεις για τη διαχείριση των λυμάτων στις πόλεις, π.χ. την υποδιαίρεση των πόλεων σε διαχειρίσιμες μονάδες, όπως η περίπτωση της Μπανγκόγκ που αποτελεί παράδειγμα για τη σταδιακή επίτευξη των στόχων (Qadir et al., 2010).

4.1.2 Έλεγχος της ανθρώπινης έκθεσης

Τα μέτρα προστασίας, όπως η χρήση μπότας και γαντιών και η αλλαγή των μεθόδων άρδευσης, μπορούν να μειώσουν την έκθεση των γεωργών. Οι αγρότες μπορούν επίσης να πλένουν τα χέρια και τα πόδια τους μετά την εμβύθιση σε λύματα για να αποτρέψουν την εξάπλωση της μόλυνσης. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι μειώνουν τον κίνδυνο σε διαφορετικό βαθμό, ο οποίος για να γίνει κατανοητός πρέπει να δοθεί προτεραιότητα και να

υποστηριχθεί, μέσω των εκστρατειών ευαισθητοποίησης. Οι δημόσιες υπηρεσίες μπορούν επίσης να εφαρμόσουν εκστρατείες εμβολιασμού των παιδιών κατά των ασθενειών που μπορούν να μεταδοθούν μέσω της χρήσης των υγρών αποβλήτων και μπορούν να στοχεύουν σε επιλεγμένες ομάδες (αυτούς που παράγουν τα υγρά απόβλητα και αυτούς που τα χρησιμοποιούν) για τη διεξαγωγή περιοδικών εκστρατειών για την προστασία από την ελμινθίαση (WHO, 2006).

4.1.3 Διαχείριση των επεξεργασμένων λυμάτων σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης

Η βελτίωση της ποιότητας της άρδευσης με λύματα εξαρτάται από την εφαρμογή των κατάλληλων πρακτικών σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης και των παρεμβάσεων μετά τη συγκομιδή, οι οποίες ταξινομούνται ως επιλογές μη επεξεργασίας και μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κύριες κατηγορίες:

1. στην επιλογή και τη διαφοροποίηση των καλλιεργειών όσον αφορά την αγοραία αξία, τις απαιτήσεις της άρδευσης και την ανοχή στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις,
2. στη διαχείριση της άρδευσης με βάση την ποιότητα του νερού και τις μεθόδους, τη συχνότητα και τον προγραμματισμό της άρδευσης και
3. τις εκτιμήσεις με βάση το έδαφος, όπως τα χαρακτηριστικά του εδάφους, οι πρακτικές προετοιμασίας του εδάφους, η εφαρμογή λιπασμάτων και βελτιωτικών εδάφους, εάν χρειάζεται, και οι πτυχές της υγείας του εδάφους.

4.1.3.1 Περιορισμός, διαφοροποίηση και επιλογή των καλλιεργειών

Τα λαχανικά (32% συχνότητα ανταπόκρισης) είναι εκτός από τα δημητριακά (27%) οι πιο κοινές καλλιέργειες που παράγονται με την άρδευση από αραιά ή ακατέργαστα λύματα (Raschid-Sally and Jayakody, 2008). Καθώς ειδικά τα λαχανικά καταναλώνονται συχνά ωμά και έρχονται σε άμεση επαφή με το νερό, οι περιορισμοί των καλλιεργειών είναι πολύ χρήσιμοι για τη μείωση των κινδύνων για ανθρώπινη υγεία. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι περιορισμοί είναι δύσκολο να εφαρμοστούν, επειδή η ζήτηση για τα λαχανικά είναι υψηλή στις πόλεις και μόνο ορισμένες εκμεταλλεύσιμες καλλιέργειες επιτυγχάνουν το επίπεδο κέρδους που χρειάζονται οι αγρότες για να διατηρήσουν τα προς το ζην (Drechsel et al., 2002). Η πιθανότητα επιτυχημένης εφαρμογής των περιορισμών στις επιλογές των καλλιεργειών είναι μεγαλύτερη όταν οι υδάτινοι πόροι διαχειρίζονται

από τους δημόσιους φορείς, τα αρδευτικά έργα έχουν ισχυρή κεντρική διαχείριση και υπάρχει καλή χρηματοδότηση για την επιβολή του νόμου (Lazarova and Bahri, 2005).

Μια εναλλακτική λύση θα μπορούσε να είναι η παραγωγή αγροδοσικών ειδών που καλλιεργούνται για καύσιμα και ξυλεία, είτε επιδοτούμενα είτε αν υπάρχει σχετική κερδοφόρα ζήτηση στην αγορά (Minhas και Samra, 2004).

Για να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις της υπερβολικής ή μη ισορροπημένης προσθήκης των θρεπτικών συστατικών σε εδάφη και καλλιέργειες που αρδεύονται από υγρά απόβλητα, οι γεωργοί μπορούν να επιλέξουν καλλιέργειες λιγότερο ευαίσθητες σε υψηλά επίπεδα θρεπτικών συστατικών ή που χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες κύριων θρεπτικών συστατικών, όπως το άζωτο και ο φώσφορος. Για παράδειγμα, τα φυλλώδη λαχανικά μπορούν να απορροφήσουν υψηλότερα επίπεδα αζώτου. Ορισμένα αγρωστώδη και κτηνοτροφικές καλλιέργειες είναι κατάλληλα για άρδευση με υγρά απόβλητα, καθώς συσσωρεύουν με ασφάλεια τα θρεπτικά συστατικά που προστίθενται από τα επεξεργασμένα λύματα (Drechsel et al., 2015).

4.1.3.2 Διαχείριση των μεθόδων άρδευσης

Οι συμβουλευτικές υπηρεσίες πρέπει να παρακινούν τους αγρότες να λαμβάνουν υπόψη την ποιότητα του νερού, την πιθανότητα μόλυνσης των καλλιεργειών από παθογόνους παράγοντες κατά την άρδευση και τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον κατά τη διαδικασία της επιλογής των μεθόδων άρδευσης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η επιλογή επηρεάζεται όχι μόνο από την ποιότητα του νερού, αλλά και από την οικονομική προσιτότητα, την προστασία της ιδιοκτησίας, τη διαθεσιμότητα του εργατικού δυναμικού και άλλους παράγοντες που σχετίζονται με την παραγωγή. Η υπόγεια στάγδην άρδευση, κυρίως με υπόγειους σταλάκτες, διασφαλίζει την προστασία των αγροτών και των καταναλωτών από διάφορα παθογόνα και ρυπαντές ελαχιστοποιώντας την έκθεση των καλλιεργειών και του ανθρώπου, αλλά απαιτείται εξοπλισμός άρδευσης με κατάλληλη πυκνότητα φύτευσης και προεπεξεργασία των λυμάτων για να αποφευχθεί η απόφραξη των εκτοξευτήρων (Minhas and Samra, 2004). Όταν τα ποτιστήρια αποτελούν τη προτιμώμενη μέθοδο άρδευσης, υπάρχουν και άλλες πιθανές επιλογές για τη μείωση του φορτίου των παθογόνων μικροοργανισμών κατά την άντληση και την εφαρμογή του νερού (Keraita et al., 2007).

Μια πρόσθετη δυνατότητα είναι η διακοπή της άρδευσης πριν από τη συγκομιδή, ώστε να επιτραπεί η φυσική εξάλειψη των παθογόνων μικροοργανισμών. Ένας συμβιβασμός με μεγαλύτερη πιθανότητα υιοθέτησης θα ήταν η διακοπή της άρδευσης για 2 ημέρες, με μείωση της απόδοσης κατά 10% (Drechsel et al., 2008).

4.1.3.3 Παρεμβάσεις στο έδαφος

Οι διαθέσιμες τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί για την αποκατάσταση των ρυπασμένων με μέταλλα και μεταλλοειδή εδαφών περιλαμβάνουν τις in-situ και ex-situ μηχανικές επιλογές, την in-situ ακινητοποίηση με βάση το έδαφος, τη φυτοεξυγίανση, τη χημική ενισχυμένη φυτοεκχύλιση και τη χρήση διαγονιδιακών καλλιεργειών.

Οι επεμβάσεις στο έδαφος χωρίς την παραγωγή βρώσιμων φυτών είναι σημαντικές, ιδίως στην περίπτωση των ανόργανων ρύπων, όπως τα βαρέα μέταλλα, τα οποία προέρχονται από τις βιομηχανίες και συνήθως συσσωρεύονται στο ανώτερο τμήμα του εδάφους λόγω των ισχυρών φαινομένων προσρόφησης και κατακρήμνισης. Ωστόσο, ορισμένα ιόντα μετάλλων μπορεί να αποτελέσουν πρόβλημα σε όξινα εδάφη, τα οποία χρειάζονται ειδική διαχείριση, όπως ασβέστωση, αποφυγή της χρήσης λιπασμάτων με όξινες αντιδράσεις και επιλογή καλλιεργειών που δεν συσσωρεύουν τα μέταλλα που προκαλούν ανησυχία.

Για τις περιοχές που είναι ήδη μολυσμένες με μικρορύπους, η προσέγγιση που συνήθως ακολουθείται είναι η απομόνωση των προσβεβλημένων περιοχών και είτε η απομάκρυνση του μολυσμένου εδάφους είτε η φυτοεξυγίανση (Drechsel et al., 2015).

Η είσοδος των φυτοφαρμάκων στα ρέματα μπορεί να μειωθεί με την κατασκευή ρυθμιστικών ζωνών, τη μείωση της απορροής και τη χρήση υγροτόπων για την εξυγίανση (Simmons et al. 2010). Η συγκράτηση του μολυσμένου νερού σε φράγματα ή υγροτόπους μπορεί να παρέχει χρόνο για την απομάκρυνση των φυτοφαρμάκων μέσω της καθίζησης ή της αποικοδόμησης. Οι γεωργικές πρακτικές που μειώνουν την απορροή, όπως οι καλλιέργειες υπό κάλυψη ή οι φυτικές ρυθμιστικές λωρίδες, μπορούν να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι βασικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης για τις περισσότερες οργανικές ουσίες είναι η απορρόφηση και η βιοαποικοδόμηση. Η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης των φυτοφαρμάκων είναι συνήθως μεγαλύτερη σε εδάφη πλούσια σε ιλύ, άργιλο και οργανική ουσία (WHO 2006).

Οι επιλογές που βασίζονται στο έδαφος μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των επιπτώσεων των θρεπτικών ουσιών. Για παράδειγμα, τα εδάφη μέσης και λεπτής υφής μπορούν να συγκρατούν περισσότερα θρεπτικά συστατικά από ό,τι τα αμμώδη εδάφη, απελευθερώνοντας έτσι λιγότερες ποσότητες στο νερό που διηθείται μέσω του εδάφους και προστίθεται στα υπόγεια ύδατα (Simmons et al. 2009).

Κατά την άρδευση με υγρά απόβλητα που περιέχουν αυξημένα επίπεδα νατρίου, πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα ώστε να αποφεύγεται η αλλοίωση της δομής του εδάφους. Η άρδευση με αλατούχα λύματα απαιτεί ειδικά προληπτικά μέτρα και στρατηγικές διαχείρισης στην γεωργική εκμετάλλευση, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν:

1. την κατάλληλη επιλογή των καλλιεργειών ή των ποικιλιών καλλιεργειών που μπορούν να παράγουν κερδοφόρες σοδιές με αλατούχα υγρά απόβλητα,
2. την επιλογή των μεθόδων άρδευσης με αλατούχα υγρά απόβλητα που μειώνουν την έκθεση των καλλιεργειών στα άλατα,
3. την εφαρμογή αλατούχων λυμάτων καθ' υπέρβαση των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό (εξατμισοδιαπνοή) για την έκπλυση των πλεοναζόντων αλάτων από τη ζώνη των ριζών, την άρδευση με αλατούχα λύματα σε συνδυασμό με γλυκό νερό, εφόσον είναι διαθέσιμο, μέσω κυκλικών εφαρμογών ή παρεμβάσεων ανάμειξης,
4. την εφαρμογή γεωπονικών παρεμβάσεων, όπως η φύτευση σε σχετικά λιγότερο αλατούχα τμήματα των κορυφογραμμών, η ανατροφή των φυτανίων με γλυκό νερό και η επακόλουθη μεταφύτευσή και άρδυσή τους με αλατούχα λύματα, η εδαφοκάλυψη των αυλακιών για την ελάττωση της συσσώρευσης αλατότητας και τη διατήρηση της εδαφικής υγρασίας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και η αύξηση της πυκνότητας των φυτών για την αντιστάθμιση της πιθανής μείωσης της ανάπτυξης και
5. την εφαρμογή βελτιωτικών ουσιών που παρέχουν ασβέστιο, όπως ο γύψος, στα εδάφη σε περίπτωση άρδευσης με έντονα νατριούχα ή αλατούχα απόβλητα για τον μετριασμό των αρνητικών επιδράσεων του νατρίου στα εδάφη και τις καλλιέργειες (Drechsel et al., 2015).

4.1.4 Παρεμβάσεις στη συγκομιδή και μετά τη συγκομιδή

Οι παρεμβάσεις αυτές αφορούν τη διαδικασία της συγκομιδής, τον καθαρισμό μετά τη συγκομιδή, τον χειρισμό κατά τη μεταφορά, την εμπορική έκθεση, την αποθήκευση και την προετοιμασία στην κουζίνα. Κατά τη συγκομιδή, τα δημητριακά και οι ζωοτροφές που

κόβονται πάνω από ένα ορισμένο ύψος (5-10 cm πάνω από το έδαφος) μπορούν να περιέχουν σημαντικά λιγότερα παθογόνα. Στη Δυτική Αφρική, το υλικό που συλλέγεται ξεπλένεται χωρίς χρώμα στην ίδια πηγή νερού που χρησιμοποιείται για την άρδευση. Επομένως, η εισαγωγή ασφαλέστερων μεθόδων καλλιέργειας μπορεί να είναι αποτελεσματική μόνο εάν βελτιωθούν οι πρακτικές πλύσης στο αγρόκτημα (Obuobie et al., 2006).

Η ελαχιστοποίηση της μόλυνσης κατά τη μεταφορά, η έκθεση στις λαϊκές αγορές και το πλύσιμο (ανανέωση, ψύξη) των λαχανικών στο λιανικό εμπόριο αποτελούν περαιτέρω σημεία εισόδου μετά τη συγκομιδή για τη μείωση του κινδύνου για την υγεία (Drechsel et al., 2007). Το μαγείρεμα των λαχανικών παραμένει ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την επίτευξη της πλήρους μείωσης των παθογόνων μικροοργανισμών, ωστόσο το πλύσιμο είναι σημαντικό για τα λαχανικά όπως το μαρούλι, τα οποία σερβίρονται και καταναλώνονται ωμά (WHO, 2006).

Καθώς οι περισσότερες μολύνσεις από τα παθογόνα είναι εξωγενείς, η αφαίρεση των εκτεθειμένων τμημάτων των λαχανικών, όπως τα εξωτερικά φύλλα στο λάχανο και το ξεφλούδισμα των λαχανικών μειώνει τους κινδύνους για την υγεία από τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Ωστόσο, τα βαρέα μέταλλα και άλλοι τοξικοί μεταβολίτες, αφού προσληφθούν, είναι μάλλον αδύνατο να απομακρυνθούν (Qadir et al., 2010).

4.2 Πολιτικές και θεσμικά ζητήματα

Οι πολιτικές που στοχεύουν στον μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων της χρήσης των λυμάτων, ενώ παράλληλα προωθούν τα πλεονεκτήματά τους, μπορούν να αντιμετωπίσουν την κατάσταση πριν από την παραγωγή λυμάτων, κατά την εφαρμογή τους και μετά την άρδευση των καλλιεργειών και τέλος κατά την προετοιμασία του προϊόντος για εμπορία και κατανάλωση.

Δύο χαρακτηριστικά περιπλέκουν τη χάραξη πολιτικής σχετικά με τη χρήση των λυμάτων στη γεωργία: τα περισσότερα λύματα παράγονται εκτός του γεωργικού τομέα, γεγονός που απαιτεί διάλογο μέσω του χάσματος μεταξύ των αγροτικών και αστικών περιοχών που συνδέει τους τομείς της γεωργίας και της αποχέτευσης. Επιπλέον, η ανησυχία του κοινού ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του εμπλεκόμενου νερού, τα επίπεδα επεξεργασίας, τη

γενική εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση και τον όγκο των πληροφοριών. Όπου είναι δυνατόν, είναι χρήσιμο να γίνεται διάκριση μεταξύ των βιομηχανικών και των οικιακών λυμάτων, καθώς η αντιμετώπιση των κινδύνων για την υγεία που σχετίζονται με παθογόνους μικροοργανισμούς από τα οικιακά λύματα μπορεί να είναι ευκολότερη και λιγότερο δαπανηρή σχετικά με την αντιμετώπιση των χημικών κινδύνων που προέρχονται από τα βιομηχανικά λύματα (Toze, 2006).

4.2.1 Θεώρηση των λυμάτων ως πόρο που απαιτεί ορθή διαχείριση

Η ενσωμάτωση της επαναχρησιμοποίησης στο σχεδιασμό της διαχείρισης των λυμάτων και η υποστήριξη της διαχείρισης των λυμάτων με τέλη από την παροχή νερού για την ανάκτηση του κόστους, την ελαχιστοποίηση του κόστους επεξεργασίας και την αύξηση της γεωργικής παραγωγικότητας κερδίζει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον σε πολλές χώρες. Η καλύτερη δυνατή στρατηγική επεξεργασίας ποικίλλει ανάλογα με τις οικονομικές και θεσμικές δυνατότητες, τις πηγές και τα συστατικά των λυμάτων και θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις της επαναχρησιμοποίησης παρά τα πρότυπα που είναι δύσκολο να διατηρηθούν (Fine et al., 2006).

Σε περιοχές όπου οι αγρότες και άλλοι ανταγωνίζονται για μια περιορισμένη διαθεσιμότητα λυμάτων, η εκχώρηση δικαιωμάτων ιδιοκτησίας μπορεί να ενθαρρύνει την αποτελεσματική χρήση. Τα δικαιώματα ιδιοκτησίας μπορούν να συνδυαστούν με την ευθύνη για την κατάλληλη χρήση των υγρών αποβλήτων και τη διαχείριση των απορρίψεων από τις αρδεύσιμες γεωργικές εκτάσεις.

Με την αυξανόμενη ζήτηση των λυμάτων για την άρδευση των καλλιεργειών σε αστικές και περιαστικές περιοχές, θα καταστεί αναγκαία η κατανομή της περιορισμένης διαθεσιμότητας των λυμάτων μεταξύ των ανταγωνιζόμενων χρηστών, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι οι κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον από την άρδευση με λύματα ελαχιστοποιούνται. Οι επιλογές των πολιτικών περιλαμβάνουν την τιμολόγηση των λυμάτων, την αυστηρή κατανομή και τα εμπορεύσιμα δικαιώματα ιδιοκτησίας, καθώς και τη θεσμοθέτηση των νέων κατευθυντήριων γραμμών του ΠΟΥ (Qadir et al., 2010).

4.2.2 Εφαρμογή οικονομικών κινήτρων

Η βελτίωση των θεσμών και των πολιτικών που επηρεάζουν τη χρήση του γλυκού νερού μπορεί να μειώσει το κόστος της διαχείρισης των λυμάτων. Τα επίπεδα των εκροών, οι

φόροι και οι εμπορεύσιμες άδειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κίνητρα για τη βελτίωση της διαχείρισης των υδάτων από τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις που απορρίπτουν τα λύματα από σημειακές πηγές. Όπου οι αγρότες χρησιμοποιούν ήδη λύματα ή μολυσμένο νερό από ρέματα, θα πρέπει να αναζητηθούν εναλλακτικές πηγές γης και νερού, όπως δρομολογείται επί του παρόντος από τις αρχές της Γκάνας και του Μπενίν (Drechsel et al., 2006).

Όπου προωθείται η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων, τα κίνητρα για τη χρήση τους είναι χρήσιμα, επιτρέποντας στους χρήστες νερού να επιλέγουν μεταξύ διαφορετικών πηγών νερού. Οι χαμηλότερες τιμές του νερού και οι επιδοτήσεις για την αγορά νέου εξοπλισμού μπορούν να επιταχύνουν το ρυθμό με τον οποίο οι αγρότες αρχίζουν να χρησιμοποιούν τα υγρά απόβλητα. Τα κίνητρα μπορούν να συνδυαστούν με παρακολούθηση για να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα προγράμματα κινήτρων και η ασφαλής χρήση των υγρών αποβλήτων (Qadir et al., 2010).

4.2.3 Βελτίωση της οικονομικής διαχείρισης

Οι πολιτικές και τα θεσμικά πλαίσια μπορούν να βοηθήσουν στην εξεύρεση ή τη διάθεση των απαιτούμενων κεφαλαίων. Οι κατάλληλες υψηλές ογκομετρικές χρεώσεις για το γλυκό νερό θα ενθαρρύνουν την εξοικονόμηση νερού και την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων αντί της απόρριψης σε φυσικές υδάτινες οδούς ή σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζεται μια υπηρεσία υγρών αποβλήτων. Υπάρχει νομοθετικό πλαίσιο για τα προγράμματα που δημιουργούν έσοδα με τη χρέωση των χρηστών νερού με ένα τέλος ανά μονάδα λυμάτων που παράγουν (η αρχή "ο ρυπαίνων πληρώνει"), ιδίως όταν τα έσοδα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εγκαταστάσεων για τη συλλογή, επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων (Qadir et al., 2010).

4.2.4 Προστασία και αποζημίωση των χαμηλών κοινωνικοοικονομικών στρωμάτων

Οι δημόσιοι φορείς πρέπει να εξετάζουν τις πιθανές επιπτώσεις στους φτωχούς κατά το σχεδιασμό των πολιτικών και προγραμμάτων. Η μεγαλύτερη πρόκληση μπορεί να είναι η εγγύηση ότι οι κάτοικοι με χαμηλό εισόδημα των περιαστικών και αγροτικών περιοχών που βασίζονται σε μολυσμένα ρέματα ή λύματα για την παραγωγή των καλλιεργειών δεν θα στερηθούν τα προς το ζην. Η απαγόρευση της χρήσης του μολυσμένου νερού θα επηρέαζε, για παράδειγμα, γύρω από την πόλη Kumasi (Γκάνα), περίπου 12.700

νοικοκυριά ή 90.000 άτομα, που εξαρτώνται από την άρδευση κατά την περίοδο της ξηρασίας (Cornish and Lawrence, 2001).

Μπορούν να εφαρμοστούν πολιτικές για την αποζημίωση των φτωχών αγροτών, παρέχοντάς τους εναλλακτικές πηγές αρδευτικού νερού ή δίνοντάς τους αποζημιώσεις ή κατάρτιση που θα τους επιτρέψει να ακολουθήσουν εναλλακτικές δραστηριότητες βιοπορισμού. Πολιτικές που επιτρέπουν στους φτωχούς να μειώνουν σταδιακά τη χρήση των λυμάτων, αναζητώντας παράλληλα άλλες βιοποριστικές δραστηριότητες, μπορεί να είναι ορθότερες και από την άποψη του εφοδιασμού των πόλεων με τρόφιμα, από τις πολιτικές που απλώς περιορίζουν ή απαγορεύουν τη χρήση των λυμάτων ή άλλες που προκαλούν απότομες διαταραχές στη διαθεσιμότητα των λυμάτων (Qadir et al., 2010).

4.2.5 Εκτεταμένες διαβουλεύσεις με άτομα και οργανισμούς

Η συμμετοχή πολλών ενδιαφερομένων θα βελτιώσει την παραγωγή και τη διάδοση πληροφοριών και θα ενισχύσει την επιτυχία των έργων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων και των σχετικών εκστρατειών για την ασφάλεια των τροφίμων (Janosova et al., 2006). Η βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ των κρατικών υπηρεσιών και των περιβαλλοντικών οργανώσεων με εμπειρογνομοσύνη σε θέματα λυμάτων μπορεί επίσης να ενισχύσει τις δημόσιες πολιτικές για τη διαχείριση των λυμάτων.

Για παράδειγμα, απαιτείται συντονισμός μεταξύ των υπουργείων γεωργίας, περιβάλλοντος, υγείας και της οικονομικής ανάπτυξης για να διασφαλιστεί ότι οι στόχοι και τα προγράμματα της μιας υπηρεσίας δεν έρχονται σε σύγκρουση με τους στόχους και τα προγράμματα μιας άλλης. Το συνολικό κόστος για την επίτευξη των δημόσιων στόχων θα ελαχιστοποιηθεί με τον αποτελεσματικό διυπουργικό συντονισμό (Qadir et al., 2010).

4.2.6 Διεξαγωγή προγραμμάτων ευαισθητοποίησης του κοινού

Τα δημόσια προγράμματα που ενημερώνουν τους αγρότες και τους καταναλωτές σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία και τα μέτρα αντιμετώπισης μπορούν να μειώσουν τα προβλήματα υγείας και το κοινωνικό κόστος. Η ενημέρωση σχετικά με τις πρακτικές χειρισμού μετά τη συγκομιδή θα ενισχύσει επίσης την ασφάλεια των καταναλωτών. Η ανάπτυξη των κατευθυντήριων γραμμών με βάση την περίσταση πρέπει να περιγράφουν τους τύπους και τις ποσότητες των λυμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την άρδευση, ενώ σε πολλές περιοχές απαιτείται η εφαρμογή

προγραμμάτων επιθεώρησης και πιστοποίησης για την ενθάρρυνση της ασφάλειας των καταναλωτών όσον αφορά τα λαχανικά και άλλα προϊόντα που πωλούνται στις αγορές ή παρασκευάζονται σε κοινόχρηστες κουζίνες (IWMI, 2006).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στο φύλο κατά το σχεδιασμό των εκπαιδευτικών προγραμμάτων για την ασφάλεια των αγροτών, των εμπόρων και των καταναλωτών. Οι εκπαιδευτικές προσπάθειες που αφορούν τα λύματα θα είναι πιο επιτυχείς εάν σχεδιαστούν έτσι ώστε να ταιριάζουν με τους ρόλους και τις δυνατότητες των ανδρών και των γυναικών στις γεωργικές κοινότητες. Σε πολλά αγροτικά νοικοκυριά, οι γυναίκες ασχολούνται άμεσα με τη γεωργία ή την εμπορία των προϊόντων, ενώ είναι υπεύθυνες και για την προετοιμασία των τροφίμων. Οι γυναίκες μπορεί επίσης να έχουν περιορισμένο χρόνο για την παρακολούθηση ειδικών μαθημάτων ή εκπαιδευτικών συνεδριών (Qadir et al., 2010).

4.2.7 Υποστήριξη της έρευνας, της ανάπτυξης και της προβολής

Η δημόσια χρηματοδότηση της έρευνας και της ανάπτυξης μπορεί να δικαιολογηθεί από τα δημόσια οφέλη που θα προκύψουν από την αποτελεσματικότερη χρήση των λυμάτων στη γεωργία. Πολλοί αγρότες θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν το θρεπτικό περιεχόμενο των λυμάτων πιο αποτελεσματικά εάν είχαν καλύτερες πληροφορίες σχετικά με τα επίπεδα των θρεπτικών ουσιών στην παροχή νερού, τα επίπεδα των θρεπτικών ουσιών στο έδαφος και τις απαιτήσεις των καλλιεργειών. Η συγκέντρωση καλύτερων δεδομένων σχετικά με την τρέχουσα φύση και την έκταση της χρήσης των υγρών αποβλήτων για την άρδευση μπορεί να ενισχύσει τις προσπάθειες των δημόσιων φορέων και των ερευνητών για την αντιμετώπιση των πραγματικών ευκαιριών και απειλών.

Υπάρχει επίσης ανάγκη για περισσότερο ολιστικές εκτιμήσεις των κινδύνων. Οι πληροφορίες που περιγράφουν τον όγκο και την ποιότητα των λυμάτων που χρησιμοποιούνται και τη γεωγραφική κατανομή της χρήσης των λυμάτων στις περιαστικές περιοχές μπορούν να είναι χρήσιμες κατά το σχεδιασμό των πολιτικών για τη βελτίωση της διαχείρισης των υδάτων και την προστασία της δημόσιας υγείας. Η δημιουργία ευαισθητοποίησης θα μπορούσε να υποστηριχθεί με κίνητρα που προσφέρονται στους αγρότες μικρής κλίμακας για την υποβολή εκθέσεων σχετικά με τη συχνότητα της άρδευσης, τις αποδόσεις και τις παρατηρούμενες επιπτώσεις στον άνθρωπο, τα φυτά, το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Οι δημόσιες υπηρεσίες θα μπορούσαν επίσης να

συνεργαστούν με τους αγρότες για την καθιέρωση ενός προγράμματος παρακολούθησης της χρήσης των λυμάτων (Qadir et al., 2010).

4.2.8 Ενίσχυση της πολιτικής βούλησης και των επενδύσεων σε υποδομές

Δεν υπάρχει απλός τρόπος για την ενίσχυση της πολιτικής βούλησης. Οι δημόσιοι φορείς πρέπει να εκτιμήσουν την αξία της έλλειψης του νερού και τις επιπτώσεις της κακής ποιότητας νερού καθώς και της αναποτελεσματικής χρήσης του στη δημόσια υγεία, την οικονομική ανάπτυξη, το περιβάλλον και τα αγροτικά και αστικά νοικοκυριά. Οι διεθνείς οργανισμοί, οι δωρητές και οι μη κυβερνητικές οργανώσεις μπορούν να παρέχουν στους πολιτικούς ηγέτες πληροφορίες, να ενθαρρύνουν καινοτόμες πολιτικές επιλογές και να παρακινήσουν τη μεγαλύτερη συμμετοχή του κοινού στις προσπάθειες διαχείρισης των υδάτων. Θα πρέπει να δοθεί έμφαση σε βιώσιμες τοπικές λύσεις που επιτρέπουν την ανάκτηση πόρων (συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων φυσικής επεξεργασίας και του EcoSan) και λιγότερο σε συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για τις πόλεις σε άλλα (ανεπτυγμένα) μέρη του κόσμου (Nhapi and Gijzen, 2004).

4.2.9 Ελαχιστοποίηση του κινδύνου και της αβεβαιότητας

Δεδομένης της ενυπάρχουσας αβεβαιότητας και του δυνητικού κοινωνικού κόστους, οι δημόσιες υπηρεσίες θα πρέπει να εξετάζουν το ενδεχόμενο υιοθέτησης της αρχής της προφύλαξης κατά το σχεδιασμό πολιτικών για την άρδευση ή τη χρήση λυμάτων. Οι πολιτικές θα πρέπει να βασίζονται στις νέες κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ για την ελαχιστοποίηση των δυνητικά επιβλαβών βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων επιπτώσεων, εάν απαιτείται, ακόμη και με το κόστος χαμηλότερων βραχυπρόθεσμων οικονομικών κερδών για τους αγρότες και τους καταναλωτές. Οι εκστρατείες ευαισθητοποίησης του κοινού θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες για την απόκτηση υποστήριξης για πολιτικές που αντικατοπτρίζουν την αρχή της προφύλαξης. Ιδιαίτερες προσπάθειες θα χρειαστούν σε περιοχές όπου πολλοί κάτοικοι δεν είναι εγγράμματοι και όπου οι αγρότες χρειάζονται εναλλακτική υποστήριξη για τη διαβίωση, επειδή εξαρτώνται από τα λύματα ως τη μόνη πηγή άρδευσης (Qadir et al., 2010).

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων θεωρείται όλο και περισσότερο ως μια προοπτική για την εξισορρόπηση της ζήτησης του γλυκού νερού. Αυτό σημαίνει τη μετάβαση του μοντέλου από την ασφαλή επεξεργασία και απόρριψη των λυμάτων στη μετατροπή του χρησιμοποιημένου νερού σε νερό κατάλληλο για χρήση. Η εφαρμογή των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στη γεωργική άρδευση παρουσιάζει περιβαλλοντικές, υγειονομικές και οικονομικές προκλήσεις αλλά και οφέλη. Ενώ ορισμένα οφέλη και μειονεκτήματα μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν, άλλα είναι περίπλοκα και τοπικά. Ως μειονεκτήματα μπορεί να χαρακτηριστούν ο κίνδυνος της έκθεσης και μόλυνσης από παθογόνα και βαρέα μέταλλα ενώ ως αναγνωρισμένα πλεονεκτήματα θεωρείται η παροχή των θρεπτικών ουσιών στο έδαφος, η προστασία και η εξοικονόμηση των αποθεμάτων του γλυκού νερού και τα έσοδα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων.

Η άρδευση με υγρά απόβλητα έχει αυξηθεί με την πάροδο των ετών λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων, ιδίως σε περιοχές με λειψυδρία. Η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων για τη γεωργική άρδευση έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την απόδοση των καλλιεργειών και τη βιωσιμότητα των υδάτινων πόρων. Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας να τονιστεί η σημασία της προτεραιότητας της ανάκτησης νερού και της τοπικής αξιοποίησης σε αυτή την πρακτική.

.Στις ανεπτυγμένες χώρες, τα περισσότερα αστικά και βιομηχανικά λύματα υποβάλλονται σε επεξεργασία και, συνεπώς, τα περισσότερα από τα λύματα που χρησιμοποιούνται στη γεωργία είναι επεξεργασμένα. Τα ζητήματα πολιτικής στις χώρες με υψηλότερο εισόδημα είναι κάπως ξεκάθαρα και ώριμα, καθώς οι δημόσιες υπηρεσίες έχουν καθορίσει σε μεγάλο βαθμό τα κατάλληλα κριτήρια ποιότητας νερού και έχουν εφαρμόσει πρωτόκολλα επεξεργασίας για την υποστήριξη της χρήσης των υγρών αποβλήτων στην άρδευση. Οι δημόσιοι φορείς και οι οργανισμοί διαχείρισης υδάτων ενθαρρύνουν τη μεγαλύτερη χρήση των λυμάτων παρέχοντας οικονομικά κίνητρα όσον αφορά τη βελτίωση και την επέκταση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και αυξάνοντας την ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με την ασφάλεια και τα οφέλη της χρήσης των επεξεργασμένων λυμάτων σε αγροκτήματα, γήπεδα γκολφ και αστικά τοπία.

Τα ζητήματα πολιτικής είναι πιο δύσκολα στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου το μεγαλύτερο μέρος των λυμάτων που χρησιμοποιούνται για την άρδευση είναι ανεπεξέργαστο και μεγάλο μέρος της χρήσης είναι άτυπο και ακούσιο (Wichelns and

Drechsel 2011). Η οικονομική επιβάρυνση από την επεξεργασία των λυμάτων στις αναπτυσσόμενες χώρες και η δυσκολία της θέσπισης κανόνων για τη χρήση των λυμάτων από τους αγρότες θα παραμείνουν σημαντικές για το ορατό μέλλον. Ως εκ τούτου, πολλοί αγρότες θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούν τα λύματα και οι εργαζόμενοι, οι οικογένειές τους, οι κοινότητες και οι καταναλωτές θα διατρέχουν κίνδυνο από τα επιβλαβή συστατικά των ανεπεξεργαστων λυμάτων. Ωστόσο, κάθε ομάδα αποκομίζει επίσης σημαντικά οφέλη (Scheierling et al., 2011). Οι αγρότες αποφέρουν οικονομικές απολαβές που ενισχύουν τα μέσα διαβίωσής τους και βελτιώνουν την οικονομική κατάσταση των αγροτικών κοινοτήτων. Οι καταναλωτές κερδίζουν σε διατροφική αξία έχοντας φθηνή πρόσβαση σε τοπικά καλλιεργούμενα φρέσκα λαχανικά (Weldesilassie et al. 2011). Το κοινό, γενικότερα, επωφελείται επίσης όταν οι αγρότες εκτρέπουν τα λύματα για χρήση στην άρδευση, αντί να τα αφήνουν να συνεχίσουν να ρέουν κατάντη προστατεύοντας από τη μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα.

Η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα παρέχει θρεπτικά συστατικά για την ενίσχυση της παραγωγής των καλλιεργειών και επίσης καθιστά το νερό διαθέσιμο στους αγρότες για την αύξηση της παραγωγής τους. Επομένως οι αγρότες εξοικονομούν χρήματα λόγω της μείωσης της χρήσης των χημικών λιπασμάτων καθώς επίσης και της συνεχής παροχής νερού ανεξαρτήτως εποχής και κλιματολογικών συνθηκών. Επιπλέον, η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα προσφέρει πολύτιμα μη εμπορικά οφέλη στην κοινωνία, καθώς διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των υδάτινων πόρων και συμβάλλει χρηματικά σε αυτό το σκοπό.

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων για την άρδευση εξοικονομεί ενέργεια και χρήμα από την άντληση των λυμάτων στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας μέσω της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας που προκύπτει από τη μείωση της απόστασης της άντλησης των λυμάτων στα σημεία της άρδευσης σε σύγκριση με την άμεση διάθεση στο περιβάλλον. Ακόμη η εκτροπή μέρους των λυμάτων για αρδευτικούς σκοπούς μειώνει τον όγκο των λυμάτων που πρέπει να διατεθούν μειώνοντας αντίστοιχα το κόστος της άντλησης. Η μείωση του όγκου των λυμάτων συνεπάγεται και μείωση των τελών που καταβάλλονται στις ρυθμιστικές αρχές για τη διάθεση των ρύπων άρα και εξοικονόμηση χρημάτων για τους διαχειριστές των εγκαταστάσεων.

Οι πρόσθετες επενδύσεις που προκύπτουν από τη στίλβωση των υγρών αποβλήτων για την πλήρωση των προδιαγραφών της επαναχρησιμοποίησης καθώς επίσης, το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης σε περίπτωση όπου οι αγρότες αδυνατούν να έχουν

πρόσβαση στα επεξεργασμένα λύματα και σε εγκατάσταση επεξεργασίας, έχει ως αποτέλεσμα την οικονομική επιβάρυνση των αγροτών και τη δημιουργία πρόσθετων εξόδων για τους διαχειριστές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες επιτρέπουν την κατάλληλη επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, παράγοντας υγρά απόβλητα με ποιότητα που ικανοποιεί τη ζήτηση από διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της βιομηχανίας και της γεωργίας. Ωστόσο, η επιστημονική πρόοδος έχει δείξει ότι η αξιοποίηση των υγρών αποβλήτων δεν περιορίζεται στην επαναχρησιμοποίηση του νερού, αναγνωρίζοντας ότι τα υγρά απόβλητα περιέχουν διάφορους πολύτιμους πόρους που μπορούν να ανακτηθούν. Τα τελευταία χρόνια, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων έχουν μετονομαστεί σε εγκαταστάσεις ανάκτησης υδάτινων πόρων (WRRF), οι οποίες αναγνωρίζουν το δυναμικό της ανάκτησης των πόρων που υπάρχει στα ρέματα των λυμάτων. Οι WRRF συμβάλλουν στην κυκλική οικονομία όχι μόνο με την παραγωγή καθαρού νερού αλλά και με την ανάκτηση πολύτιμων πόρων, όπως θρεπτικά συστατικά, ενέργεια και άλλα βιολογικά υλικά.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη χρήση των λυμάτων στη γεωργία είναι αρκετά σημαντικοί και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πιθανών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους καθώς και των επικείμενων επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία. Για να αξιολογηθούν σωστά αυτοί οι κίνδυνοι, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη το τοπικό πλαίσιο και να διασφαλιστεί ότι η ρύπανση δεν μεταφέρεται από το ένα μέσο στο άλλο, όπως από το νερό στο έδαφος. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό για τις χώρες να επικεντρωθούν στη διεξαγωγή ενδεδειγμένων αξιολογήσεων του κινδύνου και στη θέσπιση των κατάλληλων κατευθυντήριων γραμμών για την ασφαλή και υπεύθυνη επαναχρησιμοποίηση και διαχείριση των υγρών αποβλήτων για την ελαχιστοποίηση των τυχόν δυσμενών συνεπειών. Αυτό θα επέτρεπε μια αποτελεσματικότερη και ιεραρχημένη διαχείριση λαμβάνοντας υπόψη ότι η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων για γεωργική εκμετάλλευση μπορεί να αποτελέσει ένα μεγάλο πραγματικό πρόβλημα δημόσιας υγείας εάν ο κίνδυνος δεν ληφθεί σοβαρά υπόψη.

Στις ανεπτυγμένες χώρες όπου οι τεχνολογίες επεξεργασίας και διάθεσης λυμάτων είναι υψηλού επιπέδου και τα λύματα που επαναχρησιμοποιούνται πληρούν τις προδιαγραφές που έχουν θεσπιστεί, τα μελλοντικά ζητήματα θα περιλαμβάνουν την τελειοποίηση αυτών των προτύπων και πρωτοκόλλων και την αξιολόγηση του κόστους και των οφελών των εναλλακτικών επιπέδων επεξεργασίας και χρήσης των υγρών αποβλήτων στη γεωργία και σε άλλες δραστηριότητες. Θα υπάρξουν επίσης συζητήσεις σχετικά με το ποιος θα πρέπει να πληρώνει για την επεξεργασία των λυμάτων και ποιος θα πρέπει να έχει προτεραιότητα στη λήψη περιορισμένων προμηθειών επεξεργασμένων λυμάτων. Αυτά τα ζητήματα αφορούν το κόστος, τις αποδόσεις και την κατανομή των οικονομικών κερδών, αλλά γενικά δεν περιλαμβάνουν αποφάσεις που μπορούν να υποστηρίξουν ή να καταστρέψουν ευκαιρίες διαβίωσης, είτε σκόπιμα, είτε ως ακούσιες συνέπειες φαινομενικά ευεργετικών πολιτικών επιλογών.

Πέρα από τα οικονομικά οφέλη των αγροτών από την γεωργική άρδευση με επεξεργασμένα λύματα λόγω αύξησης της παραγωγής των καλλιεργειών έχουν να αντιμετωπίσουν το κόστος που προκύπτει για τη μεταφορά και τη διανομή του ανακτημένου νερού στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις σε περίπτωση που δεν έχουν άμεση πρόσβαση σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Δεδομένου ότι η επαναχρησιμοποίηση του νερού είναι μάλλον μια νέα έννοια στον αστικό σχεδιασμό, η τρέχουσα υποδομή σπάνια λαμβάνει υπόψη τη διανομή του ανακτημένου νερού. Κατά

συνέπεια, υπάρχει ελάχιστος χώρος για την εγκατάσταση ενός νέου ξεχωριστού δικτύου αγωγών, ενώ η εκ των υστέρων εγκατάσταση είναι δαπανηρή, ανέφικτη και δύσχρηστη.

Πέρα από αυτό, η επαναχρησιμοποίηση του νερού, συμπεριλαμβανομένου ενός νέου δικτύου διανομής, μπορεί να έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στον κύκλο ζωής από την επεξεργασία και τη διανομή επιφανειακού νερού μέσω του συμβατικού συστήματος αγωγών. Συνεπώς αν παράγονται μη πόσιμες ποιότητες νερού, ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση νέων γραμμών διανομής - και συνεπώς το αυξημένο κόστος - είναι αναπόφευκτο.

Η κατασκευή αυτών των υποδομών θα μπορούσε να επιφέρει οικονομική επιβάρυνση στους αγρότες και στους φορείς εκμετάλλευσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων ελλείψει επαρκούς οικονομικής βοήθειας. Χωρίς τα απαραίτητα κίνητρα και την αγοραστική αξία, οι φορείς εκμετάλλευσης μπορεί να αντιμετωπίσουν δυσκολίες στην κάλυψη αυτών των πρόσθετων δαπανών, ενώ το εισόδημα των αγροτών θα επηρεαστεί αρνητικά αντιμετωπίζοντας το υψηλότερο κόστος του νερού άρδευσης.

Οι καλύτερες πολιτικές και προγράμματα θα αντιμετωπίζουν τόσο τις ανησυχίες σε επίπεδο γεωργικής εκμετάλλευσης όσο και τους κοινωνικούς προβληματισμούς σχετικά με το κόστος και τα οφέλη της άρδευσης με υγρά απόβλητα. Οι δημόσιοι φορείς στις αναπτυσσόμενες χώρες πρέπει να καθορίσουν τον τρόπο με τον οποίο θα διατηρηθούν αυτές οι ευεργετικές πτυχές της άρδευσης με υγρά απόβλητα και τα μέσα διαβίωσης των αγροτικών οικογενειών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τους κινδύνους για τις ίδιες τις οικογένειες και τους καταναλωτές των προϊόντων τους. Οι δημόσιες επενδύσεις και παρεμβάσεις στις αναπτυσσόμενες χώρες θα αντανakλούν ένα φάσμα δραστηριοτήτων κατά μήκος μιας διαδρομής που περιλαμβάνει την παραγωγή των υγρών αποβλήτων, τη δέσμευση και χρήση του αρδευτικού νερού, τη φυτική παραγωγή και συγκομιδή, την παρασκευή τροφίμων και την κατανάλωση. Οι δημόσιοι φορείς μπορούν να εφαρμόσουν κατευθυντήριες γραμμές και προγράμματα μείωσης του κινδύνου σε κάθε στάδιο κατά μήκος της διαδρομής έκθεσης στα υγρά απόβλητα.

Η ενσωμάτωση του τομέα των υδάτων στην έννοια της κυκλικής οικονομίας μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εάν επιδιώκεται η στενή συνεργασία μεταξύ των κυβερνήσεων, της επιστήμης και των εμπορικών εταιρειών. Πιο εμπειριστατωμένες μελέτες σχετικά με την ανάλυση του κόστους και την ασφάλεια θα μπορούσαν να συμβάλουν στην αύξηση της χρήσης των προτεινόμενων τεχνολογιών ως βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων. Επιπλέον,

ακόμη και αν η αγοραία αξία των ανακτώμενων υλικών μπορεί να μην είναι αρκετά υψηλή ώστε να δικαιολογεί την εφαρμογή της, οι στρατηγικές αξιοποίησης είναι πιο υποσχόμενες από τις παραδοσιακές μεθόδους διάθεσης, καθώς δημιουργούν αξία και μειώνουν τη ρύπανση.

Τέλος, οι κοινωνικές και οι πολιτισμικές πτυχές (κοινωνική αποδοχή) αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχή εφαρμογή ή βελτίωση των πρακτικών της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης του νερού. Η συμμετοχή των ενδιαφερομένων φορέων και η οικοδόμηση κλίματος εμπιστοσύνης στα πρώτα στάδια κάθε εγχειρήματος επαναχρησιμοποίησης είναι ζωτικής σημασίας. Η εκπαίδευση, η ευαισθητοποίηση και η παροχή κινήτρων είναι απαραίτητα για τη διευκόλυνση των μέτρων ασφάλειας που βασίζονται στη συμπεριφορά, εκτός εάν τα συστήματα επεξεργασίας αποκτήσουν επαρκή κάλυψη. Για τη μετάβαση από την άτυπη στην επίσημη επαναχρησιμοποίηση, οι κοινωνικές επιστήμες θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης πολιτισμικά αποδεκτών και τοπικά εφικτών κατευθυντήριων γραμμών και κανονισμών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Aczel, M. R., 2019. What is the nitrogen cycle and why is it key to life?. *Frontiers for Young Minds*, 7. <https://doi.org/10.3389/frym.2019.00041>

Adu-Ahyiah, M. and Anku, R.E., 2007. *Small Scale Wastewater Treatment in Ghana (a Scenerio)*. Available at: <https://artemisthai.com/wp-content/uploads/2020/05/Appendix-2.-Using-Bio-Plant-in-Small-Scale-Wastewater-Treatment.pdf> (Accessed 05 Apr 2023).

Akponikpè, P. I., Wima, K., Yacouba, H. and Mermoud, A., 2011. Reuse of domestic wastewater treated in macrophyte ponds to irrigate tomato and eggplant in semi-arid West-Africa: Benefits and risks. *Agricultural water management*, 98(5), 834-840. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.009>

Alcon, F., Pedrero, F., Martin-Ortega, J., Arcas, N., Alarcon, J. J. and De Miguel, M. D., 2010. The non-market value of reclaimed wastewater for use in agriculture: a contingent valuation approach. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8, 187-196. <https://doi.org/10.5424/sjar/201008S2-1361>

Amoah, P., Drechsel, P., Henseler, M. and Abaidoo, R. C., 2007. Irrigated urban vegetable production in Ghana: microbiological contamination in farms and markets and associated consumer risk groups. *Journal of water and health*, 5(3), 455-466. <https://doi.org/10.2166/wh.2007.041>

Amoatey P. and Bani R., 2011. Wastewater Management. <https://doi.org/10.5772/16158>.

Anjum, M., Al-Makishah, N. H. and Barakat, M. A., 2016. Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 615-632. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.05.022>

Arunakumara, K. K. I. U., Walpola, B. C. and Yoon, M. H., 2013. Current status of heavy metal contamination in Asia's rice lands. *Reviews in environmental science and bio/technology*, 12, 355-377. <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9323-1>

Assouline, S. and Narkis, K., 2011. Effects of long-term irrigation with treated wastewater on the hydraulic properties of a clayey soil. *Water Resources Research*, 47(8). <https://doi.org/10.1029/2011WR010498>

- Assouline, S. and Narkis, K., 2013. Effect of long-term irrigation with treated wastewater on the root zone environment. *Vadose Zone Journal*, 12(2). <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0216>
- Ayers, R. S. and Westcot, D. W., 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 rev. 1. FAO, Rome, Italy. *Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 rev. 1. FAO, Rome, Italy.* Available at: <https://www.fao.org/3/t0234e/t0234e.pdf> (Accessed Nov 2022)
- Babayan, M., Javaheri, M., Tavassoli, A. and Esmaeilian, Y., 2012. Effects of using wastewater in agricultural production. *Afr J Microbiol Res*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.5897/AJMR11.937>
- Bahri Akissa, 2015. Managing the other side of the water cycle: Making wastewater an asset. DOI:[10.13140/RG.2.1.4711.3047](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4711.3047)
- Becerra-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M. and 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>
- Beneduce, L., Gatta, G., Bevilacqua, A., Libutti, A., Tarantino, E., Bellucci, M. and Spano, G., 2017. Impact of the reusing of food manufacturing wastewater for irrigation in a closed system on the microbiological quality of the food crops. *International journal of food microbiology*, 260, 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.08.009>
- Bixio, D., Thoeye, C., De Koning, J., Joksimovic, D., Savic, D., Wintgens, T. and Melin, T., 2006. Wastewater reuse in Europe. *Desalination*, 187(1-3), 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.070>
- Brar, S. K., Verma, M., Tyagi, R. D. and Surampalli, R. Y., 2010. Engineered nanoparticles in wastewater and wastewater sludge—Evidence and impacts. *Waste management*, 30(3), 504-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.012>
- Chang, J., Wu, S., Dai, Y., Liang, W. and Wu, Z., 2012. Treatment performance of integrated vertical-flow constructed wetland plots for domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 44, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.019>

- Cecconet, D., Raček, J., Callegari, A. and Hlavínek, P., 2019. Energy Recovery from Wastewater: A Study on Heating and Cooling of a Multipurpose Building with Sewage-Reclaimed Heat Energy. *Sustainability*, 12(1), 116. <https://doi.org/10.3390/su12010116>
- Chen, L., Feng, Q., Li, C., Wei, Y., Zhao, Y., Feng, Y. and Li, H., 2017. Impacts of aquaculture wastewater irrigation on soil microbial functional diversity and community structure in arid regions. *Scientific Reports*, 7(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11678-z>
- Chen, W., Wu, L., Frankenberger, W. T. and Chang, A. C., 2008. Soil enzyme activities of long-term reclaimed wastewater-irrigated soils. *Journal of environmental quality*, 37(S5), S-36. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0315>
- Chen, Y., Jiang, S., Yuan, H., Zhou, Q. and Gu, G., 2007. Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs. *Water research*, 41(3), 683–689. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.030>
- Choudri, B. S., Al-Awadhi, T., Charabi, Y. and Al-Nasiri, N., 2020. Wastewater treatment, reuse, and disposal-associated effects on environment and health. *Water Environment Research*, 92(10), 1595-1602. <https://doi.org/10.1002/wer.1406>
- Chowdhury, N., Marschner, P. and Burns, R. G., 2011. Soil microbial activity and community composition: impact of changes in matric and osmotic potential. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(6), 1229-1236. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.02.012>
- Cizmas, L., Sharma, V. K., Gray, C. M. and 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>
- Corcoran, E., Nellesmann, C., Baker, E., Bos, R., Osborn, D. and Savelli, H., 2010. *Sick water? The Central Role of Wastewater Management in Sustainable Development*. UNEP/Earthprint. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/9156>
- Cornish, G. A. and Lawrence, P., 2001. *Informal irrigation in peri-urban areas: A summary of findings and recommendations*. (e-book) HR Wallingford. Available at: https://www.ucl.ac.uk/dpu-projects/drivers_urb_change/urb_economy/pdf_Urban_Rural/DFID_Cornish_IrrigationPer_urbanAreas.pdf (Accessed 05 Apr 2023)

- Delgado, A., Quemada, M., Villalobos, F. J. and Mateos, L., 2016. Fertilization with phosphorus, potassium and other nutrients. *Principles of agronomy for sustainable agriculture*, 381-405. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_26
- De Matteis, V and Rinaldi, R., 2018. Toxicity assessment in the nanoparticle era. *Cellular and molecular toxicology of nanoparticles*, 1-19. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72041-8_1
- Desa, A. L., Hairom, N. H. H., Sidik, D. A. B., Misdan, N., Yusof, N., Ahmad, M. K. and Mohammad, A. W., 2019. A comparative study of ZnO-PVP and ZnO-PEG nanoparticles activity in membrane photocatalytic reactor (MPR) for industrial dye wastewater treatment under different membranes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103143. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103143>
- Dingemans, M., Smeets, P., Medema, G., Frijns, J., Raat, K., van Wezel, A. and Bartholomeus, R., 2020. Responsible Water Reuse Needs an Interdisciplinary Approach to Balance Risks and Benefits. *Water*, 12(5), 1264. <https://doi.org/10.3390/w12051264>
- Drechsel, P., Bahri, A., Raschid-Sally, L. and Redwood, M. (Eds.), 2010. *Wastewater irrigation and health: assessing and mitigating risk in low-income countries*. IWMI. Available at: <https://hdl.handle.net/10568/36471> (Accessed 25 Jul 2023)
- Drechsel, P., Blumenthal, U. and Keraita, B., 2002. Balancing health and livelihoods adjusting wastewater irrigation guidelines for resource-poor countries, RUAF Magazine, 8. Available at: https://www.researchgate.net/publication/227450002_Balancing_health_and_livelihoods_Adjusting_wastewater_irrigation_guidelines_for_resource-poor_countries(Accessed 25 Jul 2023)
- Drechsel, P., Graefe, S., Sonou, M. and Cofie, O. O., 2006. *Informal irrigation in urban West Africa: An overview*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 40.p. (IWMI Research Report 102). Available at: https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub102/RR102.pdf (Accessed 05 Apr 2023)
- Drechsel, P., Keraita, B., Amoah, P., Abaidoo, R. C., Raschid-Sally, L. and Bahri, A., 2008. Reducing health risks from wastewater use in urban and peri-urban sub-Saharan Africa: applying the 2006 WHO guidelines. *Water Science and Technology*, 57(9), 1461-1466. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.245>

- Drechsel, P., Qadir, M. and Wichelns, D. (Eds.), 2015. *Wastewater: economic asset in an urbanizing world*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9545-6>
- DTIE, 2004. *Waste stabilization ponds and constructed wetlands: design manual*. (e-book). Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8380> (Accessed: 5 April 2023)
- Duque, A. F., Campo, R., Val del Rio, A. and Amorim, C. L., 2021. Wastewater Valorization: Practice around the World at Pilot- and Full-Scale. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9466. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189466>
- Egbuikwem, P. N., Mierzwa, J. C. and Saroj, D. P., 2020. Assessment of suspended growth biological process for treatment and reuse of mixed wastewater for irrigation of edible crops under hydroponic conditions. *Agricultural Water Management*, 231, 106034. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106034>
- Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J. and Zessner, M., 2016. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 571, 522-542. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.07.019>
- Elgallal, M., Fletcher, L. and 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>
- Environment and Natural Resources Department, 2022. *Wastewater as a resource* (e-book), European Investment Bank. Available at: <https://www.eib.org/en/publications/wastewater-as-a-resource> (Accessed 05 Apr 2023).
- ESCWA, U., 2003. *Waste-water treatment technologies : a general review*, UN. United States of America. Available at: <https://policycommons.net/artifacts/139794/waste-water-treatment-technologies/202501/> (Accessed: 03 Apr 2023). CID: 20.500.12592/n8t3zx.
- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Wintgens, T. and Bixio, D., 2006. *Water reuse system management manual : Aquarec*. Publications Office. Available at: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b1912e31-3945-45a9-a01e-b29bfd058949> (Accessed 19 Apr 2023).

EUR-Lex, 2023. EUR-Lex-Access to European Union Law. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0741&from=EN>

(Accessed 01 Oct 2023).

FAO, F., 2003. Users Manual for Irrigation with Treated Wastewater. *Regional Office for the Near East, Cairo, Egypt*. Available at: <https://www.fao.org/3/y5009e/y5009e00.htm>

(Accessed 05 Apr 2023).

FAO, F., 2006. *Wastewater treatment*. Available at:

<http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e06.htm#TopOfPage> (Accessed 03 Apr 2023).

Farhadkhani, M., Nikaeen, M., Yadegarfar, G., Hatamzadeh, M., Pourmohammadbagher, H., Sahbaei, Z. and 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.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.047>

Fatta-Kassinos, D., Kalavrouziotis, I. K., Koukoulakis, P. H. and Vasquez, M. I., 2011. The risks associated with wastewater reuse and xenobiotics in the agroecological environment. *Science of the Total Environment*, 409(19), 3555-3563.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.036>

Fine, P., Halperin, R. and Hadas, E., 2006. Economic considerations for wastewater upgrading alternatives: An Israeli test case. *Journal of Environmental Management*, 78(2), 163-169.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.04.014>

Ganjegunte, G., Ulery, A., Niu, G. and Wu, Y., 2017. Effects of treated municipal wastewater irrigation on soil properties, switchgrass biomass production and quality under arid climate. *Industrial crops and products*, 99, 60-69.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.038>

Giannocco, G., Arborea, S., de Gennaro, B. C., Iacobellis, V. and Piccinni, A. F., 2019. Assessing reclaimed urban wastewater for reuse in agriculture: Technical and economic concerns for Mediterranean regions. *Water*, 11(7), 1511.

<https://doi.org/10.3390/w11071511>

Grabow, G. L. and McCornick, P. G., 2007. Planning for water allocation and water quality using a spreadsheet-based model. *Journal of Water Resources Planning and*

Management, 133(6), 560-564. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2007\)133:6\(560\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2007)133:6(560))

Guest, J. S., Skerlos, S. J., Barnard, J. L., Beck, M. B., Daigger, G. T., Hilger, H., Jackson, S. J., Karvazy, K., Kelly, L., Macpherson, L., Mihelcic, J. R., Pramanik, A., Raskin, L., Van Loosdrecht, M. C., Yeh, D. and Love, N. G., 2009. A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater. *Environmental science & technology*, 43(16), 6126–6130. <https://doi.org/10.1021/es9010515>

Guo W., Andersen, M. N., QI, X. B., Ping, L. I., LI, Z. Y., FAN, X. Y. and Yuan, Z. H. O. U., 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. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61391-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61391-6)

Hashem, M.S. and Qi, X., 2021. ‘Treated Wastewater Irrigation—A Review’, *Water*, 13(11), p. 1527. <https://doi.org/10.3390/w13111527>

Hidri, Y., Bouziri, L., Maron, P. A., Anane, M., Jedidi, N., Hassan, A. and Ranjard, L., 2010. Soil DNA evidence for altered microbial diversity after long-term application of municipal wastewater. *Agronomy for sustainable development*, 30, 423-431. <https://doi.org/10.1051/agro/2009038>

Hoekstra, A. Y., 2015. The water footprint of industry. In *Assessing and measuring environmental impact and sustainability* (pp. 221-254). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799968-5.00007-5>

Hreiz, R., Latifi, M.A. and Roche, N., 2015. Optimal design and operation of activated sludge processes : State-of-the-art. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 281, pp.900 - 920. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.125>

Huo, S., Jin, S., Ma, X., Xue, X., Yang, K., Kumar, A., Wang, P. C., Zhang, J., Hu, Z. and Liang, X. J., 2014. Ultrasmall gold nanoparticles as carriers for nucleus-based gene therapy due to size-dependent nuclear entry. *ACS nano*, 8(6), 5852–5862. <https://doi.org/10.1021/nn5008572>

Hurley, R. R. and Nizzetto, L., 2018. Fate and occurrence of micro (nano) plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 6-11. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>

- Ibekwe, A. M., Gonzalez-Rubio, A. and Suarez, D. L., 2018. Impact of treated wastewater for irrigation on soil microbial communities. *Science of the Total Environment*, 622, 1603-1610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.039>
- Ilic, S., Drechsel, P., Amoah, P. and LeJeune, J. T., 2009. Applying the multiple-barrier approach for microbial risk reduction in the post-harvest sector of wastewater-irrigated vegetables. In *Wastewater irrigation and health* (pp. 265-286). Routledge. Available at: <https://publications.iwmi.org/pdf/H042612.pdf> (Accessed Mar 2023)
- International Water Management Institute (IWMI), 2006. Recycling realities: managing health risks to make wastewater an asset. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). 6p. (*IWMI Water Policy Briefing 017*). <http://dx.doi.org/10.3910/2009.334>
- Jain, K., Patel, A. S., Pardhi, V. P., & Flora, S. J. S. (2021). Nanotechnology in wastewater management: a new paradigm towards wastewater treatment. *Molecules*, 26(6), 1797. <https://doi.org/10.3390/molecules26061797>
- Jaramillo, M. and Restrepo, I., 2017. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability*, 9(10), 1734. <https://doi.org/10.3390/su9101734>
- Janosova, B., Miklankova, J., Hlavinek, P. and Wintgens, T., 2006. Drivers for wastewater reuse: regional analysis in the Czech Republic. *Desalination*, 187(1-3), 103-114. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.071>
- Ji, Z. G., 2017. *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119371946.fmatter>
- Jiménez, B. and Chávez, A., 2004. Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: “El Mezquital Valley” case. *Water Science and Technology*, 50(2), 269-276. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0141>
- Jimenez, B., and Asano, T., 2008. Water reclamation and reuse around the world. *Water Reuse: an international survey of current practice, issues and needs*, 14, 3-26. <https://doi.org/10.2166/9781780401881>
- Ju, H., Li, K., Jiang, S. and Wang, H. R., 2011. Heavy Metal Pb and Cd Distribution in Winter-wheat with Reclaimed Water Irrigation. *Journal of Agro-Environment Science*, 30(1), 78-83.

- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R. and Bello-Amez, S., 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almås, Å. and Singh, B. R., 2017. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental research*, 156, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>
- Kaixion, Y., Li, L., Wang, Y., Xue, S., Han, Y. and Liu, J., 2019. Airborne bacteria in a wastewater treatment plant: emission characterization, source analysis and health risk assessment. *Water Research*, 149, 596-606. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.027>
- Kamizoulis, G., 2008. Setting health based targets for water reuse (in agriculture). *Desalination*, 218(1-3),154-163. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.08.026>
- Kehrein, P., van Loosdrecht, M.C., Osseweijer, P., Garfi, M., Dewulf, J. and Posada, J.A., 2020. A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants—market supply potentials, technologies and bottlenecks. *Environmental Science: Water Research & Technology*. <https://doi.org/10.1039/C9EW00905A>
- Keraita, B., Konradsen, F., Drechsel, P. and Abaidoo, R. C., 2007. Effect of low-cost irrigation methods on microbial contamination of lettuce irrigated with untreated wastewater. *Tropical Medicine & International Health*, 12, 15-22. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2007.01937.x>
- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K. and Alamri, S. A., 2018. Fertilizers and their contaminants in soils, surface and groundwater. *Encyclopedia of the Anthropocene*, 5, 225-240. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09888-8>
- Kibuye, F. A., Gall, H. E., Elkin, K. R., Ayers, B., Veith, T. L., Miller, M., Jacob, S., Hayden, K. R., Watson, J. E. and Elliott, H. A., 2019. Fate of pharmaceuticals in a spray-irrigation system: From wastewater to groundwater. *The Science of the total environment*, 654, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.442>
- Kim, E., Kim, S. H., Kim, H. C., Lee, S. G., Lee, S. J. and Jeong, S. W., 2011. Growth inhibition of aquatic plant caused by silver and titanium oxide nanoparticles. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 3, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s13530-011-0071-8>

- Kumar, A. K., Sharma, S., Dixit, G., Shah, E. and Patel, A., 2020. Techno-economic analysis of microalgae production with simultaneous dairy effluent treatment using a pilot-scale High Volume V-shape pond system. *Renewable Energy*, 145, 1620-1632. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.07.087>
- Lahlou, F. Z., Mackey, H. R. and Al-Ansari, T., 2021. Wastewater reuse for livestock feed irrigation as a sustainable practice: A socio-environmental-economic review. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126331. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126331>
- Lazarova, V. and Bahri, A. (Eds.), 2004. *Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780203499405>
- Lee, W.S., Chua, A.S., Yeoh, H.K. and Ngoh, G.C., 2014. A review of the production and applications of waste-derived volatile fatty acids. *Chemical Engineering Journal*, 235, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.002>
- Li, B., Cao, Y., Guan, X., Li, Y., Hao, Z., Hu, W. and Chen, L., 2019. Microbial assessments of soil with a 40-year history of reclaimed wastewater irrigation. *Science of the Total Environment*, 651, 696-705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.193>
- Li, J., Lei, C. and Yanfeng, L., 2010. Effect of chlorination on emitter clogging and system performance for drip irrigation with sewage effluent. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 26(5), 7-13. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2010.05.002>
- Li, Y., Zhang, S., Zhang, W., Xiong, W., Ye, Q., Hou, X., ...and Wang, P., 2019. Life cycle assessment of advanced wastewater treatment processes: Involving 126 pharmaceuticals and personal care products in life cycle inventory. *Journal of environmental management*, 238, 442-450. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.118>
- Lim, S. L., Chu, W. L. and 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>
- Lonigro, A., Rubino, P., Lacasella, V. and Montemurro, N., 2016. Faecal pollution on vegetables and soil drip irrigated with treated municipal wastewaters. *Agricultural Water Management*, 174, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.001>
- Lopes, A. R., Becerra-Castro, C., Vaz-Moreira, I., Silva, M. E. F., Nunes, O. C. and Manaia, C. M., 2015. Irrigation with treated wastewater: Potential impacts on microbial

function and diversity in agricultural soils. *Wastewater Reuse and Current Challenges*, 105-128. https://doi.org/10.1007/698_2015_346

Lotti, T., Carretti, E., Berti, D., Martina, M. R., Lubello, C. and Malpei, F., 2019. Extraction, recovery and characterization of structural extracellular polymeric substances from anammox granular sludge. *Journal of environmental management*, 236, 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.054>

Lu, Y., Song, S., Wang, R., Liu, Z., Meng, J., Sweetman, A. J., Jenkins, A., Ferrier, R. C., Li, H., Luo, W. and Wang, T., 2015. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. *Environment international*, 77, 5–15. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.12.010>

Malki, M., Bouchaou, L., Mansir, I., Benlouali, H., Nghira, A. and Choukr-Allah, R., 2017. Wastewater treatment and reuse for irrigation as alternative resource for water safeguarding in Souss-Massa region, Morocco. *European Water*, 59, 365-371. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Redouane-Choukr-Allah/publication/318209516_Wastewater_treatment_and_reuse_for_irrigation_as_alternative_resource_for_water_safeguarding_in_Souss-Massa_region_Morocco/links/5b1798ffa6fdcc6d3e0580f0/Wastewater-treatment-and-reuse-for-irrigation-as-alternative-resource-for-water-safeguarding-in-Souss-Massa-region-Morocco.pdf (Accessed 05 Apr 2023).

Mara, D., Hamilton, A., Sleight, A. and Karavarsamis, N., 2010. *More appropriate tolerable additional burden of disease Improved determination of annual risks Norovirus and Ascaris infection risks Extended health-protection control measures Treatment and non-treatment options*. Discussion Paper: Options for updating the 2006 WHO guidelines. Available at: <https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/wastewater-use/using-human-waste---kit-2/discussion-paper---options-for-updating-the-2006-who-guidelines.pdf> (accessed on April 02, 2023).

Marano, R. B., Zolti, A., Jurkevitch, E. and Cytryn, E., 2019. Antibiotic resistance and class 1 integron gene dynamics along effluent, reclaimed wastewater irrigated soil, crop continua: elucidating potential risks and ecological constraints. *Water research*, 164, 114906. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114906>

MetCalf and Eddy, 2003. *Physical Unit Process, Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4th Edition, Tata McGraw-Hill, New York.

- Mehmood, A., Aslam Mirza, M., Aziz Choudhary, M., Kim, K. H., Raza, W., Raza, N., Soo Lee, S., Zhang, M., Lee, J. H. and Sarfraz, M., 2019. Spatial distribution of heavy metals in crops in a wastewater irrigated zone and health risk assessment. *Environmental research*, 168, 382–388. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.020>
- Minhas, P. S. and Samra, J. S., 2004. *Wastewater use in peri-urban agriculture: impacts and opportunities*. Karnal, India. Central Soil Salinity Research Institute. Available at: https://www.researchgate.net/publication/274713282_Wastewater_Use_in_Peri-urban_Agriculture_Impacts_and_Oppurtunities/link/5f1538bc92851c1eff217eed/download (Accessed Dec 2022)
- Mkhinini, M., Boughattas, I., Alphonse, V., Livet, A., Giusti-Miller, S., Banni, M. and Bousserhine, N., 2020. Heavy metal accumulation and changes in soil enzymes activities and bacterial functional diversity under long-term treated wastewater irrigation in East Central region of Tunisia (Monastir governorate). *Agricultural Water Management*, 235, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106150>
- Morgan, J.B. and Connolly, E.L., 2013. Plant-Soil Interactions: Nutrient Uptake. *Nature Education Knowledge*, 4(8), 2. Available at: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/plant-soil-interactions-nutrient-uptake-105289112/> (Accessed 20 Feb 2023)
- Müller, J. A., Manoj, V. R. and Dong, R., 2016. Sanitation in constructed wetlands: a review on the removal of human pathogens and fecal indicators. *Science of the total environment*, 541,8-22. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.047>
- Murphy, B., 2015. Key soil functional properties affected by soil organic matter-evidence from published literature. In *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 25, No. 1, p. 012008). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/25/1/012008>
- Muttamara, S., 1996. Wastewater characteristics. *Resour. Conserv. Recycl.* 16, 145–159. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00052-6](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00052-6)
- Muyen, Z., Moore, G. A. and Wrigley, R. J., 2011. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agricultural Water Management*, 99(1), 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.021>

- National Research Council, 2005. *Water Conservation, Reuse, and Recycling: Proceedings of an Iranian-American Workshop*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11241>.
- Nhapi, I. and Gijzen, H. J., 2004. Wastewater management in Zimbabwe in the context of sustainability. *Water policy*, 6(6), 501-517. <https://doi.org/10.2166/wp.2004.0033>
- Obuobie, E., Keraita, B., Danso, G., Amoah, P., Cofie, O. O., Raschid-Sally, L. and Drechsel, P., 2006. *Irrigated urban vegetable production in Ghana: characteristics, benefits and risks* (No. 613-2016-40758). Available at: https://www.researchgate.net/publication/242190861_Irrigated_Urban_Vegetable_Production_in_Ghana_Characteristics_Benefits_and_Risks/link/00b4952981f6cc0d65000000/download (Accessed 05 Apr 2023)
- Ofori, S., Puškáčová, A., Růžičková, I. and Wanner, J., 2021. Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of The Total Environment*, 760, 144026. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>
- Oliveira, M., Viñas, I., Usall, J., Anguera, M. and Abadias, M., 2012. Presence and survival of Escherichia coli O157: H7 on lettuce leaves and in soil treated with contaminated compost and irrigation water. *International journal of food microbiology*, 156(2), 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.03.014>
- Oster, J., Sposito, G. and Smith, C., 2016. Accounting for potassium and magnesium in irrigation water quality assessment. *California Agriculture*, 70(2), 71-76. <https://doi.org/10.3733/ca.v070n02p71>.
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J. J., Koukoulakis, P. and 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>
- Peng, Z., Yang, P., Wang, Y. and Ren, S., 2006. Effects of irrigation with reclaimed water on available nutrient and salinize-alkalization. *J. Soil Water Conserv*, 6, 58-61.
- Pescod, M.B., 1992. Wastewater treatment and use in agriculture - FAO irrigation and drainage paper 47. Available at : <https://www.fao.org/3/t0551e/t0551e00.htm> (Accessed 04 Apr 2023).

- Pratt, S., Vandi, L. J., Gapes, D., Werker, A., Oehmen, A. and Laycock, B., 2019. Polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics from organic waste. *Biorefinery: Integrated Sustainable Processes for Biomass Conversion to Biomaterials, Biofuels, and Fertilizers*, 615-638. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10961-5_26
- Prochaska, C. and Zouboulis, A., 2020. A Mini-Review of Urban Wastewater Treatment in Greece: History, Development and Future Challenges. *Sustainability*, 12(15), 6133. <https://doi.org/10.3390/su12156133>
- Qadir, M., Mateo-Sagasta, J., Jiménez, B., Siebe, C., Siemens, J. and Hanjra, M. A., 2015. Environmental risks and cost-effective risk management in wastewater use systems. *Wastewater: economic asset in an urbanizing world*, 55-72. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9545-6_4.
- Qadir, M. and Scott, C.A., 2010. Non-pathogenic trade-offs of wastewater irrigation. In *Wastewater Irrigation and Health* (pp. 127-152). Routledge. Available at: <https://publications.iwmi.org/pdf/H042606.pdf> (Accessed 04 May 2023)
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A. and Minhas, P. S., 2010. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural water management*, 97(4), 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004>
- Quemada, M., Delgado, A., Mateos, L. and Villalobos, F.J., 2016. Nitrogen Fertilization I: The Nitrogen Balance. In: Villalobos, F., Fereres, E. (eds) *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_24
- Raschid-Sally, L., 2010. The role and place of global surveys for assessing wastewater irrigation. *Irrigation and Drainage Systems*, 24(1-2), 5-21. <https://doi.org/10.1007/s10795-009-9092-8>
- Rodriguez, C., Van Buynder, P., Lugg, R., Blair, P., Devine, B., Cook, A. and Weinstein, P., 2009. Indirect potable reuse: a sustainable water supply alternative. *International journal of environmental research and public health*, 6(3), 1174–1209. <https://doi.org/10.3390/ijerph6031174>.
- Raschid-Sally, L. and Jayakody, P., 2008. *Drivers and characteristics of wastewater agriculture in developing countries: Results from a global assessment* (Vol. 127). IWMI. Available at:

https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/PUB127/RR127.pdf (Accessed 03 Jun 2023)

Rodriguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D. and Saltiel, G., 2020. *From Waste to Resource: Shifting paradigms for smarter wastewater interventions in Latin America and the Caribbean*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/33436>

Ruiz-Rosa, I., García-Rodríguez, F. J. and Mendoza-Jiménez, J., 2016. Development and application of a cost management model for wastewater treatment and reuse processes. *Journal of cleaner production*, 113, 299-310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.044>

Russo, C., Graziani, V., Lavorgna, M., D'Abrosca, B., Piscitelli, C., Fiorentino, A., Scognamiglio, M. and Isidori, M., 2019. Lymphocytes exposed to vegetables grown in waters contaminated by anticancer drugs: metabolome alterations and genotoxic risks for human health. *Mutation research. Genetic toxicology and environmental mutagenesis*, 842, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2019.04.001>

Ruud, B., van den Eertwegh, G., Worm, B., Cirkel, G., van Loon, A. and Raat, K., 2017. Matching agricultural freshwater supply and demand: using industrial and domestic treated wastewater for sub-irrigation purposes. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 3705). Available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..19.3705B/abstract> (Accessed 05 Apr 2023).

Sadras, V. O., Villalobos, F. J., Orgaz, F. and Fereres, E., 2016. Effects of water stress on crop production. *Principles of agronomy for sustainable agriculture*, 189-204. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_14

Scheierling, S. M., Bartone, C. R., Mara, D. D. and Drechsel, P., 2011. Towards an agenda for improving wastewater use in agriculture. *Water International*, 36(4), 420-440. <https://doi.org/10.1080/02508060.2011.594527>

Shoushtarian, F. and Negahban-Azar, M., 2020. Worldwide Regulations and Guidelines for Agricultural Water Reuse: A Critical Review. *Water*, 12(4), 971. <https://doi.org/10.3390/w12040971>

Simmons, R., Qadir, M. and Drechsel, P., 2009. Farm-based measures for reducing human and environmental health risks from chemical constituents in wastewater. In *Wastewater*

Irrigation and Health (pp. 235-264). Routledge. Available at: <https://publications.iwmi.org/pdf/H042611.pdf> (Accessed 28 Apr 2023)

Suh, J. H. and Kim, D. S., 2000. Comparison of different sorbents (inorganic and biological) for the removal of Pb²⁺ from aqueous solutions. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 75(4), 279-284. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10974660\(200004\)75:4<279::AID-JCTB217>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)10974660(200004)75:4<279::AID-JCTB217>3.0.CO;2-A)

Toze, S., 2006. Reuse of effluent water—benefits and risks. *Agricultural water management*, 80(1-3), 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.010>

Tripathi, V. K., Rajput, T. B. S. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.054>

Tripathi, V. K., Rajput, T. B. S., Patel, N. and Nain, L., 2019. Impact of municipal wastewater reuse through micro-irrigation system on the incidence of coliforms in selected vegetable crops. *Journal of environmental management*, 251, 109532. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109532>

Tzanakakis, V. E., Paranychianaki, N. V. and Angelakis, A. N., 2007. Soil as a wastewater treatment system: Historical development. *Water Science and Technology: Water Supply*, 7(1), 67-75. <https://doi.org/10.2166/ws.2007.008>

Ungureanu, N., Vlăduț, V. and Voicu, G., 2020. Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. *Sustainability*, 12(21), 9055. <https://doi.org/10.3390/su12219055>

United States. Environmental Protection Agency. Office of Wastewater Management. Municipal Support Division, National Risk Management Research Laboratory (US). Technology Transfer and Support Division, 2004. *Guidelines for water reuse*. US Environmental Protection Agency. Available at: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2004-guidelines-water-reuse.pdf> (Accessed 20 Jan 2023)

US EPA, 2000. *Wastewater Technology Fact Sheet: Oxidation Ditches* (Doctoral dissertation, US EPA, Washington, DC, USA). Available at: https://www3.epa.gov/npdes/pubs/oxidation_ditch.pdf (Accessed 04 Apr 2023).

- Valipour, M. and Singh, V. P., 2016. Global experiences on wastewater irrigation: Challenges and prospects. *Balanced urban development: options and strategies for liveable cities*, 289-327. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28112-4>
- Valta, K., Kosanovic, T., Malamis, D., Moustakas, K. and Loizidou, M.D., 2015. Overview of water usage and wastewater management in the food and beverage industry. *Desalination and Water Treatment*, 53, 3335-3347. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.934100>
- Vianna, M. R., de Melo, G. C. and Neto, M. R., 2012. Wastewater treatment in trickling filters using *Luffa cylindrica* as biofilm supporting medium. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 6(2), 57-66. <http://www.jstor.org/stable/26203371>.
- Vymazal, J., 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological engineering*, 73, 724-751. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.034>
- Wang, J. F., Wang, G. X. and Wanyan, H., 2007. Treated wastewater irrigation effect on soil, crop and environment: wastewater recycling in the loess area of China. *Journal of environmental sciences (China)*, 19(9), 1093–1099. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60178-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60178-8)
- Wang, Z., Li, J. and Li, Y., 2017. Using Reclaimed Water for Agricultural and Landscape Irrigation in China: a Review. *Irrig. and Drain.*, 66: 672– 686. <https://doi.org/10.1002/ird.2129>
- Weldesilassie, A. B., Amerasinghe, P. and Danso, G., 2011. Assessing the empirical challenges of evaluating the benefits and risks of irrigating with wastewater. *Water International*, 36(4), 441-454. <https://doi.org/10.1080/02508060.2011.595056>
- World Health Organization, 2006. *WHO guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater* (Vol. 2). World Health Organization. Available at: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/who_safe_use_wastewater_excreta_greywater_v2_en.pdf (Accessed 04 Apr 2023)
- Wichelns, D. and Drechsel, P., 2011. Meeting the challenge of wastewater irrigation: economics, finance, business opportunities and methodological constraints. *Water International*, 36(4), 415-419. <https://doi.org/10.1080/02508060.2011.593732>

Wolf, C., Pavese, A., von Gunten, U. and Kohn, T., 2019. Proxies to monitor the inactivation of viruses by ozone in surface water and wastewater effluent. *Water research*, 166, 115088. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115088>

World Health Organization. (2006). *WHO guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater* (Vol. 1). World Health Organization. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9241546824> (Accessed 20 Jan 2023)

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2017. The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource. Paris, UNESCO. Available at: https://reliefweb.int/report/world/2017-un-world-water-development-report-wastewater-untapped-resource?gclid=EAIaIQobChMI0fTY0liQ_gIVioxoCR09KwJ-EAAYASAAEgItf_D_BwE (Accessed 04 Apr 2023)

Xu, J., Wu, L., Chang, A. C. and 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.<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.094>

Yang, K., Wang, C., Xue, S., Li, W., Liu, J. and Li, L., 2019. The identification, health risks and olfactory effects assessment of VOCs released from the wastewater storage tank in a pesticide plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184, 109665. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109665>

Ye, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Liu, Y., Chang, S. W., Nguyen, D. D., ... and Wang, J., 2018. A critical review on ammonium recovery from wastewater for sustainable wastewater management. *Bioresource Technology*, 268, 749-758. <https://doi.org/268.10.1016/j.biortech.2018.07.111>

Yi, L., Jiao, W., Chen, X. and Chen, W., 2011. An overview of reclaimed water reuse in China. *Journal of Environmental Sciences*, 23(10), 1585-1593. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60627-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60627-4)

Yu, K., Sun, C., Zhang, B., Hassan, M. and He, Y., 2019. Size-dependent adsorption of antibiotics onto nanoparticles in a field-scale wastewater treatment plant. *Environmental Pollution*, 248, 1079-1087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.090>

- Yuan, B. C., Li, Z. Z., Liu, H., Gao, M. and Zhang, Y. Y., 2007. Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions. *Applied Soil Ecology*, 35(2), 319-328. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.07.004>
- Yuan, Y., Xiang, M., Liu, C. and Theng, B. K., 2019. Chronic impact of an accidental wastewater spill from a smelter, China: a study of health risk of heavy metal (loid) s via vegetable intake. *Ecotoxicology and environmental safety*, 182, 109401. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109401>
- Zeyad, M. T., Kumar, M. and Malik, A., 2019. Mutagenicity, genotoxicity and oxidative stress induced by pesticide industry wastewater using bacterial and plant bioassays. *Biotechnology reports*, 24, e00389. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00389>
- Zhang, D. Q., Jinadasa, K. B. S. N., Gersberg, R. M., Liu, Y., Ng, W. J. and Tan, S. K., 2014. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries—a review of recent developments (2000–2013). *Journal of environmental management*, 141, 116-131. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.015>
- Zhang, Y. and Shen, Y., 2019. Wastewater irrigation: past, present, and future. *WIREs Water* ; 6:e1234. <https://doi.org/10.1002/wat2.1234>
- Zhiguo, Z., Li, B., Li, N., Sardar, M. F., Song, T., Zhu, C., ... and Li, H., 2019. Effects of UV disinfection on phenotypes and genotypes of antibiotic-resistant bacteria in secondary effluent from a municipal wastewater treatment plant. *Water research*, 157, 546-554. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.079>
- Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L. and Leusch, F. D., 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>
- Zuurbier, K., Smeets, P., Roest, K. and van Vierssen, W., 2018. Use of wastewater in managed aquifer recharge for agricultural and drinking purposes: the dutch experience. *Safe Use of Wastewater in Agriculture: From Concept to Implementation*, 159-175. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74268-7_8

Ελληνική Βιβλιογραφία

ΕΛΙΝΥΑΕ, 2023. ΕΛΙΝΥΑΕ-Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας. Διαθέσιμο στο: <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-oik-1451162011-fek-354b-832011> [Πρόσβαση 01 Οκτώβριος 2023]

ΥΠΕΝ, 2023. ΥΠΕΝ-Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Διαθέσιμο στο: <https://ypen.gov.gr/perivallon/ydatikoi-poroi/diacheirisi-lymaton/> [Πρόσβαση 01 Οκτώβριος 2023]