



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΚΡΟΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

ΝΤΟΥΡΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΤΗΣ: ΤΣΕΣΜΕΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ, 2026



ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

<<ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ
ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΚΡΟΩΝ ΣΤΟ
ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ>>

ΝΤΟΥΡΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας
Επιβλέπων Καθηγητής : ΤΣΕΣΜΕΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
Συν-επιβλέπων: ΡΑΨΟΜΑΝΙΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ, 2026

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στηρίζεται, πέρα από την ατομική εργασία, στην βοήθεια ορισμένων ατόμων όπου δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ.Δημήτριο Τσεσμελή, ο οποίος ήταν αυτός που ανέλαβε την επίβλεψη της εργασίας με την καθοδήγησή του βοηθώντας με στα ζητήματα που προέκυψαν.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου που με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια σε κάθε μου βήμα, όπως και τους φίλους μου για την ηθική στήριξη και την υπομονή τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Εισαγωγή-Αντικείμενο της εργασίας.....	10
1.2 Σκοπός της εργασίας.....	11
1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση και δομή εργασίας.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	
2.1 Κυκλική οικονομία.....	12
2.1.1 Η έννοια της κυκλικής οικονομίας.....	12
2.1.2 Βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας.....	12
2.1.3 Γραμμική και κυκλική οικονομία.....	13
2.1.4 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία.....	13
2.2 Η διαχείριση υδατικών πόρων στη σύγχρονη εποχή.....	14
2.2.1 Βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων.....	14
2.2.2 Κλιματική αλλαγή.....	15
2.3 Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων.....	16
2.3.1 Έννοια και σημασία της επεξεργασίας λυμάτων.....	18
2.3.2 Στάδια επεξεργασίας λυμάτων.....	18
2.4 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων εκροών.....	19
2.4.1 Η σημασία της επαναχρησιμοποίησης υδάτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	
3.1 Μεθοδολογική προσέγγιση.....	23
3.2 Συλλογή δεδομένων.....	24
3.3 Κριτήρια και δείκτες αξιολόγησης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων.....	25
3.4 Μεθοδολογία αξιολόγησης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων.....	28
3.5 Μεθοδολογία αξιολόγησης της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	
4.1 Περιοχή Μελέτης.....	30
4.2 Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας.....	31
4.3 Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Βόλου.....	33
4.4 Επιλογή της ΕΕΛ Βόλου ως περιοχή μελέτης.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ	
5.1 Εισαγωγή.....	36
5.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου.....	37
5.2.1 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD ₅).....	38
5.2.2 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD).....	39
5.2.3 Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS).....	41
5.2.4 Συνολική αξιολόγηση των φυσικοχημικών παραμέτρων.....	42
5.2.5 Μικροβιολογικά χαρακτηριστικά της επεξεργασμένης εκροής.....	43
5.3 Αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης της ΕΕΛ Βόλου.....	44
5.4 Δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών.....	46
5.5 Αξιολόγηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης της εκροής.....	47

5.5.1 Αξιολόγηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης της εκροής της ΕΕΛ Βόλου.....	48
5.5.2 Δυνατότητες γεωργικής επαναχρησιμοποίησης της εκροής της ΕΕΛ Βόλου.....	48
5.5.3 Δυνατότητες αστικής, βιομηχανικής και περιβαλλοντικής επαναχρησιμοποίησης.....	50
5.5.4 Συνολική αξιολόγηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης.....	51
5.6 Παρουσίαση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας.....	57
5.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων.....	62
5.6.1 Συγκριτική αξιολόγηση των ΕΕΛ της Θεσσαλίας.....	62
5.6.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη διεθνή βιβλιογραφία.....	63
5.6.3 Περιορισμοί της παρούσας έρευνας και προτάσεις για μελλοντική εφαρμογή.....	65
5.6.4 Συμβολή της επαναχρησιμοποίησης στην κυκλική οικονομία και στη βιώσιμη ανάπτυξη.....	66
5.7 Γενική συζήτηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.....	68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα.....	70
6.2 Προτάσεις και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.....	72

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	74
-------------------	----

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας1: δείκτες αξιολόγησης.....	27
Πίνακας2.....	32
Πίνακας3 Βασικές παράμετροι ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου.....	37
Πίνακας 4: Αξιολόγηση της παραμέτρου BOD.....	39
Πίνακας 5: Σύγκριση βασικών παραμέτρων ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής των ΕΕΛ της Θεσσαλίας.....	39
Πίνακας 6: Τιμή cod στην επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου.....	40
Πίνακας 7: Τιμή cod στην επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου.....	40
Πίνακας 8: Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στις ΕΕΛ της Θεσσαλίας....	42
Πίνακας 9: Μέσων συγκεντρώσεων BOD , COD και TSS στις ΕΕΛ της Θεσσαλίας.....	43
Πίνακας 10: Συγκεντρώσεις κοπρανωδών κολοβακτηριοειδών στις ΕΕΛ της Θεσσαλίας.....	44
Πίνακας 11: Συνολική αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης της ΕΕΛ Βόλου.....	45
Πίνακας12: Πιθανές εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης της εκροής της ΕΕΛ Βόλου.....	46
Πίνακας 13 Πιθανές γεωργικές εφαρμογές της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου.....	49
Πίνακας 14 Δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου.....	51
Πίνακας 15 Στοιχεία που θα συλλεχθούν από την Εθνική Βάση Δεδομένων ΕΕΛ του ΥΠΕΝ.....	58
Πίνακας 16 Ποιοτικά χαρακτηριστικά επεξεργασμένης εκροής.....	58

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Θέση της ΕΕΛ Βόλου.....	34
Εικόνα2: Περιφέρεια Θεσσαλίας.....	34

Περίληψη

Η βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις της σύγχρονης εποχής, καθώς η κλιματική αλλαγή, η αυξανόμενη ζήτηση νερού και η υποβάθμιση των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων εντείνουν την ανάγκη υιοθέτησης εναλλακτικών πρακτικών διαχείρισης. Στο πλαίσιο αυτό, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων αναδεικνύεται ως μία από τις βασικότερες εφαρμογές της κυκλικής οικονομίας, συμβάλλοντας τόσο στην εξοικονόμηση φυσικών υδατικών πόρων όσο και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με τη διάθεση των επεξεργασμένων εκροών.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της Περιφέρειας Θεσσαλίας και η διερεύνηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους, με ιδιαίτερη έμφαση στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Βόλου. Η εργασία αποσκοπεί στην αποτύπωση της λειτουργικής απόδοσης των εγκαταστάσεων, στην αξιολόγηση της ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής και στην εκτίμηση της δυνατότητας αξιοποίησης του ανακτημένου νερού σύμφωνα με το ισχύον ευρωπαϊκό και εθνικό θεσμικό πλαίσιο.

Η μεθοδολογία βασίστηκε σε εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση, στη συλλογή και επεξεργασία στοιχείων από την Εθνική Βάση Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) και στη συγκριτική αξιολόγηση των σημαντικότερων ΕΕΛ της Θεσσαλίας. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν βασικοί δείκτες ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), καθώς και, όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα, το ολικό άζωτο (TN), ο ολικός φώσφορος (TP) και η *Escherichia coli*. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις απαιτήσεις του Κανονισμού (ΕΕ) 2020/741 και της ελληνικής νομοθεσίας σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν ότι οι εξεταζόμενες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας παρουσιάζουν γενικά υψηλή λειτουργική απόδοση ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών, ενώ η ΕΕΛ Βόλου εμφανίζει ιδιαίτερα ικανοποιητική ποιότητα εκροής ως προς τις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι η αξιολόγηση της καταλληλότητας για επαναχρησιμοποίηση δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στις παραμέτρους BOD₅, COD και TSS, αλλά απαιτεί τη συνεκτίμηση μικροβιολογικών, υγειονομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, καθώς και τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας της εκροής.

Η εργασία καταλήγει ότι η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων στη Θεσσαλία, ιδιαίτερα για γεωργικές εφαρμογές, όπου οι αρδευτικές ανάγκες είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Παράλληλα, επισημαίνεται ότι η εφαρμογή αντίστοιχων έργων προϋποθέτει

κατάλληλες υποδομές μεταφοράς και επιτυχής αποθήκευσης του ανακτημένου νερού,

αξιόπιστα συστήματα παρακολούθησης της ποιότητας, συμμόρφωση με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο και στενή συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων. Συνολικά, η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών δύναται να συμβάλει ουσιαστικά στην προστασία των υδατικών πόρων, στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και στην προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας στην Περιφέρεια Θεσσαλίας.

Λέξεις-κλειδιά: Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων εκροών, κυκλική οικονομία, διαχείριση υδατικών πόρων, Περιφέρεια Θεσσαλίας, ΕΕΛ Βόλου, γεωργική άρδευση.

Abstract

Sustainable water resources management is one of the greatest environmental challenges of the modern era, driven by climate change, increasing water demand, and the degradation of available freshwater resources. In this context, the reuse of treated municipal wastewater has emerged as a key practice within the framework of the circular economy, contributing to water conservation while reducing the environmental impacts associated with wastewater discharge.

The aim of this thesis is to evaluate the performance of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in the Region of Thessaly and investigate the potential for the reuse of treated effluents, with particular emphasis on the Volos Wastewater Treatment Plant. The study seeks to assess the operational performance of the selected WWTPs, evaluate the quality of treated effluents, and examine their suitability for reuse in accordance with the current European and Greek legislative framework.

The methodology combines an extensive literature review with the collection and analysis of data obtained from the National Database of Wastewater Treatment Plants maintained by the Hellenic Ministry of Environment and Energy. A comparative assessment was carried out for the major WWTPs operating in the Region of Thessaly. The evaluation was based on key treated effluent quality indicators, including Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS), and, where available, Total Nitrogen (TN), Total Phosphorus (TP), and *Escherichia coli*. The results were compared with the quality requirements established by Regulation (EU) 2020/741 and the relevant Greek legislation governing reclaimed water reuse.

The findings indicate that the examined wastewater treatment plants in Thessaly generally achieve high treatment efficiency in terms of organic matter and suspended solids removal. In particular, the Volos WWTP demonstrates satisfactory effluent quality with respect to the main physicochemical parameters. However, the study highlights that the suitability of treated wastewater for reuse cannot be assessed solely on the basis of BOD, COD, and TSS. A comprehensive evaluation requires consideration of microbiological, sanitary, and environmental parameters, as well as continuous monitoring of effluent quality to ensure compliance with the applicable regulatory requirements.

The study concludes that treated wastewater reuse can become an important component of sustainable water resources management in the Region of Thessaly, particularly for agricultural irrigation, where water demand is consistently high. Nevertheless, the successful implementation of wastewater reuse schemes requires adequate storage and distribution infrastructure, reliable monitoring systems, strict compliance with the legislative framework, and effective cooperation among the responsible authorities and stakeholders. Overall, the reuse of treated effluents has the potential to contribute significantly to water conservation, strengthen resilience to climate change, and promote the principles of the circular economy in the Region of Thessaly.

Keywords: Wastewater Treatment Plants (WWTPs), treated wastewater reuse, circular economy, water resources management, Region of Thessaly, Volos Wastewater Treatment Plant, agricultural irrigation.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Η διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί τις πιο σημαντικές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις της σύγχρονης εποχής. Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η αστικοποίηση, η εντατικοποίηση της γεωργικής και βιομηχανικής παραγωγής, καθώς και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, έχουν ως αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση νερού και επιβαρύνουν τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους. Η αυξανόμενη εμφάνιση φαινομένων λειψυδρίας σε πολλές περιοχές του κόσμου καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση σύγχρονων πρακτικών διαχείρισης που διασφαλίζουν την προστασία και τη βιώσιμη αξιοποίηση του νερού.

Η κυκλική οικονομία αναδεικνύεται ως ένα νέο μοντέλο ανάπτυξης όπου επιδιώκει τη διατήρηση των φυσικών πόρων μέσα στον οικονομικό κύκλο για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Σε αντίθεση με το παραδοσιακό γραμμικό μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, το οποίο βασίζεται στη λογική «παράγω–καταναλώνω–απορρίπτω», η κυκλική οικονομία προωθεί την πρόληψη παραγωγής αποβλήτων, την ανάκτηση υλικών και ενέργειας, την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση πόρων, συμβάλλοντας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη βιώσιμη ανάπτυξη.

Οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) αποτελούν βασικό στοιχείο της σύγχρονης περιβαλλοντικής διαχείρισης, καθώς διασφαλίζουν την προστασία των υδάτινων αποδεκτών μέσω της απομάκρυνσης οργανικών φορτίων, αιωρούμενων στερεών, θρεπτικών συστατικών και παθογόνων μικροοργανισμών από τα αστικά λύματα. Παράλληλα, οι σύγχρονες ΕΕΛ δεν αντιμετωπίζονται πλέον αποκλειστικά ως εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων, αλλά ως εγκαταστάσεις ανάκτησης πόρων, στις οποίες είναι δυνατή η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού, της ενέργειας και των παραπροϊόντων της επεξεργασίας.

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκρμών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της κυκλικής οικονομίας στον τομέα της διαχείρισης των υδάτων. Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να συμβάλει στη μείωση της άντλησης φυσικών υδατικών πόρων, στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας απέναντι στη λειψυδρία, στην προστασία των οικοσυστημάτων και στη δημιουργία σημαντικών περιβαλλοντικών και οικονομικών οφελών. Ανάλογα με την ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής και τις ισχύουσες νομοθετικές απαιτήσεις, οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης περιλαμβάνουν τη γεωργική άρδευση, τις αστικές και δημοτικές χρήσεις, τη βιομηχανική αξιοποίηση, τον εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων και την περιβαλλοντική αποκατάσταση.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων ως προς τα τεχνικά, λειτουργικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά

τους, καθώς και η διερεύνηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Η μελέτη εστιάζει στην Περιφέρεια Θεσσαλίας, με ιδιαίτερη αναφορά στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων του Βόλου, η οποία αποτελεί τη μεγαλύτερη εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων στην Ελλάδα και μία από τις σημαντικότερες της Ευρώπης.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη αξιολόγηση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων της περιοχής μελέτης, με στόχο την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, την εκτίμηση της αποδοτικότητας της λειτουργίας τους και τη διερεύνηση των δυνατοτήτων ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών σύμφωνα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

Επιπλέον, η εργασία επιδιώκει να αναδείξει τον ρόλο των ΕΕΛ ως βασικών υποδομών βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων και να διερευνήσει τον τρόπο με τον οποίο οι επεξεργασμένες εκροές μπορούν να αποτελέσουν έναν πολύτιμο φυσικό πόρο αντί να αντιμετωπίζονται ως απόβλητο.

Παράλληλα, η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στη διαμόρφωση προτάσεων που μπορούν να υποστηρίξουν τον σχεδιασμό πολιτικών βιώσιμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις περιβαλλοντικές όσο και τις κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους που σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων.

1.3 Μεθοδολογική προσέγγιση και δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε σε συνδυασμό βιβλιογραφικής ανασκόπησης και ανάλυσης πραγματικών δεδομένων λειτουργίας Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ). Αρχικά πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση της διεθνούς και ελληνικής βιβλιογραφίας σχετικά με τις τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων, τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών, το ισχύον θεσμικό πλαίσιο και τις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

Στη συνέχεια συλλέχθηκαν στοιχεία από την **Εθνική Βάση Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ)** για τις κυριότερες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Τα στοιχεία περιλάμβαναν πληροφορίες σχετικά με τα γενικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων, τη δυναμικότητα σχεδιασμού, την εξυπηρετούμενη περιοχή, καθώς και δεδομένα που αφορούν την ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής.

Για την αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης των εγκαταστάσεων χρησιμοποιήθηκαν οι βασικές ποιοτικές παράμετροι της εκροής, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), το ολικό άζωτο (TN), ο ολικός φώσφορος (TP) και, όπου υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία, η

Escherichia coli. Για κάθε εξεταζόμενη ΕΕΛ υπολογίστηκαν οι ετήσιοι μέσοι όροι των διαθέσιμων μετρήσεων, ώστε να καταστεί δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση των εγκαταστάσεων.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων παρουσιάστηκαν σε συγκριτικούς πίνακες και αξιολογήθηκαν ως προς τη λειτουργική απόδοση των εγκαταστάσεων και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου. Η τελική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με στόχο τη διερεύνηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Κυκλική οικονομία

2.1.1 Η έννοια της κυκλικής οικονομίας

Με την έννοια της κυκλικής οικονομίας περιγράφεται ένα οικονομικό σύστημα το οποίο στοχεύει στην εξάλειψη των αποβλήτων και στην προώθηση της βιωσιμότητας μέσα από την επαναχρησιμοποίηση και την αποδοτικότητα των πόρων.

2.1.2 Βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας

Η κυκλική οικονομία λειτουργεί δημιουργώντας ένα σύστημα κλειστού βρόχου όπου μειώνει την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων πόρων μέσω της επισκευής, της κοινής χρήσης, της ανακατασκευής αλλά και της ανακύκλωσης. Μειώνεται η εξάρτηση από τις νέες πρώτες ύλες κ περιορίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής και της κατανάλωσης.

Η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας βασίζεται στα παρακάτω:

Περιορισμός των αποβλήτων και της ρύπανσης: Η κυκλική οικονομία δίνει έμφαση στον σχεδιασμό προϊόντων και διαδικασιών που μειώνουν την παραγωγή αποβλήτων και τη ρύπανση. Ενδεικτικά μέτρα αποτελούν η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η μείωση της συσκευασίας και η εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών στη διαχείριση απορριμμάτων.

Επιμήκυνση του κύκλου ζωής των προϊόντων: Τα προϊόντα σχεδιάζονται ώστε να είναι ανθεκτικά, εύκολα επισκευαστικά και δυνατόν να αναβαθμίζονται, παραμένοντας σε χρήση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Παράλληλα, ενισχύονται πρακτικές όπως η επαναχρησιμοποίηση, η ανακατασκευή και η ανακύκλωση υλικών.

Αναγέννηση των φυσικών οικοσυστημάτων: Θεμελιώδες στοιχείο της κυκλικής οικονομίας αποτελεί η αποκατάσταση των φυσικών πόρων που επηρεάζονται από την ανθρώπινη

δραστηριότητα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης της γης, δράσεων αναδάσωσης και πρωτοβουλιών προστασίας και διατήρησης του περιβάλλοντος.

2.1.3 Γραμμική και κυκλική οικονομία

Η γραμμική οικονομία, που μερικές φορές αναφέρεται ως οικονομία «παίρνω-φτιάχνω-αποβάλλω», είναι ένα σύστημα όπου εξάγονται πόροι για την παραγωγή προϊόντων που τελικά καταλήγουν ως απόβλητα και απορρίπτονται. Τα προϊόντα και τα υλικά γενικά δεν χρησιμοποιούνται στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους σε μια γραμμική οικονομία και, όπως υποδηλώνει το όνομα, κινούνται πάντα προς μία κατεύθυνση - από τις πρώτες ύλες στα απόβλητα. Είναι ένα ρυπογόνο σύστημα που υποβαθμίζει τα φυσικά συστήματα και αποτελεί την κινητήρια δύναμη των παγκόσμιων προκλήσεων, συμπεριλαμβανομένης της κλιματικής αλλαγής και της απώλειας βιοποικιλότητας.

Η βιομηχανική επανάσταση έθεσε τις βάσεις για την γραμμική οικονομία και έχει αποφέρει πολλά οφέλη. Για πρώτη φορά, τα αγαθά μπόρεσαν να παραχθούν μαζικά. Φαινόταν ότι οι πρώτες ύλες και η ενέργεια ήταν ουσιαστικά άπειρες και, χάρη σε αυτόν τον οικονομικό μετασχηματισμό, οι βιομηχανικές χώρες έγιναν κοινωνίες αφθονίας, ο παγκόσμιος πληθυσμός εκτοξεύτηκε στα ύψη και πολλά εκατομμύρια άνθρωποι βγήκαν από τη φτώχεια.

Αυτή η παγκόσμια ανάπτυξη κατέστη δυνατή μόνο μέσω της εξόρυξης πεπερασμένων πόρων και της υποβάθμισης του φυσικού κεφαλαίου για τη δημιουργία οικονομικής αξίας. Με την πάροδο του χρόνου, έχουμε μάθει να το κάνουμε αυτό με όλο και περισσότερους τρόπους, δημιουργώντας ολοένα και πιο προηγμένα προϊόντα. Αλλά το κυρίαρχο μοντέλο δεν έχει αλλάξει.

Οι αρνητικές επιπτώσεις αυτής της προσέγγισης, με τη μορφή περιβαλλοντικής ζημίας και απώλειας πολύτιμων υλικών, είναι σαφείς. Οφείλονται στην κακοδιαχείριση των πόρων και της γης σε κλάδους σε ολόκληρη την οικονομία, συμπεριλαμβανομένης της γεωργίας, των κατασκευών και των μεταφορών.

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η οικονομία μας καταστρέφει το φυσικό κεφάλαιο από το οποίο εξαρτάται. Αυτό φαίνεται στα εδάφη που υποβαθμίζονται, στον ωκεανό που μολύνεται, στη βιοποικιλότητα που χάνεται, στο γλυκό νερό που στεγνώνει και στα δάση που αποψιλώνονται.

Η μετάβαση προς ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας θεωρείται πλέον απαραίτητη για τη διασφάλιση της βιώσιμης ανάπτυξης, της ορθολογικής διαχείρισης των φυσικών πόρων και της προστασίας του περιβάλλοντος στο μέλλον.

2.1.4 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία μεταμορφώνει την ΕΕ σε μια σύγχρονη, ανταγωνιστική και αποδοτική ως προς τους πόρους οικονομία.

Ξεκίνησε από την Πρόεδρο von der Leyen το 2019 και ανταποκρίνεται στην επείγουσα έκκληση των πολιτών —ιδίως των νέων— για δράση για το κλίμα. Καθορίζει ένα σχέδιο για τον μετασχηματισμό της οικονομίας, της ενέργειας, των μεταφορών και των βιομηχανιών της Ευρώπης για ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

Στόχος του είναι η μείωση των εκπομπών κατά τουλάχιστον 50% έως το 2030, φτάνοντας το ποσοστό στο 55%, ενώ παράλληλα δεσμεύει νομικά τον στόχο ουδετερότητας για το 2050 μέσω του Ευρωπαϊκού Νόμου για το Κλίμα. Προωθεί μια καθαρή μετάβαση που προστατεύει τους ανθρώπους και τον πλανήτη, είναι οικονομικά ορθή και κοινωνικά δίκαιη.

Η Πράσινη Συμφωνία επενδύει στην καινοτομία, την καθαρή τεχνολογία και τις πράσινες υποδομές, διασφαλίζοντας παράλληλα μια δίκαιη μετάβαση για τις κοινότητες που επηρεάζονται περισσότερο. Χάρη στην Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, οι Ευρωπαίοι απολαμβάνουν καθαρότερο αέρα και πιο ενεργειακά αποδοτικά προϊόντα και σπίτια. Επίσης, αξιοποιούν περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για να τροφοδοτήσουν τη ζωή τους.

2.2 Η διαχείριση υδατικών πόρων στη σύγχρονη εποχή

2.2.1 Βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων.

Η βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων συνιστά κρίσιμο ζήτημα για τη συνέχιση της ανθρώπινης δραστηριότητας και ευημερίας. Τα τελευταία χρόνια, η αντιμετώπισή της καθίσταται ολοένα πιο σύνθετη, εξαιτίας των ταχύτατων περιβαλλοντικών μεταβολών, της περιορισμένης κατανόησης των μηχανισμών που τις διέπουν και της αυξημένης πολυπλοκότητας των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ανθρώπινων συστημάτων και υδατικού περιβάλλοντος. Ενδεικτικά, οι αλλαγές στα πρότυπα βροχοπτώσεων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή έχουν επηρεάσει τη χωρική και χρονική διαθεσιμότητα του νερού, οδηγώντας σε ακραία φαινόμενα όπως παρατεταμένες ξηρασίες και εκτεταμένες πλημμύρες, οι οποίες υπερβαίνουν τις αντοχές των υφιστάμενων υποδομών ύδρευσης.

Η πρόκληση αυτή επιτείνεται από την αποσπασματική και συχνά αντικρουόμενη γνώση σχετικά με τη φύση και τις μελλοντικές επιπτώσεις αυτών των μεταβολών, γεγονός που δυσχεραίνει τη διαμόρφωση κοινά αποδεκτών και αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης. Η κατάσταση αυτή, που χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα ως προς τις σχέσεις αιτίου–αποτελέσματος, τις πιθανότητες διαφορετικών μελλοντικών εξελίξεων και τη σχετική σημασία των ενδεχόμενων αποτελεσμάτων υπό συνθήκες άγνωστων ή αντικρουόμενων παραδοχών, ορίζεται στη βιβλιογραφία ως «βαθιά αβεβαιότητα». Η βαθιά αβεβαιότητα αναγνωρίζεται πλέον ως μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στη διαχείριση υδατικών πόρων, καθιστώντας τις παραδοσιακές προσεγγίσεις ανεπαρκείς και αναδεικνύοντας την ανάγκη για ένα νέο πλαίσιο σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων.

Το επικρατούν παραδοσιακό παράδειγμα στον σχεδιασμό και τη διαχείριση υδατικών συστημάτων βασίζεται στη συστημική προσέγγιση, η οποία αξιοποιεί ένα ή περισσότερα

μοντέλα για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος με βάση εξωγενείς μεταβλητές και παραμέτρους απόφασης. Τα παραγόμενα αποτελέσματα αξιολογούνται από τα εμπλεκόμενα μέρη με στόχο την επιλογή της καταλληλότερης λύσης. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί είτε μέσω προσομοιώσεων, όπου εξετάζονται πολλαπλά σενάρια μεταβλητών, είτε μέσω μεθόδων βελτιστοποίησης που αποσκοπούν στον εντοπισμό αποδοτικών ή «βέλτιστων» λύσεων.

Ωστόσο, ανεξαρτήτως της επιλεγόμενης μεθόδου, αβεβαιότητες είναι δυνατόν να προκύψουν τόσο στις εισροές του συστήματος όσο και στη δομή των μοντέλων, στις παραμέτρους τους και στα παραγόμενα αποτελέσματα. Στο παραδοσιακό πλαίσιο, οι αβεβαιότητες αυτές συνήθως αντιμετωπίζονται μέσω πιθανοκρατικών προσεγγίσεων που βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα ή σε υποκειμενικές εκτιμήσεις, υιοθετώντας μια «καλύτερη εκτίμηση» για το μέλλον. Ωστόσο, η πρακτική αυτή αδυνατεί να αποτυπώσει τη βαθιά αβέβαιη φύση των μελλοντικών εξελίξεων και να εξετάσει το πλήρες φάσμα των πιθανών σεναρίων.

Κατά συνέπεια, καθίσταται αναγκαία η υιοθέτηση ενός νέου παραδείγματος για τη διαχείριση υδατικών πόρων υπό συνθήκες βαθιάς αβεβαιότητας, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη τις μακροπρόθεσμες μεταβολές στις εξωγενείς εισροές, την ελλιπή ή αμφισβητούμενη γνώση των υποκείμενων διεργασιών και τον καθοριστικό ρόλο της ανθρώπινης παρέμβασης σε όλα τα στάδια της ανάλυσης και της λήψης αποφάσεων.

2.2.2 Κλιματική αλλαγή.

Η κλιματική αλλαγή έχει επιφέρει σημαντικές πιέσεις στους υδάτινους πόρους παγκοσμίως, γεγονός που αποτυπώνεται στην αυξανόμενη συχνότητα και ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως είναι:

- οι παρατεταμένες ξηρασίες,
- οι πλημμύρες και
- τα έντονα φαινόμενα καταιγίδων.

Παρά το γεγονός ότι το νερό καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της Γης, μόλις ένα μικρό ποσοστό — περίπου 3% — αποτελείται από γλυκό νερό, εκ των οποίων τα δύο τρίτα βρίσκονται δεσμευμένα σε παγετώνες.

Από το εναπομείναν ποσοστό γλυκού νερού, μόνο ένα ελάχιστο μέρος είναι άμεσα προσβάσιμο, καθώς σημαντικές ποσότητες εντοπίζονται σε απομονωμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές, ενώ τα εποχικά υδατικά αποθέματα από μουσώνες και πλημμυρικά φαινόμενα δεν μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά. Στην παρούσα φάση, λιγότερο από το 0,1% του παγκόσμιου γλυκού νερού χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για βασικές ανάγκες, όπως η ύδρευση, η αποχέτευση, η αγροτική παραγωγή, η βιομηχανική επεξεργασία και οι δραστηριότητες αναψυχής.

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση και υπερεκμετάλλευση των υδατικών πόρων έχει οδηγήσει σε σοβαρή υποβάθμιση των οικοσυστημάτων γλυκού νερού, με τα ποτάμια να πλήττονται ιδιαίτερα έντονα.

Έχει αναπτυχθεί ένα ευρύ φάσμα μεθόδων για την αντιμετώπιση της βαθιάς αβεβαιότητας στη Διαχείριση Υδάτινων Πόρων (WRM), οι οποίες συχνά στηρίζονται στη χρήση σεναρίων (Elsawah et al., 2020; Kwakkel and Haasnoot, 2019; Walker et al., 2003). Τα σενάρια απεικονίζουν πιθανές μελλοντικές «καταστάσεις του κόσμου», αντανακλώντας διαφορετικές υλοποιήσεις των βαθιών αβεβαιοτήτων (Mahmoud et al., 2011). Αντί για μια μοναδική προβολή του μέλλοντος με περιορισμένη αβεβαιότητα, η ανάλυση εστιάζει πλέον σε πολλαπλές λογικές μελλοντικές εξελίξεις (Σχήμα 1β). Οι συνέπειες διαφορετικών αποφάσεων WRM, όπως η ποσότητα νερού που απελευθερώνεται από ένα ταμειυτήρα, αξιολογούνται μέσω μοντέλων συστήματος υπό αυτά τα σενάρια. Μετρήσεις απόδοσης, όπως η ασφάλεια νερού ή ο κίνδυνος πλημμύρας, μπορούν να αξιολογηθούν είτε ανά σενάριο είτε συνολικά, ανάλογα με τους στόχους της μελέτης.

Υπάρχουν επίσης μέθοδοι που λαμβάνουν υπόψη την ανθρώπινη εμπλοκή, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές μεταβλητών ή διαφορετικές προτιμήσεις και αξίες κατά τη λήψη αποφάσεων. Αν και δεν χαρακτηρίζονται πάντα ως «σενάρια», συνιστούν μορφή «σεναριολογικής σκέψης» σε υψηλό επίπεδο.

Παρά τη δημοτικότητα των προσεγγίσεων που βασίζονται σε σενάρια για τη λήψη αποφάσεων υπό βαθιά αβεβαιότητα, η υιοθέτησή τους παραμένει περιορισμένη. Για τη μετάβαση από το παραδοσιακό στο νέο παράδειγμα WRM, απαιτείται σαφής κατηγοριοποίηση των πηγών βαθιάς αβεβαιότητας και παραδείγματα εφαρμογής σεναρίων.

2.3 Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων

Βαθιά αβεβαιότητα και πηγές της στη WRM

Η βαθιά αβεβαιότητα θεωρείται βασική πρόκληση στη λήψη περιβαλλοντικών αποφάσεων και τη διαμόρφωση πολιτικής για τη WRM. Υπάρχουν τρεις κύριες πηγές:

- Μη στασιμότητα εξωγενών εισροών, όπως κλιματικές αλλαγές, δημογραφικές εξελίξεις ή τεχνολογικές και πολιτικές μεταβολές.
- Ελλιπής ή αμφισβητούμενη γνώση για τη λειτουργία και τα όρια του συστήματος, που δημιουργεί πολλαπλές ερμηνείες και επιλογές μοντέλων.
- Διαφορετικές ανθρώπινες προτιμήσεις και αξίες, που επηρεάζουν την αξιολόγηση και κατάταξη πιθανών λύσεων.

Επιπτώσεις στη WRM

Κάθε πηγή βαθιάς αβεβαιότητας επηρεάζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και τα αποτελέσματα:

Η πρώτη πηγή οδηγεί σε διαφορετικά σενάρια μελλοντικής διαθεσιμότητας και ζήτησης νερού, επηρεάζοντας τα βέλτιστα μείγματα και τις λύσεις Pareto.

Η δεύτερη πηγή οδηγεί σε διαφορετικές διατυπώσεις προβλημάτων και επιλογές μοντέλων.

Η τρίτη πηγή διαφοροποιεί τις τελικές επιλογές λόγω αντικρουόμενων συμφερόντων και κοσμοθεωριών.

Σενάρια και σεναριολογική σκέψη

Η σεναριολογική σκέψη υποστηρίζει την ανάλυση πολλαπλών πιθανών μελλοντικών εξελίξεων. Στα σενάρια περιγράφονται εναλλακτικές καταστάσεις του κόσμου (SoW) και οι δυνατές πορείες προς αυτές. Εφαρμόζονται τόσο για την αντιμετώπιση αβεβαιότητας στις εξωγενείς εισροές, όσο και για διαφορές στην κατανόηση του συστήματος ή στις κοσμοθεωρίες των ενδιαφερόμενων.

Αβεβαιότητα από εξωγενείς εισροές

Οι μεταβολές σε βροχοπτώσεις, εισροές, ζήτηση και άλλες παραμέτρους όπως η κλιματική αλλαγή, η αύξηση πληθυσμού και η τεχνολογία επηρεάζουν τη διαχείριση υδάτινων πόρων. Τα σενάρια μπορούν να είναι:

- Σενάρια στιγμιότυπων: εκτιμούν την απόδοση του συστήματος σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- Σενάρια πορείας: αναπαριστούν την εξέλιξη του συστήματος στο χρόνο έως την περίοδο αξιολόγησης.

Βαθιά αβεβαιότητα λόγω ελλιπούς γνώσης και διαφορετικών κοσμοθεωριών

Η βαθιά αβεβαιότητα που προκύπτει από την ελλιπή ή αμφισβητούμενη γνώση (δεύτερη πηγή) και από διαφορετικές κοσμοθεωρίες (τρίτη πηγή) συχνά εμφανίζεται με παρόμοιο τρόπο στη διαχείριση υδάτινων πόρων (WRM), αλλά επιφέρει σημαντική πολυπλοκότητα λόγω της συμμετοχής της ανθρώπινης κρίσης. Οι παραδοσιακές μέθοδοι που βασίζονται σε κατανομές πιθανοτήτων δεν επαρκούν σε αυτά τα πλαίσια, και η σεναριολογική σκέψη, που αντικατοπτρίζει τις αντιλήψεις και τις προτιμήσεις των ενδιαφερομένων, αποτελεί κρίσιμο εργαλείο.

Συνήθως, η επίδραση αυτής της αβεβαιότητας γίνεται πιο εμφανής στο τελικό στάδιο λήψης αποφάσεων, όπου πρέπει να επιλεγεί μια λύση από ένα σύνολο εναλλακτικών. Μέθοδοι όπως η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) και η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) χρησιμοποιούνται για να ενσωματώσουν τις προτιμήσεις των ενδιαφερομένων, αξιολογώντας εναλλακτικές λύσεις έναντι σταθμισμένων κριτηρίων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι προτιμήσεις των ενδιαφερομένων μπορούν να θεωρηθούν ως σενάρια, επιτρέποντας την κατανόηση του πώς διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα ανάλογα με τις προτιμήσεις των ομάδων.

Η ενσωμάτωση της βαθιάς αβεβαιότητας σε άλλα στάδια της διαδικασίας είναι πιο περίπλοκη. Απαιτεί τη δημιουργία αφηγήσεων ή σεναρίων για διαφορετικές ομάδες ενδιαφερομένων, μέσω δραστηριοτήτων συμμετοχής όπως εργαστήρια ή ομάδες εστίασης. Στο έργο Optimal Mix, για παράδειγμα, η επιλογή της πλατφόρμας μοντελοποίησης βασίστηκε σε αφήγηση που αντικατοπτρίζει κυβερνητικές προτιμήσεις, ενώ η απόφαση να αποκλειστούν τα συλλεγόμενα όμβρια ύδατα και τα ανακτημένα λύματα για πόσιμη χρήση στηρίχθηκε σε ανησυχίες δημόσιας υγείας.

Μέσω αυτής της προσέγγισης, αναπτύσσονται πολλαπλά σενάρια που αντικατοπτρίζουν διαφορετικές ή αντικρουόμενες προτιμήσεις και αξιολογούνται οι επιπτώσεις τους στο σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων. Πρόσφατες μέθοδοι, όπως τα ανταγωνιστικά πλαίσια, χρησιμοποιούν παράλληλες διατυπώσεις προβλημάτων για την ανάλυση των διαφορών στις τελικές λύσεις.

Συνολικά, η βαθιά αβεβαιότητα που προκύπτει από την ανθρώπινη εμπλοκή μπορεί να επηρεάσει οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας WRM. Η ανάπτυξη προσαρμοσμένων λύσεων μέσω αφηγήσεων και σεναρίων υπερβαίνει τις παραδοσιακές αριθμητικές μεθόδους, παρέχοντας εργαλεία για τη διαχείριση της πολυπλοκότητας και την υποστήριξη πιο ενημερωμένων και ανθεκτικών αποφάσεων.

2.3.1 Έννοια και σημασία της επεξεργασίας λυμάτων

Τα λύματα αποτελούνται από λύματα που απορρίπτονται από κατοικίες και από εμπορικές, θεσμικές και δημόσιες εγκαταστάσεις που υπάρχουν στην περιοχή. Λύματα είναι ένα μείγμα νερού, ανθρώπινων περιττωμάτων, χρησιμοποιημένου νερού από μπάνια, υπολειμμάτων παρασκευής τροφίμων, λυμάτων πλυντηρίων και άλλων αποβλήτων της κανονικής ζωής.

Τα λύματα των δήμων περιέχουν λύματα από εμπορικές δραστηριότητες και ιδρύματα, π.χ. λύματα που απορρίπτονται από εστιατόρια, πλυντήρια, νοσοκομεία, σχολεία, φυλακές, γραφεία, καταστήματα και εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν την τοπική περιοχή μεγαλύτερων κοινοτήτων.

Τα λύματα μπορούν να διακριθούν σε «μη επεξεργασμένα λύματα» και «επεξεργασμένα λύματα».

Ο όρος «λύματα» χρησιμοποιείται σήμερα συχνά εναλλακτικά με τον όρο «λύματα» – που υποδηλώνει «αστικά λύματα» – σε πολλά εγχειρίδια, έγγραφα πολιτικής και στη βιβλιογραφία. Για την ακρίβεια, τα λύματα είναι ένας ευρύτερος όρος, επειδή αναφέρονται σε οποιοδήποτε νερό μετά τη χρήση του σε μια ποικιλία εφαρμογών. Έτσι, μπορεί επίσης να αναφέρεται σε «βιομηχανικά λύματα», γεωργικά λύματα και άλλες ροές που δεν σχετίζονται με οικιακές δραστηριότητες.

2.3.2 Στάδια επεξεργασίας λυμάτων

Τα λύματα είναι ακάθαρτα νερά που προέρχονται από οικιακή χρήση, από εμπορικές ή και διοικητικές δραστηριότητες του οικισμού τα οποία περιέχουν αιωρούμενες και διαλυμένες οργανικές ή και ανόργανες ουσίες.

Η επεξεργασία των λυμάτων είναι ένα θέμα ζωτικής σημασίας για την προστασία του περιβάλλοντος από την ρύπανση, τη διατήρηση των υδάτινων οικοσυστημάτων, τη διασφάλιση της βιώσιμης διαχείρισης των υδάτων και την προστασία της δημόσιας υγείας μέσω της πρόληψης της εξάπλωσης ασθενειών και της διασφάλισης ασφαλούς πόσιμου νερού. Οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων απομακρύνουν τους ρύπους από τα λύματα, ώστε να μπορούν να απορριφθούν με ασφάλεια στο περιβάλλον ή να καταστούν κατάλληλα για επαναχρησιμοποίηση. Υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες επεξεργασίας των λυμάτων οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι για να εξυπηρετούν διαφορετικές κλίμακες, διαφορετικές πηγές και διαφορετικούς στόχους επεξεργασίας τους.

- **Προκαταρτική επεξεργασία**

Πρόκειται για την πρωτεύουσα διαδικασία επεξεργασίας η οποία περιλαμβάνει άλεση ή σχαρισμό, εξάμμωση και απολίπανση. Η προεπεξεργασία πραγματοποιείται με σκοπό την προστασία των κατόπιν έργων, όπως είναι των αντλιοστασίων και των αγωγών από σκουπίδια, άμμο κλπ αλλά και από την αφαίρεση των λιπών όπου επηρεάζουν σημαντικά τη βιολογική επεξεργασία.

- **Πρωτοβάθμια επεξεργασία**

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία είναι η διαδικασία της απλής ή και της χημικά υποβοηθούμενης καθίζησης. Πρόκειται για το πρώτο βασικό στάδιο επεξεργασίας το οποίο βέβαια επιτυγχάνει περίπου το 60% απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών και το 30% του BOD₅. Αποτελεί το κατά ελάχιστο βαθμό επεξεργασίας των λυμάτων σε περιπτώσεις διάθεσης των λυμάτων στη θάλασσα με υποθαλάσσιο αγωγό.

- **Δευτεροβάθμια επεξεργασία**

Η δευτεροβάθμια επεξεργασία αποτελεί την βιολογική αποικοδόμηση των πολύ λεπτών και διαλυμένων οργανικών ουσιών και κατα συνέπεια την απομάκρυνση των σχηματιζόμενων αιωρημάτων όπου έχουν δευτεροβάθμια καθίζηση. Σε συνδυασμό οι δύο αυτές επεξεργασίες αποτελούν το γνωστό ‘‘συμβατικό σύστημα’’ της επεξεργασίας των λυμάτων

Τριτοβάθμια επεξεργασία

Η τριτοβάθμια επεξεργασία αποτελεί ένα επιπλέον στάδιο μετά την δευτεροβάθμια επεξεργασία με σκοπό την αφαίρεση όλων των ακαθαρσιών από τα λύματα σε ποσοστό περίπου 99%.

2.4 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων εκρρών

2.4.1 Η σημασία της επαναχρησιμοποίησης υδάτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

Επαναχρησιμοποίηση εκροών- κατηγορίες, εφαρμογές και οφέλη.

Οι κατηγορίες όπου απαιτούνται για την επαναχρησιμοποίηση των εκροών είναι οι ακόλουθες:

1. Η άμεση επαναχρησιμοποίηση όπου πραγματοποιείται χρήση της εκροής χωρίς αυτό να πραγματοποιεί σημαντική επεξεργασία όπως για παράδειγμα η επαναχρησιμοποίηση του νερού ψύξης σε βιομηχανία.
2. Η επαναχρησιμοποίηση έπειτα από την επεξεργασία όπου απαιτείται φυσική, χημική ή βιολογική επεξεργασία όπως είναι για παράδειγμα τα επεξεργασμένα λύματα για την άρδευση
3. Η Βιομηχανική συμβίωση από τα απόβλητα μιας επιχείρησης που γίνονται πρώτη ύλη για άλλη
4. Η Ανακύκλωση και η ανάκτηση των υλικών όπως για παράδειγμα η μετατροπή των εκροών σε δευτερογενείς πρώτες ύλες πχ. η ανακύκλωση των μετάλλων και των πλαστικών
5. Η ενεργειακή αξιοποίηση από την χρήση των εκροών για παραγωγή ενέργειας όπως είναι το βιοαέριο από τα οργανικά απόβλητα

Ο αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός και η οικονομική στροφή προς πιο εντατικά πρότυπα κατανάλωσης πόρων έχουν οδηγήσει σε αυξημένη ζήτηση νερού, με τα παγκόσμια αποθέματα νερού να αναμένεται να υποστούν αυξημένη πίεση λόγω των αυξανόμενων επιπέδων πλούτου και των αυξανόμενων απολήψεων γλυκού νερού για γεωργία, βιομηχανία και δημοτικές χρήσεις.

Επί του παρόντος, το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού επηρεάζεται σοβαρά (αρνητικά) από τη λειψυδρία, η οποία συμβαίνει όταν η ζήτηση νερού υπερβαίνει τους υδατικούς πόρους που είναι εκμεταλλεύσιμοι υπό βιώσιμες συνθήκες.

Η λειψυδρία αναφέρεται σε μακροπρόθεσμες ανισορροπίες στο νερό, που συνδυάζουν τη χαμηλή διαθεσιμότητα νερού με ένα επίπεδο ζήτησης νερού που υπερβαίνει την ικανότητα εφοδιασμού του φυσικού συστήματος.

Η επιταχυνόμενη αστικοποίηση και η επέκταση των δημοτικών συστημάτων ύδρευσης είναι επίσης βασικοί παράγοντες, με τη λειψυδρία να αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω στο εγγύς μέλλον λόγω της κλιματικής αλλαγής.

Καθώς η χρήση νερού αυξάνεται παγκοσμίως, αυξάνεται επίσης η ποσότητα των παραγόμενων λυμάτων και το συνολικό φορτίο ρύπανσης, με πάνω από το 80% των λυμάτων παγκοσμίως - και πάνω από 95% σε ορισμένες λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες - να απελευθερώνονται στο περιβάλλον χωρίς επεξεργασία. Ως αποτέλεσμα, η επαναχρησιμοποίηση του νερού εξετάζεται ως λύση που μπορεί τόσο να μειώσει το χάσμα μεταξύ διαθεσιμότητας και ζήτησης όσο και την ποσότητα ρύπανσης που προκαλείται από τα λύματα. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού αναφέρεται στην παραγωγή νερού από λύματα που συλλέγονται από μια ποικιλία πηγών, στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία και επαναχρησιμοποιούνται για ωφέλιμους σκοπούς, κλείνοντας τον κύκλο του ανθρωπογενούς κύκλου του νερού. Η συμβατική φύση αυτού του γραμμικού κύκλου «λήψη-δημιουργία-χρήση-απόρριψη» είναι εγγενώς μη βιώσιμη, καθώς

συνεπάγεται σημαντικές απώλειες πόρων. Το νερό σπαταλιέται στην αλυσίδα παραγωγής μεταξύ της άντλησης, της επεξεργασίας, της διανομής και της χρήσης νερού, και στη συνέχεια της διάθεσης ως λύματα, της συλλογής και της επεξεργασίας σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (ΜΕΛ) πριν επιστρέψουν στο περιβάλλον. Όταν τα επεξεργασμένα λύματα απορρίπτονται στο υδάτινο περιβάλλον, χάνεται υπολειμματική ενέργεια από τη συλλογή, την εξαγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή νερού στους τελικούς χρήστες.

Τα επεξεργασμένα λύματα παρέχουν μια εναλλακτική πηγή νερού, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου το νερό είναι σπάνιο. Από την άρδευση έως τις βιομηχανικές χρήσεις και την παροχή πόσιμου νερού, τα λύματα που υποβάλλονται σε επεξεργασία στην κατάλληλη ποιότητα μπορούν να αναπληρώσουν τα αποθέματα νερού και να μειώσουν το χάσμα ζήτησης/διαθεσιμότητας. Παρόλο που απαιτεί παρόμοιες τεχνολογίες, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων διαφέρει από την αφαλάτωση, καθώς γενικά έχει χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο και προσφέρει μια σειρά από περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη. Το νερό μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στη γεωργία (π.χ., καλλιέργειες τροφίμων υδροπονία υδατοκαλλιέργεια θερμοκήπια), στη βιομηχανία (π.χ., νερό επεξεργασίας νερό ψύξης ανακυκλούμενοι πύργοι ψύξης), σε αστικές χρήσεις (π.χ., άρδευση δημόσιων πάρκων· αθλητικές εγκαταστάσεις· ιδιωτικοί κήποι· παρυφές δρόμων), για ψυχαγωγικές χρήσεις (π.χ., άρδευση γηπέδων γκολφ), για περιβαλλοντικές χρήσεις (π.χ., αναπλήρωση υδροφορέα υγρότοποι έλη), για πόσιμο (π.χ., αναπλήρωση υδροφορέα για χρήση πόσιμου νερού αύξηση των επιφανειακών αποθεμάτων πόσιμου νερού) υπό την προϋπόθεση της κατάλληλης επεξεργασίας.

Επί του παρόντος, περίπου 1 δισεκατομμύριο κυβικά μέτρα επεξεργασμένων αστικών λυμάτων επαναχρησιμοποιούνται ετησίως, ποσό που αντιστοιχεί περίπου στο 2,4% των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων και σε λιγότερο από 0,5% των ετήσιων αντλήσεων γλυκού νερού στην ΕΕ. Ο πιθανός ρόλος της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων ως εναλλακτικής πηγής ύδρευσης είναι πλέον ευρέως αναγνωρισμένος και ενσωματωμένος σε διεθνείς, ευρωπαϊκές και εθνικές στρατηγικές. Ο Στόχος Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών για το Νερό (ΣΒΑ 6) στοχεύει συγκεκριμένα σε σημαντική αύξηση της ανακύκλωσης και της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης παγκοσμίως έως το 2030.

Η επαναχρησιμοποίηση του νερού εφαρμόζεται σήμερα αποτελεσματικά σε ανεπτυγμένες περιοχές με έντονη λειψυδρία, όπως: οι Νότιες Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (ΗΠΑ) (κυρίως στην Καλιφόρνια, τη Φλόριντα, το Τέξας και την Αριζόνα), η Αυστραλία, η Σιγκαπούρη, το Ισραήλ και οι χώρες του Περσικού Κόλπου. Οι ΗΠΑ κατατάσσονται πρώτες στον συνολικό όγκο επεξεργασμένων λυμάτων που επαναχρησιμοποιούνται, με 7,6 εκατομμύρια m³ /ημέρα. Από τη δεκαετία του 1980, στις ΗΠΑ, η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA) έχει δημοσιεύσει Οδηγίες για την Επαναχρησιμοποίηση του Νερού για να υποστηρίξει την εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης του νερού για μη πόσιμες χρήσεις και πιο πρόσφατα για την επαναχρησιμοποίηση του πόσιμου νερού. Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Επαναχρησιμοποίηση του Νερού, το 2020, στοχεύει στην προώθηση της εξέτασης της επαναχρησιμοποίησης του νερού για να διασφαλιστεί η ασφάλεια, η βιωσιμότητα και η ανθεκτικότητα των υδάτινων πόρων των ΗΠΑ. Η Αυστραλία έχει μακρά εμπειρία στην επαναχρησιμοποίηση του νερού και έχει μια εθνικά συνεπή προσέγγιση στη διαχείριση των

κινδύνων για την υγεία και το περιβάλλον από την ανακύκλωση του νερού. Το Ισραήλ και η Σιγκαπούρη εμφανίζονται ως παγκόσμιοι ηγέτες όσον αφορά την επαναχρησιμοποίηση του νερού. Στο Ισραήλ, το μερίδιο των επαναχρησιμοποιούμενων επεξεργασμένων λυμάτων έχει αυξηθεί από περίπου 10% των 130 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων συλλεγόμενων λυμάτων στις αρχές της δεκαετίας του 1960, σε έως και 87% των 500 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων το 2015. Το Ισραήλ είναι σήμερα μία από τις λίγες χώρες στον κόσμο που έχει καταφέρει να κλείσει σχεδόν πλήρως τον αστικό κύκλο του νερού. Η Σιγκαπούρη έχει επιτύχει πλήρη επαναχρησιμοποίηση και, επί του παρόντος, με τις πέντε μονάδες NEWater που διαθέτει, μπορεί να καλύψει έως και το 40% των τρεχουσών αναγκών της χώρας σε νερό.

Παρόλο που η επαναχρησιμοποίηση του νερού στη γεωργία αποτελεί αποδεκτή πρακτική σε αρκετές χώρες της ΕΕ που αντιμετωπίζουν προβλήματα λειψυδρίας (π.χ. Κύπρος, Γαλλία, Ελλάδα, Ιταλία, Μάλτα, Πορτογαλία, Ισπανία), όπου έχει γίνει αναπόσπαστο και αποτελεσματικό στοιχείο της μακροπρόθεσμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων, συνολικά μόνο ένα μικρό ποσοστό του νερού επαναχρησιμοποιείται επί του παρόντος στην ΕΕ, συμπεριλαμβανομένων των εν λόγω χωρών. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού επισημάνθηκε ως ένα σημαντικό πιθανό μέτρο για περαιτέρω δράση της ΕΕ στο «Σχέδιο για την προστασία των υδάτινων πόρων της Ευρώπης». Η ανακοίνωση του 2015 με τίτλο «Κλείσιμο του κύκλου - Ένα σχέδιο δράσης της ΕΕ για την Κοινή Υδατική Πόροι» προχώρησε περαιτέρω, δηλώνοντας ότι η Επιτροπή θα λάβει μια σειρά από δράσεις για την προώθηση της επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων. 24 Ακολούθησε μια Κοινή Στρατηγική Εφαρμογής για την Ενσωμάτωση της Επαναχρησιμοποίησης του Νερού στον Σχεδιασμό και τη Διαχείριση των Υδάτων στο Πλαίσιο της ΟΠΥ και μια πρόταση κανονισμού για τις ελάχιστες απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης του νερού για γεωργική άρδευση. Ωστόσο, σε σύγκριση με άλλες χώρες, η πρόοδος της ΕΕ στην επαναχρησιμοποίηση του νερού ήταν ομαλή και υποτονική.

Από πολιτική άποψη, η κυκλική οικονομία προσφέρει έναν νέο τρόπο θεώρησης των σχέσεων μεταξύ αγορών, πελατών και φυσικών πόρων, προωθώντας βιώσιμες και αποδοτικές ως προς τους πόρους πολιτικές και πρακτικές. Η κυκλική οικονομία στοχεύει στην αποσύνδεση της οικονομικής ανάπτυξης από την κατανάλωση πόρων, ώστε να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των πιέσεων στους πεπερασμένους φυσικούς πόρους που προκύπτουν από τον ταχέως αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό και την άνοδο του βιοτικού επιπέδου. Η μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία θα ενθαρρύνει μια πιο αποτελεσματική χρήση του νερού, σε συνδυασμό με ισχυρά κίνητρα για καινοτομία, και μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα μιας οικονομίας να χειρίζεται τις απαιτήσεις της αυξανόμενης ανισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης νερού. Παρόλο που η επαναχρησιμοποίηση του νερού αντιμετωπίζει πολλά εμπόδια, που κυμαίνονται από την αντίληψη του κοινού έως τις προκλήσεις τιμολόγησης και τεχνολογίας, ασφάλειας και κανονισμών, αναδύονται γεωγραφικές και τομεακές στρατηγικές που στηρίζουν την κυκλική οικονομία και έχουν τη δυνατότητα να μεταμορφώσουν ορισμένα από τα κύρια εμπόδια στην επαναχρησιμοποίηση του νερού.

Κεφάλαιο 3 Μεθοδολογία

3.1 Γενική μεθοδολογική προσέγγιση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε σε συνδυαστική μεθοδολογική προσέγγιση, η οποία περιλάμβανε βιβλιογραφική ανασκόπηση, συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της Περιφέρειας Θεσσαλίας και διερεύνηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους. Η μεθοδολογία διαμορφώθηκε σύμφωνα με τις αρχές της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων και της κυκλικής οικονομίας, με στόχο την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης των εγκαταστάσεων και της δυνατότητας αξιοποίησης του ανακτημένου νερού.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση της ελληνικής και διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με τη λειτουργία των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων, τις τεχνολογίες επεξεργασίας αστικών λυμάτων, την ποιότητα των επεξεργασμένων εκροών, τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησής τους και τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Παράλληλα, εξετάστηκε το ισχύον ευρωπαϊκό και εθνικό θεσμικό πλαίσιο που διέπει την επεξεργασία, τη διάθεση και την επαναχρησιμοποίηση των αστικών λυμάτων, προκειμένου να καθοριστούν τα κριτήρια αξιολόγησης που εφαρμόστηκαν στη συνέχεια της έρευνας.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε συλλογή δεδομένων για τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας, αξιοποιώντας στοιχεία από την Εθνική Βάση Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), καθώς και από επιστημονικές δημοσιεύσεις, τεχνικές εκθέσεις και άλλες αξιόπιστες πηγές. Τα δεδομένα περιλάμβαναν πληροφορίες σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων, τη δυναμικότητα σχεδιασμού, τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό, τις εφαρμοζόμενες μεθόδους επεξεργασίας και τα διαθέσιμα ποιοτικά χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων εκροών.

Η επεξεργασία και η αξιολόγηση των δεδομένων βασίστηκαν σε τεχνικά, λειτουργικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, με στόχο την αποτίμηση της λειτουργικής απόδοσης των εξεταζόμενων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων. Ειδικότερα, εξετάστηκαν βασικές φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παράμετροι της επεξεργασμένης εκροής, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), το ολικό άζωτο (TN), ο ολικός φώσφορος (TP) και, όπου υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία, η *Escherichia coli*. Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας και της ποιότητας των παραγόμενων εκροών.

Στο επόμενο στάδιο διερευνήθηκαν οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ισχύοντος ευρωπαϊκού και εθνικού νομοθετικού πλαισίου. Η αξιολόγηση επικεντρώθηκε κυρίως στη δυνατότητα αξιοποίησης των

εκροών για γεωργική άρδευση, ενώ εξετάστηκαν επίσης πιθανές αστικές, βιομηχανικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπου αυτό ήταν εφικτό. Για τον σκοπό αυτό λήφθηκαν υπόψη τόσο η ποιότητα των επεξεργασμένων εκροών όσο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, οι υδατικές ανάγκες και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί που επηρεάζουν την εφαρμογή πρακτικών επαναχρησιμοποίησης.

Τέλος, τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και της ανάλυσης των διαθέσιμων δεδομένων συνδυάστηκαν, ώστε να εξαχθούν τεκμηριωμένα συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργική απόδοση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας και τη δυνατότητα ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους. Μέσα από τη διαδικασία αυτή αξιολογήθηκε ο βαθμός στον οποίο οι εξεταζόμενες εγκαταστάσεις μπορούν να συμβάλουν στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

3.2 Συλλογή δεδομένων.

Η συλλογή των δεδομένων αποτέλεσε βασικό στάδιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της Περιφέρειας Θεσσαλίας και για τη διερεύνηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους. Για τον σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν δευτερογενή δεδομένα, τα οποία προέρχονταν από επίσημες βάσεις δεδομένων, θεσμικούς φορείς και επιστημονικές πηγές, ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία και η εγκυρότητα της ανάλυσης.

Η κύρια πηγή άντλησης των δεδομένων ήταν η Εθνική Βάση Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Η βάση αυτή αποτελεί το επίσημο πληροφοριακό σύστημα παρακολούθησης της λειτουργίας των ΕΕΛ στην Ελλάδα και περιλαμβάνει στοιχεία σχετικά με τη δυναμικότητα σχεδιασμού, τον εξυπηρετούμενο ισοδύναμο πληθυσμό, τις εφαρμοζόμενες βαθμίδες επεξεργασίας, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων εκροών, καθώς και πληροφορίες για τη διάθεση ή την επαναχρησιμοποίηση των εκροών και της παραγόμενης ιλύος.

Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν δεδομένα από την ελληνική και διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία, επίσημες εκθέσεις δημόσιων οργανισμών και το ισχύον εθνικό και ευρωπαϊκό νομοθετικό πλαίσιο. Η βιβλιογραφική τεκμηρίωση χρησιμοποιήθηκε για την κατανόηση των τεχνολογιών επεξεργασίας, την επιλογή των κατάλληλων δεικτών αξιολόγησης και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση των διαθέσιμων στοιχείων.

Για τις ανάγκες της εργασίας συλλέχθηκαν στοιχεία που αφορούσαν τις κυριότερες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Τα δεδομένα περιλάμβαναν πληροφορίες σχετικά με τη δυναμικότητα σχεδιασμού, τον εξυπηρετούμενο ισοδύναμο πληθυσμό, τις εφαρμοζόμενες μεθόδους επεξεργασίας, καθώς και τις διαθέσιμες μετρήσεις βασικών ποιοτικών παραμέτρων των επεξεργασμένων εκροών. Επιπλέον, όπου

υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία, αξιοποιήθηκαν χρονοσειρές λειτουργικών δεδομένων, προκειμένου να εξεταστεί η σταθερότητα της λειτουργίας των εγκαταστάσεων και η διαχρονική μεταβολή της ποιότητας των εκροών.

Μετά τη συλλογή τους, τα δεδομένα οργανώθηκαν και ταξινομήθηκαν ανά εγκατάσταση και ανά παράμετρο αξιολόγησης, ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική ανάλυση των εξεταζόμενων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος της πληρότητας και της καταλληλότητας των διαθέσιμων στοιχείων, ενώ στην αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν μόνο δεδομένα που ήταν επαρκώς τεκμηριωμένα και κατάλληλα για επιστημονική επεξεργασία.

Η επιλογή της Περιφέρειας Θεσσαλίας ως περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε λόγω της ιδιαίτερης σημασίας της για τον πρωτογενή τομέα και των αυξημένων αναγκών σε υδατικούς πόρους. Η δυνατότητα αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών αποκτά ιδιαίτερη σημασία για την περιοχή, καθώς μπορεί να συμβάλει στη μείωση της πίεσης στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους και στην ενίσχυση της βιώσιμης διαχείρισής τους, ιδιαίτερα σε περιόδους αυξημένης ζήτησης ή περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού.

Η συστηματική συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων αποτέλεσε τη βάση για την αξιολόγηση που παρουσιάζεται στα επόμενα υποκεφάλαια, όπου εξετάζεται η λειτουργική απόδοση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας και διερευνώνται οι δυνατότητες ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου.

3.3 Κριτήρια και δείκτες αξιολόγησης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων

Η αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) πραγματοποιήθηκε με βάση ένα σύνολο τεχνικών, λειτουργικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων, τα οποία επιλέχθηκαν ώστε να αποτυπώνουν τη συνολική λειτουργική απόδοση των εγκαταστάσεων και την ποιότητα των επεξεργασμένων εκροών τους. Η επιλογή των κριτηρίων βασίστηκε στις απαιτήσεις της ισχύουσας ελληνικής και ευρωπαϊκής νομοθεσίας, στη σχετική επιστημονική βιβλιογραφία, καθώς και στη διαθεσιμότητα των στοιχείων που παρέχονται από την Εθνική Βάση Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με σκοπό να εκτιμηθεί κατά πόσο οι εξεταζόμενες εγκαταστάσεις επιτυγχάνουν την αποτελεσματική επεξεργασία των αστικών λυμάτων και εάν οι επεξεργασμένες εκροές πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για πιθανή επαναχρησιμοποίηση. Για τον λόγο αυτό εξετάστηκαν τόσο τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων όσο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των εκροών τους.

Τεχνικά και λειτουργικά κριτήρια

Στην πρώτη κατηγορία αξιολογήθηκαν τα βασικά τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων, όπως η δυναμικότητα σχεδιασμού, ο εξυπηρετούμενος ισοδύναμος πληθυσμός, οι βαθμίδες επεξεργασίας που εφαρμόζονται, η μέθοδος απολύμανσης και ο τελικός αποδέκτης των επεξεργασμένων εκροών. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της λειτουργικής επάρκειας κάθε εγκατάστασης και της δυνατότητας παραγωγής επεξεργασμένου νερού κατάλληλης ποιότητας.

Η καταγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών επέτρεψε επίσης τη συγκριτική αξιολόγηση των εγκαταστάσεων της Περιφέρειας Θεσσαλίας, αναδεικνύοντας τυχόν διαφοροποιήσεις ως προς τη δυναμικότητα, τις εφαρμοζόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας και τον βαθμό εξυπηρέτησης του πληθυσμού.

Περιβαλλοντικά κριτήρια

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση βασίστηκε κυρίως στην ποιότητα των επεξεργασμένων εκροών, καθώς αυτή αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα για την προστασία των υδάτινων αποδεκτών και τη δυνατότητα ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης του ανακτημένου νερού.

Για τον σκοπό αυτό εξετάστηκαν οι βασικές φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την αξιολόγηση της λειτουργίας των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων και περιλαμβάνονται στις απαιτήσεις της σχετικής νομοθεσίας.

Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν οι ακόλουθοι:

- Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅),
- Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD),
- Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS),
- Ολικό Άζωτο (TN),
- Ολικός Φώσφορος (TP),
- *Escherichia coli*, όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα.

Οι παραπάνω παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της ποιότητας των επεξεργασμένων εκροών και για τη διερεύνηση του βαθμού συμμόρφωσής τους με τις απαιτήσεις του ισχύοντος εθνικού και ευρωπαϊκού θεσμικού πλαισίου. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν για τη συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας, ώστε να αποτυπωθούν πιθανές διαφοροποιήσεις στη λειτουργική τους απόδοση.

Η αξιολόγηση δεν βασίστηκε αποκλειστικά στις μεμονωμένες τιμές των παραμέτρων, αλλά στη συνολική εικόνα που προέκυψε από το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων και των χρονοσειρών λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η πληρέστερη εκτίμηση της

αποτελεσματικότητας των εγκαταστάσεων και της αξιοπιστίας της ποιότητας των επεξεργασμένων εκροών.

Τέλος, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των τεχνικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων αποτέλεσαν τη βάση για τη διερεύνηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών, σύμφωνα με τις προβλεπόμενες χρήσεις του ανακτημένου νερού και τις απαιτήσεις του ισχύοντος νομοθετικού πλαισίου.

Πίνακας1: δείκτες αξιολόγησης.

Κατηγορία κριτηρίων	Δείκτης αξιολόγησης	Αντικείμενο αξιολόγησης	Σκοπός χρήσης στην παρούσα εργασία
Τεχνικά	Δυναμικότητα σχεδιασμού	Ικανότητα επεξεργασίας της εγκατάστασης	Εκτίμηση της επάρκειας της εγκατάστασης σε σχέση με τις ανάγκες της περιοχής
Τεχνικά	Εξυπηρετούμενος ισοδύναμος πληθυσμός	Μέγεθος πληθυσμού που εξυπηρετεί η ΕΕΛ	Σύγκριση της λειτουργικής ικανότητας των εγκαταστάσεων
Λειτουργικά	Βαθμίδες επεξεργασίας	Εφαρμοζόμενη τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων	Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας
Λειτουργικά	Μέθοδος απολύμανσης	Διαδικασία μικροβιολογικής προστασίας της εκροής	Εκτίμηση της καταλληλότητας για επαναχρησιμοποίηση
Περιβαλλοντικά	BOD	Οργανικό φορτίο επεξεργασμένης εκροής	Αξιολόγηση της απομάκρυνσης οργανικού φορτίου
Περιβαλλοντικά	COD	Συνολικό οργανικό φορτίο	Εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας
Περιβαλλοντικά	TSS	Ολικά αιωρούμενα στερεά	Αξιολόγηση της ποιότητας της εκροής
Περιβαλλοντικά	TN	Ολικό άζωτο	Εκτίμηση της απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών
Περιβαλλοντικά	TP	Ολικός φώσφορος	Αξιολόγηση του κινδύνου ευτροφισμού και της ποιότητας της εκροής
Περιβαλλοντικά	Escherichia coli	Μικροβιολογική ποιότητα	Εκτίμηση της καταλληλότητας της

			εκροής για ασφαλή επαναχρησιμοποίηση
--	--	--	--------------------------------------

Ο Πίνακας συνοψίζει τα βασικά κριτήρια και τους δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Η συνδυαστική αξιολόγηση των τεχνικών, λειτουργικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών επέτρεψε την ολοκληρωμένη αποτίμηση της λειτουργικής απόδοσης των εγκαταστάσεων, καθώς και τη διερεύνηση της δυνατότητας ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας.

3.4 Μεθοδολογία αξιολόγησης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων

Η αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της Περιφέρειας Θεσσαλίας πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εκτίμηση της λειτουργικής τους απόδοσης και της ποιότητας των επεξεργασμένων εκροών, καθώς και τη διερεύνηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησής τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου. Η αξιολόγηση βασίστηκε στα διαθέσιμα στοιχεία της Εθνικής Βάσης Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), καθώς και στις πληροφορίες που προέκυψαν από τη σχετική βιβλιογραφία και τις τεχνικές προδιαγραφές των εγκαταστάσεων.

Η διαδικασία αξιολόγησης πραγματοποιήθηκε σε διαδοχικά στάδια. Αρχικά συγκεντρώθηκαν και καταγράφηκαν τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων εγκαταστάσεων, όπως η δυναμικότητα σχεδιασμού, ο εξυπηρετούμενος ισοδύναμος πληθυσμός, οι εφαρμοζόμενες βαθμίδες επεξεργασίας και η μέθοδος απολύμανσης. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση της γενικής εικόνας των εγκαταστάσεων και τη σύγκριση των βασικών λειτουργικών χαρακτηριστικών τους.

Στη συνέχεια αξιολογήθηκαν οι διαθέσιμες μετρήσεις των ποιοτικών χαρακτηριστικών της επεξεργασμένης εκροής. Η αξιολόγηση βασίστηκε στις κύριες φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται διεθνώς για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας των αστικών λυμάτων. Οι παράμετροι αυτές περιλάμβαναν το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), το ολικό άζωτο (TN), τον ολικό φώσφορο (TP) και, όπου υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία, τη μικροβιολογική παράμετρο *Escherichia coli*.

Για κάθε εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των διαθέσιμων δεδομένων, με στόχο να διαπιστωθεί η λειτουργική της επίδοση και ο βαθμός συμμόρφωσης των επεξεργασμένων εκροών με τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας. Η αξιολόγηση δεν περιορίστηκε στη μελέτη μεμονωμένων τιμών, αλλά βασίστηκε στη συνολική εικόνα που

προέκυψε από τα διαθέσιμα λειτουργικά στοιχεία και τις χρονοσειρές παρακολούθησης, όπου αυτές ήταν διαθέσιμες.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας, προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές διαφοροποιήσεις ως προς τη λειτουργική τους απόδοση, την ποιότητα των επεξεργασμένων εκροών και τη δυνατότητα παραγωγής ανακτημένου νερού κατάλληλου για επαναχρησιμοποίηση. Η συγκριτική αυτή προσέγγιση επέτρεψε την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, καθώς η αξιολόγηση δεν βασίστηκε αποκλειστικά σε μία εγκατάσταση αλλά σε δεδομένα από περισσότερες ΕΕΛ της Περιφέρειας.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας, όπου αναλύονται συγκριτικά τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων εγκαταστάσεων, η ποιότητα των επεξεργασμένων εκροών και ο βαθμός συμμόρφωσής τους με τις απαιτήσεις του εθνικού και ευρωπαϊκού νομοθετικού πλαισίου.

3.5 Μεθοδολογία αξιολόγησης της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών

Η αξιολόγηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών πραγματοποιήθηκε με βάση τα διαθέσιμα ποιοτικά χαρακτηριστικά των εκροών των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις του ισχύοντος ευρωπαϊκού και εθνικού νομοθετικού πλαισίου. Σκοπός της αξιολόγησης ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο οι επεξεργασμένες εκροές μπορούν να αξιοποιηθούν με ασφάλεια ως εναλλακτικός υδατικός πόρος, συμβάλλοντας στην προστασία των φυσικών υδατικών αποθεμάτων και στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

Η αξιολόγηση βασίστηκε στην ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων που αφορούσαν τις φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους των επεξεργασμένων εκροών, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), το ολικό άζωτο (TN), τον ολικό φώσφορο (TP) και, όπου υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία, την *Escherichia coli*. Οι παράμετροι αυτές συγκρίθηκαν με τα όρια που προβλέπονται από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, ώστε να εκτιμηθεί ο βαθμός συμμόρφωσης των εξεταζόμενων εγκαταστάσεων.

Παράλληλα, εξετάστηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων, όπως η εφαρμοζόμενη μέθοδος επεξεργασίας και απολύμανσης, καθώς και η συνολική λειτουργική τους απόδοση. Η αξιολόγηση δεν βασίστηκε αποκλειστικά στις τιμές των επιμέρους παραμέτρων, αλλά στη συνολική εικόνα που προέκυψε από τα διαθέσιμα στοιχεία, ώστε να διαμορφωθεί μια ολοκληρωμένη εκτίμηση της ποιότητας των επεξεργασμένων εκροών.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών για γεωργική άρδευση, καθώς η Περιφέρεια Θεσσαλίας χαρακτηρίζεται από έντονη γεωργική δραστηριότητα και αυξημένες ανάγκες σε αρδευτικό νερό. Παράλληλα, εξετάστηκαν και άλλες πιθανές εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης, όπως η άρδευση χώρων πρασίνου, οι αστικές χρήσεις, οι περιβαλλοντικές εφαρμογές και, όπου ήταν εφικτό, η βιομηχανική αξιοποίηση, σύμφωνα με τις προβλέψεις της ισχύουσας νομοθεσίας.

Κατά την αξιολόγηση λήφθηκαν επίσης υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, όπως οι ανάγκες σε υδατικούς πόρους, οι υφιστάμενες πιέσεις στα επιφανειακά και υπόγεια υδατικά συστήματα και η σημασία της επαναχρησιμοποίησης ως μέτρου ενίσχυσης της βιώσιμης διαχείρισης των υδάτων. Με τον τρόπο αυτό η αξιολόγηση δεν περιορίστηκε μόνο στη συμμόρφωση με τις νομοθετικές απαιτήσεις, αλλά περιέλαβε και τη διερεύνηση της πρακτικής δυνατότητας αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών υπό τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στην Περιφέρεια Θεσσαλίας.

Τέλος, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν συγκριτικά για τις εξεταζόμενες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων, ώστε να προσδιοριστούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί που παρουσιάζει κάθε εγκατάσταση ως προς την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών της. Η διαδικασία αυτή αποτέλεσε τη βάση για την παρουσίαση και τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων που ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η Περιφέρεια Θεσσαλίας βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της ηπειρωτικής Ελλάδας και αποτελεί μία από τις σημαντικότερες γεωγραφικές και παραγωγικές περιφέρειες της χώρας. Συνορεύει βόρεια με την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, δυτικά με την Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας και την Περιφέρεια Ηπείρου, νότια με την Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας και ανατολικά βρέχεται από το Αιγαίο Πέλαγος. Διοικητικά αποτελείται από τις Περιφερειακές Ενότητες Λάρισας, Μαγνησίας, Τρικάλων, Καρδίτσας και Σποράδων.

Η Θεσσαλία χαρακτηρίζεται από έντονο γεωργικό χαρακτήρα και διαθέτει μία από τις μεγαλύτερες και παραγωγικότερες πεδιάδες της Ελλάδας. Η οικονομική ανάπτυξη της περιοχής βασίζεται κυρίως στον πρωτογενή τομέα, με σημαντική παραγωγή βαμβακιού, σιτηρών, καλαμποκιού, βιομηχανικής τομάτας, δένδρων καλλιεργειών και κτηνοτροφικών προϊόντων. Η εκτεταμένη γεωργική δραστηριότητα έχει ως αποτέλεσμα ιδιαίτερα αυξημένες ανάγκες σε αρδευτικό νερό, γεγονός που καθιστά τη διαχείριση των υδατικών πόρων κρίσιμο ζήτημα για τη βιώσιμη ανάπτυξη της Περιφέρειας.

Οι υδατικοί πόροι της Θεσσαλίας προέρχονται τόσο από επιφανειακά όσο και από υπόγεια υδατικά συστήματα. Κύριος υδατικός άξονας της περιοχής είναι ο ποταμός Πηνειός, ο οποίος διασχίζει μεγάλο τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας και δέχεται τα νερά σημαντικών παραποτάμων. Παράλληλα, στην Περιφέρεια αναπτύσσονται σημαντικοί υπόγειοι υδροφορείς, οι οποίοι αξιοποιούνται κυρίως για αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες.

Τα τελευταία χρόνια η Θεσσαλία αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδάτων. Η αυξημένη ζήτηση για άρδευση, η υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων, οι περίοδοι ξηρασίας που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή, καθώς και τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα που εκδηλώθηκαν στην περιοχή, ανέδειξαν την ανάγκη εφαρμογής ολοκληρωμένων πρακτικών διαχείρισης των υδατικών πόρων. Στο πλαίσιο αυτό, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων αποτελεί μία εναλλακτική λύση που μπορεί να συμβάλει στη μείωση της πίεσης στους φυσικούς υδατικούς πόρους και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας της περιοχής απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Για τους λόγους αυτούς, η Περιφέρεια Θεσσαλίας επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Ο συνδυασμός των αυξημένων αναγκών σε νερό, της ύπαρξης οργανωμένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων και της δυνατότητας αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών καθιστά την περιοχή κατάλληλη για τη διερεύνηση της συμβολής της επαναχρησιμοποίησης στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων.

4.2 Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας

Η Περιφέρεια Θεσσαλίας διαθέτει οργανωμένο δίκτυο Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), οι οποίες εξυπηρετούν τις μεγαλύτερες αστικές περιοχές αλλά και αρκετούς μικρότερους οικισμούς. Οι εγκαταστάσεις αυτές αποτελούν βασικές υποδομές προστασίας του περιβάλλοντος, καθώς συμβάλλουν στη συλλογή, επεξεργασία και ασφαλή διάθεση των αστικών λυμάτων, περιορίζοντας τη ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.

Οι σημαντικότερες ΕΕΛ της Περιφέρειας βρίσκονται στους Δήμους Λάρισας, Βόλου, Τρικκαίων και Καρδίτσας, ενώ λειτουργούν και μικρότερες εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν τις ανάγκες άλλων οικισμών. Η λειτουργία τους βασίζεται κυρίως σε συστήματα δευτεροβάθμιας βιολογικής επεξεργασίας, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμόζονται και τριτοβάθμιες διεργασίες, όπως η απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και η απολύμανση της εκροής, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του επεξεργασμένου νερού.

Οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ως προς τη δυναμικότητα σχεδιασμού, τον εξυπηρετούμενο ισοδύναμο πληθυσμό, τις εφαρμοζόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας και τον τελικό αποδέκτη των επεξεργασμένων

εκροών. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται κυρίως στο μέγεθος των περιοχών που εξυπηρετούν, στις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες και στις απαιτήσεις που προκύπτουν από την ισχύουσα νομοθεσία.

Παράλληλα, οι εγκαταστάσεις διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας, καθώς η επεξεργασμένη εκροή μπορεί, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, να αποτελέσει εναλλακτική πηγή νερού για διάφορες χρήσεις. Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία για την Περιφέρεια Θεσσαλίας, όπου η αυξημένη κατανάλωση νερού για γεωργική άρδευση και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής καθιστούν αναγκαία την αξιοποίηση μη συμβατικών υδατικών πόρων.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε επισκόπηση των βασικών Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας, με σκοπό την κατανόηση των γενικών χαρακτηριστικών τους και τη συγκριτική αποτύπωση της λειτουργίας τους. Από τις εγκαταστάσεις αυτές επιλέχθηκε ως κύρια περιοχή μελέτης η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Βόλου, λόγω της πληρότητας των διαθέσιμων στοιχείων, της δυναμικότητάς της και της ιδιαίτερης σημασίας της για την ευρύτερη περιοχή της Μαγνησίας.

Πίνακας2

Εγκατάσταση ΕΕΛ	Περιφερειακή Ενότητα	Εξυπηρετούμενη περιοχή	Κύρια χαρακτηριστικά
ΕΕΛ Λάρισας	Λάρισας	Δήμος Λαρισαίων	Μεγάλη δυναμικότητα, τριτοβάθμια επεξεργασία
ΕΕΛ Βόλου	Μαγνησίας	Πολεοδομικό Συγκρότημα Βόλου	Μεγάλη δυναμικότητα, απομάκρυνση θρεπτικών και απολύμανση
ΕΕΛ Τρικάλων	Τρικάλων	Δήμος Τρικκαίων	Δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία
ΕΕΛ Καρδίτσας	Καρδίτσας	Δήμος Καρδίτσας	Βιολογική επεξεργασία και απολύμανση

4.3 Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Βόλου

Η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Βόλου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Λειτουργεί υπό την ευθύνη της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Μείζονος Περιοχής Βόλου (ΔΕΥΑΜΒ) και εξυπηρετεί το Πολεοδομικό Συγκρότημα Βόλου, καθώς και τις γύρω περιοχές που είναι συνδεδεμένες με το αποχετευτικό δίκτυο.

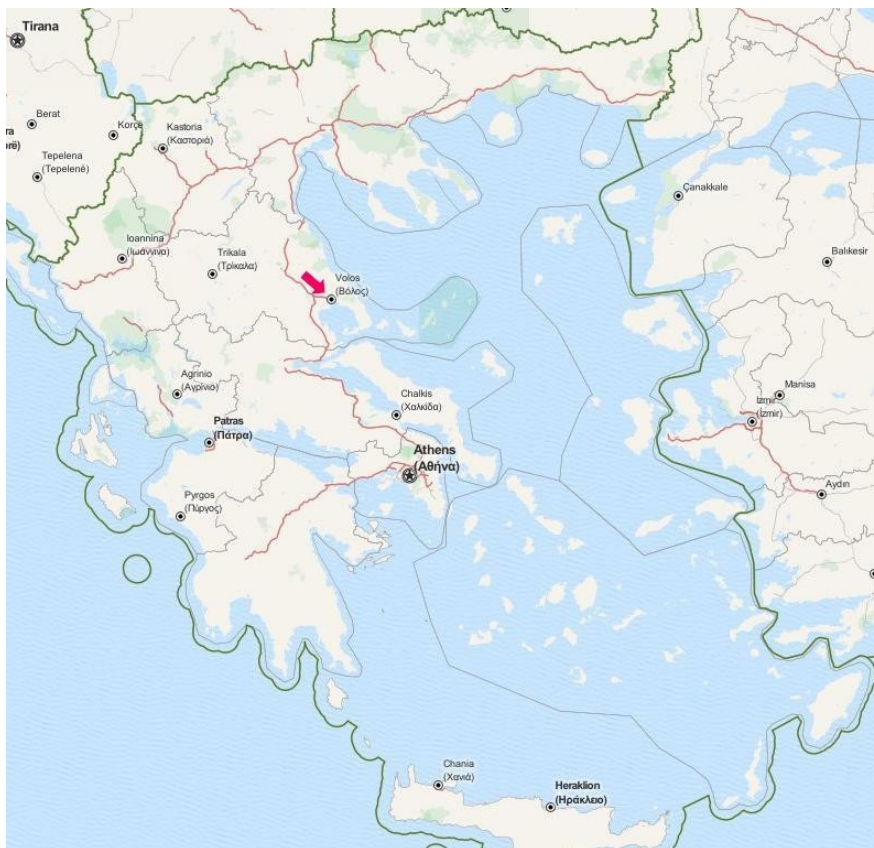
Η εγκατάσταση σχεδιάστηκε για την αποτελεσματική επεξεργασία των αστικών λυμάτων πριν από τη διάθεσή τους στον τελικό αποδέκτη, συμβάλλοντας στην προστασία του Παγασητικού Κόλπου και του ευρύτερου φυσικού περιβάλλοντος. Η λειτουργία της ακολουθεί τις απαιτήσεις της ελληνικής και ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την επεξεργασία αστικών λυμάτων, με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας και των υδατικών αποδεκτών.

Η επεξεργασία των λυμάτων πραγματοποιείται διαδοχικά μέσω των βασικών σταδίων της προεπεξεργασίας, της πρωτοβάθμιας καθίζησης, της βιολογικής επεξεργασίας με ενεργό ιλύ, της δευτεροβάθμιας καθίζησης και της απολύμανσης της τελικής εκροής. Ανάλογα με τις απαιτήσεις λειτουργίας εφαρμόζονται επίσης διεργασίες απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής.

Η ΕΕΛ Βόλου επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας για τρεις βασικούς λόγους. Πρώτον, αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας και εξυπηρετεί μεγάλο πληθυσμό. Δεύτερον, για την εγκατάσταση υπάρχουν διαθέσιμα τεχνικά και ποιοτικά στοιχεία από επίσημες πηγές, γεγονός που επιτρέπει την αξιόπιστη αξιολόγηση της λειτουργικής της απόδοσης. Τρίτον, η περιοχή της Μαγνησίας παρουσιάζει σημαντικές ανάγκες σε υδατικούς πόρους, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα σημαντική τη διερεύνηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών.

Η επιλογή της συγκεκριμένης εγκατάστασης επιτρέπει τη διερεύνηση της συμβολής των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται η αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης της ΕΕΛ Βόλου, καθώς και η διερεύνηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών της.

Εικόνα 1: Θέση της ΕΕΛ Βόλου



Εικόνα2: Περιφέρεια Θεσσαλίας



4.4 Επιλογή της ΕΕΛ Βόλου ως περιοχή μελέτης

Η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Βόλου επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας λόγω της σημασίας της για την Περιφέρεια Θεσσαλίας και της διαθεσιμότητας αξιόπιστων στοιχείων σχετικά με τη λειτουργία και την ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής της. Η εγκατάσταση εξυπηρετεί το Πολεοδομικό Συγκρότημα Βόλου και αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες και πλέον οργανωμένες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της περιοχής.

Η επιλογή της συγκεκριμένης εγκατάστασης κρίθηκε κατάλληλη, καθώς υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία από επίσημες πηγές, όπως η Εθνική Βάση Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, καθώς και από σχετικές επιστημονικές δημοσιεύσεις. Η διαθεσιμότητα αυτών των δεδομένων καθιστά δυνατή την αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης της εγκατάστασης και τη διερεύνηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών της.

Παράλληλα, η Περιφέρεια Θεσσαλίας χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα αυξημένες ανάγκες σε υδατικούς πόρους, κυρίως λόγω της έντονης γεωργικής δραστηριότητας που αναπτύσσεται στην περιοχή. Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών μπορεί να συμβάλει στη μείωση της πίεσης στους φυσικούς υδατικούς πόρους και να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης του νερού.

Επιπλέον, η ΕΕΛ Βόλου αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μεγάλης αστικής εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων, στην οποία εφαρμόζονται σύγχρονες διεργασίες επεξεργασίας και παρακολουθούνται συστηματικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της εκροής. Για τον λόγο αυτό, η μελέτη της μπορεί να προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργική απόδοση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και τις δυνατότητες αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών σε περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά.

Με βάση τα παραπάνω, η ΕΕΛ Βόλου επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτική περίπτωση μελέτης για την αξιολόγηση της ποιότητας των επεξεργασμένων εκροών και τη διερεύνηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησής τους, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της εγκατάστασης και εξετάζονται οι δυνατότητες αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΒΟΛΟΥ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΕΚΡΟΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Βόλου και διερευνά τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών της στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η αξιολόγηση βασίζεται στη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και αξιοποιεί στοιχεία που προέρχονται από την επιστημονική βιβλιογραφία, την Εθνική Βάση Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), καθώς και άλλες αξιόπιστες πηγές.

Η λειτουργική αξιολόγηση μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων αποτελεί βασικό εργαλείο για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των διεργασιών επεξεργασίας και της ποιότητας της τελικής εκροής. Μέσω της αξιολόγησης είναι δυνατόν να διαπιστωθεί κατά πόσο μια εγκατάσταση ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας, προστατεύει αποτελεσματικά τους υδατικούς αποδέκτες και μπορεί να συμβάλει στην ασφαλή αξιοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων για εναλλακτικές χρήσεις.

Στην παρούσα εργασία η αξιολόγηση επικεντρώνεται στην ΕΕΛ Βόλου, η οποία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Η επιλογή της συγκεκριμένης εγκατάστασης βασίστηκε στη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων, στη σημασία της για την ευρύτερη περιοχή της Μαγνησίας και στον σημαντικό ρόλο που μπορεί να διαδραματίσει στην αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών ως εναλλακτικού υδατικού πόρου.

Αρχικά παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου, μέσω βασικών φυσικοχημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), το ολικό άζωτο (TN), ο ολικός φώσφορος (TP) και, όπου υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, η *Escherichia coli*. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται διεθνώς για την εκτίμηση της αποδοτικότητας της επεξεργασίας και της ποιότητας της τελικής εκροής.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης της εγκατάστασης μέσω σύγκρισης των διαθέσιμων στοιχείων με τις απαιτήσεις του ισχύοντος ευρωπαϊκού και εθνικού νομοθετικού πλαισίου, καθώς και με τα ευρήματα της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της εγκατάστασης ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, των αιωρούμενων στερεών, των θρεπτικών συστατικών και των μικροβιολογικών παραμέτρων.

Τέλος, διερευνώνται οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών της ΕΕΛ Βόλου, με ιδιαίτερη έμφαση στη γεωργική άρδευση, αλλά και σε άλλες πιθανές εφαρμογές, όπως η αστική, η βιομηχανική και η περιβαλλοντική επαναχρησιμοποίηση. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου, τις ιδιαιτερότητες της Περιφέρειας Θεσσαλίας και τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, με στόχο να διερευνηθεί κατά πόσο η επεξεργασμένη εκροή μπορεί να αποτελέσει έναν ασφαλή και αξιόπιστο εναλλακτικό υδατικό πόρο.

5.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά της επεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου

Η ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες αξιολόγησης της λειτουργικής απόδοσης μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ). Η συστηματική παρακολούθηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της εκροής επιτρέπει την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των διεργασιών επεξεργασίας, της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας και της δυνατότητας αξιοποίησης του επεξεργασμένου νερού για επαναχρησιμοποίηση.

Η αξιολόγηση της ποιότητας της εκροής βασίζεται κυρίως σε φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους, οι οποίες χρησιμοποιούνται διεθνώς για τον έλεγχο της λειτουργίας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Μεταξύ των σημαντικότερων παραμέτρων περιλαμβάνονται το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), το ολικό άζωτο (TN), ο ολικός φώσφορος (TP) και, όπου υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, οι μικροβιολογικοί δείκτες, όπως η *Escherichia coli*. Οι παράμετροι αυτές αποτυπώνουν τόσο την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου όσο και τον βαθμό προστασίας της δημόσιας υγείας και του φυσικού περιβάλλοντος.

Για την αξιολόγηση της ΕΕΛ Βόλου αξιοποιήθηκαν στοιχεία από τη μελέτη των **Bakopoulou et al. (2011)**, στην οποία εξετάστηκαν οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων του Βόλου, της Λάρισας, της Καρδίτσας και του Τυρνάβου. Η συγκεκριμένη μελέτη περιλαμβάνει δεδομένα σχετικά με τα φυσικοχημικά, μικροβιολογικά και οικοτοξικολογικά χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων εκροών, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της ποιότητάς τους.

Πίνακας 3 Βασικές παράμετροι ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου

Παράμετρος	Μέση τιμή	Μονάδα
BOD	9,50 ± 2,12	mg/L
COD	42,00 ± 15,56	mg/L
TSS	9,50 ± 0,99	mg/L

Οι τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα υποδηλώνουν ότι η επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου χαρακτηρίζεται από χαμηλές συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών. Η διαπίστωση αυτή αποτελεί ένδειξη αποτελεσματικής λειτουργίας των βασικών σταδίων επεξεργασίας της εγκατάστασης και παραγωγής εκροής υψηλής ποιότητας ως προς τις συγκεκριμένες παραμέτρους.

Ωστόσο, η αξιολόγηση της ποιότητας της εκροής δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στις τιμές των φυσικοχημικών παραμέτρων. Για την πλήρη εκτίμηση της καταλληλότητας του επεξεργασμένου νερού για επαναχρησιμοποίηση απαιτείται η συνεκτίμηση μικροβιολογικών χαρακτηριστικών, καθώς και άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας θα πρέπει να εξετάζεται συνολικά, λαμβάνοντας υπόψη το είδος της προβλεπόμενης χρήσης του ανακτημένου νερού.

Για τον λόγο αυτό, στις επόμενες ενότητες πραγματοποιείται αναλυτική αξιολόγηση των επιμέρους παραμέτρων και εξετάζεται ο βαθμός στον οποίο η ποιότητα της εκροής της ΕΕΛ Βόλου μπορεί να υποστηρίξει την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου.

5.2.1 Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅)

Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (Biochemical Oxygen Demand – BOD₅) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους αξιολόγησης της ποιότητας των αστικών λυμάτων και της αποτελεσματικότητας των διεργασιών βιολογικής επεξεργασίας. Η παράμετρος αυτή εκφράζει την ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου που απαιτείται για τη βιολογική αποδόμηση του βιοαποδομήσιμου οργανικού φορτίου από τους μικροοργανισμούς μέσα σε χρονικό διάστημα πέντε ημερών. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του BOD₅ στην τελική εκροή, τόσο αποτελεσματικότερη θεωρείται η λειτουργία της εγκατάστασης ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης των **Bakopoulou et al. (2011)**, η μέση συγκέντρωση BOD₅ στην επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου ανήλθε σε **9,50 ± 2,12 mg/L**. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα χαμηλή και υποδηλώνει ότι οι βιολογικές διεργασίες της εγκατάστασης επιτυγχάνουν σημαντική απομάκρυνση του οργανικού φορτίου.

Η χαμηλή συγκέντρωση BOD₅ αποτελεί ένδειξη αποτελεσματικής λειτουργίας της βιολογικής επεξεργασίας και συμβάλλει στη μείωση της πιθανότητας υποβάθμισης του υδάτινου αποδέκτη. Παράλληλα, η επίτευξη χαμηλών τιμών οργανικού φορτίου αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών, καθώς μειώνεται ο κίνδυνος ανάπτυξης ανεπιθύμητων μικροοργανισμών και δημιουργίας προβλημάτων κατά τη χρήση του ανακτημένου νερού.

Η αξιολόγηση της συγκεκριμένης παραμέτρου δείχνει ότι η ΕΕΛ Βόλου παρουσιάζει ιδιαίτερα ικανοποιητική απόδοση ως προς την απομάκρυνση του βιοαποδομήσιμου οργανικού φορτίου. Ωστόσο, η συνολική αξιολόγηση της ποιότητας της εκροής δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στο BOD , αλλά απαιτεί τη συνεκτίμηση και των υπόλοιπων φυσικοχημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων.

Πίνακας 4: Αξιολόγηση της παραμέτρου BOD

Παράμετρος	Τιμή ΕΕΛ Βόλου	Μονάδα	Ερμηνεία
BOD	9,50 ± 2,12	mg/L	Χαμηλή συγκέντρωση οργανικού φορτίου – αποτελεσματική βιολογική επεξεργασία

Πίνακας 5: Σύγκριση βασικών παραμέτρων ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής των ΕΕΛ της Θεσσαλίας

ΕΕΛ	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	Συνολική αξιολόγηση
Βόλου	9,50 ± 2,12	42 ± 15,56	9,50 ± 0,99	Πολύ καλή ποιότητα εκροής
Λάρισας	-	-	-	-
Καρδίτσας	-	-	-	-
Τυρνάβου	-	-	-	-

5.2.2 Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand – COD) αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους αξιολόγησης της ποιότητας των επεξεργασμένων λυμάτων, καθώς εκφράζει τη συνολική ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση των οργανικών ουσιών που περιέχονται στο νερό. Σε αντίθεση με το BOD , το COD περιλαμβάνει τόσο το βιοαποδομήσιμο όσο και μέρος του μη βιοαποδομήσιμου οργανικού φορτίου, παρέχοντας μια συνολικότερη εικόνα της οργανικής ρύπανσης της εκροής. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως ως δείκτης της αποτελεσματικότητας των διεργασιών επεξεργασίας και της ποιότητας της τελικής εκροής.

Σύμφωνα με τη μελέτη των **Bakopoulou et al. (2011)**, η μέση συγκέντρωση COD στην επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου ήταν **42,00 ± 15,56 mg/L**. Η τιμή αυτή υποδηλώνει ότι το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού φορτίου απομακρύνεται κατά τη διαδικασία

επεξεργασίας, γεγονός που καταδεικνύει την αποτελεσματική λειτουργία της εγκατάστασης ως προς τη μείωση της οργανικής ρύπανσης.

Οι Bakoroulou et al. (2011) παρατήρησαν ότι οι τιμές του COD παρουσίαζαν εποχικές διακυμάνσεις μεταξύ των δειγματοληψιών, με υψηλότερες τιμές κατά την περίοδο του φθινοπώρου. Οι συγγραφείς αποδίδουν το φαινόμενο αυτό στις αυξημένες γεωργικές και αγροβιομηχανικές δραστηριότητες της περιοχής κατά την περίοδο αυτή, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων.

Παρά τις διακυμάνσεις αυτές, η ΕΕΛ Βόλου παρουσίασε γενικά ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. Επιπλέον, οι συγγραφείς αναφέρουν ότι οι τιμές του COD δεν εμφάνισαν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των τεσσάρων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας που εξετάστηκαν (Βόλος, Λάρισα, Καρδίτσα και Τύρναβος), γεγονός που υποδηλώνει παρόμοια απόδοση ως προς τη συγκεκριμένη παράμετρο.

Η αξιολόγηση του COD σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους είναι απαραίτητη για τη συνολική εκτίμηση της ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής και της καταλληλότητάς της για επαναχρησιμοποίηση. Οι σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις COD που καταγράφηκαν στην ΕΕΛ Βόλου αποτελούν θετική ένδειξη για τη λειτουργική απόδοση της εγκατάστασης, χωρίς όμως να αρκούν από μόνες τους για την τελική αξιολόγηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης του ανακτημένου νερού.

Πίνακας 6: Τιμή cod στην επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου

Παράμετρος	Μέση τιμή	Μονάδα	Ερμηνεία
COD	42,00 ± 15,56	mg/L	Χαμηλό οργανικό φορτίο – ικανοποιητική απόδοση της βιολογικής επεξεργασίας

Πίνακας 7: Τιμή cod στην επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου

ΕΕΛ	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	pH	Αγωγιμότητα (mS/cm)	FC (MPN/100 mL)
Λάρισας	7,33 ± 4,16	34,67 ± 17,67	7,25 ± 0,83	9,60 ± 0,36	11,13 ± 1,53	115 ± 161,17
Βόλου	9,50 ± 2,12	42,00 ± 15,56	9,50 ± 0,99	8,95 ± 0,07	10,92 ± 0,11	-
Καρδίτσας	6,00± 2,00	18,67 ± 6,66	7,30 ± 0,66	9,40 ± 0,36	9,45 ± 1,14	136,67 ± 151,70
Τυρνάβου	6,00 ± 3,46	29,33 ± 21,94	2,50 ± 1,32	7,91 ± 0,17	0,90 ± 0,17	-

Από τον Πίνακα προκύπτει ότι όλες οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας παρουσίασαν χαμηλές συγκεντρώσεις BOD , COD και TSS στην επεξεργασμένη εκροή, γεγονός που υποδηλώνει αποτελεσματική απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών. Η ΕΕΛ Καρδίτσας παρουσίασε τις χαμηλότερες μέσες συγκεντρώσεις COD, ενώ η ΕΕΛ Τυρνάβου εμφάνισε τη χαμηλότερη τιμή TSS, γεγονός που υποδηλώνει ιδιαίτερα αποτελεσματική απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών. Αντίστοιχα, η ΕΕΛ Βόλου παρουσίασε ελαφρώς υψηλότερες συγκεντρώσεις BOD και COD σε σχέση με τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις, οι οποίες όμως εξακολουθούν να βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα και υποδηλώνουν ικανοποιητική λειτουργική απόδοση. Επιπλέον, στην ΕΕΛ Τυρνάβου δεν ανιχνεύθηκαν κοπρανώδη κολοβακτηριοειδή, ενώ για την ΕΕΛ Βόλου δεν κατέστη δυνατός ο υπολογισμός τους, επειδή το δείγμα συλλέχθηκε πριν από το στάδιο της απολύμανσης. Συνολικά, τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι οι εξεταζόμενες ΕΕΛ παράγουν δευτεροβάθμιες εκροές καλής ποιότητας, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν βάση για επαναχρησιμοποίηση, εφόσον εφαρμοστούν κατάλληλες τεχνολογίες προχωρημένης επεξεργασίας και απολύμανσης.

5.2.3 Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)

Τα ολικά αιωρούμενα στερεά (Total Suspended Solids – TSS) αποτελούν έναν από τους βασικότερους δείκτες αξιολόγησης της ποιότητας των επεξεργασμένων λυμάτων και χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των διεργασιών

επεξεργασίας. Η παράμετρος αυτή εκφράζει τη συγκέντρωση των στερεών σωματιδίων που παραμένουν αιωρούμενα στην τελική εκροή και επηρεάζει άμεσα τόσο την ποιότητα του αποδέκτη όσο και την καταλληλότητα του ανακτημένου νερού για πιθανή επαναχρησιμοποίηση.

Η αποτελεσματική απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών αποτελεί βασικό στόχο της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, καθώς συμβάλλει στη βελτίωση της διαύγειας της εκροής, στη μείωση του οργανικού φορτίου και στον περιορισμό της μεταφοράς μικροοργανισμών που προσκολλώνται στα στερεά σωματίδια. Για τον λόγο αυτό, η παράμετρος TSS αξιολογείται πάντοτε σε συνδυασμό με τις παραμέτρους BOD και COD.

Πίνακας 8: Συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) στις ΕΕΛ της Θεσσαλίας

ΕΕΛ	TSS (mg/L)
Λάρισας	7,25 ± 0,83
Βόλου	9,50 ± 0,99
Καρδίτσας	7,30 ± 0,66
Τυρνάβου	2,50 ± 1,32

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα προκύπτει ότι και οι τέσσερις εγκαταστάσεις παρουσίασαν χαμηλές συγκεντρώσεις ολικών αιωρούμενων στερεών στην τελική εκροή. Η χαμηλότερη μέση συγκέντρωση καταγράφηκε στην ΕΕΛ Τυρνάβου (**2,50 ± 1,32 mg/L**), ενώ η υψηλότερη στην ΕΕΛ Βόλου (**9,50 ± 0,99 mg/L**). Οι ΕΕΛ Λάρισας και Καρδίτσας παρουσίασαν παρόμοιες τιμές (**7,25 ± 0,83 mg/L** και **7,30 ± 0,66 mg/L**, αντίστοιχα), γεγονός που υποδηλώνει αντίστοιχη απόδοση ως προς την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών.

Παρότι η ΕΕΛ Βόλου παρουσίασε τη μεγαλύτερη μέση συγκέντρωση TSS μεταξύ των τεσσάρων εγκαταστάσεων, η τιμή αυτή παραμένει χαμηλή και, σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες τιμές των BOD και COD, υποδηλώνει αποτελεσματική λειτουργία της εγκατάστασης. Τα αποτελέσματα αυτά αξιοποιούνται στη συνέχεια της εργασίας για την εκτίμηση της συνολικής ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής και της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησής της.

5.2.4 Συνολική αξιολόγηση των φυσικοχημικών παραμέτρων

Η συνδυαστική αξιολόγηση των παραμέτρων BOD , COD και TSS παρέχει μία ολοκληρωμένη εικόνα της αποτελεσματικότητας των διεργασιών επεξεργασίας των αστικών λυμάτων. Οι

παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται διεθνώς ως βασικοί δείκτες για την εκτίμηση της λειτουργικής απόδοσης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων, καθώς αποτυπώνουν τον βαθμό απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών από την τελική εκροή.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μελέτης των **Bakopoulou et al. (2011)** προκύπτει ότι και οι τέσσερις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας παρουσίασαν χαμηλές συγκεντρώσεις BOD , COD και TSS στην τελική εκροή. Οι τιμές αυτές αποτελούν ένδειξη αποτελεσματικής λειτουργίας των διεργασιών βιολογικής επεξεργασίας και δευτεροβάθμιας καθίζησης, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση του οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών πριν από τη διάθεση της εκροής.

Η ΕΕΛ Βόλου παρουσίασε μέσες συγκεντρώσεις **BOD 9,50 ± 2,12 mg/L**, **COD 42,00 ± 15,56 mg/L** και **TSS 9,50 ± 0,99 mg/L**. Αν και οι τιμές αυτές είναι ελαφρώς υψηλότερες σε σχέση με ορισμένες από τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις που εξετάστηκαν, εξακολουθούν να υποδηλώνουν ικανοποιητική λειτουργική απόδοση της εγκατάστασης και αποτελεσματική απομάκρυνση του οργανικού φορτίου.

Αντίστοιχα, η ΕΕΛ Τυρνάβου παρουσίασε τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις TSS, ενώ η ΕΕΛ Καρδίτσας εμφάνισε τη χαμηλότερη μέση συγκέντρωση COD. Οι διαφοροποιήσεις αυτές πιθανόν σχετίζονται με τις επιμέρους συνθήκες λειτουργίας κάθε εγκατάστασης, τη σύσταση των εισερχόμενων λυμάτων, τη δυναμικότητα σχεδιασμού και τις εποχικές μεταβολές που επηρεάζουν τη λειτουργία των μονάδων επεξεργασίας.

Η αξιολόγηση των φυσικοχημικών παραμέτρων δείχνει ότι οι εξεταζόμενες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας επιτυγχάνουν σημαντική απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών. Ωστόσο, η αξιολόγηση της καταλληλότητας της επεξεργασμένης εκροής για επαναχρησιμοποίηση δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στις συγκεκριμένες παραμέτρους. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η συνεκτίμηση των μικροβιολογικών χαρακτηριστικών, των θρεπτικών συστατικών και των απαιτήσεων του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου, τα οποία εξετάζονται στις επόμενες ενότητες της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 9: Μέσων συγκεντρώσεων BOD , COD και TSS στις ΕΕΛ της Θεσσαλίας

ΕΕΛ	BOD	COD	TSS
Λάρισα	7,33	34,67	7,25
Βόλου	9,5	42,00	9,5
Καρδίτσας	6	18,67	7,3
Τυρνάβου	6	29,33	2,5

5.2.5 Μικροβιολογικά χαρακτηριστικά της επεξεργασμένης εκροής

Η αξιολόγηση της ποιότητας των επεξεργασμένων εκροών δεν περιορίζεται μόνο στις φυσικοχημικές παραμέτρους, αλλά περιλαμβάνει και τη διερεύνηση των μικροβιολογικών χαρακτηριστικών τους. Η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την καταλληλότητα του ανακτημένου νερού για επαναχρησιμοποίηση, ιδιαίτερα όταν αυτό προορίζεται για γεωργική άρδευση ή άλλες χρήσεις με πιθανή ανθρώπινη έκθεση.

Πίνακας 10: Συγκεντρώσεις κοπρανωδών κολοβακτηριοειδών στις ΕΕΛ της Θεσσαλίας

ΕΕΛ	FC (MPN/100 mL)
Λάρισας	115 ± 161,17
Βόλου	-
Καρδίτσας	136,67 ± 151,70
Τυρνάβου	-

Από τα αποτελέσματα της μελέτης προκύπτει ότι η **ΕΕΛ Τυρνάβου** παρουσίασε απουσία κοπρανωδών κολοβακτηριοειδών, ενώ στις **ΕΕΛ Λάρισας** και **Καρδίτσας** καταγράφηκαν χαμηλές συγκεντρώσεις. Για την **ΕΕΛ Βόλου** δεν ήταν δυνατή η αξιολόγηση της συγκεκριμένης παραμέτρου, καθώς το δείγμα αναλύθηκε πριν από την ολοκλήρωση του σταδίου απολύμανσης.

5.3 Αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης της ΕΕΛ Βόλου

Η αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) Βόλου πραγματοποιήθηκε με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες και αφορούν τις φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους της επεξεργασμένης εκροής. Στόχος της αξιολόγησης είναι η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοζόμενων διεργασιών επεξεργασίας, καθώς και η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της εκροής στο πλαίσιο της επαναχρησιμοποίησης και της κυκλικής οικονομίας.

Η ανάλυση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών έδειξε ότι η επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου παρουσιάζει χαμηλές συγκεντρώσεις BOD , COD και TSS. Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν ότι οι διεργασίες βιολογικής επεξεργασίας λειτουργούν αποτελεσματικά και επιτυγχάνουν σημαντική απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών. Παράλληλα, η σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές των υπόλοιπων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας δείχνει ότι η ΕΕΛ Βόλου παρουσιάζει αντίστοιχο επίπεδο λειτουργικής απόδοσης, χωρίς να εμφανίζονται σημαντικές αποκλίσεις ως προς τους βασικούς δείκτες ποιότητας της εκροής.

Η αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης δεν περιορίζεται μόνο στις φυσικοχημικές παραμέτρους. Η μικροβιολογική ποιότητα της εκροής, η συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών και η εφαρμογή αποτελεσματικής απολύμανσης αποτελούν επίσης σημαντικές προϋποθέσεις για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού. Για τον λόγο αυτό, η συνολική αξιολόγηση μιας ΕΕΛ πρέπει να βασίζεται στη συνεκτίμηση όλων των διαθέσιμων παραμέτρων και όχι αποκλειστικά σε έναν μόνο δείκτη ποιότητας.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου δείχνει ότι οι φυσικοχημικές παράμετροι της εκροής βρίσκονται σε επίπεδα που υποστηρίζουν την αποτελεσματική λειτουργία της εγκατάστασης. Ωστόσο, η τελική καταλληλότητα της εκροής για επαναχρησιμοποίηση εξαρτάται από την πλήρη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας, οι οποίες περιλαμβάνουν, εκτός από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, τη μικροβιολογική ποιότητα, την εφαρμογή κατάλληλης απολύμανσης και τη διαχείριση των πιθανών κινδύνων.

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων της Θεσσαλίας, ιδιαίτερα σε περιόδους αυξημένης ζήτησης νερού και μειωμένων διαθέσιμων αποθεμάτων. Η αξιοποίηση της εκροής της ΕΕΛ Βόλου για αρδευτικές, αστικές ή άλλες χρήσεις μπορεί να μειώσει την πίεση στους φυσικούς υδατικούς πόρους και να ενισχύσει την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας, υπό την προϋπόθεση ότι θα εξασφαλίζεται σταθερά η απαιτούμενη ποιότητα του ανακτημένου νερού.

Συνολικά, η αξιολόγηση δείχνει ότι η ΕΕΛ Βόλου παρουσιάζει ικανοποιητική λειτουργική απόδοση και διαθέτει σημαντικές προοπτικές αξιοποίησης της επεξεργασμένης εκροής. Παράλληλα, η συνεχής παρακολούθηση της λειτουργίας της εγκατάστασης, η εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών επεξεργασίας και η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη διατήρηση υψηλής ποιότητας εκροής και την ασφαλή επαναχρησιμοποίησή της.

Πίνακας 11: Συνολική αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης της ΕΕΛ Βόλου

Κριτήριο αξιολόγησης	Εκτίμηση
Απομάκρυνση οργανικού φορτίου (BOD ₅)	Πολύ καλή
Απομάκρυνση οργανικού φορτίου (COD)	Πολύ καλή
Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών (TSS)	Πολύ καλή
Μικροβιολογική ποιότητα	Απαιτείται συνεχής παρακολούθηση
Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης	Υψηλή, μετά την εφαρμογή των απαιτήσεων της νομοθεσίας
Συμβολή στην κυκλική οικονομία	Σημαντική

5.4 Δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πρακτικές βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων και βασικό άξονα της κυκλικής οικονομίας. Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών υδατικών πόρων, στην προστασία των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των περιοχών που αντιμετωπίζουν προβλήματα λειψυδρίας.

Η Θεσσαλία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες γεωργικές περιφέρειες της Ελλάδας και χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλές ανάγκες σε αρδευτικό νερό. Η έντονη γεωργική δραστηριότητα, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, τη μείωση των διαθέσιμων υδατικών πόρων και την υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων, καθιστούν αναγκαία την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών νερού. Στο πλαίσιο αυτό, οι επεξεργασμένες εκροές των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων μπορούν να αποτελέσουν μία αξιόπιστη συμπληρωματική πηγή υδατικών πόρων, εφόσον πληρούν τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας.

Η αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε στις προηγούμενες ενότητες έδειξε ότι η ποιότητα της εκροής της ΕΕΛ Βόλου παρουσιάζει χαρακτηριστικά που μπορούν να υποστηρίξουν την περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης. Ωστόσο, η τελική επιλογή των κατάλληλων χρήσεων δεν εξαρτάται μόνο από τις φυσικοχημικές παραμέτρους, αλλά και από τη μικροβιολογική ποιότητα, τις απαιτήσεις της νομοθεσίας, την εφαρμογή κατάλληλης απολύμανσης και τη διαχείριση των πιθανών κινδύνων.

Στις επόμενες ενότητες εξετάζονται οι βασικές κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών και αξιολογείται η δυνατότητα εφαρμογής τους στην περιοχή της Θεσσαλίας και ειδικότερα στην ΕΕΛ Βόλου.

Πίνακας12: Πιθανές εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης της εκροής της ΕΕΛ Βόλου

Κατηγορία	Δυνατότητα εφαρμογής	Προϋποθέσεις
Γεωργική άρδευση	Υψηλή	Συμμόρφωση με τη νομοθεσία και κατάλληλη απολύμανση
Άρδευση πάρκων και κοινόχρηστων χώρων	Υψηλή	Έλεγχος μικροβιολογικών παραμέτρων
Βιομηχανική χρήση	Μέτρια	Πρόσθετη επεξεργασία ανάλογα με τη χρήση
Περιβαλλοντικές εφαρμογές	Υψηλή	Περιβαλλοντικά αξιολόγηση και παρακολούθηση

5.5 Αξιολόγηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης της εκροής

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων αποτελεί μία σημαντική εναλλακτική λύση για την κάλυψη μέρους των υδατικών αναγκών, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου παρατηρούνται αυξημένες πιέσεις στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους. Στην περίπτωση της Θεσσαλίας, η σημαντική ζήτηση νερού για γεωργική χρήση καθιστά την αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών ιδιαίτερα σημαντική ως συμπληρωματική πηγή αρδευτικού νερού.

Η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης μιας επεξεργασμένης εκροής εξαρτάται από την ποιότητά της, το είδος της προβλεπόμενης χρήσης και τον βαθμό προστασίας της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται μόνο στις παραμέτρους BOD , COD και TSS, αλλά περιλαμβάνει επίσης μικροβιολογικούς δείκτες, θρεπτικά συστατικά και τις υπόλοιπες απαιτήσεις που προβλέπονται από το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο.

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), η ασφαλής επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων στη γεωργία βασίζεται στην ολοκληρωμένη εκτίμηση και διαχείριση του κινδύνου, με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας, των εργαζομένων, των καταναλωτών και του περιβάλλοντος.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας για την επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού στη γεωργική άρδευση. Οι απαιτήσεις διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και τη μέθοδο άρδευσης, καθορίζοντας τέσσερις κατηγορίες ποιότητας (Α, Β, Γ και Δ), καθεμία από τις οποίες συνοδεύεται από συγκεκριμένες απαιτήσεις ως προς τις φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους.

Η κατηγορία Α αντιστοιχεί στην υψηλότερη ποιότητα ανακτημένου νερού και προορίζεται για εφαρμογές με τις αυστηρότερες απαιτήσεις προστασίας της δημόσιας υγείας. Οι υπόλοιπες κατηγορίες επιτρέπουν διαφορετικές εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης, ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας, τη μέθοδο άρδευσης και το επίπεδο κινδύνου.

Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της εκροής της ΕΕΛ Βόλου

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου αξιολογήθηκε με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία και τις χρονοσειρές της Εθνικής Βάσης Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), καθώς και τις απαιτήσεις του Κανονισμού (ΕΕ) 2020/741 και της ισχύουσας ελληνικής νομοθεσίας.

Η αξιολόγηση βασίστηκε στη σύγκριση των διαθέσιμων ποιοτικών χαρακτηριστικών της επεξεργασμένης εκροής με τα προβλεπόμενα όρια για τις επιτρεπόμενες χρήσεις του

ανακτημένου νερού. Εξετάστηκαν οι βασικές φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παράμετροι που είναι διαθέσιμες για την εγκατάσταση, προκειμένου να εκτιμηθεί η δυνατότητα ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης της εκροής.

Η τελική εκτίμηση της καταλληλότητας της επεξεργασμένης εκροής δεν βασίζεται σε μεμονωμένες μετρήσεις, αλλά στη διαχρονική αξιολόγηση των διαθέσιμων δεδομένων και στη συμμόρφωσή τους με τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την πληρέστερη αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης της εγκατάστασης και της δυνατότητας αξιοποίησης του ανακτημένου νερού.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5, όπου πραγματοποιείται η σύγκριση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας και διερευνώνται οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

5.5.1 Αξιολόγηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης της εκροής της ΕΕΛ Βόλου

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου αξιολογήθηκε με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία της εγκατάστασης, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, καθώς και τις απαιτήσεις του Κανονισμού (ΕΕ) 2020/741 και της ισχύουσας ελληνικής νομοθεσίας.

Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης των διαθέσιμων φυσικοχημικών και μικροβιολογικών χαρακτηριστικών της επεξεργασμένης εκροής με τις απαιτήσεις που προβλέπονται για τις επιτρεπόμενες χρήσεις του ανακτημένου νερού. Παράλληλα, εξετάστηκαν οι ανάγκες της περιοχής μελέτης, με ιδιαίτερη έμφαση στον γεωργικό τομέα, ο οποίος αποτελεί τον σημαντικότερο καταναλωτή υδατικών πόρων στη Θεσσαλία.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης δείχνουν ότι η ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής μπορεί να αποτελέσει σημαντική βάση για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης, υπό την προϋπόθεση της συνεχούς παρακολούθησης της ποιότητας του ανακτημένου νερού και της πλήρους συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου. Η τελική επιλογή των επιτρεπόμενων χρήσεων εξαρτάται από την κατηγορία ποιότητας στην οποία κατατάσσεται η εκροή, καθώς και από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης κινδύνου που προβλέπει η ευρωπαϊκή νομοθεσία.

5.5.2 Δυνατότητες γεωργικής επαναχρησιμοποίησης της εκροής της ΕΕΛ Βόλου

Η γεωργική άρδευση αποτελεί τη σημαντικότερη και πλέον διαδεδομένη εφαρμογή επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων αστικών λυμάτων σε διεθνές επίπεδο. Η χρήση ανακτημένου νερού στον γεωργικό τομέα συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών υδατικών πόρων, στη διατήρηση των υπόγειων υδροφορέων και στην αντιμετώπιση των

επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη γεωργική δραστηριότητα.

Στην Περιφέρεια Θεσσαλίας, όπου ο πρωτογενής τομέας αποτελεί βασικό πυλώνα της οικονομίας, η ζήτηση αρδευτικού νερού είναι ιδιαίτερα αυξημένη κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου. Η συνεχής αύξηση των αναγκών σε νερό, σε συνδυασμό με τη μείωση των διαθέσιμων υδατικών πόρων και την υπεράντληση πολλών υπόγειων υδροφορέων, καθιστούν αναγκαία την αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών νερού. Στο πλαίσιο αυτό, οι επεξεργασμένες εκροές της ΕΕΛ Βόλου μπορούν να αποτελέσουν μια σημαντική συμπληρωματική πηγή για την κάλυψη μέρους των αρδευτικών αναγκών.

Με βάση την αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια, η επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου παρουσιάζει ικανοποιητικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ως προς τις βασικές παραμέτρους ποιότητας. Η χαμηλή συγκέντρωση οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών αποτελεί θετική ένδειξη για την αξιοποίηση της εκροής, υπό την προϋπόθεση ότι διασφαλίζεται και η συμμόρφωση με τις μικροβιολογικές απαιτήσεις και εφαρμόζονται οι διαδικασίες διαχείρισης κινδύνου που προβλέπονται από την ισχύουσα νομοθεσία.

Η γεωργική επαναχρησιμοποίηση της εκροής της ΕΕΛ Βόλου θα μπορούσε να αξιοποιηθεί κυρίως για την άρδευση καλλιεργειών της ευρύτερης περιοχής της Μαγνησίας, μειώνοντας την εξάρτηση από τους φυσικούς υδατικούς πόρους. Παράλληλα, η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ανθεκτικότητας του γεωργικού τομέα απέναντι στις περιόδους ξηρασίας και στις μεταβολές της διαθεσιμότητας νερού που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή.

Ωστόσο, η εφαρμογή της γεωργικής επαναχρησιμοποίησης προϋποθέτει συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας της εκροής, τήρηση των απαιτήσεων του Κανονισμού (ΕΕ) 2020/741 και εφαρμογή κατάλληλων μέτρων διαχείρισης κινδύνου. Η επιλογή των καλλιεργειών που μπορούν να αρδεύονται με ανακτημένο νερό εξαρτάται από την κατηγορία ποιότητας του νερού, τη μέθοδο άρδευσης και τον βαθμό προστασίας που απαιτείται για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον.

Συνεπώς, η επαναχρησιμοποίηση της εκροής της ΕΕΛ Βόλου στη γεωργία αποτελεί μία ιδιαίτερα ελπιδοφόρα προοπτική για τη Θεσσαλία. Η εφαρμογή της μπορεί να συμβάλει στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων, στην προστασία των υπόγειων υδροφορέων και στη μετάβαση προς ένα πιο κυκλικό μοντέλο διαχείρισης του νερού, υπό την προϋπόθεση της συνεχούς περιβαλλοντικής παρακολούθησης και της συμμόρφωσης με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο.

Πίνακας 13 Πιθανές γεωργικές εφαρμογές της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου

Εφαρμογή	Δυνατότητα αξιοποίησης	Βασικές προϋποθέσεις

Άρδευση δένδρων καλλιέργειών	Υψηλή	Συνεχής παρακολούθηση ποιότητας
Άρδευση βαμβακιού	Υψηλή	Συμμόρφωση με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741
Άρδευση βιομηχανικών φυτών	Υψηλή	Κατάλληλη απολύμανση
Άρδευση κτηνοτροφικών φυτών	Υψηλή	Διαχείριση κινδύνου
Άρδευση κηπευτικών	Εξαρτάται από την κατηγορία ποιότητας του ανακτημένου νερού και τις απαιτήσεις της νομοθεσίας	

5.5.3 Δυνατότητες αστικής, βιομηχανικής και περιβαλλοντικής επαναχρησιμοποίησης

Πέρα από τη γεωργική άρδευση, οι επεξεργασμένες εκροές των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων μπορούν να αξιοποιηθούν και σε άλλες εφαρμογές, συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης πόσιμου νερού και στην προστασία των φυσικών υδατικών πόρων. Η επιλογή της κατάλληλης χρήσης εξαρτάται από την ποιότητα του ανακτημένου νερού, τις τεχνικές απαιτήσεις κάθε εφαρμογής και τη συμμόρφωση με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο.

Στις αστικές εφαρμογές, το ανακτημένο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άρδευση πάρκων, αλσών, χώρων πρασίνου, αθλητικών εγκαταστάσεων και κοινόχρηστων χώρων, καθώς και για τον καθαρισμό οδών ή την κάλυψη αναγκών πυρόσβεσης. Η αξιοποίηση αυτή μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση πόσιμου νερού από τους δήμους, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, όταν οι ανάγκες άρδευσης είναι αυξημένες.

Στον βιομηχανικό τομέα, το ανακτημένο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διεργασίες που δεν απαιτούν πόσιμο νερό, όπως η ψύξη εξοπλισμού, η παραγωγή ατμού μετά από κατάλληλη επεξεργασία, καθώς και σε διάφορες διαδικασίες καθαρισμού εγκαταστάσεων. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης γλυκού νερού και στη βελτίωση της αποδοτικότητας των βιομηχανικών μονάδων.

Παράλληλα, οι επεξεργασμένες εκροές μπορούν να αξιοποιηθούν και για περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως ο εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων, η ενίσχυση υγροτοπικών οικοσυστημάτων, η αποκατάσταση υποβαθμισμένων περιοχών και η διατήρηση οικολογικών

παροχών σε υδάτινα σώματα, όπου αυτό επιτρέπεται από τη νομοθεσία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για την περιοχή της Θεσσαλίας, η σημαντικότερη δυνατότητα αξιοποίησης εξακολουθεί να αφορά τη γεωργική άρδευση, λόγω της ιδιαίτερα υψηλής ζήτησης αρδευτικού νερού. Ωστόσο, οι αστικές, βιομηχανικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά, ενισχύοντας τη συνολική αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών και μειώνοντας περαιτέρω την πίεση στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους.

Πίνακας 14 Δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου

Κατηγορία χρήσης	Ενδεικτικές εφαρμογές	Δυνατότητα εφαρμογής
Γεωργική	Άρδευση καλλιεργειών	Υψηλή
Αστική	Πάρκα, άλση, χώροι πρασίνου, καθαρισμός οδών	Υψηλή
Βιομηχανική	Ψύξη εξοπλισμού, καθαρισμός εγκαταστάσεων	Μέτρια
Περιβαλλοντική	Εμπλουτισμός υδροφορέων, αποκατάσταση οικοσυστημάτων	Μέτρια έως υψηλή

5.5.4 Συνολική αξιολόγηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων αποτελεί σήμερα μία από τις πλέον ολοκληρωμένες πρακτικές βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων, καθώς επιτρέπει την αξιοποίηση ενός υδατικού πόρου που μέχρι πρόσφατα αντιμετωπιζόταν αποκλειστικά ως απόβλητο. Η μετάβαση από τη λογική της διάθεσης των επεξεργασμένων εκροών στη λογική της επαναχρησιμοποίησής τους συνάδει με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, σύμφωνα με τις οποίες οι διαθέσιμοι φυσικοί πόροι πρέπει να αξιοποιούνται με τρόπο που να μεγιστοποιεί την περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική τους αξία.

Στην περίπτωση της Θεσσαλίας, η ανάγκη εφαρμογής πρακτικών επαναχρησιμοποίησης καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη γεωργική δραστηριότητα και υψηλές απαιτήσεις σε αρδευτικό νερό. Η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων, η μείωση της στάθμης των υπόγειων νερών, οι αυξημένες απαιτήσεις των καλλιεργειών και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής δημιουργούν ένα περιβάλλον στο οποίο η αξιοποίηση εναλλακτικών υδατικών πόρων αποτελεί αναγκαιότητα και όχι απλώς μία προαιρετική επιλογή.

Η αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έδειξε ότι η επεξεργασμένη εκροή της ΕΕΛ Βόλου παρουσιάζει ιδιαίτερα ικανοποιητικά χαρακτηριστικά ως προς τις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την εκτίμηση της ποιότητας των επεξεργασμένων λυμάτων. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών αποτελούν ένδειξη αποτελεσματικής λειτουργίας της εγκατάστασης και δημιουργούν θετικές προϋποθέσεις για την περαιτέρω αξιοποίηση της εκροής. Ωστόσο, η καταλληλότητα μιας εκροής για επαναχρησιμοποίηση δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στις συγκεκριμένες παραμέτρους, αλλά απαιτεί ολοκληρωμένη αξιολόγηση όλων των δεικτών ποιότητας που προβλέπονται από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η εφαρμογή του Κανονισμού (ΕΕ) 2020/741, ο οποίος εισάγει μια σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση του ανακτημένου νερού. Η συμμόρφωση με τα ποιοτικά όρια δεν αποτελεί τη μοναδική απαίτηση του Κανονισμού, καθώς εξίσου σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η εφαρμογή σχεδίων διαχείρισης κινδύνου, η συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας της εκροής και η αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι η επαναχρησιμοποίηση πραγματοποιείται με τρόπο ασφαλή και επιστημονικά τεκμηριωμένο.

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, η σημαντικότερη δυνατότητα αξιοποίησης της επεξεργασμένης εκροής της ΕΕΛ Βόλου αφορά τη γεωργική άρδευση. Η περιοχή της Θεσσαλίας διαθέτει εκτεταμένες γεωργικές εκτάσεις και σημαντικές αρδευτικές ανάγκες, γεγονός που δημιουργεί ευνοϊκές προϋποθέσεις για την αξιοποίηση του ανακτημένου νερού. Η χρήση αυτή μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση των αντλήσεων από υπόγειους υδροφορείς, στην εξοικονόμηση πολύτιμων υδατικών πόρων και στη διατήρηση της γεωργικής παραγωγής σε περιόδους μειωμένης διαθεσιμότητας νερού.

Παράλληλα, η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών μπορεί να επεκταθεί και σε αστικές, βιομηχανικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές. Η άρδευση χώρων πρασίνου, η χρήση σε βιομηχανικές διεργασίες που δεν απαιτούν πόσιμο νερό, καθώς και ο εμπλουτισμός υδροφορέων ή η ενίσχυση υγροτοπικών οικοσυστημάτων αποτελούν πρακτικές που εφαρμόζονται ήδη σε αρκετές χώρες και μπορούν να συμβάλουν στη συνολική εξοικονόμηση υδατικών πόρων. Παρότι οι εφαρμογές αυτές έχουν μικρότερη σημασία για τη Θεσσαλία σε σύγκριση με τη γεωργική χρήση, μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά και να ενισχύσουν την αποδοτικότητα των συστημάτων διαχείρισης νερού.

Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή προγραμμάτων επαναχρησιμοποίησης δεν εξαρτάται μόνο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της επεξεργασμένης εκροής. Απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλων δικτύων μεταφοράς του ανακτημένου νερού, η συνεχής λειτουργία συστημάτων παρακολούθησης της ποιότητας, η εκπαίδευση των χρηστών, καθώς και η συνεργασία μεταξύ των φορέων διαχείρισης, των τοπικών αρχών και των τελικών χρηστών του νερού. Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία έχει η ενημέρωση της κοινωνίας σχετικά με τα οφέλη της επαναχρησιμοποίησης, καθώς η κοινωνική αποδοχή αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή αντίστοιχων έργων.

Συνολικά, η αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επαναχρησιμοποίηση της εκροής της ΕΕΛ Βόλου μπορεί να αποτελέσει μια ρεαλιστική και περιβαλλοντικά βιώσιμη λύση για τη διαχείριση των υδατικών πόρων της Θεσσαλίας. Η εφαρμογή της, σε συνδυασμό με τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του ανακτημένου νερού και την τήρηση των απαιτήσεων του θεσμικού πλαισίου, μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην προστασία των υδατικών πόρων, στη στήριξη της γεωργικής παραγωγής και στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας.

- Οφέλη από την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών

Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. Η επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού μειώνει την ανάγκη άντλησης νερού από επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους, συμβάλλοντας στην προστασία των οικοσυστημάτων και στη διατήρηση των διαθέσιμων αποθεμάτων γλυκού νερού. Η πρακτική αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιοχές όπως η Θεσσαλία, όπου οι ανάγκες άρδευσης είναι αυξημένες και οι υδατικοί πόροι δέχονται έντονες πιέσεις.

Η χρήση ανακτημένου νερού μπορεί επίσης να μειώσει το κόστος διαχείρισης των υδατικών πόρων και να περιορίσει τις απορρίψεις επεξεργασμένων λυμάτων στους φυσικούς αποδέκτες. Παράλληλα, δημιουργεί προϋποθέσεις για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα του αγροτικού τομέα απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, διασφαλίζοντας μια πιο σταθερή διαθεσιμότητα νερού κατά τη διάρκεια των περιόδων ξηρασίας.

Από περιβαλλοντική άποψη, η επαναχρησιμοποίηση ενισχύει την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας, καθώς μετατρέπει ένα παραπροϊόν της επεξεργασίας λυμάτων σε αξιοποιήσιμο φυσικό πόρο. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η κατανάλωση πρωτογενών υδατικών πόρων και προωθείται η ορθολογική χρήση του νερού.

- Προκλήσεις και περιορισμοί

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή προγραμμάτων επαναχρησιμοποίησης συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις. Βασική προϋπόθεση αποτελεί η διασφάλιση σταθερής ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής μέσω συνεχούς παρακολούθησης και αποτελεσματικής λειτουργίας της εγκατάστασης. Επιπλέον, απαιτούνται κατάλληλες υποδομές μεταφοράς και διανομής του ανακτημένου νερού, οι οποίες συνεπάγονται σημαντικό κόστος επένδυσης και λειτουργίας.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι η κοινωνική αποδοχή της επαναχρησιμοποίησης. Η ενημέρωση των πολιτών και των χρηστών σχετικά με την ποιότητα και την ασφάλεια του ανακτημένου νερού αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ευρύτερη εφαρμογή τέτοιων

πρακτικών. Παράλληλα, απαιτείται στενή συνεργασία μεταξύ των φορέων διαχείρισης των ΕΕΛ, των τοπικών αρχών, των αγροτών και των αρμόδιων υπηρεσιών, ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή εφαρμογή του θεσμικού πλαισίου.

Στην περίπτωση της Θεσσαλίας, οι προκλήσεις αυτές συνδέονται και με τις ιδιαίτερες υδρολογικές και γεωργικές συνθήκες της περιοχής. Η ανάπτυξη κατάλληλων έργων μεταφοράς του ανακτημένου νερού προς τις αρδευόμενες εκτάσεις, σε συνδυασμό με τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας της εκροής, αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή προγραμμάτων επαναχρησιμοποίησης.

Οφέλη και προκλήσεις της επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών

Η εφαρμογή πρακτικών επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο για το περιβάλλον όσο και για την οικονομία και την κοινωνία. Το σημαντικότερο όφελος αφορά την εξοικονόμηση υδατικών πόρων, καθώς η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού μειώνει την ανάγκη άντλησης από υπόγειους και επιφανειακούς υδατικούς πόρους. Η πρακτική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη Θεσσαλία, όπου η αυξημένη ζήτηση αρδευτικού νερού έχει οδηγήσει διαχρονικά σε σημαντική πίεση των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων.

Παράλληλα, η επαναχρησιμοποίηση συμβάλλει στη μείωση της ποσότητας των επεξεργασμένων εκροών που απορρίπτονται στους φυσικούς αποδέκτες, περιορίζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ενισχύοντας την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων. Επιπλέον, η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού μπορεί να υποστηρίξει τη γεωργική παραγωγή κατά τις περιόδους αυξημένων αρδευτικών αναγκών, προσφέροντας μία εναλλακτική και περισσότερο βιώσιμη πηγή νερού. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, καθώς το επεξεργασμένο νερό αντιμετωπίζεται ως αξιοποιήσιμος φυσικός πόρος και όχι ως απόβλητο.

Παρά τα σημαντικά οφέλη, η εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις. Η σημαντικότερη αφορά τη διασφάλιση σταθερής ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής μέσω συνεχούς παρακολούθησης και ελέγχου της λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Παράλληλα, απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών μεταφοράς και διανομής του ανακτημένου νερού, γεγονός που αυξάνει το αρχικό κόστος επένδυσης.

Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία έχει η αυστηρή τήρηση των απαιτήσεων του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου και η εφαρμογή διαδικασιών διαχείρισης κινδύνου, ώστε να διασφαλίζεται η προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Τέλος, σημαντικό παράγοντα επιτυχίας αποτελεί και η κοινωνική αποδοχή της επαναχρησιμοποίησης. Η ενημέρωση των πολιτών, των αγροτών και των λοιπών χρηστών σχετικά με την ποιότητα και την ασφάλεια του ανακτημένου νερού μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην ευρύτερη εφαρμογή αντίστοιχων πρακτικών.

Συνεπώς, η επιτυχής εφαρμογή προγραμμάτων επαναχρησιμοποίησης δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής, αλλά και από τη συνδυασμένη αντιμετώπιση

τεχνικών, οικονομικών, θεσμικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση των παραγόντων αυτών μπορεί να διασφαλίσει τη μακροχρόνια και ασφαλή αξιοποίηση του ανακτημένου νερού, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων της Θεσσαλίας.

Προοπτικές εφαρμογής στη Θεσσαλία

Η αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων που σχετίζονται με τη διαχείριση των υδατικών πόρων στη Θεσσαλία. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλές αρδευτικές ανάγκες, ενώ η διαχρονική υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων έχει οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση της ποσοτικής και, σε ορισμένες περιπτώσεις, της ποιοτικής τους κατάστασης. Παράλληλα, η αυξανόμενη συχνότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως παρατεταμένες περίοδοι ξηρασίας και έντονες πλημμύρες, ενισχύει την ανάγκη υιοθέτησης ολοκληρωμένων πρακτικών διαχείρισης του νερού.

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών δεν μπορεί να επιλύσει από μόνη της τα προβλήματα λειψυδρίας της Θεσσαλίας. Μπορεί, όμως, να αποτελέσει ένα σημαντικό συμπληρωματικό μέτρο, το οποίο σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση του αρδευτικού νερού, τη βελτίωση των αρδευτικών δικτύων, τον περιορισμό των απωλειών και την εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών άρδευσης μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η δυνατότητα αξιοποίησης της επεξεργασμένης εκροής κατά τους θερινούς μήνες, όταν οι ανάγκες άρδευσης είναι αυξημένες και οι διαθέσιμοι φυσικοί πόροι μειώνονται. Η χρήση ανακτημένου νερού σε κατάλληλες καλλιέργειες μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από υπόγεια νερά, περιορίζοντας την περαιτέρω υποβάθμιση των υδροφορέων και ενισχύοντας τη μακροχρόνια ασφάλεια των διαθέσιμων αποθεμάτων.

Παράλληλα, η ανάπτυξη έργων επαναχρησιμοποίησης μπορεί να δημιουργήσει πρόσθετα περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά οφέλη. Η μείωση της απόρριψης επεξεργασμένων εκροών στους φυσικούς αποδέκτες, η προστασία των υδατικών οικοσυστημάτων και η ενίσχυση της ανθεκτικότητας του πρωτογενούς τομέα αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα που συνδέονται άμεσα με την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Επιπλέον, η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία ενός περισσότερο ανθεκτικού και βιώσιμου μοντέλου διαχείρισης των υδατικών πόρων σε περιφερειακό επίπεδο.

Ωστόσο, για την επιτυχή εφαρμογή αντίστοιχων έργων απαιτείται στρατηγικός σχεδιασμός, επαρκής χρηματοδότηση και συνεχής συνεργασία μεταξύ των αρμόδιων φορέων, των οργανισμών διαχείρισης υδάτων, των επιχειρήσεων ύδρευσης και αποχέτευσης, των τοπικών αρχών και των τελικών χρηστών του νερού. Η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών μεταφοράς και αποθήκευσης του ανακτημένου νερού, καθώς και η εφαρμογή αξιόπιστων συστημάτων

παρακολούθησης της ποιότητας της εκροής, αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη μακροχρόνια επιτυχία των έργων επαναχρησιμοποίησης.

Συνολικά, η παρούσα αξιολόγηση υποδεικνύει ότι η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκρών μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πυλώνα της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων στη Θεσσαλία. Η περίπτωση της ΕΕΛ Βόλου αναδεικνύει ότι, όταν εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ποιότητα της εκροής και εφαρμόζονται οι απαιτήσεις του θεσμικού πλαισίου, το ανακτημένο νερό μπορεί να αξιοποιηθεί με ασφάλεια, συμβάλλοντας τόσο στην προστασία του περιβάλλοντος όσο και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας της γεωργικής παραγωγής απέναντι στις μελλοντικές προκλήσεις.

Συνολική αποτίμηση

Η αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκρών αποτελεί μία ρεαλιστική και επιστημονικά τεκμηριωμένη επιλογή για την ενίσχυση της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων στη Θεσσαλία. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της ΕΕΛ Βόλου δείχνουν ότι η εγκατάσταση παρουσιάζει ικανοποιητική λειτουργική απόδοση ως προς τις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους, γεγονός που δημιουργεί θετικές προϋποθέσεις για την αξιοποίηση της επεξεργασμένης εκροής.

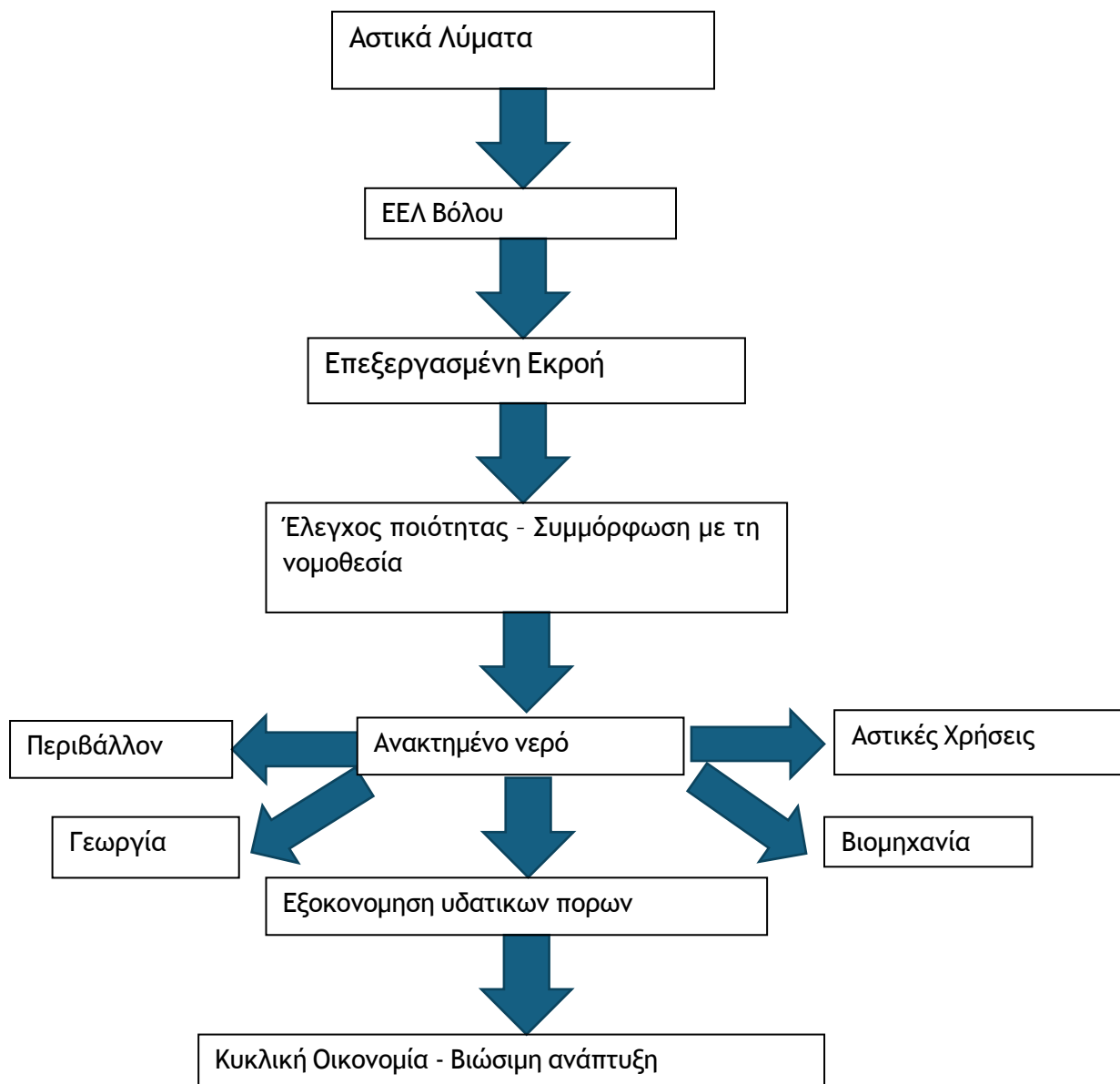
Παράλληλα, η επαναχρησιμοποίηση δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζεται αποκλειστικά ως μία τεχνική λύση διαχείρισης των λυμάτων, αλλά ως ένα ολοκληρωμένο εργαλείο περιβαλλοντικής πολιτικής. Η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού συμβάλλει στη μετάβαση από το γραμμικό μοντέλο διαχείρισης των υδατικών πόρων, στο οποίο οι εκροές απορρίπτονται μετά την επεξεργασία τους, σε ένα κυκλικό μοντέλο όπου το νερό επανεντάσσεται στον κύκλο χρήσης, μειώνοντας την κατανάλωση φυσικών πόρων.

Η εφαρμογή αντίστοιχων πρακτικών μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη τόσο σε τοπικό όσο και σε περιφερειακό επίπεδο. Η μείωση της πίεσης στους υπόγειους υδροφορείς, η ενίσχυση της διαθεσιμότητας νερού για αρδευτικές χρήσεις, η προστασία των επιφανειακών υδάτων και η ενίσχυση της ανθεκτικότητας απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αποτελούν βασικά πλεονεκτήματα της επαναχρησιμοποίησης. Παράλληλα, η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κόστους διαχείρισης των υδατικών πόρων και στη δημιουργία ενός περισσότερο βιώσιμου μοντέλου ανάπτυξης.

Ωστόσο, η επιτυχία της επαναχρησιμοποίησης εξαρτάται από τη διατήρηση υψηλής ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής, την εφαρμογή αξιόπιστων διαδικασιών παρακολούθησης, την ανάπτυξη των απαραίτητων τεχνικών υποδομών και την ενεργή συμμετοχή όλων των εμπλεκόμενων φορέων. Η συνεχής συνεργασία μεταξύ των φορέων διαχείρισης, των δημόσιων αρχών, της επιστημονικής κοινότητας και των τελικών χρηστών αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μακροχρόνια επιτυχία τέτοιων δράσεων.

Συνοψίζοντας, η περίπτωση της ΕΕΛ Βόλου αναδεικνύει ότι οι σύγχρονες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων μπορούν να διαδραματίσουν έναν ευρύτερο ρόλο πέρα από την

προστασία των φυσικών αποδεκτών. Μέσω της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών μπορούν να συμβάλουν ενεργά στην εξοικονόμηση υδατικών πόρων, στην υποστήριξη της γεωργικής παραγωγής και στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας, ενισχύοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη της Θεσσαλίας.



5.6 Παρουσίαση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της Περιφέρειας Θεσσαλίας με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία

της Εθνικής Βάσης Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Η επιλογή των εγκαταστάσεων βασίστηκε στη διαθεσιμότητα πρόσφατων λειτουργικών δεδομένων και χρονοσειρών, ώστε η αξιολόγηση να στηρίζεται σε πραγματικά στοιχεία λειτουργίας και όχι αποκλειστικά σε βιβλιογραφικές αναφορές.

Οι εγκαταστάσεις που εξετάστηκαν αντιπροσωπεύουν τις κυριότερες ΕΕΛ της Περιφέρειας Θεσσαλίας και εξυπηρετούν σημαντικό ποσοστό του πληθυσμού της περιοχής. Για κάθε εγκατάσταση συλλέχθηκαν στοιχεία σχετικά με τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό, τη δυναμικότητα σχεδιασμού, το επίπεδο επεξεργασίας, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της επεξεργασμένης εκροής και τον τρόπο διάθεσης ή επαναχρησιμοποίησης αυτής.

Η αξιολόγηση βασίστηκε σε στοιχεία που αφορούν τη λειτουργική κατάσταση των εγκαταστάσεων και στις διαθέσιμες χρονοσειρές ποιοτικών παραμέτρων της επεξεργασμένης εκροής. Οι πληροφορίες αυτές αποτέλεσαν τη βάση για τη συγκριτική αξιολόγηση των ΕΕΛ και για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των εκρρών τους σύμφωνα με το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο.

Πίνακας 15 Στοιχεία που θα συλλεχθούν από την Εθνική Βάση Δεδομένων ΕΕΛ του ΥΠΕΝ

ΕΕΛ	ΠΕΡΙΦΕΡΙ ΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ	ΦΟΡΕΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓ ΙΑΣ	ΒΑΘΜΙΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑ ΣΙΑΣ	Πληθυσ μός Αιχμής (Μ.Ι.Π.)	Δυναμικότητ α κατασκευασμ ένης εγκατάσταση ς (Μ.Ι.Π.)	Μέση παροχή (m ³ /ημέ ρα)
Βόλου	Μαγνησίας	ΔΕΥΑΜΒ	Δευτεροβάθμ ια / Τριτοβάθμια *	178.880	215.000	46.421
Λάρισα ς	Λάρισας	ΔΕΥΑ Λάρισας	Δευτεροβάθμ ια / Τριτοβάθμια *	145.592	210.000	29.666
Καρδίτ σας	Καρδίτσας	ΔΕΥΑ Καρδίτσας	Δευτεροβάθμ ια / Τριτοβάθμια *	49.893	56.050	0
Τρικάλ ων	Τρικάλων	ΔΕΥΑ Τρικαίων	Δευτεροβάθμ ια / Τριτοβάθμια *	60.000	75.000	0
Τυρνάβ ου	Λάρισα	ΔΕΥΑ Τυρνάβου	Δευτεροβάθμ ια	10.898	18.000	1.250

Πίνακας 16 Ποιοτικά χαρακτηριστικά επεξεργασμένης εκροής

ΕΕΛ	Sampling date	BOD5 (mg/l)	COD (mg/l)	TSS (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)	NH4-N (mg/l)
Λάρισα	29/4/2026	220	335	163	63,14	8,39	163
	22/4/2026	170	269	148	57,82	8,9	51,75
	8/4/2026	220	362	166	63,88	8,35	55,93
	1/4/2026	280	439	174	63,16	7,29	54,8
	24/3/2026	230	369	170	57,46	8,26	50,4
	13/3/2026	250	383	164	55,24	8,37	49,6
	10/3/2026	200	310	156	57,18	9,02	50,4
	4/3/2026	310	505	187	79,95	10,23	71,47
	27/2/2026	180	278	157	53,81	7,47	47,2
	18/2/2026	230	363	156	62,83	8,44	55,72
	11/2/2026	190	293	148	56,18	7,81	49,66
	6/2/2026	190	292	154	57,08	7,55	50,3
	28/1/2026	320	493	178	69,24	8,91	60,9
	21/1/2026	240	386	156	67,34	8,42	60,08
	14/1/2026	200	322	152	63,08	7,81	56,71
	9/1/2026	190	313	151	64,15	7,68	57,6
Βόλος	30/6/2026	180	340	170	31	4	21
	25/6/2026	210	390	200	37	4,4	26
	22/6/2026	190	390	200	38	4,7	28
	17/6/2026	200	430	230	41	4,7	30
	15/6/2026	150	390	180	41	4,5	30
	11/6/2026	170	400	160	36	4,7	26
	8/6/2026	150	360	170	40	4,1	29
	2/6/2026	190	380	180	39	4,2	28
	28/5/2026	190	410	190	36	4,3	24
	25/5/2026	190	370	180	35	6	25
	20/5/2026	190	420	190	36	5	25
	11/5/2026	180	380	120	33	4,5	23
	7/5/2026	190	350	200	31	4,6	21
	4/5/2026	160	330	190	32	4,4	21
	27/4/2026	220	370	190	34	4,7	23
	20/4/2026	220	370	190	33	4,8	23
	14/4/2026	260	400	220	42	5,2	30
	6/4/2026	270	450	210	32	5	20
	30/3/2026	200	430	220	36	5,5	24
	22/3/2026	180	380	160	38	4,7	28
	16/3/2026	180	410	190	44	5	27
	12/3/2026	220	480	250	41	5,2	27
	9/3/2026	160	390	180	42	5	27
	4/3/2026	230	430	250	48	6,4	33
	26/2/2026	190	430	220	40	5,8	28
	18/2/2026	140	310	160	35	4	27
	9/2/2026	200	420	260	32	5	21
	3/2/2026	170	330	180	35	4	24
	27/1/2026	160	320	160	41	4	29

	20/1/2026	190	420	200	48	5,6	36
	15/1/2026	210	460	240	52	8	39
	7/1/2026	220	430	180	46	5,2	30
Τρικάλα	11/12/2025	180	358	106	58	5,76	-
	4/12/2025	205	397	95	65,1	7,22	-
	20/11/2025	240	362	220	67,6	8,9	-
	13/11/2025	205	404	160	62,8	6,69	-
	6/11/2025	150	355	260	69,2	7,31	-
	30/10/2025	180	481	196	57,7	6,84	-
	22/10/2025	160	315	107	61,6	7,11	-
	16/10/2025	150	326	84	54,4	6,03	-
	9/10/2025	160	343	110	65,6	6,99	-
	2/10/2025	195	426	120	64,2	7,88	-
	25/9/2025	240	504	140	64,4	7,51	-
	18/9/2025	125	205	105	44,3	4,63	-
	11/9/2025	290	488	132	59,1	7,07	-
	4/9/2025	250	330	118	61,4	6,38	-
	28/8/2025	220	424	82	61,7	7,02	-
	21/8/2025	160	485	95	70	7,16	-
	7/8/2025	130	302	110	52,4	4,05	-
	31/7/2025	310	510	76	69,9	7,01	-
	24/7/2025	180	315	65	48,6	6,02	-
	17/7/2025	210	492	81	73,7	7,49	-
	10/7/2025	200	430	93	63	7,28	-
	3/7/2025	270	514	130	78,3	7,41	-
	25/6/2025	230	438	160	63	8,32	-
	18/6/2025	300	627	210	63,6	7,12	-
	11/6/2025	190	345	120	52	6,05	-
	5/6/2025	150	392	92	56,7	6,32	-
	28/5/2025	150	389	84	54,8	6,39	-
	22/5/2025	55	128	36	21,4	2,28	-
	16/5/2025	150	393	91	50,6	6,09	-
	9/5/2025	210	431	130	55,7	6,55	-
	2/5/2025	190	376	140	59,6	6,23	-
	11/4/2025	270	443	108	55,9	6,5	-
	4/4/2025	140	336	90,4	76,9	6,59	-
	28/3/2025	210	465	89	91,5	7,2	-
	21/3/2025	210	473	110	86,2	6,76	-
	14/3/2025	350	461	190	82,1	8,03	-
	21/2/2025	190	342	110	78,5	6,52	-
	14/2/2025	420	555	250	105	7,78	-
	7/2/2025	220	459	140	99,2	7,2	-
	31/1/2025	350	417	159	95,5	6,4	-
	24/1/2025	270	401	230	96,4	6,4	-
	17/1/2025	190	320	109	73,4	7,32	-
	10/1/2025	350	428	109	80,3	7,47	-

Τύρναβος	9/12/2025	585	741	268	-	-	-
	10/11/2025	674	754	205	-	-	-
	13/10/2025	654	701	285	-	-	-
	9/9/2025	602	801	425	-	-	-
	11/8/2025	522	675	225	-	-	-
	16/7/2025	530	865	321	-	-	-
	4/6/2025	540	590	220	-	-	-
	7/5/2025	531	822	111	-	-	-
	29/4/2025	523	910	505	-	-	-
	12/3/2025	322	395	96	-	-	-
	10/2/2025	187	249	66	-	-	-
	7/1/2025	289	356	89	-	-	-
Κρδίτσα	23/12/2025	125	303	111	30,5	6,75	
	17/12/2025	85	205	79	31	3,13	
	12/12/2025	78	188	71	23,9	3,68	
	26/11/2025	73	173	66	29,7	3,41	
	20/11/2025	66	155	59	26,6	2,87	
	11/11/2025	77	182	70	23	3,82	
	23/10/2025	80	183	73	34,2	4,43	
	15/10/2025	110	245	100	30,6	8,78	
	8/10/2025	60	144	55	32,2	2,65	
	1/10/2025	82	184	77	29,9	2,44	
	24/9/2025	64	154	53	30,1	2,76	
	16/9/2025	60	147	55	28,6	2,77	
	10/9/2025	58	138	52	30,4	2,65	
	28/8/2025	85	203	76	36,1	3,97	
	20/8/2025	53	128	50	27,2	9,01	
	13/8/2025	44	108	39	22,4	1,64	
	7/8/2025	51	123	46	22,1	2,47	
	29/7/2025	57	133	52	25,2	2,84	
	21/7/2025	151	347	125	31,7	6,84	
	16/7/2025	99	246	94	37,5	5,86	
	8/7/2025	172	420	160	40,7	8,9	
	23/6/2025	105	265	95	39	7,85	
	12/6/2025	134	338	102	63	7,59	
	5/6/2025	127	317	110	35,2	9,21	

	22/5/2025	80	197	70	30,4	5,75	
	14/5/2025	60	143	55	22,8	3,57	
	7/5/2025	125	293	112	32,4	8,6	
	29/4/2025	95	248	88	31,2	3,44	
	14/4/2025	89	202	80	26,1	5,62	
	9/4/2025	55	133	50	15,6	7,34	
	3/4/2025	35	84,1	33	16,2	6,54	
	27/3/2025	65	151	59	36,1	3,61	
	19/3/2025	101	257	94	33,5	13	
	5/3/2025	85	186	80	32,9	3,37	
	26/2/2025	92	230	90	52,7	4,98	
	19/2/2025	80	190	76	43,8	10,2	
	12/2/2025	95	240	91	42,9	7,69	
	5/2/2025	66	163	62	29,4	6,05	
	29/1/2025	70	172	65	42,6	9,32	
	22/1/2025	65	151	60	23	3,8	
	14/1/2025	61	139	55	26,8	4,01	
	9/1/2025	90	219	84	40,4	3,9	

5.6Συζήτηση των αποτελεσμάτων

5.6.1Συγκριτική αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας

Η αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας ανέδειξε ότι οι κύριες εγκαταστάσεις της περιοχής παρουσιάζουν γενικά ικανοποιητική λειτουργική απόδοση ως προς τις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους της επεξεργασμένης εκροής. Η επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων από τις χρονοσειρές του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας επέτρεψε τη συγκριτική εξέταση της λειτουργίας των ΕΕΛ Βόλου, Λάρισας, Τρικάλων και Καρδίτσας, παρέχοντας μία συνολική εικόνα της κατάστασης των σημαντικότερων εγκαταστάσεων της Περιφέρειας Θεσσαλίας.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι περισσότερες εγκαταστάσεις διατηρούν σταθερές τιμές στις βασικές παραμέτρους ποιότητας της εκροής, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD₅), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS). Η διατήρηση χαμηλών συγκεντρώσεων των παραμέτρων αυτών υποδηλώνει αποτελεσματική λειτουργία των βιολογικών διεργασιών επεξεργασίας και επαρκή απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών.

Παρά τις επιμέρους διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ των εγκαταστάσεων, η συνολική εικόνα δείχνει ότι οι ΕΕΛ της Θεσσαλίας λειτουργούν σε ικανοποιητικό επίπεδο, παρουσιάζοντας εκροές που στις περισσότερες περιπτώσεις συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις της ισχύουσας περιβαλλοντικής νομοθεσίας. Οι διαφορές που εμφανίζονται στις επιμέρους παραμέτρους μπορούν να αποδοθούν σε παράγοντες όπως η δυναμικότητα κάθε εγκατάστασης, οι εποχικές διακυμάνσεις της παροχής, η σύνθεση των εισερχόμενων λυμάτων, καθώς και οι διαφορετικές τεχνολογίες και οι λειτουργικές συνθήκες που εφαρμόζονται.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ΕΕΛ Βόλου, η οποία αποτέλεσε την κύρια περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Η ανάλυση των διαθέσιμων στοιχείων έδειξε ότι η εγκατάσταση παρουσιάζει σταθερή λειτουργική συμπεριφορά ως προς τους βασικούς δείκτες ποιότητας της εκροής, γεγονός που αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για τη διερεύνηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης του ανακτημένου νερού. Ωστόσο, η τελική αξιολόγηση της καταλληλότητας της εκροής δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στις φυσικοχημικές παραμέτρους, αλλά απαιτεί τη συνεκτίμηση μικροβιολογικών δεδομένων, της αξιοπιστίας της απολύμανσης και της διαχρονικής συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου.

Η συγκριτική αξιολόγηση ανέδειξε επίσης τη σημασία της συστηματικής παρακολούθησης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων μέσω οργανωμένων βάσεων δεδομένων, όπως η Εθνική Βάση Δεδομένων του ΥΠΕΝ. Η διαθεσιμότητα χρονοσειρών επιτρέπει όχι μόνο την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, αλλά και την αναγνώριση πιθανών μεταβολών στη λειτουργία των εγκαταστάσεων, διευκολύνοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη βελτίωση της απόδοσής τους και την ασφαλή αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών.

5.6.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη διεθνή βιβλιογραφία

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας αποκτά μεγαλύτερη επιστημονική αξία όταν εξετάζεται σε συνδυασμό με τα ευρήματα της διεθνούς και της ελληνικής βιβλιογραφίας. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει να διαπιστωθεί κατά πόσο η λειτουργική απόδοση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας συμβαδίζει με τις σύγχρονες απαιτήσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων και τις πρακτικές που εφαρμόζονται διεθνώς. Παράλληλα, συμβάλλει στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας και στην ανάδειξη των παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής.

Η διεθνής βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι οι σύγχρονες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων που εφαρμόζουν δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία μπορούν να επιτύχουν ιδιαίτερα υψηλή απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, των αιωρούμενων στερεών και σημαντικού ποσοστού των θρεπτικών συστατικών. Η εφαρμογή βιολογικών διεργασιών, σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα απολύμανσης και προχωρημένης επεξεργασίας, επιτρέπει την παραγωγή εκροής υψηλής ποιότητας, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί με

ασφάλεια σε εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης, εφόσον πληρούνται οι απαιτήσεις του ισχύοντος θεσμικού πλαισίου.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας βρίσκονται σε γενικές γραμμές σε συμφωνία με τα παραπάνω ευρήματα. Η αξιολόγηση των διαθέσιμων δεδομένων από τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας έδειξε ότι οι περισσότερες εγκαταστάσεις παρουσιάζουν σταθερή λειτουργική συμπεριφορά ως προς τις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους της επεξεργασμένης εκροής. Οι συγκεντρώσεις των παραμέτρων BOD , COD και TSS παραμένουν σε επίπεδα που υποδηλώνουν αποτελεσματική λειτουργία των βιολογικών διεργασιών, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι εγκαταστάσεις μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της περιβαλλοντικής νομοθεσίας και να συμβάλουν στην προστασία των φυσικών αποδεκτών.

Παράλληλα, η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η αξιολόγηση μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων δεν πρέπει να περιορίζεται αποκλειστικά στις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους. Η ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής επηρεάζεται και από μικροβιολογικούς δείκτες, από τη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων, από την πιθανή παρουσία βαρέων μετάλλων, καθώς και από αναδυόμενους ρύπους, όπως τα κατάλοιπα φαρμακευτικών ουσιών και τα μικροπλαστικά. Για τον λόγο αυτό, η σύγχρονη επιστημονική προσέγγιση προτείνει την εφαρμογή ολοκληρωμένων προγραμμάτων παρακολούθησης που συνδυάζουν φυσικοχημικές, μικροβιολογικές και οικοτοξικολογικές αναλύσεις, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών.

Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική και για την περίπτωση της Θεσσαλίας. Παρότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι οι βασικές παράμετροι ποιότητας των εκροών βρίσκονται σε ικανοποιητικά επίπεδα, η ασφαλής επαναχρησιμοποίηση του ανακτημένου νερού απαιτεί συνεχή και ολοκληρωμένη παρακολούθηση όλων των παραμέτρων που προβλέπονται από το ευρωπαϊκό και το ελληνικό θεσμικό πλαίσιο. Η απαίτηση αυτή αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία όταν το ανακτημένο νερό προορίζεται για γεωργικές εφαρμογές, όπου η προστασία της δημόσιας υγείας αποτελεί βασική προτεραιότητα.

Επιπλέον, η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η επιτυχής εφαρμογή προγραμμάτων επαναχρησιμοποίησης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογική επάρκεια των εγκαταστάσεων, αλλά και από τη συνολική στρατηγική διαχείρισης των υδατικών πόρων. Σε πολλές χώρες της Μεσογείου, όπως η Ισπανία, η Ιταλία και η Κύπρος, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών αποτελεί πλέον αναπόσπαστο τμήμα της διαχείρισης του νερού, ιδιαίτερα σε περιοχές με αυξημένα προβλήματα λειψυδρίας. Η εμπειρία αυτή αποδεικνύει ότι η επιτυχία τέτοιων προγραμμάτων προϋποθέτει συνδυασμό τεχνολογικής αξιοπιστίας, θεσμικής οργάνωσης, συνεχούς ελέγχου της ποιότητας και αποδοχής από την κοινωνία.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συγκλίνουν με αυτή τη διεθνή εμπειρία, καθώς αναδεικνύουν ότι οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας διαθέτουν σημαντικές δυνατότητες για την αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών τους. Ωστόσο, η περαιτέρω ανάπτυξη έργων επαναχρησιμοποίησης προϋποθέτει συνεχή αναβάθμιση των

υποδομών, εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών επεξεργασίας, ενίσχυση των προγραμμάτων παρακολούθησης και διαρκή προσαρμογή στις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας.

Συνολικά, η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας επιβεβαιώνει ότι η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών αποτελεί μία ώριμη και επιστημονικά τεκμηριωμένη πρακτική διαχείρισης των υδατικών πόρων. Παράλληλα, αναδεικνύεται ότι η περίπτωση της Θεσσαλίας παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές για την περαιτέρω ανάπτυξη αντίστοιχων εφαρμογών, υπό την προϋπόθεση ότι θα συνεχιστεί η συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας των εκροών, η αναβάθμιση των εγκαταστάσεων όπου απαιτείται και η εφαρμογή ολοκληρωμένων πολιτικών βιώσιμης διαχείρισης του νερού.

5.6.3 Περιορισμοί της παρούσας έρευνας και προτάσεις για μελλοντική εφαρμογή

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στην αξιολόγηση των διαθέσιμων στοιχείων που αφορούν τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας, με ιδιαίτερη έμφαση στην ΕΕΛ Βόλου, αξιοποιώντας τις διαθέσιμες χρονοσειρές της Εθνικής Βάσης Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, καθώς και τη σχετική ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία. Παρότι τα δεδομένα αυτά επέτρεψαν την πραγματοποίηση μιας ολοκληρωμένης αξιολόγησης της λειτουργικής απόδοσης και των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ένας βασικός περιορισμός αφορά τη διαθεσιμότητα και την πληρότητα των στοιχείων που είναι δημόσια προσβάσιμα. Οι χρονοσειρές του ΥΠΕΝ παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους της επεξεργασμένης εκροής, όπως το BOD₅, το COD και τα ολικά αιωρούμενα στερεά, όμως δεν είναι πάντοτε διαθέσιμα πλήρη δεδομένα για όλες τις παραμέτρους που σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση, όπως ειδικοί μικροβιολογικοί δείκτες, αναδύομενοι ρύποι ή στοιχεία σχετικά με τη μακροχρόνια λειτουργία των συστημάτων απολύμανσης.

Επιπλέον, η ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής επηρεάζεται από παράγοντες που μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, όπως η εποχική διακύμανση της παροχής λυμάτων, οι κλιματικές συνθήκες, η σύνθεση των εισερχόμενων λυμάτων και οι λειτουργικές απαιτήσεις κάθε εγκατάστασης. Ως εκ τούτου, η αξιολόγηση των διαθέσιμων χρονοσειρών αποτυπώνει τη συνολική εικόνα της λειτουργίας των εγκαταστάσεων, χωρίς όμως να είναι δυνατόν να διερευνηθούν αναλυτικά όλες οι επιμέρους αιτίες των παρατηρούμενων διακυμάνσεων.

Ένας ακόμη περιορισμός σχετίζεται με το γεγονός ότι η παρούσα εργασία επικεντρώνεται κυρίως στην αξιολόγηση της ποιότητας της εκροής και στη διερεύνηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησής της. Δεν πραγματοποιήθηκε αναλυτική οικονομική αξιολόγηση του κόστους ανάπτυξης των απαραίτητων υποδομών μεταφοράς, αποθήκευσης και διανομής του ανακτημένου νερού, ούτε εκτιμήθηκε η οικονομική βιωσιμότητα συγκεκριμένων έργων επαναχρησιμοποίησης. Η ενσωμάτωση τέτοιων αναλύσεων θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Παράλληλα, η εργασία δεν εξετάζει εξειδικευμένες περιβαλλοντικές αξιολογήσεις, όπως η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), η εκτίμηση του ανθρακικού αποτυπώματος ή η ποσοτική αξιολόγηση του ενεργειακού ισοζυγίου των εγκαταστάσεων. Η διερεύνηση των παραμέτρων αυτών θα μπορούσε να προσφέρει μια περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα της περιβαλλοντικής επίδοσης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων και της συμβολής τους στην κυκλική οικονομία.

Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν επίσης να επεκταθούν στη διερεύνηση της αποδοχής του ανακτημένου νερού από τους τελικούς χρήστες, όπως οι αγρότες, οι τοπικοί φορείς και οι επιχειρήσεις. Η κοινωνική διάσταση της επαναχρησιμοποίησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή αντίστοιχων έργων, καθώς η τεχνολογική επάρκεια από μόνη της δεν διασφαλίζει την ευρεία αξιοποίηση του ανακτημένου νερού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων παρακολούθησης της ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής με αξιοποίηση σύγχρονων ψηφιακών τεχνολογιών. Η χρήση αισθητήρων συνεχούς καταγραφής, αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου και εργαλείων ανάλυσης δεδομένων μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αξιοπιστία της λειτουργίας των εγκαταστάσεων και να επιτρέψει την έγκαιρη αντιμετώπιση πιθανών αποκλίσεων από τα προβλεπόμενα όρια ποιότητας.

Συνολικά, παρά τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν, η παρούσα εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργικής απόδοσης των βασικών Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας και των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους. Τα αποτελέσματά της μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμη βάση για περαιτέρω επιστημονική έρευνα, αλλά και για τον σχεδιασμό πολιτικών και έργων που θα ενισχύσουν τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

5.6.4 Συμβολή της επαναχρησιμοποίησης στην κυκλική οικονομία και στη βιώσιμη ανάπτυξη

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές της κυκλικής οικονομίας στον τομέα της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Σε αντίθεση με το παραδοσιακό γραμμικό μοντέλο διαχείρισης, όπου τα αστικά λύματα μετά την επεξεργασία τους απορρίπτονται στους φυσικούς αποδέκτες, το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας επιδιώκει την ανάκτηση και επαναξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, ώστε να παραμένουν στον παραγωγικό κύκλο για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στο πλαίσιο αυτό, το επεξεργασμένο νερό δεν αντιμετωπίζεται ως απόβλητο προς διάθεση, αλλά ως ένας πολύτιμος δευτερογενής υδατικός πόρος, ο οποίος μπορεί να καλύψει μέρος των αναγκών σε νερό χωρίς να επιβαρύνει επιπλέον το φυσικό περιβάλλον.

Η μετάβαση σε ένα μοντέλο κυκλικής διαχείρισης των υδατικών πόρων αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιοχές που αντιμετωπίζουν αυξημένες πιέσεις λόγω της κλιματικής αλλαγής, της πληθυσμιακής ανάπτυξης και της αυξανόμενης ζήτησης νερού. Η Θεσσαλία αποτελεί

χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχής όπου η έντονη γεωργική δραστηριότητα, σε συνδυασμό με τη συστηματική εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων, έχει δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα υδατικού ελλείμματος. Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών μπορεί να συμβάλει στη σταδιακή αποκατάσταση του υδατικού ισοζυγίου, περιορίζοντας τις απώλειες από φυσικές πηγές και δημιουργώντας ένα περισσότερο ανθεκτικό σύστημα διαχείρισης του νερού.

Παράλληλα, η επαναχρησιμοποίηση συνδέεται άμεσα με την επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης. Η εξοικονόμηση φυσικών υδατικών πόρων, η προστασία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, η διατήρηση της αγροτικής παραγωγής και η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποτελούν βασικούς άξονες της βιώσιμης διαχείρισης. Επιπλέον, η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού ενισχύει την ανθεκτικότητα των τοπικών κοινωνιών απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, διασφαλίζοντας μεγαλύτερη σταθερότητα στην κάλυψη των αρδευτικών και άλλων αναγκών σε νερό.

Η εφαρμογή πρακτικών επαναχρησιμοποίησης συμβάλλει επίσης στην επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών. Ειδικότερα, συνδέεται άμεσα με τον **Στόχο 6 (Καθαρό νερό και αποχέτευση)**, καθώς προωθεί τη βιώσιμη διαχείριση και την αποδοτική χρήση των υδατικών πόρων. Παράλληλα, υποστηρίζει τον **Στόχο 12 (Υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή)** μέσω της επαναξιοποίησης ενός πολύτιμου πόρου που διαφορετικά θα απορριπτόταν, ενώ συμβάλλει και στον **Στόχο 13 (Δράση για το κλίμα)**, καθώς ενισχύει την προσαρμογή των κοινωνιών στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και περιορίζει την ευπάθεια των περιοχών που αντιμετωπίζουν προβλήματα λειψυδρίας.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών αποτελεί βασικό στοιχείο της πολιτικής για τη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων. Η εφαρμογή του Κανονισμού (ΕΕ) 2020/741 ενισχύει τη συστηματική αξιοποίηση του ανακτημένου νερού στη γεωργία, καθορίζοντας κοινές απαιτήσεις ποιότητας και διαχείρισης κινδύνου για όλα τα κράτη-μέλη. Η προσέγγιση αυτή ενθαρρύνει την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση, ενισχύει την προστασία της δημόσιας υγείας και προωθεί την αποδοτικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων υδατικών πόρων σε ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας διαθέτουν σημαντικές δυνατότητες συμβολής στην κυκλική οικονομία. Η αξιολόγηση των διαθέσιμων στοιχείων έδειξε ότι οι εγκαταστάσεις παρουσιάζουν γενικά ικανοποιητική λειτουργική απόδοση ως προς τις βασικές παραμέτρους ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής, γεγονός που δημιουργεί θετικές προοπτικές για την ασφαλή αξιοποίηση του ανακτημένου νερού σε κατάλληλες εφαρμογές. Η ΕΕΛ Βόλου, ως περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα εγκατάστασης που μπορεί να υποστηρίξει μελλοντικά δράσεις επαναχρησιμοποίησης, εφόσον συνεχίσει να διατηρεί υψηλή ποιότητα εκροής και να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του θεσμικού πλαισίου.

Ωστόσο, η ουσιαστική ενσωμάτωση της επαναχρησιμοποίησης στην κυκλική οικονομία δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη λειτουργική απόδοση των εγκαταστάσεων. Απαιτείται ολοκληρωμένος σχεδιασμός, επαρκής χρηματοδότηση, ανάπτυξη δικτύων μεταφοράς και διανομής του ανακτημένου νερού, συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας και ενεργός συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων φορέων. Παράλληλα, η ενημέρωση των πολιτών και των τελικών χρηστών σχετικά με τα οφέλη και την ασφάλεια της επαναχρησιμοποίησης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ευρύτερη αποδοχή και εφαρμογή αντίστοιχων πρακτικών.

Συμπερασματικά, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών μπορεί να αποτελέσει έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της κυκλικής οικονομίας στον τομέα της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού προσφέρει περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη, συμβάλλει στην προστασία των φυσικών πόρων και ενισχύει τη βιώσιμη ανάπτυξη. Για τη Θεσσαλία, όπου οι πιέσεις στους υδατικούς πόρους είναι ιδιαίτερα έντονες, η εφαρμογή τέτοιων πρακτικών μπορεί να αποτελέσει ουσιαστικό εργαλείο για την αντιμετώπιση των μελλοντικών προκλήσεων και τη διασφάλιση της ορθολογικής διαχείρισης του νερού.

5.7 Γενική συζήτηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ανέδειξε τον καθοριστικό ρόλο που διαδραματίζουν οι σύγχρονες υποδομές επεξεργασίας λυμάτων στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων. Η επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων κατέδειξε ότι οι βασικές εγκαταστάσεις της Περιφέρειας παρουσιάζουν, σε γενικές γραμμές, ικανοποιητική λειτουργική απόδοση ως προς τις κύριες φυσικοχημικές παραμέτρους της εκροής, γεγονός που δημιουργεί θετικές προϋποθέσεις για την περαιτέρω αξιοποίηση του ανακτημένου νερού.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η αποτελεσματική λειτουργία μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων δεν μπορεί να αξιολογείται αποκλειστικά από τη συμμόρφωση με τα θεσμοθετημένα όρια εκροής. Αντίθετα, απαιτείται μία συνολική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τη σταθερότητα της λειτουργίας της εγκατάστασης, τη διαχρονική διακύμανση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της εκροής, την αξιοπιστία των συστημάτων επεξεργασίας και απολύμανσης, καθώς και τη δυνατότητα προσαρμογής της εγκατάστασης στις αυξημένες απαιτήσεις που προκύπτουν από τη σύγχρονη περιβαλλοντική νομοθεσία. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την πληρέστερη αποτίμηση της πραγματικής λειτουργικής επίδοσης των εγκαταστάσεων και της δυνατότητάς τους να υποστηρίξουν δράσεις επαναχρησιμοποίησης.

Η περίπτωση της ΕΕΛ Βόλου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η εγκατάσταση εξυπηρετεί έναν σημαντικό αστικό πληθυσμό και λειτουργεί σε μία περιοχή όπου η γεωργική δραστηριότητα αποτελεί βασικό παράγοντα της τοπικής οικονομίας. Η αξιολόγηση των διαθέσιμων στοιχείων έδειξε ότι η εγκατάσταση διαθέτει τα χαρακτηριστικά εκείνα που

μπορούν να υποστηρίξουν μελλοντικές εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης, υπό την προϋπόθεση ότι θα συνεχιστεί η συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας της εκροής και θα διασφαλίζεται η πλήρης συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της ευρωπαϊκής και της ελληνικής νομοθεσίας.

Παράλληλα, η συγκριτική εξέταση των υπόλοιπων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας ανέδειξε ότι οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ των εγκαταστάσεων δεν σχετίζονται αποκλειστικά με την εφαρμοζόμενη τεχνολογία επεξεργασίας, αλλά επηρεάζονται και από παράγοντες όπως ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός, οι εποχικές μεταβολές της παροχής, η σύσταση των εισερχόμενων λυμάτων, οι λειτουργικές πρακτικές και η συχνότητα της παρακολούθησης. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η αξιολόγηση των ΕΕΛ πρέπει να βασίζεται σε πολυπαραγοντική ανάλυση και όχι μόνο σε μεμονωμένες τιμές ποιοτικών παραμέτρων.

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας αφορά τη σημασία της αξιοποίησης των δημόσια διαθέσιμων δεδομένων για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Η χρήση των χρονοσειρών της Εθνικής Βάσης Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων επέτρεψε την αντικειμενική αποτύπωση της λειτουργικής εικόνας των εγκαταστάσεων και την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών. Η συστηματική ενημέρωση και αξιοποίηση των δεδομένων αυτών μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τον σχεδιασμό περιβαλλοντικών πολιτικών και τη βελτίωση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο.

Η παρούσα μελέτη αναδεικνύει επίσης ότι η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών δεν αποτελεί αποκλειστικά μία τεχνολογική επιλογή, αλλά μια ολοκληρωμένη στρατηγική διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η επιτυχία της εξαρτάται από τη συνδυασμένη εφαρμογή τεχνικών, θεσμικών, οικονομικών και κοινωνικών μέτρων. Η ανάπτυξη κατάλληλων δικτύων μεταφοράς, η εφαρμογή αξιόπιστων προγραμμάτων παρακολούθησης της ποιότητας, η διαρκής εκπαίδευση των χρηστών και η συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων φορέων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την ασφαλή και αποτελεσματική αξιοποίηση του ανακτημένου νερού.

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποκτά η εφαρμογή των παραπάνω στη Θεσσαλία, όπου η αυξανόμενη πίεση στους υδατικούς πόρους, η έντονη γεωργική δραστηριότητα και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής καθιστούν αναγκαία την υιοθέτηση νέων προσεγγίσεων στη διαχείριση του νερού. Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών μπορεί να αποτελέσει σημαντικό συμπληρωματικό μέτρο, το οποίο θα ενισχύσει την ασφάλεια των διαθέσιμων υδατικών πόρων, θα μειώσει την εξάρτηση από τους υπόγειους υδροφορείς και θα συμβάλει στην προστασία των φυσικών οικοσυστημάτων.

Συνολικά, η ανάλυση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας μπορούν να διαδραματίσουν ουσιαστικό ρόλο στη μετάβαση προς ένα περισσότερο βιώσιμο μοντέλο

διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών, σε συνδυασμό με τη συνεχή βελτίωση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων και την εφαρμογή των απαιτήσεων του θεσμικού πλαισίου, μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην προστασία του περιβάλλοντος, στην ενίσχυση της αγροτικής παραγωγής και στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την αξιολόγηση των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της Περιφέρειας Θεσσαλίας και τη διερεύνηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών τους στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, με κύρια περιοχή μελέτης την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Βόλου. Η εργασία αναπτύχθηκε με σκοπό να αξιολογήσει τόσο τη λειτουργική απόδοση των εγκαταστάσεων όσο και τις προοπτικές αξιοποίησης του ανακτημένου νερού ως εναλλακτικού υδατικού πόρου, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του ισχύοντος ευρωπαϊκού και εθνικού θεσμικού πλαισίου.

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίστηκε στη συνδυαστική αξιοποίηση της διεθνούς και ελληνικής βιβλιογραφίας, στην επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων της Εθνικής Βάσης Δεδομένων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), καθώς και στη συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Η αξιολόγηση επικεντρώθηκε κυρίως στις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους της επεξεργασμένης εκροής, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), ενώ παράλληλα εξετάστηκε η συμμόρφωσή τους με τις απαιτήσεις που προβλέπονται για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών.

Η αξιολόγηση των διαθέσιμων στοιχείων κατέδειξε ότι οι βασικές Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Θεσσαλίας παρουσιάζουν γενικά ικανοποιητική λειτουργική απόδοση ως προς τις κύριες φυσικοχημικές παραμέτρους της εκροής. Η περίπτωση της ΕΕΛ Βόλου, η οποία αποτέλεσε τη βασική περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, ανέδειξε ότι η εγκατάσταση επιτυγχάνει αποτελεσματική απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών, παρουσιάζοντας χαμηλές συγκεντρώσεις BOD, COD και TSS στην τελική εκροή. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι η εγκατάσταση λειτουργεί αποτελεσματικά ως προς τους βασικούς δείκτες ποιότητας, συμβάλλοντας στην προστασία των φυσικών αποδεκτών και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων.

Παράλληλα, η συγκριτική αξιολόγηση των ΕΕΛ Βόλου, Λάρισας, Καρδίτσας και Τρικάλων ανέδειξε ότι, παρά τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ των εγκαταστάσεων, η συνολική εικόνα είναι θετική. Οι διαφορές που καταγράφηκαν σχετίζονται κυρίως με τη δυναμικότητα των εγκαταστάσεων, τη σύνθεση των εισερχόμενων λυμάτων, τις εποχικές διακυμάνσεις της παροχής και τις επιμέρους λειτουργικές συνθήκες κάθε μονάδας. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι η αξιολόγηση μιας Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε μεμονωμένες τιμές ποιοτικών παραμέτρων, αλλά απαιτεί διαχρονική παρακολούθηση της λειτουργίας της και ολοκληρωμένη ερμηνεία των διαθέσιμων δεδομένων.

Η εργασία κατέδειξε επίσης ότι η αξιολόγηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών δεν μπορεί να περιορίζεται αποκλειστικά στις φυσικοχημικές παραμέτρους. Η ασφαλής αξιοποίηση του ανακτημένου νερού προϋποθέτει τη συνεκτίμηση μικροβιολογικών χαρακτηριστικών, θρεπτικών συστατικών, της αλατότητας, καθώς και όλων των ποιοτικών παραμέτρων που προβλέπονται από τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741 και την ελληνική νομοθεσία. Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία έχει η εφαρμογή ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης κινδύνου, τα οποία διασφαλίζουν την προστασία της δημόσιας υγείας, των χρηστών του ανακτημένου νερού και του φυσικού περιβάλλοντος.

Η διερεύνηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης ανέδειξε ότι η γεωργική άρδευση αποτελεί τη σημαντικότερη προοπτική αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών για την Περιφέρεια Θεσσαλίας. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη γεωργική δραστηριότητα και ιδιαίτερα αυξημένες ανάγκες άρδευσης, γεγονός που καθιστά το ανακτημένο νερό έναν πολύτιμο συμπληρωματικό υδατικό πόρο. Παράλληλα, εξετάστηκαν οι δυνατότητες αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών σε αστικές, βιομηχανικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, οι οποίες μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών υδατικών πόρων και στην προστασία των υπόγειων υδροφορέων.

Η εργασία ανέδειξε ακόμη ότι η επιτυχής εφαρμογή προγραμμάτων επαναχρησιμοποίησης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ποιότητα της επεξεργασμένης εκροής. Απαιτείται ολοκληρωμένος σχεδιασμός, ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών μεταφοράς και αποθήκευσης του ανακτημένου νερού, συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας, αποτελεσματική λειτουργία των εγκαταστάσεων και διαρκής συμμόρφωση με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο. Επιπλέον, η συνεργασία μεταξύ των φορέων διαχείρισης, των αρμόδιων δημόσιων υπηρεσιών, των οργανισμών τοπικής αυτοδιοίκησης και των τελικών χρηστών αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βιώσιμη εφαρμογή αντίστοιχων έργων.

Ιδιαίτερα σημαντικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας αποτελεί η διαπίστωση ότι η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών δεν συνιστά απλώς μία τεχνολογική επιλογή, αλλά έναν βασικό πυλώνα της σύγχρονης πολιτικής διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού ενσωματώνει στην πράξη τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, μετατρέποντας μία εκροή που μέχρι πρότινος αντιμετωπιζόταν ως απόβλητο σε έναν αξιοποιήσιμο φυσικό πόρο με σημαντική περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική αξία. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στην εξοικονόμηση φυσικών υδατικών πόρων, στη

μείωση των πιέσεων στους υπόγειους υδροφορείς, στην προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας της γεωργικής παραγωγής απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας επιβεβαιώνουν ότι οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας μπορούν να διαδραματίσουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων. Η περίπτωση της ΕΕΛ Βόλου αποδεικνύει ότι, όταν διασφαλίζεται η αποτελεσματική λειτουργία της εγκατάστασης, η συστηματική παρακολούθηση της ποιότητας της εκροής και η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας, οι επεξεργασμένες εκροές μπορούν να αποτελέσουν έναν ασφαλή, αξιόπιστο και περιβαλλοντικά βιώσιμο συμπληρωματικό υδατικό πόρο. Η περαιτέρω ανάπτυξη έργων επαναχρησιμοποίησης στη Θεσσαλία μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην προστασία των φυσικών πόρων, στη διασφάλιση της υδατικής επάρκειας και στην προώθηση ενός περισσότερο βιώσιμου μοντέλου ανάπτυξης, πλήρως εναρμονισμένου με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

6.2 Προτάσεις και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, προκύπτει ότι η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων της Περιφέρειας Θεσσαλίας μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Παρότι η αξιολόγηση έδειξε ότι οι βασικές εγκαταστάσεις της Περιφέρειας παρουσιάζουν ικανοποιητική λειτουργική απόδοση ως προς τις κύριες φυσικοχημικές παραμέτρους της εκροής, η ευρύτερη εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης προϋποθέτει τη συνεχή βελτίωση των τεχνολογιών επεξεργασίας, την ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών και την περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση επιμέρους θεμάτων που δεν ήταν δυνατό να εξεταστούν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, ιδιαίτερη σημασία έχει η ενίσχυση των προγραμμάτων συστηματικής παρακολούθησης της ποιότητας των επεξεργασμένων εκροών. Η πραγματοποίηση τακτικών δειγματοληψιών και εργαστηριακών αναλύσεων θα επιτρέψει την καλύτερη αξιολόγηση της διαχρονικής σταθερότητας της λειτουργίας των εγκαταστάσεων και της συμμόρφωσής τους με τις απαιτήσεις του Κανονισμού (ΕΕ) 2020/741 και της ισχύουσας ελληνικής νομοθεσίας. Παράλληλα, η αξιοποίηση σύγχρονων συστημάτων αυτοματισμού, τηλεμετρίας και ψηφιακής καταγραφής δεδομένων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τον έλεγχο της λειτουργίας των εγκαταστάσεων και να συμβάλει στην έγκαιρη ανίχνευση πιθανών αποκλίσεων από τα προβλεπόμενα όρια.

Επιπλέον, κρίνεται αναγκαία η συλλογή περισσότερων δεδομένων που αφορούν μικροβιολογικές παραμέτρους, θρεπτικά συστατικά, αλατότητα, ηλεκτρική αγωγιμότητα, ιχνοστοιχεία και άλλους δείκτες που σχετίζονται με την ασφάλεια και την καταλληλότητα του

ανακτημένου νερού. Η ολοκληρωμένη αξιολόγηση των παραμέτρων αυτών θα επιτρέψει την πληρέστερη εκτίμηση της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης των εκροών για διαφορετικές χρήσεις, όπως η γεωργική άρδευση, η αστική αξιοποίηση, η βιομηχανική χρήση και η περιβαλλοντική αποκατάσταση.

Παράλληλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της παρουσίας αναδυόμενων ρύπων, όπως υπολείμματα φαρμακευτικών ουσιών, προϊόντα προσωπικής φροντίδας, μικροπλαστικά και άλλοι μικρορρύποι, οι οποίοι τα τελευταία χρόνια αποτελούν αντικείμενο έντονου επιστημονικού ενδιαφέροντος. Η παρακολούθηση των ουσιών αυτών μπορεί να συμβάλει στην πληρέστερη αξιολόγηση της περιβαλλοντικής ασφάλειας των επεξεργασμένων εκροών και στη διαμόρφωση αποτελεσματικότερων στρατηγικών διαχείρισης.

Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει επίσης να δοθεί στην εκπόνηση τεχνικοοικονομικών μελετών που θα αξιολογούν τη σκοπιμότητα ανάπτυξης έργων επαναχρησιμοποίησης στην Περιφέρεια Θεσσαλίας. Οι μελέτες αυτές είναι σημαντικό να εξετάζουν όχι μόνο το κόστος αναβάθμισης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων, αλλά και τις απαιτούμενες υποδομές μεταφοράς, αποθήκευσης και διανομής του ανακτημένου νερού, καθώς και τα αναμενόμενα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη από την εφαρμογή των έργων.

Επιπλέον, προτείνεται η διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής συμπληρωματικών τεχνολογιών τριτοβάθμιας και προχωρημένης επεξεργασίας, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο. Η εφαρμογή τεχνολογιών όπως η υπεριώδης απολύμανση (UV), οι μεμβράνες, η υπερδιήθηση ή άλλες προηγμένες διεργασίες μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω την ποιότητα της εκροής και να επεκτείνει τις δυνατότητες ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης του ανακτημένου νερού.

Για την Περιφέρεια Θεσσαλίας προτείνεται ακόμη η εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου περιφερειακού σχεδίου επαναχρησιμοποίησης, το οποίο θα προσδιορίζει τις περιοχές όπου μπορεί να εφαρμοστεί η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών, τις απαιτούμενες τεχνικές υποδομές, τις προτεραιότητες υλοποίησης των έργων και τους αρμόδιους φορείς διαχείρισης. Ένα τέτοιο σχέδιο θα μπορούσε να συμβάλει στον καλύτερο συντονισμό των ΔΕΥΑ, της Περιφέρειας Θεσσαλίας, των ΤΟΕΒ, των ΓΟΕΒ και των συναρμόδιων υπηρεσιών, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των δράσεων επαναχρησιμοποίησης.

Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία έχει η ενίσχυση της ενημέρωσης και της ευαισθητοποίησης των πολιτών, των παραγωγών και των λοιπών χρηστών σχετικά με τα οφέλη και τις προϋποθέσεις ασφαλούς χρήσης του ανακτημένου νερού. Η κοινωνική αποδοχή αποτελεί βασικό παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή αντίστοιχων έργων και μπορεί να ενισχυθεί μέσω προγραμμάτων ενημέρωσης, εκπαιδευτικών δράσεων και πιλοτικών εφαρμογών.

Τέλος, προτείνεται η επέκταση της παρούσας μελέτης και σε άλλες Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων της Ελλάδας, ώστε να πραγματοποιηθεί ευρύτερη συγκριτική αξιολόγηση της λειτουργικής τους απόδοσης και των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων εκροών. Η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης βάσης συγκριτικών στοιχείων σε εθνικό επίπεδο θα μπορούσε να υποστηρίξει τον σχεδιασμό πολιτικών διαχείρισης των

υδατικών πόρων και να συμβάλει στην ευρύτερη εφαρμογή πρακτικών κυκλικής οικονομίας στον τομέα των αστικών λυμάτων.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών αποτελεί μια ρεαλιστική και περιβαλλοντικά βιώσιμη προοπτική για την Περιφέρεια Θεσσαλίας. Η περαιτέρω ανάπτυξη της συγκεκριμένης πρακτικής προϋποθέτει συνδυασμό τεχνολογικής αναβάθμισης, επιστημονικής τεκμηρίωσης, αποτελεσματικού θεσμικού σχεδιασμού και συνεργασίας όλων των εμπλεκόμενων φορέων. Η υλοποίηση των παραπάνω προτάσεων μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη διασφάλιση της υδατικής επάρκειας, στην προστασία του περιβάλλοντος και στην προώθηση ενός περισσότερο βιώσιμου μοντέλου διαχείρισης των υδατικών πόρων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bakopoulou, S., & Kungolos, A. (2009). Investigation of wastewater reuse potential in Thessaly region, Greece. *Desalination*, 248(1–3), 1029–1038.

Bakopoulou, S., Emmanouil, C., & Kungolos, A. (2011). Assessment of wastewater effluent quality in Thessaly region, Greece, for determining its irrigation reuse potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74(2), 188–194.

Bakopoulou, S., Vasiloglou, V., & Kungolos, A. (2012). A multicriteria analysis application for evaluating the possibility of reusing wastewater for irrigation purposes in a Greek region. *Desalination and Water Treatment*, 39(1–3), 262–270.

Biswas, A. K. (Ed.). (1976). *Systems approach to water management*. McGraw-Hill.

Bradfield, R., Wright, G., Burt, G., Cairns, G., & Van der Heijden, K. (2005). The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, 37(8), 795–812.

Elsawah, S., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., Rothman, D., Schweizer, V., Trutnevyte, E., Carlsen, H., Drakes, C., Frame, B., Fu, B., Guivarch, C., Haasnoot, M., Kemp-Benedict, E., Kok, K., Kosow, H., Ryan, M., & van Delden, H. (2020). Scenario processes for socio-environmental systems analysis of futures: A review of recent efforts and a salient research agenda for supporting decision making. *Science of the Total Environment*, 729, 138393.

Ellen MacArthur Foundation. (2023). *What is the linear economy?*

European Commission. (2019). *The European Green Deal (COM(2019) 640 final)*. European Commission.

European Parliament & Council of the European Union. (1991). *Council Directive*

91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. Official Journal of the European Communities, L 135, 40–52.

European Parliament & Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities, L 327, 1–73.

European Parliament & Council of the European Union. (2020). Regulation (EU) 2020/741 of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. Official Journal of the European Union, L 177, 32–55.

Giakoumis, T., Vaghela, C., & Voulvoulis, N. (2020). The role of water reuse in the circular economy. *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*, 5, 227–252.

Giuliani, M., Li, Y., Castelletti, A., & Gandolfi, C. (2016). A coupled human-natural systems analysis of irrigated agriculture under changing climate. *Water Resources Research*, 52(9), 6928–6947.

Godet, M. (2000). The art of scenarios and strategic planning: Tools and pitfalls. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(1), 3–22.

Haasnoot, M., & Middelkoop, H. (2012). A history of futures: A review of scenario use in

water policy studies in the Netherlands. *Environmental Science & Policy*, 19–20, 108–120.

Hellenic Statistical Authority (ELSTAT). (2021). 2021 Population-Housing Census: Permanent population results.

Herman, J. D., Zeff, H. B., Reed, P. M., & Characklis, G. W. (2014). Beyond optimality: Multistakeholder robustness tradeoffs for regional water portfolio planning under deep uncertainty. *Water Resources Research*, 50(10), 7692–7713.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.

Kwakkel, J. H., & Haasnoot, M. (2019). Supporting DMDU: A taxonomy of approaches and tools. In V. A. W. J. Marchau, W. E. Walker, P. J. T. M. Bloemen, & S. W. Popper (Eds.), *Decision making under deep uncertainty: From theory to practice* (pp. 355–374). Springer.

Loucks, D. P., & van Beek, E. (2005). *Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications*. UNESCO Publishing.

Maass, A., Hufschmidt, M. M., Dorfman, R., Thomas, H. A., Jr., Marglin, S. A., & Fair, G. M. (1962). *Design of water-resource systems: New techniques for relating economic objectives, engineering analysis, and governmental planning*. Harvard University Press.

Mahmoud, M., Liu, Y., Hartmann, H., Stewart, S., Wagener, T., Semmens, D., Stewart, R., Gupta, H., Dominguez, D., Dominguez, F., Hulse, D., Letcher, R., Rashleigh, B., Smith, C., Street, R., Ticehurst, J., Twery, M., van Delden, H., Waldick, R., White, D., & Winter, L. (2009). A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software*, 24(7), 798–808.

Marchau, V. A. W. J., Walker, W. E., Bloemen, P. J. T. M., & Popper, S. W. (Eds.). (2019). *Decision making under deep uncertainty: From theory to practice*. Springer.

Ofori, S., Puškáčová, A., Růžicková, I., & Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of the Total Environment*, 760, 144026.

ScienceDirect Topics. (χ.χ.). Urban wastewater.

van Notten, P. W. F., Rotmans, J., van Asselt, M. B. A., & Rothman, D. S. (2003). An updated scenario typology. *Futures*, 35(5), 423–443.

Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M. B. A., Janssen, P., & Kreyer von Krauss, M. P. (2003). Defining uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated Assessment*, 4(1), 5–17.

Walker, W. E., Lempert, R. J., & Kwakkel, J. H. (2013). Deep uncertainty. In S. I. Gass & M. C. Fu (Eds.), *Encyclopedia of operations research and management science* (pp. 395–402). Springer.

World Health Organization. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Volume 2. Wastewater use in agriculture*. World Health Organization.

Wu, W., Eamen, L., Dandy, G., Razavi, S., Kuczera, G., & Maier, H. R. (2023). Beyond engineering: A review of reservoir management through the lens of wickedness, competing objectives and uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 167, 105777.

Wu, W., Eamen, L., Dandy, G., Maier, H. R., Razavi, S., Kwakkel, J., Huang, J., & Kuczera, G. (2025). Beyond the traditional paradigm of water resources management: Scenario thinking to address deep uncertainty. *Journal of Hydrology*, 661, 133547.

Zagklis, D. P., & Bampos, G. (2022). Tertiary wastewater treatment technologies: A review of technical, economic, and life cycle aspects. *Processes*, 10(11), 2304.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). (χ.χ.). Επαναχρησιμοποίηση λυμάτων.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). (χ.χ.). Νομοθεσία για αστικά λύματα και επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων.