



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Η επίδραση της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων για αρδευτική χρήση στον δεσμό Νερού – Τροφής – Ενέργειας - Οικοσύστημάτων



Χατζηγεωργίου Μιχαήλ, ΑΜ:00075

Επιβλέπων Διδάσκων: Δρ. Κοφινάς Δημήτριος

ΔΠΜΣ-Βιώσιμη Διαχείριση Περιβαλλοντικών Αλλαγών και Κυκλική Οικονομία

Θεσσαλία, 2025

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέπων Δρ. Κοφινά Δημήτριο για την πολύτιμη καθοδήγηση, την επιστημονική υποστήριξη και τις ουσιαστικές κατευθύνσεις που παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Επίσης, θερμές ευχαριστίες απευθύνω στην Καθηγήτρια Δρ. Λασπίδου Χρυσή καθώς και στον Δρ. Μέλλιο Νικόλαο για την συμβολή τους στην ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας.

Ιδιαίτερη μνεία αξίζει στους υπευθύνους των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίοι ανταποκρίθηκαν με προθυμία και συνέβαλαν σημαντικά μέσω της συμπλήρωσης του ερωτηματολογίου, παρέχοντας ουσιαστικά δεδομένα για την έρευνα.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και την αγάπη μου προς τη σύζυγό μου και τους γονείς μου για την αδιάκοπη στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Ευχαριστώ από καρδιάς τον Δρ. Δημήτριο Μητρόγιαννη για τη φιλία του και τη διαρκή, ανθρώπινη παρουσία του σε όλη αυτή τη διαδρομή.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη συμβολή της κυκλικής οικονομίας στην προώθηση βιώσιμων πρακτικών για την ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων. Εστιάζει στην αποδόμηση του γραμμικού μοντέλου παραγωγής και κατανάλωσης και στην υιοθέτηση ενός κυκλικού συστήματος που στηρίζεται στην ανακύκλωση, την ανάκτηση και την επαναχρησιμοποίηση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαχείριση του νερού, και πιο συγκεκριμένα στην αξιοποίηση των εκροών από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων ως εναλλακτική πηγή για γεωργικές, αστικές ή βιομηχανικές χρήσεις. Η πρακτική αυτή συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση της πίεσης στους φυσικούς υδατικούς πόρους, ενισχύοντας παράλληλα τη λειτουργική αποδοτικότητα και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Στο πλαίσιο της μελέτης αναλύεται η πολυδιάστατη σχέση μεταξύ νερού, ενέργειας, τροφής και οικοσυστημάτων, γνωστή ως προσέγγιση Nexus. Η ενσωμάτωση της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων σε αυτό το πλέγμα διασυνδεδεμένων τομέων αναδεικνύεται ως καθοριστικής σημασίας για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων και την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους. Η μεθοδολογική προσέγγιση περιλάμβανε βιβλιογραφική ανασκόπηση, κατά την οποία εντοπίστηκαν επιστημονικές πηγές μέσω στοχευμένων λέξεων-κλειδιών. Από την αποδελτίωση του υλικού συντάχθηκε συγκριτικός πίνακας που αποτυπώνει τις θετικές και αρνητικές επιπτώσεις της επαναχρησιμοποίησης στους τέσσερις βασικούς πυλώνες του Nexus. Ο πίνακας αυτός αποτέλεσε τη βάση για τη διαμόρφωση ερωτηματολογίου, το οποίο απευθύνθηκε σε φορείς που δραστηριοποιούνται στη διαχείριση εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Η συλλογή των απαντήσεων πραγματοποιήθηκε είτε μέσω ημιδομημένων συνεντεύξεων είτε μέσω ηλεκτρονικής υποβολής.

Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν αξιολογήθηκαν τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, αναδεικνύοντας κρίσιμες πτυχές της επαναχρησιμοποίησης στο πλαίσιο της προσέγγισης Nexus. Μέσα από τη σύνθεση των ευρημάτων, αποτυπώνονται τόσο οι δυνατότητες εφαρμογής όσο και τα εμπόδια που σχετίζονται με τεχνικά, θεσμικά και κοινωνικά ζητήματα. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ενίσχυση της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων, μέσα από την ολιστική και διατομεακή οπτική της κυκλικής οικονομίας, συνιστά απαραίτητο βήμα για τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο και ανθεκτικό σύστημα διαχείρισης πόρων.

Abstract

This master's thesis investigates the contribution of the circular economy to the promotion of sustainable practices for the rational management of natural resources. It focuses on the deconstruction of the linear production and consumption model and the adoption of a circular system based on recycling, recovery, and reuse. Particular emphasis is placed on water management, and more specifically, on the utilization of effluent from urban wastewater treatment plants as an alternative source for agricultural, urban, or industrial applications. This practice plays a crucial role in reducing pressure on natural water resources, while simultaneously enhancing operational efficiency and environmental sustainability.

Within the scope of the study, the complex interrelationships between water, energy, food, and ecosystems—known as the Nexus approach—are analyzed. The integration of wastewater reuse into this network of interconnected sectors emerges as a key factor for improving overall system efficiency and strengthening resilience. The methodological approach included a literature review, during which scientific sources were identified using targeted keywords. Based on the reviewed material, a comparative table was developed, categorizing the positive and negative impacts of wastewater reuse across the four main pillars of the Nexus. This table served as the foundation for designing a questionnaire addressed to stakeholders involved in the management of wastewater treatment facilities. Responses were collected either through semi-structured interviews or electronic submissions.

The collected data were analyzed using both qualitative and quantitative methods, revealing critical aspects of wastewater reuse within the Nexus framework. The synthesis of findings highlights both the implementation potential and the barriers associated with technical, institutional, and social factors. The study concludes that strengthening the practice of treated wastewater reuse—through the holistic and cross-sectoral lens of the circular economy—constitutes a necessary step toward the transition to a sustainable and resilient resource management system.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	6
2. Η κατάσταση στην Ελλάδα: Ιδιαιτερότητες και προκλήσεις	10
3. Υδρολογικός κύκλος.....	12
4. Πλαίσιο σχεδιασμού από «λίκνο σε λίκνο» (Cradle-to-Cradle).....	14
5. Κυκλική Οικονομία.....	15
6. Κυκλική Προσέγγιση στη Βιομηχανία και το Περιβάλλον	21
7. Κυκλικότητα του Νερού: Από τη Θεωρία στην Πράξη της Διαχείρισης.....	25
8. Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) και Κυκλική Οικονομία	29
9. Το Μοντέλο των 6R: Μια Ολιστική Προσέγγιση για Βιώσιμη Διαχείριση Υδάτινων Πόρων και Λυμάτων.....	33
10. Προκλήσεις και Εφαρμοστικά Εμπόδια στη Βιώσιμη Διακυβέρνηση WEFE.....	42
11. Το Νερό στο Πλαίσιο του Nexus.....	44
12. Διερεύνηση των Αλληλεξαρτήσεων στο Πλέγμα Νερό-Τροφή-Ενέργεια- Οικοσύστημα	49
13. Μεθοδολογία	52
14. Βιβλιογραφική Έρευνα.....	58
15. Αποτύπωση επιπτώσεων της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στους κρίσιμους τομείς του Πλέγματος Νερό-Τροφή-Ενέργεια- Οικοσύστημα (Nexus WEFE)	61
16. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	77
17. Προδιαγραφές ποιότητας εκροών από ΕΕΛ σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία	86
18. Αποτίμηση της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων	90
19. Η ωριμότητα της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων στην Ελλάδα: Αποτύπωση βάσει στοιχείων από ΕΕΛ.....	105
20. Συμπεράσματα και προτάσεις για την αντιμετώπιση των αδυναμιών στην επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων	107
Παράρτημα 1	114
ΑΡΧΕΙΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΥΠΕΥΘΥΝΟΥΣ ΕΕΛ.....	128

1. Εισαγωγή

Η διαθεσιμότητα νερού αποτελεί ζήτημα αυξανόμενης παγκόσμιας ανησυχίας. Καθώς η κατανάλωση υπερβαίνει σταθερά τα βιώσιμα όρια και ολοένα μεγαλύτερες ποσότητες ρυπαντών έρχονται σε επαφή με πηγές νερού που στο παρελθόν ήταν καθαρές, αυξάνεται ο προβληματισμός σχετικά με την προέλευση και την ποιότητα του νερού που θα είναι διαθέσιμο για κατανάλωση στο μέλλον. Κατά μέσο όρο, περίπου 3,3 εκατομμύρια άνθρωποι χάνουν τη ζωή τους ετησίως εξαιτίας ασθενειών που σχετίζονται με το νερό, ενώ το 2008, περίπου το 46% του παγκόσμιου πληθυσμού ζούσε σε κατοικίες χωρίς σύνδεση με εσωτερικό δίκτυο ύδρευσης [Macedonio et al., 2012].

Σύμφωνα με την Έκθεση για την Ανάπτυξη των Υδάτινων Πόρων του ΟΗΕ, η ζήτηση για νερό αναμένεται να αυξηθεί σε όλους τους παραγωγικούς τομείς. Εάν οι σημερινές πρακτικές διαχείρισης παραμείνουν αμετάβλητες, έως το 2030 η παγκόσμια ανεπάρκεια υδάτινων πόρων ενδέχεται να φτάσει το 40%. Την ίδια στιγμή, η κλιματική αλλαγή εντείνει τόσο τη συχνότητα όσο και την ένταση των φαινομένων ξηρασίας και έντονων βροχοπτώσεων, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα ενισχύει τις απαιτήσεις για άρδευση στις γεωργικές καλλιέργειες και για υδροδότηση στον τομέα της κτηνοτροφίας. [UN Water, 2015b].

Το νερό είναι ζωτικής σημασίας για την ανθρώπινη επιβίωση και ευημερία και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο σε πλήθος τομέων της οικονομικής δραστηριότητας. Ωστόσο, οι υδατικοί πόροι παρουσιάζουν ανομοιόμορφη γεωγραφική και χρονική κατανομή και υφίστανται εντεινόμενες πιέσεις εξαιτίας της ανθρώπινης παρέμβασης και της διαρκούς οικονομικής ανάπτυξης [Forslund et al., 2009]. Η ραγδαία αστικοποίηση, σε συνδυασμό με την επέκταση των συστημάτων υδροδότησης και αποχέτευσης, συμβάλλει στην περαιτέρω αύξηση της ζήτησης για νερό [UN, 2017]. Παράλληλα, τα σενάρια κλιματικής αλλαγής προβλέπουν σημαντικές χρονικές και γεωγραφικές διακυμάνσεις στον υδρολογικό κύκλο, επιτείνοντας την αναντιστοιχία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης υδατικών πόρων [Evans, 1996].

Η γεωργική δραστηριότητα συγκαταλέγεται στις κυριότερες πηγές πίεσης στους διαθέσιμους πόρους γλυκού νερού, καθώς καταναλώνει περισσότερο από το 70% των παγκόσμιων αντλήσεων, ποσοστό που σε ταχέως αναπτυσσόμενες οικονομίες μπορεί να φτάσει έως και το 90% [UN, 2017]. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, εάν έως το 2030 το 5% των οδικών μεταφορών βασίζεται σε βιοκαύσιμα (με στόχευση 10% για το 2020), η παραγωγή τους θα απαιτεί τουλάχιστον το 20% της παγκόσμιας ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται

στον αγροτικό τομέα [European Commission, 2009]. Η βιομηχανία αποτελεί επίσης σημαντικό καταναλωτή [FAO, 2012].

Η διαθεσιμότητα, η έλλειψη και η ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων κατατάσσονται μεταξύ των σημαντικότερων παγκόσμιων κινδύνων, σύμφωνα με την Έκθεση Παγκόσμιου Κινδύνου του Παγκόσμιου Οικονομικού Φόρουμ [World Economic Forum, 2015]. Η έκθεση αυτή προειδοποιεί ότι, εφόσον δεν υπάρξει ουσιαστική αλλαγή στις υφιστάμενες πρακτικές, έως το 2030 η παγκόσμια προσφορά νερού ενδέχεται να υπολείπεται της ζήτησης κατά περίπου 40%.

Πέραν της καθοριστικής του σημασίας για την ανθρώπινη επιβίωση και την οικονομική ανάπτυξη, το νερό αποτελεί θεμέλιο για τη διατήρηση των οικοσυστημικών υπηρεσιών. Εντούτοις, κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα που σχετίζεται με την άντληση, μεταφορά, αποθήκευση ή χρήση υδατικών πόρων ενδέχεται να προκαλέσει υποβάθμιση των λειτουργιών των φυσικών υδατικών συστημάτων, όπως είναι οι ποταμοί, οι λίμνες, οι υγρότοποι και οι υπόγειοι υδροφορείς [Kaaya et al., 2015].

Η έλλειψη νερού, εντείνοντας τη συγκέντρωση ρυπογόνων ουσιών και τις συνακόλουθες οικολογικές επιπτώσεις, αποτελεί σημαντικό στρεσογόνο παράγοντα για πολλά ποτάμια οικοσυστήματα. Η μειωμένη ροή νερού περιορίζει τη δυνατότητα αυτοκαθαρισμού των υδάτινων σωμάτων και επιδεινώνει τις αρνητικές επιδράσεις άλλων, ήδη υφιστάμενων περιβαλλοντικών πιέσεων [Petrovic et al., 2011].

Το πρόβλημα της έλλειψης νερού καθίσταται ιδιαίτερα οξύ σε ημιάνυδρες περιοχές, όπως η Μεσογειακή ζώνη, καθώς και σε περιοχές όπου η ζήτηση προσεγγίζει ή υπερβαίνει συστηματικά τη διαθέσιμη προσφορά. Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται εκτεταμένες περιοχές της Ευρώπης, όπως καταδεικνύεται από τον Δείκτη Εκμετάλλευσης Νερού (Water Exploitation Index – WEI), ο οποίος εκφράζει τον λόγο μεταξύ των συνολικών ετήσιων αντλήσεων και των ανανεώσιμων υδατικών πόρων [European Environmental Agency, 2012].

Σύμφωνα με στοιχεία του ΟΗΕ, περίπου τα δύο τρίτα του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικούν σε περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα έλλειψης νερού για τουλάχιστον έναν μήνα κάθε χρόνο. Από αυτούς, σχεδόν 500 εκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε περιοχές όπου η κατανάλωση νερού υπερβαίνει συστηματικά τα τοπικά ανανεώσιμα υδατικά αποθέματα [UN, 2017].

Η διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του νερού, καθώς η ρύπανση των πηγών μπορεί να περιορίσει ή να αποκλείσει τη χρήση τους για διάφορους σκοπούς. Η αυξημένη εκροή ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων, σε συνδυασμό με τη ρύπανση

από γεωργικές δραστηριότητες και τη μη επαρκή επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων, έχει οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του νερού σε παγκόσμιο επίπεδο [Environmental Performance Index, 2017].

Εάν οι υφιστάμενες τάσεις συνεχιστούν, η ποιότητα των υδάτων αναμένεται να επιδεινωθεί τις προσεχείς δεκαετίες, ιδιαίτερα σε χώρες με περιορισμένους πόρους και σε ξηρές περιοχές. Το γεγονός αυτό θα αυξήσει περαιτέρω τους κινδύνους για τη δημόσια υγεία και τα οικοσυστήματα, θα εντείνει το πρόβλημα της υδατικής ανεπάρκειας και θα περιορίσει τις δυνατότητες για βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη. Σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, η πλειονότητα των λυμάτων εξακολουθεί να απορρίπτεται απευθείας στο περιβάλλον χωρίς καμία ή με ανεπαρκή επεξεργασία, με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού, στην αγροτική και βιομηχανική παραγωγή, καθώς και στη συνολική οικολογική ισορροπία των υδάτινων σωμάτων [UN, 2017].

Δεδομένης της ολοένα εντονότερης πίεσης στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους και της αυξημένης ζήτησης λόγω οικονομικής ανάπτυξης, τεχνολογίες όπως η αφαλάτωση και η επαναχρησιμοποίηση νερού αναδεικνύονται ως ιδιαίτερα υποσχόμενες λύσεις για την κάλυψη του χάσματος προσφοράς και ζήτησης [IWA, 2015]. Ωστόσο, η εφαρμογή της αφαλάτωσης σε μεγάλη κλίμακα ενέχει περιβαλλοντικούς κινδύνους, καθώς τα παραγόμενα υπολείμματα (άλμη) περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων και χημικών ουσιών, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά τα παράκτια οικοσυστήματα [Dawoud & Al Mulla, 2012]. Επιπροσθέτως, η διαχείριση των παραπροϊόντων και το υψηλό κόστος λειτουργίας παραμένουν σημαντικές προκλήσεις. Η αδυναμία αναγνώρισης και αντιμετώπισης της διαχείρισης των λυμάτων ως κρίσιμου κοινωνικού και περιβαλλοντικού ζητήματος ενδέχεται να υπονομεύσει τις ευρύτερες προσπάθειες για την επίτευξη των στόχων της Ατζέντας 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη [UN, 2017].

Η επαναχρησιμοποίηση νερού αναδεικνύεται ως μια στρατηγική με πολλαπλά οφέλη, είτε με στόχο την ενίσχυση των υδατικών αποθεμάτων είτε τη διαχείριση θρεπτικών ουσιών που περιέχονται στα επεξεργασμένα απόβλητα – παράγοντας εξίσου σημαντικός για την ανάπτυξη σχετικών προγραμμάτων [EPA, 2012]. Μεταξύ των βασικών πλεονεκτημάτων της συγκαταλέγονται η ενίσχυση της γεωργικής παραγωγής, η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης που σχετίζεται με την άντληση, την επεξεργασία και τη διανομή του νερού, καθώς και τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, όπως η μείωση της εισροής θρεπτικών ουσιών σε αποδέκτες/υδάτινα συστήματα, χάρη στην ελεγχόμενη αξιοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων [Fatta-Kassinos & Dionysiou, 2016].

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η Οδηγία για την Επεξεργασία Αστικών Λυμάτων (91/271/ΕΟΚ) έχει ήδη διαμορφώσει τις συνθήκες για την παραγωγή επεξεργασμένων λυμάτων υψηλής ποιότητας, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν εκ νέου για συγκεκριμένες εφαρμογές ή να υποβληθούν σε περαιτέρω επεξεργασία ώστε να ανταποκριθούν σε αυστηρότερες ποιοτικές απαιτήσεις [European Commission, 2001]. Παρά το γεγονός ότι η πρακτική της επαναχρησιμοποίησης έχει ήδη υιοθετηθεί σε αρκετές χώρες, το συνολικό της δυναμικό παραμένει εν πολλοίς αναξιοποίητο. Εντούτοις, η δυναμική αυτή παρουσιάζει αυξητική τάση. Εκτιμάται ότι η παγκόσμια δυναμικότητα επαναχρησιμοποίησης νερού αυξήθηκε από 33,7 GL/ημέρα το 2010 σε 54,5 GL/ημέρα το 2015, με τις μεγαλύτερες αυξήσεις να παρατηρούνται στην Κίνα, τις Ηνωμένες Πολιτείες, τη Μέση Ανατολή, τη Βόρεια Αφρική, τη Δυτική Ευρώπη και τη Νότια Ασία [Chen et al., 2013].

Η παγκοσμιοποίηση εντείνει περαιτέρω τις πιέσεις που ασκούνται στους φυσικούς πόρους, στη βιοποικιλότητα και στα οικοσυστήματα, ενώ επηρεάζει αρνητικά την οικονομία και την κοινωνική ευημερία τόσο των άμεσα πληττόμενων όσο και των γειτονικών περιοχών. Μέσα σε αυτό το δυναμικό και διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, η ανάγκη για έγκαιρη και επαρκή διαμόρφωση στρατηγικών προσαρμογής αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για τη βιώσιμη κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη και την ενίσχυση της διακρατικής συνεργασίας [Molajou et al., 2021].

Η βιώσιμη διαχείριση του νερού και των λυμάτων μέσω της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης πόρων μπορεί να επιτευχθεί με ολοκληρωμένα επιχειρηματικά μοντέλα που υπερβαίνουν τις παραδοσιακές υπηρεσίες. Τα μοντέλα αυτά μετατρέπουν τα απόβλητα σε πολύτιμους πόρους, όπως βιοκαύσιμα και λιπάσματα, ενώ παράλληλα βελτιώνουν τη συνολική διαχείριση του νερού.

Στο πλαίσιο αυτό, η μετάβαση προς ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας αναμένεται να λειτουργήσει ενισχυτικά προς την ευρύτερη υιοθέτηση πρακτικών επαναχρησιμοποίησης νερού. Η εν λόγω προσέγγιση, η οποία εντάσσεται σε μια αναδύομενη παγκόσμια αντίληψη που υποστηρίζει πως μια «τρίτη βιομηχανική επανάσταση» βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη – τροφοδοτούμενη από την εποχή του διαδικτύου και την πρωτοφανή ταχύτητα κυκλοφορίας πληροφοριών και τεχνογνωσίας – ωθεί ολοένα και περισσότερα κράτη να αξιοποιούν οικονομικά και ρυθμιστικά εργαλεία με στόχο την υιοθέτηση μίας κυκλικής οικονομίας που θα μπορούσε να δημιουργήσει σημαντικές συνέργειες για την ευρεία υιοθέτηση της επαναχρησιμοποίησης νερού. Το μοντέλο αυτό επιδιώκει τη δημιουργία παραγωγικών και περιβαλλοντικών συνεργειών, λειτουργώντας ως απάντηση στις εγγενείς αδυναμίες του

παραδοσιακού γραμμικού μοντέλου παραγωγής και κατανάλωσης, το οποίο βασίζεται στην υπερεκμετάλλευση φυσικών πόρων και στην απόρριψη αποβλήτων και εντάσσεται στο πλαίσιο της μετάβασης προς μια πιο βιώσιμη αναπτυξιακή πορεία [Voulvoulis, 2018].

Στο πλαίσιο των αυξανόμενων πιέσεων στους υδατικούς πόρους, η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων και η ενσωμάτωσή της σε στρατηγικές κυκλικής οικονομίας καθίστανται ολοένα και πιο κρίσιμη. Η υιοθέτηση τέτοιων πρακτικών δεν συνεισφέρει μόνο στην κάλυψη της ζήτησης σε νερό, αλλά και στην προστασία των οικοσυστημάτων, στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος και στη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων συνολικά. Η παρούσα εργασία εστιάζει στη μελέτη αυτής της σύνδεσης μεταξύ επαναχρησιμοποίησης νερού και κυκλικής οικονομίας, μέσα από το πρίσμα της προσέγγισης Nexus (νερό–τροφή–ενέργεια–οικοσύστημα), προκειμένου να συμβάλει στη διαμόρφωση πιο ολοκληρωμένων και ανθεκτικών πολιτικών διαχείρισης.

2. Η κατάσταση στην Ελλάδα: Ιδιαιτερότητες και προκλήσεις

Η υφιστάμενη κατάσταση των υδατικών αποθεμάτων και της διαχείρισής τους στην Ελλάδα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδέεται με ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιομορφίες που αντανακλούν το επίπεδο της πραγματικής ανάπτυξης και της θεσμικής οργάνωσης της χώρας (Στουρνάρας, 2007).

Αναλυτικότερα, η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από έντονη ποικιλομορφία και πολυπλοκότητα στο υδρολογικό της προφίλ, με κύρια γνωρίσματα τα εξής:

- ♦ Η ανομοιόμορφη χρονική κατανομή των κατακρημνισμάτων, δεδομένου ότι ποσοστό μεγαλύτερο του 85% αφορά τη χειμερινή (υγρή) περίοδο και το υπόλοιπο τη θερινή (ξηρή) περίοδο του υδρολογικού έτους.
- ♦ Η ανομοιόμορφη χωρική κατανομή των κατακρημνισμάτων, δεδομένου ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά αναφέρονται στη δυτική Ελλάδα (δυτικώς της οροσειράς της Πίνδου) και τα λιγότερα στην ανατολική Ελλάδα.
- ♦ Το βόρειο τμήμα της Ελλάδας εξαρτάται (ποσοτικώς και ποιοτικώς) από διακρατικά νερά, δεδομένου ότι όλοι οι σημαντικοί ποταμοί της περιοχής αυτής ξεκινούν από τη Βουλγαρία

(Εβρος, Νέστος, Στρυμόνας) και την Πρώην Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία της Μακεδονίας (Αξιός).

- ◆ Εποχικότητα στη ζήτηση: Η θερινή περίοδος χαρακτηρίζεται από αυξημένες ανάγκες σε νερό, κυρίως λόγω της αρδευτικής δραστηριότητας και της τουριστικής αιχμής, σε περίοδο που οι φυσικές απορροές είναι περιορισμένες.

- ◆ Η έντονη χωρική κατανομή ζήτησεως, λόγω της υπερκατανάλωσης από την υπέρμετρη συσσώρευση πληθυσμών στα αστικά κέντρα. Είναι χαρακτηριστικό το παράδειγμα της Αθήνας και του λεκανοπεδίου της Αττικής, γενικώς, στο οποίο κατοικεί περίπου το ήμισυ του πληθυσμού της Ελλάδας, στο οποίο αναπτύσσεται πάνω από το 70% της οικονομικής δραστηριότητας της χώρας και εισέρχονται εκατομμύρια εσωτερικών και ξένων τουριστών κάθε χρόνο.

- ◆ Γεωλογική και γεωμορφολογική διαφοροποίηση: Η σύνθετη γεωλογική δομή της Ελλάδας επηρεάζει την ανάπτυξη των υδροφορέων και την επιφανειακή απορροή, επιτείνοντας τις προκλήσεις στη διαχείριση.

- ◆ Η εκτεταμένη ακτογραμμή και υφαλμύρωση: Η μεγάλη ακτογραμμή της χώρας (περίπου 15.000 χιλιόμετρα), σε συνδυασμό με την υπεράντληση των παράκτιων υδροφορέων, ευνοεί την εισχώρηση θαλασσινού νερού στο υπέδαφος, υποβαθμίζοντας την ποιότητα των υδάτων.

- ◆ Οι ιδιαιτερότητες των νησιών του Αιγαίου: Τα μικρά νησιά παρουσιάζουν ιδιαίτερες δυσκολίες, καθώς χαρακτηρίζονται από χαμηλό ύψος βροχόπτωσης, περιορισμένη επιφάνεια και πλήρη έκθεση στο θαλάσσιο περιβάλλον, γεγονός που περιορίζει σημαντικά τις δυνατότητες υδατικής επάρκειας.

Από πλευράς υδατικών αποθεμάτων, η Ελλάδα θεωρούνταν μέχρι πρότινος μια χώρα «πλούσια» σε υδατικούς πόρους, κυρίως λόγω των γενικά υψηλών επιπέδων βροχόπτωσης. Ο μέσος ετήσιος υετός στην Ελλάδα κυμαίνεται γύρω στα 700 mm, τιμή σημαντικά υψηλότερη από τον μέσο όρο των χωρών της Μεσογείου. Για το έτος 2024, ωστόσο, η μέση ετήσια βροχόπτωση εκτιμάται ότι ανήλθε σε περίπου 640 mm, καταγράφοντας μείωση σε σχέση με τον μακροχρόνιο μέσο όρο. Αυτό οφείλεται στους γενικούς παράγοντες που διαμορφώνουν το κλίμα της Ελλάδας και τα καιρινικά φαινόμενα, αλλά και τους ορεογραφικούς χαρακτήρες της, με έντονο ανάγλυφο κοντά στη θάλασσα, που συγκρατεί τα νέφη και προκαλεί βροχές στις ορεινές περιοχές. Ενδεικτική είναι η περίπτωση της οροσειράς της Πίνδου, όπου οι δυτικές

προσήνεμες πλευρές της λαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των κατακρημνίσεων, ενώ οι ανατολικές πλευρές δέχονται πολύ λιγότερες βροχοπτώσεις. Το πολυσχιδές ανάγλυφο της Ελλάδας δημιουργεί το πλαίσιο εμφανίσεως πυκνού δικτύου επιφανειακής απορροής, με υδρογραφικά δίκτυα μεγάλης πυκνότητας και τελικό αποδέκτη μια σειρά από μεγάλα (για τα δεδομένα της Ελλάδας) ποτάμια, που αποστραγγίζουν τα επιφανειακά και, εν μέρει, τα υπόγεια νερά, στο βαθμό που νερά πηγαίων εκφορτίσεων προστίθενται στην επιφανειακή απορροή.

Από πλευράς υδατικής διαχειρίσεως, η Ελλάδα έχει χαρακτηριστεί σαν μια χώρα «σπάταλη». Χαρακτηρισμός που έχει αποδοθεί και από επιστήμονες του ΟΟΣΑ σε έκθεσή τους για το Περιβάλλον στην Ελλάδα (Στουρνάρας, 2007).

3. Υδρολογικός κύκλος

Ο κύκλος του νερού, γνωστός και ως υδρολογικός κύκλος, είναι η συνεχής ανακύκλωση του νερού της Γης μέσα στην υδρόσφαιρα, στην ατμόσφαιρα και στη λιθόσφαιρα (έδαφος-υπέδαφος). Το συνεχές της κυκλικής διαδικασίας του κύκλου του νερού επιτυγχάνεται με την βοήθεια του ήλιου. Η κινητήρια δύναμη του κύκλου του νερού είναι η ηλιακή ενέργεια. Περίπου 174×10^{15} θερμικά watt ετησίως φτάνουν στην επιφάνεια της Γης μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Το νερό στη Γη βρίσκεται σε συνεχή κυκλοφορία, διαδικασία γνωστή ως υδρολογικός κύκλος, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 1.

Το νερό που προέρχεται από τη συμπύκνωση των υδρατμών στην ατμόσφαιρα πέφτει στην επιφάνεια της γης με τη μορφή κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι). Ένα μέρος αυτών των κατακρημνισμάτων εξατμίζεται κατά την κάθοδό του, ενώ ένα άλλο ποσοστό εξατμίζεται αφού φτάσει στην υγρή επιφάνεια της γης. Σημαντικό ποσοστό του κατακρημνιζόμενου νερού ρέει μέσω επιφανειακών υδάτων (ποτάμια, λίμνες) προς τη θάλασσα. Το υπόλοιπο διεισδύει στο έδαφος: είτε απορροφάται από τα φυτά και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω της διαπνοής, είτε καταλήγει στους υπόγειους υδροφορείς. Τα υπόγεια νερά μετακινούνται εντός του εδάφους μέσω των πόρων, ακολουθώντας το φυσικό πεδίο ροής (από περιοχές υψηλότερου προς περιοχές χαμηλότερου υδραυλικού δυναμικού), και εκβάλλουν τελικά σε πηγές, ποτάμια, λίμνες, θάλασσες και ωκεανούς, όπου και πάλι εξατμίζονται, ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο.



Σχήμα 1. Ο κύκλος του νερού. Πηγή: ιστοσελίδα Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης - Αποχέτευσης Βισαλτίας.

Το νερό που εξατμίζεται από τους ωκεανούς ετησίως είναι περίπου $5,04 \times 10^5 \text{ km}^3$. Από το νερό αυτό το μεγαλύτερο ποσοστό $4,58 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{year}$ κατακρημνίζεται ξανά στους ωκεανούς και το υπόλοιπο ($4,6 \times 10^4 \text{ km}^3/\text{year}$) μεταφέρεται μέσω της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια της γης. Οι κατακρημνίσεις στην επιφάνεια της γης αποθέτουν ετησίως $1,19 \times 10^5 \text{ km}^3$ νερό από το οποίο $7,3 \times 10^4 \text{ km}^3/\text{year}$ εξατμίζεται ξανά στην ατμόσφαιρα $4,5 \times 10^4 \text{ km}^3/\text{year}$ καταλήγει στους ωκεανούς μέσω ποταμών και το υπόλοιπο $1,0 \times 10^4 \text{ km}^3/\text{year}$ καταλήγει και αυτό στους ωκεανούς μέσω υπόγειων υδροφορέων (Maidment, 1993).

Η ολική ποσότητα του νερού στην υδρόσφαιρα είναι περίπου $1,43 \times 10^9 \text{ km}^3$. Ωστόσο, οι υδατικοί πόροι δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι ούτε χωρικά ούτε χρονικά. Για παράδειγμα, κατά τους θερινούς μήνες, μεγαλύτερες ποσότητες νερού αποθηκεύονται στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με την άνοιξη, ενώ το χειμώνα παρατηρείται αυξημένη αποθήκευση στο έδαφος συγκριτικά με το φθινόπωρο. Αντίστοιχα, κατά το φθινόπωρο, η αποθηκευμένη ποσότητα νερού σε λίμνες και ωκεανούς είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι τον χειμώνα.

Εάν από τη συνολική ποσότητα του νερού αφαιρέσουμε το νερό που είναι αποθηκευμένο στους παγετώνες, προκύπτει ότι το 98,2% του νερού της Γης βρίσκεται σε υγρή μορφή. Από αυτή την ποσότητα, το 98,9% αντιστοιχεί σε υπόγεια νερά, τα οποία συνιστούν την κύρια πηγή

υδατικών πόρων που είναι πρακτικά διαθέσιμοι για χρήση στη γεωργία, τη βιομηχανία και την ύδρευση (Maidment, 1993).

4. Πλαίσιο σχεδιασμού από «λίκνο σε λίκνο» (Cradle-to-Cradle)

Η προσέγγιση "από λίκνο σε λίκνο" (Cradle-to-Cradle - C2C) διαμορφώθηκε από τον χημικό Braungart και τον αρχιτέκτονα McDonough στο έργο τους *Cradle to Cradle: Rethinking the Way We Make Things* (McDonough & Braungart, 2002). Παρά ταύτα, ο όρος "cradle-to-cradle" εισήχθη για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970 από τον Stahel. Η φράση «από λίκνο σε λίκνο» (στα αγγλικά "cradle to cradle") είναι ένας όρος που προέρχεται από τη θεωρία της κυκλικής οικονομίας και περιγράφει ένα μοντέλο βιώσιμου σχεδιασμού προϊόντων και διαδικασιών, στο οποίο κανένα υλικό δεν πηγαίνει χαμένο. Αντίθετα, όλα τα υλικά ανακυκλώνονται ή επαναχρησιμοποιούνται επ' άπειρον — σαν να ξαναγεννιούνται συνεχώς, από ένα "λίκνο" σε ένα νέο "λίκνο". Στην κυριολεξία, το λίκνο είναι η κούνια ή το πρώτο κρεβατάκι ενός μωρού, και συμβολίζει την αρχή της ζωής. Στη φράση "από λίκνο σε λίκνο", συμβολίζει την αρχή του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Η βασική επιδίωξη της φιλοσοφίας αυτής είναι η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων μέσω πιο βιώσιμων πρακτικών παραγωγής, διανομής και απόρριψης, καθώς και μέσω της ενίσχυσης της κοινωνικής ευθύνης των προϊόντων (Visser, 2010).

Ορισμένες φορές, το C2C ταυτίζεται με την έννοια της «κλειστής εφοδιαστικής αλυσίδας», κατά την οποία το τέλος ζωής ενός προϊόντος σηματοδοτεί την έναρξη της διαδικασίας ανακύκλωσης (De Pauw, Karana, & Kandachar, 2013). Μέσα από την ανακύκλωση, τα υλικά επαναχρησιμοποιούνται είτε για την ίδια χρήση είτε για την παραγωγή νέων προϊόντων (Huang, Bird, & Heidrich, 2007).

Η προσέγγιση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή και την ανακύκλωση, αλλά δίνει ιδιαίτερη έμφαση στο στάδιο του σχεδιασμού (Baumgartner & Zielowski, 2007). Ο σχεδιασμός C2C αντλεί έμπνευση από τον «βιολογικό μεταβολισμό» και επιχειρεί να τον μεταφράσει σε έναν «τεχνικό μεταβολισμό» ροών υλικών εντός των βιομηχανικών συστημάτων (McDonough, Braungart, Anastas, & Zimmerman, 2003). Τα υφιστάμενα προϊόντα επανασχεδιάζονται ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αποδοτικότητα και να

περιορίζονται οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα εξαρτήματα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτρέπουν την κυκλική ανάκτηση ή επαναχρησιμοποίηση. Στην ουσία, πρόκειται για μία φιλοσοφία σχεδιασμού που διακρίνει δύο βασικές κατηγορίες υλικών: τα τεχνικά και τα βιολογικά (McDonough & Braungart, 2002).

Ο Lovins (2008) υποστηρίζει την πλήρη εξάλειψη των αποβλήτων. Σε περιπτώσεις όπου τα απόβλητα δεν είναι δυνατόν να εξαλειφθούν πλήρως, θα πρέπει να μετατρέπονται σε πολύτιμους πόρους. Η εφαρμογή του C2C προϋποθέτει την ενσωμάτωση διαδικασιών συλλογής και ανάκτησης εντός της ίδιας της εφοδιαστικής αλυσίδας των επιχειρήσεων (Kumar & Putnam, 2008), γεγονός που αναδεικνύει τη στενή σύνδεσή του με την ερευνητική κατεύθυνση της αντίστροφης εφοδιαστικής. Επιπλέον, η προσέγγιση προτείνει τη χρήση ανανεώσιμων υλικών και πηγών ενέργειας (McDonough et al., 2003). Τέλος, το C2C ενσωματώνει το ιδανικό της ποικιλομορφίας, αντλώντας πρότυπα από τα φυσικά οικοσυστήματα. Η προώθηση οικοσυστημάτων υγιών κοινοτήτων και επιχειρήσεων που συνυπάρχουν αρμονικά σε γεωγραφική εγγύτητα, υποστηρίζει την τοπική κοινωνική υπευθυνότητα.

Συνοψίζοντας, το C2C συνιστά ένα ολιστικό πλαίσιο, με στόχο τη δημιουργία αποδοτικών, βιώσιμων και απαλλαγμένων από απόβλητα συστημάτων. Αν και η εφαρμογή του εντοπίζεται κυρίως σε μικροεπίπεδο, το πλαίσιο αυτό υπερβαίνει τις διαδικασίες κατασκευής και σχεδιασμού, αφού μπορεί να αξιοποιηθεί και στην αρχιτεκτονική, την κατασκευή, τον αστικό σχεδιασμό και τις υποδομές. Περιλαμβάνει, επίσης, κοινωνικά κριτήρια τα οποία ενσωματώνονται στην πιστοποίηση που παρέχει ο φορέας c2ccertified.org, υποστηρίζοντας έτσι την εφαρμογή του. Πρόκειται για το πλαίσιο με τη μεγαλύτερη συνάφεια με την Κυκλική Οικονομία (Circular Economy - CE) και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται ως συνώνυμό της (Esposito et al., 2017a).

5. Κυκλική Οικονομία

Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το πρότυπο «από λίκνο σε λίκνο» (Cradle-to-Cradle) προσέφερε μία από τις πρώτες ολοκληρωμένες μορφές εφαρμογής κυκλικού σχεδιασμού, με στόχο την εξάλειψη των αποβλήτων και την αναγέννηση των υλικών μέσω

τεχνικών και βιολογικών κύκλων. Παρότι το C2C αποτελεί ένα εμβληματικό παράδειγμα, η κυκλική οικονομία συνιστά ένα ευρύτερο σύστημα σκέψης και πράξης, που επεκτείνεται πέραν του σχεδιασμού προϊόντων και καλύπτει συνολικά την παραγωγή, την κατανάλωση, την ενέργεια, τις υποδομές και τη διακυβέρνηση.

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας (Circular Economy - CE) άρχισε να αποκτά ιδιαίτερη δυναμική από τα τέλη της δεκαετίας του 1970, ως απάντηση στις αυξανόμενες προκλήσεις της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, της εξάντλησης των φυσικών πόρων και της ανάγκης αποσύνδεσης της οικονομικής ανάπτυξης από την εκτεταμένη κατανάλωση πρώτων υλών. Πολλοί ερευνητές έχουν επιχειρήσει να ορίσουν την κυκλική οικονομία με διαφορετικούς τρόπους. Καθώς το επιστημονικό πεδίο ωριμάζει, οι εμπειρίες από την εφαρμογή της και οι ακαδημαϊκές παρεμβάσεις δημιουργούν νέα ερωτήματα και επισημαίνουν την ανάγκη για εννοιολογική σαφήνεια.

Η κυκλική οικονομία αποτελεί μια προσέγγιση συστημικού επιπέδου για την οικονομική ανάπτυξη και συνιστά μια ουσιαστική μετατόπιση από το παραδοσιακό γραμμικό μοντέλο οικονομίας τύπου "εξαγωγή-παραγωγή-κατανάλωση-απόρριψη-εξάντληση" (extract-produce-consume-dispose-deplete, EPD2), προς ένα ανώτερο επίπεδο στο οποίο επιδιώκεται η επίτευξη της μηδενικής παραγωγής αποβλήτων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διατήρησης και της αποδοτικής χρήσης των πόρων, με αναθεώρηση των μεθόδων σχεδιασμού των παραγωγικών διαδικασιών και της επιλογής των υλικών, ώστε να εξασφαλίζεται αυξημένος κύκλος ζωής.

Η κυκλική οικονομία προωθεί τη διατήρηση κάθε μορφής πόρων –είτε υλικών είτε ενεργειακών– με στόχο την ανάκτηση και αξιοποίησή τους καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγικής αλυσίδας. Ακόμα και στο τέλος του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, το υλικό του μπορεί να επανενταχθεί ως εισροή σε νέα παραγωγική διαδικασία, εντός ενός κλειστού κυκλώματος, συμβάλλοντας στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας των πόρων, στην ενίσχυση των επιχειρηματικών και κοινωνικών ωφελειών, στη δημιουργία θέσεων εργασίας και στη διασφάλιση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Η κυκλική οικονομία έχει διατυπωθεί με ποικίλους τρόπους από διαφορετικούς ερευνητές. Αν και δεν υφίσταται ένας καθολικά αποδεκτός ορισμός, πολλοί από αυτούς είναι εν μέρει ή πλήρως αντιπροσωπευτικοί της ουσίας του όρου. Ο Πίνακας 1 συγκεντρώνει μια σειρά ορισμών που έχουν προταθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από την επιστημονική κοινότητα.

Με την πάροδο του χρόνου, η έννοια της κυκλικής οικονομίας έχει δεχθεί και σημαντική κριτική, κυρίως λόγω της ποικιλομορφίας των ορισμών και των διαφορετικών προσεγγίσεων που έχουν αναπτυχθεί. Αν και η κυκλική οικονομία έχει κερδίσει ευρεία απήχηση στον ακαδημαϊκό, πολιτικό και επιχειρηματικό χώρο η ερμηνεία και η πρακτική εφαρμογή της παραμένουν ανομοιογενείς. Το γεγονός αυτό έχει προκαλέσει σύγχυση και έχει περιορίσει τις δυνατότητες διεθνούς συνεργασίας (Ghisellini et al., 2016),

Ένα από τα βασικά ζητήματα που συνδέονται με την ερμηνεία του όρου είναι η δυσκολία αξιολόγησης των επιπτώσεων από τη μετάβαση σε κυκλική οικονομία. Παρόλα αυτά, πολυάριθμες μελέτες έχουν δείξει ότι η κυκλική οικονομία διαθέτει τη δυνατότητα να προσφέρει οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη – παρά το γεγονός ότι η εστίαση και οι δείκτες αξιολόγησης των μελετών διαφέρουν σημαντικά. Επιπλέον, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ακαδημία Επιστημών (EASAC, 2015), το επιστημονικό πεδίο που αφορά την κυκλική οικονομία βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο, γεγονός που οδηγεί στη χρήση ποσοτικών μοντέλων τα οποία βασίζονται σε απλοποιήσεις και παραδοχές που επιδέχονται κριτική.

Πίνακας 1. Ορισμοί και ερμηνείες της Κυκλικής Οικονομίας (Πηγή: Vasileios Rizos et al.2017)

Πηγή	Ορισμός / Ερμηνεία
Sauvé et al. (2016)	Η κυκλική οικονομία αναφέρεται στην παραγωγή και κατανάλωση αγαθών μέσω ροών υλικών κλειστού βρόχου που εσωτερικεύουν τις περιβαλλοντικές εξωτερικότητες και συνδέονται με την εξόρυξη παρθένων πόρων και τη δημιουργία αποβλήτων (συμπεριλαμβανομένης της ρύπανσης).
Preston (2012)	Η κυκλική οικονομία είναι μια προσέγγιση που μετασχηματίζει τη λειτουργία των πόρων στην οικονομία, όπου τα απόβλητα καθίστανται πολύτιμες εισροές σε νέες διαδικασίες και τα προϊόντα επιδιορθώνονται, επαναχρησιμοποιούνται ή αναβαθμίζονται αντί να απορρίπτονται.
EEA (2014)	Η κυκλική οικονομία επικεντρώνεται κυρίως στις φυσικές και υλικές πτυχές των πόρων, δίνοντας έμφαση στην ανακύκλωση, τον περιορισμό και την επαναχρησιμοποίηση φυσικών εισροών, και στη χρήση αποβλήτων ως πόρων για τη μείωση της πρωτογενούς κατανάλωσης.
Mitchell (2015)	Η κυκλική οικονομία είναι εναλλακτική στο γραμμικό μοντέλο (παραγωγή, χρήση, απόρριψη), όπου οι πόροι διατηρούνται σε χρήση για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο διάστημα, και στη συνέχεια ανακτώνται και επαναχρησιμοποιούνται.
Heck (2006)	Η μετάβαση σε κυκλική οικονομία προϋποθέτει την καθιέρωση βιώσιμων ενεργειακών λύσεων και δράσεων σε τομείς όπως η γεωργία, το έδαφος, το νερό και η βιοποικιλότητα.
Su et al. (2013)	Η κυκλική οικονομία επεκτείνεται σε ζητήματα ενεργειακής αποδοτικότητας, διαχείρισης γης και προστασίας φυσικών πόρων όπως το έδαφος και το νερό.
Bastein et al. (2013)	Η μετάβαση σε κυκλική οικονομία αποτελεί θεμέλιο για ένα ανθεκτικό βιομηχανικό σύστημα, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα και δημιουργώντας νέες μορφές οικονομικής δραστηριότητας και απασχόλησης.
EEA (2016)	Η κυκλική οικονομία προσφέρει ευκαιρίες για ευημερία, ανάπτυξη και εργασία, ενώ μειώνει τις περιβαλλοντικές πιέσεις και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους φυσικούς πόρους.
Ghisellini et al. (2016)	Η ριζική αναδιαμόρφωση των διαδικασιών κατά τον κύκλο ζωής των προϊόντων από καινοτόμους φορείς μπορεί να επιφέρει υλική ή ενεργειακή ανάκτηση και να βελτιώσει συνολικά το οικονομικό μοντέλο.
ADEME (2014)	Στόχος της κυκλικής οικονομίας είναι η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατανάλωση πόρων και η βελτίωση της κοινωνικής ευημερίας.
Ellen MacArthur Foundation (2013a; 2013b; 2015a)	Η κυκλική οικονομία είναι ένα βιομηχανικό σύστημα που αποκαθίσταται ή αναγεννάται μέσω σχεδιασμού, αντικαθιστώντας το 'τέλος ζωής' με την αποκατάσταση, προωθώντας ανανεώσιμες πηγές και αποφεύγοντας τοξικές ουσίες, με στόχο την επαναχρησιμοποίηση και την εξάλειψη αποβλήτων.
European Commission (2015a)	Η κυκλική οικονομία διατηρεί την αξία προϊόντων, υλικών και πόρων στην οικονομία για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο διάστημα, περιορίζοντας τα απόβλητα και συμβάλλοντας σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών και αποδοτικής χρήσης πόρων.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η κυκλική οικονομία αποτελεί μια εναλλακτική προσέγγιση σε σχέση με το παραδοσιακό γραμμικό οικονομικό μοντέλο, το οποίο βασίζεται στη λογική «παραγωγή – χρήση – απόρριψη». Σε ένα κυκλικό σύστημα, οι πόροι διατηρούνται σε χρήση για το μεγαλύτερο δυνατό χρονικό διάστημα, αξιοποιείται στο έπακρο η αξία τους κατά τη διάρκεια της χρήσης τους, και στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους, τα προϊόντα και τα υλικά ανακτώνται και αναγεννώνται [Ghosh, 2021].

Η κυκλική οικονομία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη της βιώσιμης ανάπτυξης, στην κυκλοφορία και διατήρηση των πόρων, και στην προώθηση της επαναχρησιμοποίησης, με στόχο το κλείσιμο του κύκλου των υλικών και την ιεραρχική αξιοποίηση των χρησιμοποιημένων πόρων. Μέσω αυτών των μηχανισμών επιδιώκεται η πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων και η μετατροπή των υπολειμματικών ροών σε νέες (δευτερογενείς) πρώτες ύλες [Ellen MacArthur Foundation, 2012].

Το γραμμικό μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης έχει επικρατήσει σε παγκόσμια κλίμακα τα τελευταία εκατόν πενήντα χρόνια. Στο πλαίσιο της εφοδιαστικής αλυσίδας που χαρακτηρίζεται από αυτό το μοντέλο, τα προϊόντα κατασκευάζονται από πρώτες ύλες, πωλούνται, χρησιμοποιούνται και, στο τέλος του κύκλου ζωής τους, απορρίπτονται ως απόβλητα είτε σε χώρους υγειονομικής ταφής είτε μέσω καύσης. Οι πρώτες ύλες εξάγονται μία φορά από τη φύση και, μετά τη χρήση του αντίστοιχου προϊόντος, καταλήγουν συνήθως στα απόβλητα. Το μοντέλο αυτό λειτουργεί με γραμμική λογική, και για τον λόγο αυτό συχνά αναφέρεται ως "γραμμικό μοντέλο". Ωστόσο, το συγκεκριμένο σύστημα δεν ευνοεί την περιβαλλοντική βιωσιμότητα ούτε την αποδοτική χρήση των φυσικών πόρων [Ghosh, 2021].

Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται διαρκώς, η αστικοποίηση και η βιομηχανοποίηση επιταχύνονται, ενώ η κατανάλωση πόρων εντείνεται, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθίστανται ολοένα και πιο ανησυχητικές. Σε αυτό το πλαίσιο, γίνεται σαφές ότι η διατήρηση της υφιστάμενης πορείας του γραμμικού οικονομικού μοντέλου δεν είναι βιώσιμη για το μέλλον [Ghosh, 2021].

Πέραν των προφανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, σημαντική είναι και η εννοιολογική διάκριση μεταξύ της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας των συστημάτων διαχείρισης υλικών. Η οικο-αποδοτικότητα (eco-efficiency) βασίζεται στη λογική περιορισμού των αρνητικών επιπτώσεων μέσω της μείωσης της κατανάλωσης, της ταχύτητας και της τοξικότητας των ροών υλικών. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση διατηρεί τη γραμμική δομή της παραγωγής και της κατανάλωσης, καθότι τα προϊόντα δεν έχουν σχεδιαστεί εξαρχής για

επαναχρησιμοποίηση ή πραγματική ανακύκλωση. Συχνά, οι ανακυκλούμενες ύλες υφίστανται υποβάθμιση ποιότητας (downcycling), γεγονός που περιορίζει τη λειτουργικότητά τους και παρατείνει τον γραμμικό χαρακτήρα του συστήματος [Braungart & McDonough, 2002].

Σε αντιδιαστολή με αυτή τη λογική της ελαχιστοποίησης, η έννοια της οικο-αποτελεσματικότητας (eco-effectiveness) επιδιώκει την ανασχεδίαση των προϊόντων και των αντίστοιχων ροών υλικών, ώστε να εντάσσονται σε κυκλικούς "μεταβολισμούς" τύπου «από λίκνο σε λίκνο» (cradle-to-cradle). Σκοπός δεν είναι μόνο η μείωση των επιπτώσεων, αλλά η θετική συμβολή των προϊόντων στο φυσικό και οικονομικό περιβάλλον, διατηρώντας την αξία των υλικών ως πόρων και ενισχύοντας τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα μέσω της αναβάθμισής τους (upcycling). Έτσι, καλλιεργείται μια ενισχυτική και αμοιβαία σχέση μεταξύ οικονομίας και οικολογίας, η οποία ξεπερνά τα όρια της παραδοσιακής γραμμικής σκέψης [Braungart & McDonough, 2002].

Η ανάγκη για μετάβαση σε πιο κυκλικά πρότυπα έγινε ήδη εμφανής από τη Διάσκεψη της Στοκχόλμης, όπου τέθηκαν οι βάσεις για την ανακύκλωση και την ανακύκλωση πόρων. Στη βάση αυτής της θεώρησης, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής, οι ερευνητές, οι μεγάλες πολυεθνικές εταιρείες και οι φορείς εφαρμογής στρέφουν την προσοχή τους στην αναδιάρθρωση του κυρίαρχου οικονομικού μοντέλου, με σκοπό τη μετάβαση από τη γραμμική προς μια κυκλική οικονομία. Στο Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ του 2012 στο Νταβός, το Ίδρυμα Ellen MacArthur (EMF) σε συνεργασία με την εταιρεία McKinsey δημοσίευσαν μελέτη στην οποία αναλύονται τα πιθανά οφέλη από την υιοθέτηση της κυκλικής οικονομίας. Σύμφωνα με την εν λόγω μελέτη, μόνο για συγκεκριμένους τομείς της μεταποίησης στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η μετάβαση αυτή θα μπορούσε να δημιουργήσει οικονομικό όφελος ύψους 630 δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως [Ellen MacArthur Foundation, 2012].

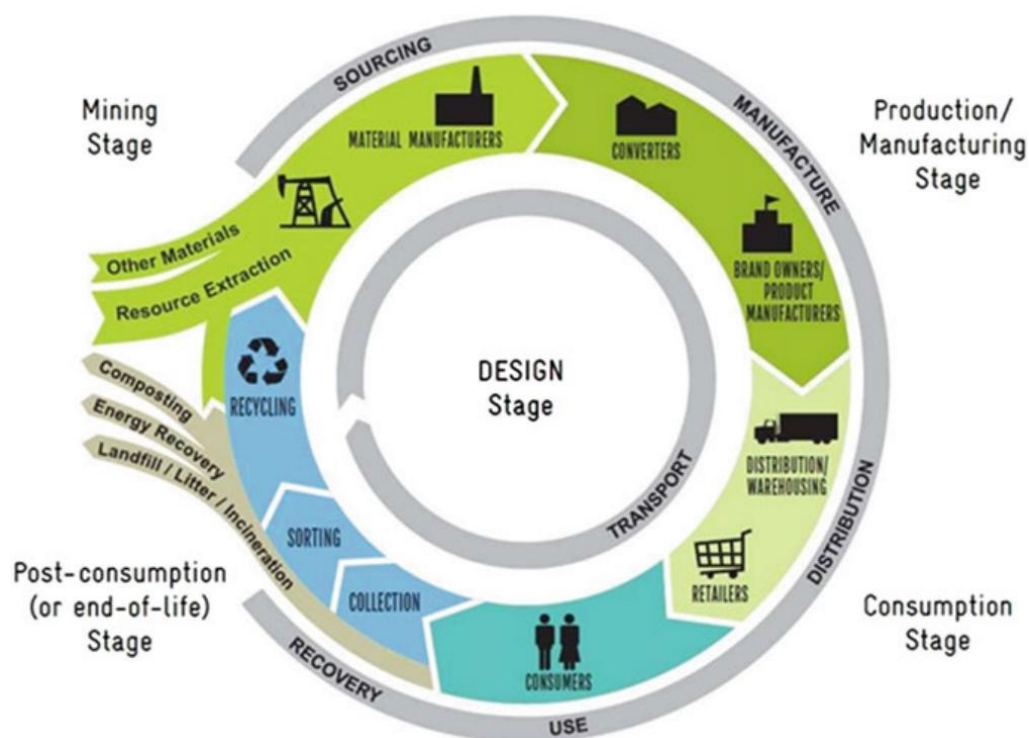
Η κυκλική οικονομία στοχεύει στην αποσύνδεση της οικονομικής ανάπτυξης από την κατανάλωση φυσικών πόρων, μέσω πρακτικών όπως η κοινή χρήση, η ενοικίαση, η επαναχρησιμοποίηση, η επισκευή, η ανακατασκευή και η ανακύκλωση, δημιουργώντας έναν (σχεδόν) κλειστό κύκλο που περιορίζει στο ελάχιστο τις απώλειες υλικών. Η υιοθέτηση της κυκλικής οικονομίας σε οποιοδήποτε προϊόν ή διαδικασία ξεκινά ήδη από το στάδιο της σύλληψης και του σχεδιασμού. Υπάρχουν διάφορες θεωρητικές προσεγγίσεις για τον ορισμό και την κατανόηση της έννοιας της κυκλικής οικονομίας [Ghosh, 2021].

6. Κυκλική Προσέγγιση στη Βιομηχανία και το Περιβάλλον

Ο σχεδιασμός ενός προϊόντος θα πρέπει να στοχεύει στην επιμήκυνση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του. Ωστόσο, λόγω του κορεσμού που παρατηρείται στις αγορές για πολλές κατηγορίες προϊόντων, οι επιχειρήσεις επιλέγουν συχνά να σχεδιάζουν προϊόντα μιας χρήσης ή με περιορισμένη διάρκεια ζωής, ενισχύοντας έτσι τον κύκλο αντικατάστασης. Η επιμήκυνση του χρόνου ζωής ενός προϊόντος δεν συμβάλλει μόνο στην εξοικονόμηση υλικών πόρων, αλλά επιτρέπει και την κατανομή του ανθρακικού αποτυπώματος σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Επομένως, καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικό να ενισχυθεί ο σχεδιασμός ηλεκτρικού εξοπλισμού που να διευκολύνει την αναβάθμιση και την επιδιόρθωσή του, ώστε να αποφεύγεται η πρόωρη απόρριψη και να ενισχύεται η βιώσιμη χρήση των συσκευών.

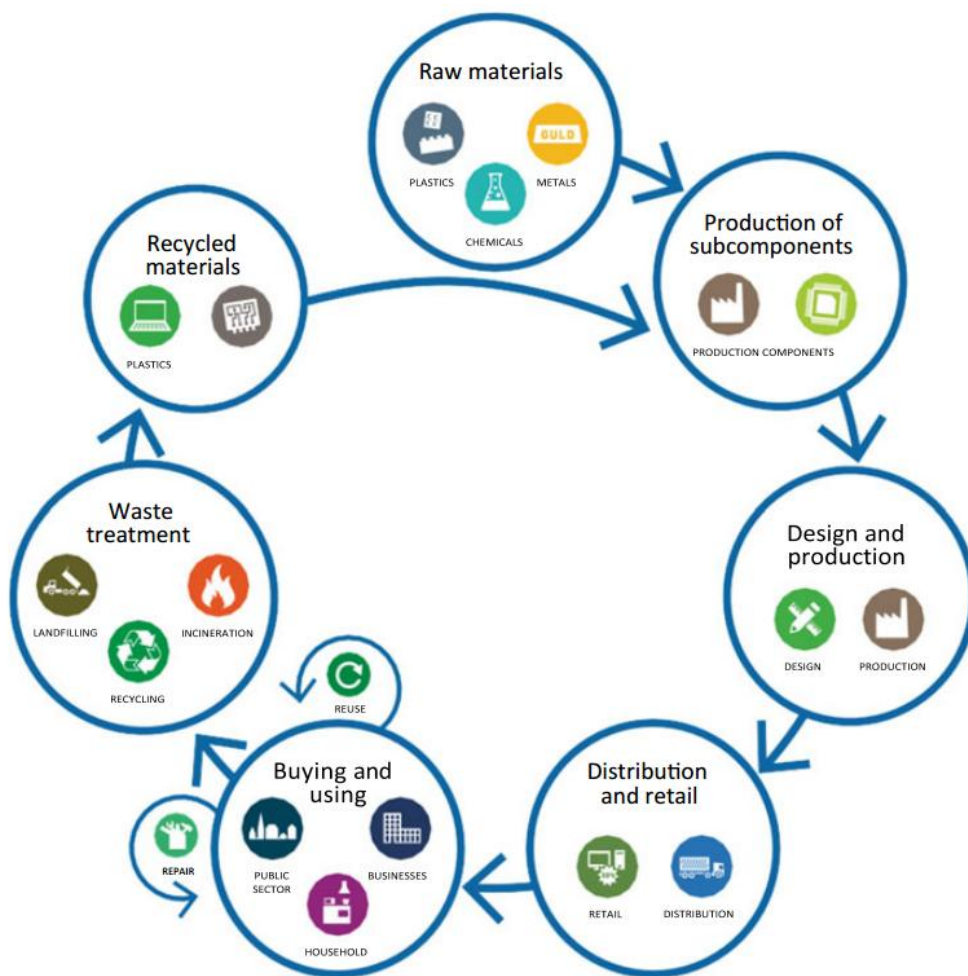
Η κυκλική οικονομία αποτυπώνεται σχηματικά μέσα από διαγράμματα όπως αυτό του σχήματος 1, τα οποία παρουσιάζουν τις ροές των υλικών σε έναν κλειστό βρόχο παραγωγής και κατανάλωσης, δίνοντας έμφαση στη διατήρηση της αξίας των πόρων για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα .



Σχήμα 2. Σχηματική αναπαράσταση της κυκλικής οικονομίας βάσει της προσέγγισης των 6R (Reduce, Reuse, Recycle, Recover, Redesign, Remanufacture).

Η κυκλική οικονομία υπερβαίνει την έννοια της ανακύκλωσης και βασίζεται σε ένα αποκαταστατικό βιομηχανικό σύστημα, το οποίο αντιμετωπίζει τα απόβλητα ως πολύτιμους πόρους. Όταν ένα προϊόν φθάνει στο τέλος της ωφέλιμης ζωής του, γίνεται προσπάθεια οι χρησιμοποιημένες πρώτες ύλες να παραμείνουν εντός των ορίων του κύκλου παραγωγής και να επαναχρησιμοποιηθούν με τρόπο που να δημιουργείται νέα προστιθέμενη αξία (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Το Σχήμα 3 (Denmark without Waste II, 2015) παρουσιάζει μια ενδεικτική αλυσίδα αξίας στον τομέα του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, η οποία περιλαμβάνει όλα τα στάδια: από τον αρχικό σχεδιασμό, την προμήθεια πρώτων υλών, την παραγωγή υποσυστημάτων και υπομονάδων, τη συναρμολόγηση και κατασκευή, την αποθήκευση, τη διανομή και τη λιανική πώληση, έως και τη φάση χρήσης, την επεξεργασία αποβλήτων και, τέλος, την ανακύκλωση.



Σχήμα 3. Αλυσίδα αξίας κυκλικής οικονομίας για τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Το γραμμικό μοντέλο «παραγωγή – χρήση – απόρριψη» βασίζεται σε μεγάλες ποσότητες άμεσα διαθέσιμων φυσικών πόρων και ενέργειας, ωστόσο αυτό το υπόδειγμα κρίνεται ολοένα και πιο ακατάλληλο για τις σύγχρονες πραγματικότητες. Η αποδοτικότητα των πόρων (resource efficiency) και η οικο-αποδοτικότητα (eco-efficiency) αποτελούν βασικά κίνητρα για την ενίσχυση της βιωσιμότητας της οικονομικής ανάπτυξης, ιδιαίτερα σε συνθήκες επισφαλούς ανάπτυξης [Hicks & Dietmar, 2007].

Στις αναπτυσσόμενες οικονομίες, η διαχείριση των αποβλήτων εντάσσεται στο πλαίσιο των αρχών των 3R (Μείωση – Επαναχρησιμοποίηση – Ανακύκλωση), ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής που στηρίζεται στην κυκλική οικονομία. Η τελευταία περιγράφει ένα βιομηχανικό μοντέλο με αποκαταστατικό χαρακτήρα, το οποίο βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επιδιώκει την ελαχιστοποίηση, παρακολούθηση και εξάλειψη της χρήσης τοξικών χημικών, ενώ αποσκοπεί στην εξάλειψη των αποβλήτων μέσω επιμελούς σχεδιασμού. Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, τα ανθεκτικά προϊόντα θα πρέπει να σχεδιάζονται με τρόπο που να επιτρέπουν την επιδιόρθωση και όχι την αντικατάσταση, ενώ τα βιολογικά υλικά να διαχειρίζονται με τρόπο ώστε να μπορούν να επιστρέφουν με ασφάλεια στη βιόσφαιρα. Η εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας βασίζεται στην αποδοτικότητα των πόρων και την οικο-αποδοτικότητα και στοχεύει στην υιοθέτηση ενός συνόλου βασικών μέτρων για τη μετάβαση σε μια περισσότερο κυκλική, «πράσινη» και βιώσιμη οικονομία (Yuan et al., 2006).

Η βιβλιογραφική επισκόπηση αποδεικνύει ότι υπάρχει πληθώρα πρωτοβουλιών που προωθούν τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, είτε με το ίδιο όνομα είτε με παραπλήσιες προσεγγίσεις. Είναι, ωστόσο, πλέον σαφές ότι η κυκλική οικονομία συνιστά αναπόφευκτη ανάγκη στον σύγχρονο κόσμο.

Η κυκλική κατανάλωση αποτελεί ουσιώδες στοιχείο του συστήματος της κυκλικής οικονομίας, συμβάλλοντας τόσο στη βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη όσο και στην αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής υποβάθμισης και της εξάντλησης των φυσικών πόρων. Η εφαρμογή της κυκλικής κατανάλωσης στηρίζεται επίσης στις αρχές των 3R (Μείωση – Ανακύκλωση – Επαναχρησιμοποίηση), και υποστηρίζει τη μετατροπή των αποβλήτων σε πολύτιμα προϊόντα, οδηγώντας στη δημιουργία μιας κοινωνίας μηδενικών αποβλήτων.

Η κυκλική οικονομία καλύπτει το σύνολο της κυκλοφορίας των πόρων και των κλειστών βρόχων σε τομείς όπως η διαχείριση στερεών και υγρών αποβλήτων, η μείωση της ρύπανσης σε νερό, αέρα και έδαφος, η διατήρηση φυσικών πόρων, η "πρασινοποίηση" των παραγωγικών κλάδων και άλλες συναφείς δραστηριότητες.

Η προσέγγιση της κυκλικής οικονομίας μπορεί να αποφέρει πολλαπλά οφέλη, αξιοποιώντας επιχειρηματικές δυνατότητες που έως σήμερα παραμένουν ανεκμετάλλευτες. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η αντικατάσταση μόλις του 20% των πλαστικών συσκευασιών μίας χρήσης με επαναχρησιμοποιούμενες εναλλακτικές λύσεις μπορεί να δημιουργήσει οικονομική ευκαιρία αξίας τουλάχιστον 10 δισεκατομμυρίων δολαρίων (Ellen MacArthur Foundation, 2017, 2019).

Τα μοντέλα επαναχρησιμοποίησης μπορούν να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τις επιχειρήσεις, όπως βελτιωμένη εμπειρία χρήστη, πρόσβαση σε χρήσιμα δεδομένα καταναλωτικής συμπεριφοράς, ενίσχυση της πιστότητας στο εμπορικό σήμα και εξοικονόμηση κόστους. Συγκεκριμένα, τα οφέλη από την εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης περιλαμβάνουν:

1. **Διεθνής κινητοποίηση για την αντιμετώπιση της ρύπανσης από πλαστικό:** Περισσότεροι από 350 οργανισμοί έχουν υιοθετήσει το όραμα για τη δημιουργία μιας κυκλικής οικονομίας στον τομέα των πλαστικών, συμμετέχοντας στη Διεθνή Δέσμευση για τη Νέα Οικονομία του Πλαστικού (New Plastics Economy Global Commitment). Επιπλέον, περισσότεροι από 100 επιχειρηματικοί φορείς που έχουν υπογράψει τη Δέσμευση, έχουν αναλάβει τη δέσμευση να μεταβούν από συσκευασίες μίας χρήσης σε επαναχρησιμοποιούμενες μέχρι το έτος 2025 (Ellen MacArthur Foundation, 2019).
2. **Μετατόπιση καταναλωτικών προτιμήσεων:** Σύμφωνα με τα ευρήματα του Kantar World Panel (2017), καινοτόμα μοντέλα επαναχρησιμοποίησης μπορούν να επιφέρουν σημαντική μεταβολή στις προτιμήσεις των καταναλωτών, προσφέροντας αισθητικά και λειτουργικά ανώτερες συσκευασίες. Αυτές οι βελτιώσεις ενδέχεται να διευκολύνουν τη συλλογή πολύτιμων δεδομένων και να επιτρέψουν την εξατομίκευση των προϊόντων σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών.
3. **Οφέλη για το κλίμα και το περιβάλλον:** Η μετάβαση από τα προϊόντα μίας χρήσης σε λύσεις επαναχρησιμοποίησης δύναται να συμβάλει αποφασιστικά στη μείωση της πλαστικής ρύπανσης, ενώ παράλληλα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και άλλων περιβαλλοντικών εξωτερικοτήτων (Ellen MacArthur Foundation, 2014).

Οι αρχές της κυκλικής οικονομίας, παρότι αποτυπώνονται κυρίως μέσα από τη ροή υλικών και προϊόντων, δεν περιορίζονται σε αυτά τα πεδία εφαρμογής. Αντιθέτως, βρίσκουν ουσιαστική έκφραση και στον κύκλο του νερού, ιδιαίτερα μέσω της αξιοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων ως πολύτιμοι δευτερογενούς πόρου. Πρόκειται για μία πρακτική που εναρμονίζεται

πλήρως με τη λογική της κυκλικής οικονομίας και εντάσσεται στη συστημική προσέγγιση Nexus, όπου νερό, ενέργεια, τροφή και οικοσύστημα αντιμετωπίζονται ως αλληλεξαρτώμενοι τομείς. Όπως τα προϊόντα σχεδιάζονται με στόχο την επανένταξή τους στον παραγωγικό κύκλο, έτσι και το νερό που προκύπτει από την επεξεργασία λυμάτων μπορεί να επανεισυχθεί στον κύκλο κατανάλωσης – καλύπτοντας ανάγκες όπως η άρδευση, η βιομηχανική χρήση ή η τεχνητή αναπλήρωση υπόγειων υδροφορέων. Η δυναμική αυτή, καθώς και οι εφαρμογές της, θα αναπτυχθούν εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα της εργασίας.

7. Κυκλικότητα του Νερού: Από τη Θεωρία στην Πράξη της Διαχείρισης

Το σχήμα 4 απεικονίζει τον κύκλο του νερού, περιλαμβάνοντας όχι μόνο τις καταναλωτικές χρήσεις που σχετίζονται συνήθως με το υδατικό αποτύπωμα, αλλά και επιπλέον διεργασίες που συνδέονται με την κυκλικότητα του υδρολογικού κύκλου, η οποία έχει αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενη ενότητα. Αν και η αναπαράσταση αυτή αποτελεί αναμφίβολα μια απλοποίηση της πραγματικότητας, προσφέρει μια χρήσιμη εικόνα για το ποιες ροές σχετίζονται με την εκτίμηση του υδατικού αποτυπώματος και ποια τμήματα αυτών των ροών θα μπορούσαν, υπό προϋποθέσεις, να χαρακτηριστούν ως κυκλικά — ή και όχι. Η αφετηρία του νερού τοποθετείται στη βροχόπτωση, η οποία αντιστοιχεί στο λεγόμενο «πράσινο» υδατικό αποτύπωμα. Αυτός ο τύπος αποτυπώματος μπορεί, υπό κατάλληλη διαχείριση, να θεωρηθεί κατ' εξοχήν κυκλικός. Ωστόσο, τόσο η συλλογή του βρόχινου νερού όσο και οι αλλαγές στις χρήσεις γης δύνανται να επηρεάσουν σημαντικά τη διαθεσιμότητα νερού μέσω επιφανειακής απορροής από λεκάνες απορροής, καθώς και τους ρυθμούς ανατροφοδότησης των υπόγειων υδροφορέων. Επιπλέον, εγείρονται σύνθετα ηθικά ζητήματα αναφορικά με το ποιος έχει το δικαίωμα αξιοποίησης αυτών των πόρων «πράσινου» νερού και με ποια κριτήρια θα πρέπει να προτεραιοποιείται η κατανομή τους.



Σχήμα 4. Απεικόνιση της κυκλικότητας του νερού με παραδείγματα μεταφοράς υδατικών πόρων, τόσο σε τοπική όσο και σε ευρύτερη κλίμακα. Οι ροές αυτές επηρεάζονται επίσης από τις διεθνείς ή εγχώριες εμπορικές συναλλαγές προϊόντων, τα οποία ενσωματώνουν κρυφή κατανάλωση εικονικού νερού που σχετίζεται με τη χρήση τους (χωρίς να απεικονίζεται στο σχήμα).

Πράγματι, το πρώτο και ουσιαστικό βήμα για τον ορισμό της κυκλικότητας του νερού είναι η επιλογή από την κοινωνία των περιβαλλοντικών στόχων που επιδιώκεται να επιτευχθούν. Σε ένα πλαίσιο συνεχώς μεταβαλλόμενο, όπου σχεδόν κάθε οικοσύστημα επηρεάζεται σε κάποιο βαθμό από ανθρώπινες δραστηριότητες, και πολλά βρίσκονται ήδη σε διαδικασία μετασχηματισμού, ο καθορισμός περιβαλλοντικών στόχων απαιτεί έναν ρεαλιστικό απολογισμό του τι είναι εφικτό. Ειδικότερα, προκύπτει η ανάγκη να αναγνωριστούν ποιες οικοσυστημικές υπηρεσίες είναι κρίσιμο να διατηρηθούν — και ποιες επιθυμεί η κοινωνία να προστατεύσει.

Το επόμενο στάδιο είναι ο καθορισμός των απαιτήσεων σε νερό που σχετίζονται με την επίτευξη των επιλεγμένων περιβαλλοντικών στόχων. Οι απαιτήσεις αυτές διαφέρουν ανάλογα με το οικοσύστημα και αποτελούν έναν συνδυασμό ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού. Με άλλα λόγια, πρόκειται για το «υδρολογικό καθεστώς» ενός οικοσυστήματος — που μπορεί να περιλαμβάνει, για παράδειγμα, τη χρονική κατανομή και

την ένταση ροών σε έναν ποταμό ή τις διακυμάνσεις πίεσης σε πηγές που τροφοδοτούνται από υπόγεια ύδατα.

Το τελικό βήμα αφορά την ύπαρξη ισχυρών μηχανισμών ρύθμισης, ώστε να διασφαλίζεται η τήρηση του συμφωνημένου μεριδίου νερού για το περιβάλλον. Μόνον όταν έχουν τεθεί σαφή πλαίσια και δεσμεύσεις μπορεί να ξεκινήσει ο σχεδιασμός για τη βελτιστοποίηση της κυκλικότητας στη χρήση του νερού.

Τα βασικά στοιχεία του υδρολογικού κύκλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4 και περιλαμβάνουν τη βροχόπτωση, την υπόγεια ανατροφοδότηση, την εξατμισοδιαπνοή, την αποθήκευση σε λίμνες και ταμιευτήρες, καθώς και τη ροή επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Το νερό που απαιτείται για τη γεωργική παραγωγή, τις οικιακές χρήσεις ή τις εμπορικές δραστηριότητες προέρχεται είτε από βροχόπτωση, είτε από επιφανειακούς ή υπόγειους πόρους, είτε μέσω διαδικασιών ανακύκλωσης. Συνεπώς, πριν οριστεί τι συνιστά «κυκλική χρήση» του νερού, πρέπει να είναι σαφώς καθορισμένο το υδατικό ισοζύγιο του συστήματος.

Ωστόσο, το ισοζύγιο αυτό είναι μεταβλητό, καθώς διαδικασίες όπως η κλιματική αλλαγή και οι μεταβολές στη χρήση γης ασκούν σημαντικές επιδράσεις στη διαθεσιμότητα του νερού, τροποποιώντας τους ρυθμούς απορροής και υπόγειας ανατροφοδότησης. Οι διεργασίες αυτές δεν είναι γραμμικές και συχνά παρουσιάζουν υψηλό βαθμό αβεβαιότητας, καθιστώντας τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη ιδιαίτερα απαιτητική (Fowler et al., 2016). Επιπρόσθετα, η γεωγραφική κλίμακα στην οποία εκδηλώνονται οι υδρολογικές ροές αποτελεί άλλη μία σημαντική πρόκληση: ενώ ορισμένες διεργασίες του κύκλου λειτουργούν σε τοπικό επίπεδο, άλλες εκτείνονται σε παγκόσμια κλίμακα, καθώς ο κύκλος του νερού αγνοεί πλήρως τα γεωπολιτικά σύνορα.

Μια υποθετική μονάδα επεξεργασίας νερού απεικονίζεται επίσης στο Σχήμα 4, προκειμένου να καταδειχθεί ότι τα υγρά απόβλητα μπορούν να υποβληθούν σε κατάλληλη επεξεργασία ώστε να ανακτήσουν την «κυκλικότητά» τους. Αυτό σημαίνει ότι τα ίδια προϊόντα ενδέχεται να προκαλούν παραγωγή μεγαλύτερης ή μικρότερης ποσότητας γκρίζου νερού, ανάλογα με το επίπεδο και την αποδοτικότητα της επεξεργασίας των λυμάτων. Η διαπίστωση αυτή υπογραμμίζει παράλληλα ότι τόσο η διαδικασία επεξεργασίας όσο και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται επηρεάζουν ουσιαστικά τον βαθμό στον οποίο η χρήση του νερού εντάσσεται στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Πρόκειται για χαρακτηριστικό παράδειγμα στο οποίο η αξιολόγηση της κυκλικότητας του νερού αποσυνδέεται από το απλό ισοζύγιο μάζας, και

μετατοπίζεται σε όρους που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας, χημικών και λοιπών αναλώσιμων πόρων.

Η αξιολόγηση της κυκλικότητας στη χρήση του νερού εξαρτάται σαφώς από τον τρόπο με τον οποίο ορίζεται η ίδια η έννοια της κατανάλωσης, με βάση τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Πιο πρακτικό ίσως είναι να εστιάσουμε στον τρόπο με τον οποίο η κατανάλωση νερού και οι συναφείς δραστηριότητες επηρεάζουν την παραγωγή γκρίζου νερού — χωρίς να παραβλέπεται ότι ορισμένες χρήσεις, αν και δεν καταναλώνουν ποσοτικά το νερό, απαιτούν την παρουσία του για την αραίωση και εξουδετέρωση ρυπαντικών φορτίων που θα κατέληγαν στο περιβάλλον. Η επένδυση στην επεξεργασία του νερού ενισχύει την αξία του και δημιουργεί πρόσφορες συνθήκες για επαναχρησιμοποίηση.

Συνεπώς, ως κυκλική χρήση νερού μπορεί να νοηθεί εκείνη που εντάσσεται σε έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο — όπου η διαδικασία συλλογής και ανάκτησης του νερού μπορεί να επαναλαμβάνεται συνεχώς, χωρίς να παρατηρείται απώλεια του φυσικού πόρου ή επιβάρυνσή του με ρύπους. Υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας, μια προσέγγιση που θεωρείται αποτελεσματική είναι η αποτίμηση του συνολικού υδατικού αποτυπώματος και η αφαίρεση από αυτό του κυκλικού αποτυπώματος (το οποίο θεωρείται βιώσιμο και με αμελητέες περιβαλλοντικές επιπτώσεις). Αυτό που απομένει είναι το μη κυκλικό, μη βιώσιμο αποτύπωμα, το οποίο θα πρέπει να αποτελεί αντικείμενο μείωσης και περιορισμού. Ουσιαστικά, η χρήση κυκλικού νερού πρέπει να αντιμετωπίζεται ως δραστηριότητα με σχεδόν μηδενική περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, οι περιοχές που παρουσιάζουν υδατική ανεπάρκεια καλούνται να αξιοποιήσουν κάθε διαθέσιμη στρατηγική για τη διατήρηση και τη βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού. Τέτοιες στρατηγικές περιλαμβάνουν την ορθολογική διαχείριση της άρδευσης στη γεωργία, τη συλλογή και αξιοποίηση του βρόχινου νερού και των υγρών αποβλήτων, καθώς και την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων ακόμη και ως πόσιμο νερό (Angelakis et al., 2018). Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα λύματα υφίστανται επεξεργασία και επανεισάγονται σε υπόγειους υδροφορείς, είτε για να χρησιμοποιηθούν αργότερα, είτε για την αποτροπή διείσδυσης αλμυρού νερού σε παράκτιες περιοχές (Zuurbier et al., 2017).

Ωστόσο, σε συγκεκριμένα κοινωνικά και πολιτισμικά πλαίσια, η επαναχρησιμοποίηση οικιακών λυμάτων για ανθρώπινη κατανάλωση καθίσταται αδύνατη λόγω έντονης κοινωνικής αντίστασης ή ακόμη και πλήρους απόρριψης από την κοινότητα (Duong & Saphores, 2015).

Σε τέτοιες περιπτώσεις, έχει εφαρμοστεί εναλλακτική προσέγγιση, με την αξιοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων για αρδευτικούς σκοπούς, όπως η καλλιέργεια ανθοκομικών ειδών ή αμπελώνων, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη νέων δραστηριοτήτων σε οικονομικά ευάλωτες περιοχές (Duong & Saphores, 2015).

Το Σχήμα 4 δεν περιλαμβάνει την αφαλάτωση, παρότι αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει μια ευρύτερη λύση για την αντιμετώπιση της υδατικής ανεπάρκειας, και ήδη εφαρμόζεται σε πολλές άνωδρες —και συγκριτικά εύπορες— περιοχές ανά τον κόσμο. Παρόλο που προς το παρόν πρόκειται για μία ιδιαίτερα δαπανηρή τεχνολογία, εάν μελλοντικά καταστεί οικονομικά προσβάσιμη, θεωρητικά θα μπορούσε να επιτρέψει την παραγωγή γλυκού νερού από τους ωκεανούς, προσφέροντας πρόσβαση σε μια σχεδόν απεριόριστη πηγή νερού.

Ωστόσο, για να θεωρηθεί η αφαλάτωση ως βιώσιμη, περιβαλλοντικά φιλική και συμβατή με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, απαιτείται εξέταση ολόκληρης της διαδικασίας παραγωγής της. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη άφθονης και καθαρής πηγής ενέργειας, την επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης της διαδικασίας χωρίς υπερβολική χρήση αναλωσίμων και εξοπλισμού, καθώς και τη δυνατότητα ασφαλούς διαχείρισης της υπολειμματικής άλμης χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον (Roberts et al., 2010). Μόνο εφόσον ικανοποιηθούν όλες αυτές οι προϋποθέσεις, η αφαλάτωση θα μπορούσε να θεωρηθεί πραγματικά κυκλική.

Μέχρι τότε, παραμένει μια τεχνολογία με σημαντικές προκλήσεις και απέχει ακόμη πολύ από το να χαρακτηριστεί «πράσινη» ή πλήρως συμβατή με τα πρότυπα της κυκλικής οικονομίας.

8. Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) και Κυκλική Οικονομία

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η διερεύνηση της συμβολής της κυκλικής οικονομίας στην επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Πιο συγκεκριμένα, η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων αναδεικνύεται ως μία κρίσιμη πρακτική, καθώς δεν αντιμετωπίζει μεμονωμένα ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, αλλά επηρεάζει θετικά πολλαπλούς τομείς ταυτόχρονα (νερό, τροφή, ενέργεια, οικοσύστημα) και συμβάλλοντας στην ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των προκλήσεων βιωσιμότητας.

Η κυκλική οικονομία και οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (Sustainable Development Goals – SDGs) συνδέονται στενά σε πολλαπλά επίπεδα. Η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής

οικονομίας μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην υλοποίηση της Ατζέντας 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη παγκοσμίως. Οι πρακτικές της κυκλικής οικονομίας και τα συναφή επιχειρηματικά μοντέλα μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην επίτευξη πολλών επιμέρους Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης, ενισχύοντας τη συνολική βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα των συστημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, οι πρακτικές της κυκλικής οικονομίας συμβάλλουν άμεσα στην επίτευξη 21 στόχων των SDGs, ενώ επηρεάζουν έμμεσα ακόμη 28 επιπλέον στόχους (Schroeder et al., 2018). Η ισχυρότερη συσχέτιση εντοπίζεται με τους παρακάτω στόχους (σχήμα 5):

- SDG 6: Διαχείριση υδάτινων πόρων και πρόσβαση σε καθαρό νερό και αποχέτευση,
- SDG 7: Καθαρή και προσιτή ενέργεια,
- SDG 12: Υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή,
- SDG 15: Ζωή στη στεριά και προστασία της χερσαίας βιοποικιλότητας.

Αν και η κυκλική οικονομία δεν μπορεί από μόνη της να καλύψει το σύνολο των προκλήσεων που θέτουν οι SDGs, εντούτοις αναγνωρίζεται ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο εφαρμογής για συγκεκριμένους στόχους. Υπάρχουν τουλάχιστον 35 επιμέρους στόχοι στους οποίους οι πρακτικές της κυκλικής οικονομίας ασκούν περιορισμένη ή και καθόλου επίδραση, ωστόσο η συνεισφορά της κυκλικής οικονομίας παραμένει σημαντική για τη βιώσιμη μετάβαση (Schröder et al., 2019)

Στο πλαίσιο αυτό, η επαναχρησιμοποίηση του νερού από επεξεργασμένα λύματα αναδεικνύεται ως μια καίρια πρακτική της κυκλικής οικονομίας, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην επίτευξη του SDG 6, που αφορά την καθολική πρόσβαση σε καθαρό νερό και αποχέτευση. Παραδοσιακά, τα λύματα θεωρούνταν απόβλητα χωρίς ιδιαίτερη αξία. Ωστόσο, με τις σύγχρονες τεχνολογίες επεξεργασίας, τα λύματα μπορούν να μετατραπούν σε πολύτιμη πηγή καθαρού νερού για μη πόσιμες και, υπό προϋποθέσεις, πόσιμες χρήσεις. Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων ως εναλλακτική πηγή νερού μειώνει την πίεση στους φυσικούς υδάτινους πόρους, ενισχύει την ανθεκτικότητα των αστικών περιοχών στην κλιματική αλλαγή και προωθεί τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτων.

Μεταξύ των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης, ο στόχος 6.3 κατέχει κεντρική θέση όσον αφορά τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, καθώς θέτει ως επιδίωξη, έως το 2030, τη βελτίωση της ποιότητας του νερού μέσω της μείωσης της ρύπανσης, της εξάλειψης της ανεξέλεγκτης απόρριψης και της ελαχιστοποίησης της απελευθέρωσης επικίνδυνων χημικών ουσιών και

υλικών. Παράλληλα, περιλαμβάνει τον στόχο της μείωσης κατά το ήμισυ του ποσοστού των ανεπεξέργαστων λυμάτων και της ουσιαστικής ενίσχυσης της ανακύκλωσης και της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης σε παγκόσμια κλίμακα. Η πρόοδος ως προς την επίτευξη του στόχου αυτού παρακολουθείται μέσω του δείκτη 6.3.1 (σχήμα 6), ο οποίος καταγράφει το ποσοστό των συνολικών, βιομηχανικών και οικιακών ροών λυμάτων που υπόκεινται σε ασφαλή επεξεργασία, σύμφωνα με τα εκάστοτε εθνικά ή τοπικά πρότυπα (Obaideen et al., 2022).

Σύμφωνα με μελέτες, η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων εντάσσεται στον πυρήνα της κυκλικής οικονομίας, μετατρέποντας τα απόβλητα σε πολύτιμους πόρους. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προωθεί την επαναχρησιμοποίηση του νερού από αστικά λύματα για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας και την ενίσχυση της προσαρμοστικότητας στην κλιματική αλλαγή.

Η ανακύκλωση του νερού από λύματα προσφέρει σημαντικά οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη, όπως η αύξηση της διαθεσιμότητας νερού για μη πόσιμες χρήσεις, η μείωση των θρεπτικών φορτίων στους υδάτινους αποδέκτες και η εξοικονόμηση ενέργειας σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, όπως η αφαλάτωση.

Επιπλέον, η επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων συμβάλλει στην επίτευξη πολλών SDGs, πέραν του SDG 6. Σύμφωνα με μελέτη, η διαχείριση των λυμάτων μπορεί να συνεισφέρει στην επίτευξη 11 από τους 17 SDGs, μέσω της αύξησης της διαθεσιμότητας νερού, της παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο και της ανάκτησης θρεπτικών συστατικών.

Η ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών στην επεξεργασία λυμάτων ενισχύει την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των συστημάτων. Για παράδειγμα, ερευνητές στο Εθνικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Ρουρκέλα ανέπτυξαν ένα σύστημα επεξεργασίας λυμάτων που χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια και επαναχρησιμοποιήσιμες σφαιρικές τσιμεντένιες χάντρες ως φωτοκαταλύτες, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση της χημικής απαίτησης σε οξυγόνο (COD) και διατηρώντας υψηλή απόδοση μετά από πολλαπλούς κύκλους χρήσης. Επιπλέον, η παραγωγή βιοαερίου από την επεξεργασία ιλύος στα εργοστάσια επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί μια πρακτική που ενισχύει την ενεργειακή αυτάρκεια και μειώνει τα λειτουργικά κόστη.

Παρά τα οφέλη, η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως η έλλειψη σαφούς ρυθμιστικού πλαισίου και οι χαμηλές χρεώσεις για το γλυκό νερό, που μειώνουν τα κίνητρα για την επένδυση σε τέτοιες πρακτικές. Η ενίσχυση των στρατηγικών για την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, μέσω της καινοτομίας και της υιοθέτησης βιώσιμων

τεχνολογιών, μπορεί να δημιουργήσει νέες επιχειρηματικές και απασχολησιακές ευκαιρίες, μειώνοντας την εξάρτηση από φυσικούς πόρους και συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης. Συνοψίζοντας, η επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων αποτελεί ουσιαστικό εργαλείο για την επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης, προσφέροντας λύσεις σε προκλήσεις που σχετίζονται με το νερό, την ενέργεια, την τροφή και το περιβάλλον.



Σχήμα 5. Τα λύματα, ο Στόχος Βιώσιμης Ανάπτυξης 6 και οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (Πηγή: GRID-Arendal/Studio Atlantis, 2023)



Σχήμα 6. Ο Στόχος 6.3 των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) επικεντρώνεται στη βελτίωση της ποιότητας του νερού μέσω της μείωσης της ρύπανσης, της επεξεργασίας των λυμάτων και της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων σε παγκόσμιο επίπεδο.

9. Το Μοντέλο των 6R: Μια Ολιστική Προσέγγιση για Βιώσιμη Διαχείριση Υδάτινων Πόρων και Λυμάτων

Η μετάβαση της ευρωπαϊκής οικονομίας προς το μοντέλο της Κυκλικής Οικονομίας απαιτεί την υιοθέτηση πιο βιώσιμων πρακτικών στη διαχείριση τόσο των φυσικών πόρων όσο και των παραγόμενων αποβλήτων (European Commission, 2018). Ο τομέας της ύδρευσης και αποχέτευσης δεν αποτελεί εξαίρεση, καθώς περιλαμβάνει κρίσιμα στοιχεία όπως το νερό, τα λύματα, την ιλύ, την τέφρα ιλύος και άλλα παραπροϊόντα που χρήζουν διαχείρισης βάσει κυκλικών αρχών.

Στην πράξη, έχουν ήδη υιοθετηθεί ορισμένες βασικές στρατηγικές πρόληψης στο πλαίσιο της διαχείρισης αποβλήτων, οι οποίες περιγράφονται μέσω των γνωστών προσεγγίσεων τύπου **R**:

- Τα **2Rs**: μείωση (reduce) και επαναχρησιμοποίηση (reuse),
- Τα **3Rs**: μείωση, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση (recycling),
- Τα **4Rs**: μείωση, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και ανάκτηση (recovery).

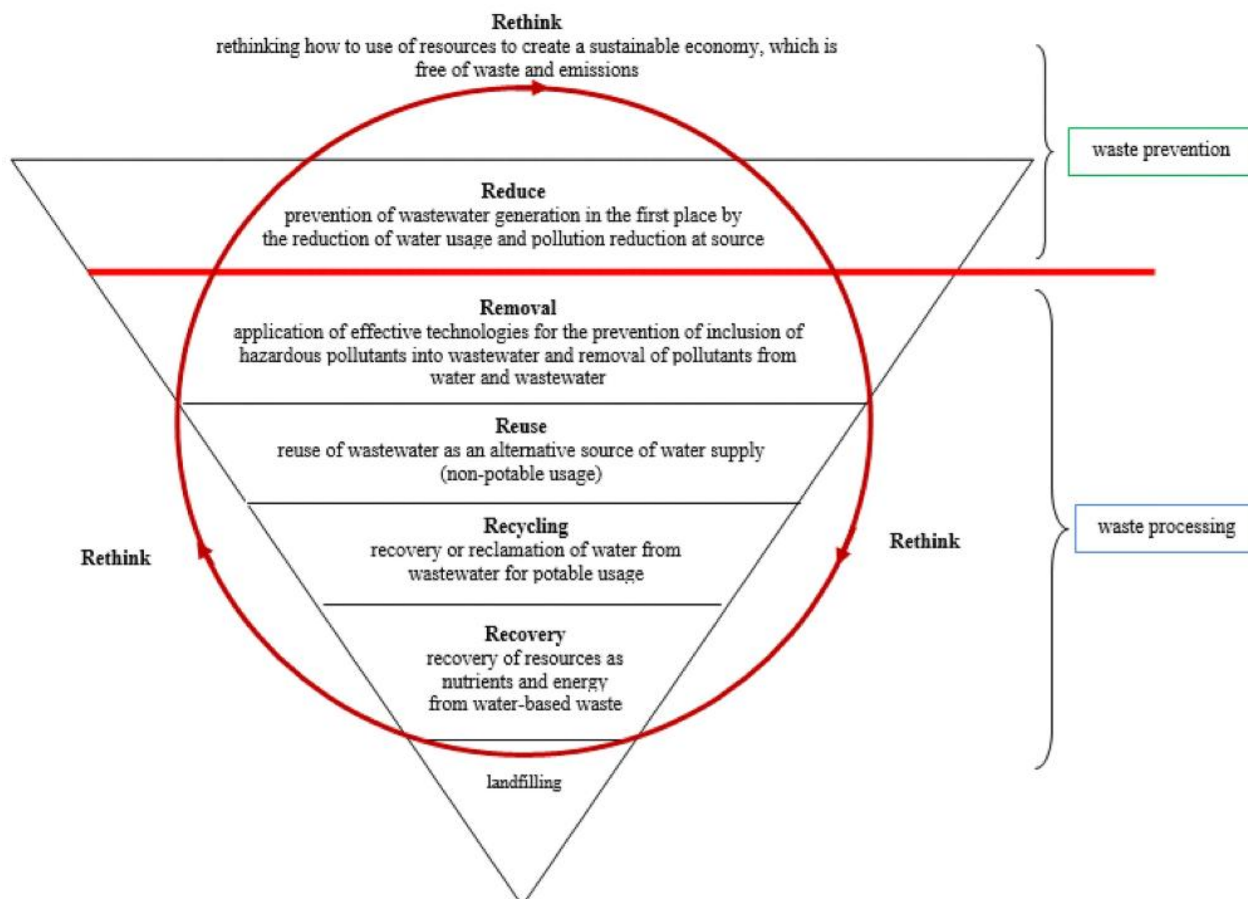
Ωστόσο, για την πλήρη ενσωμάτωση των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον τομέα της ύδρευσης και αποχέτευσης απαιτείται η περαιτέρω εξέλιξη και διεύρυνση αυτών των τεχνικών, με στόχο τη δημιουργία ενός περισσότερο ολοκληρωμένου και συστημικού μοντέλου.

Το προτεινόμενο πλαίσιο του μοντέλου Κυκλικής Οικονομίας εμπλουτίζεται με δύο πρόσθετες, κρίσιμες διαστάσεις:

- **Ανάκτηση (reclamation)**, η οποία αφορά την αποτελεσματική απομάκρυνση ρύπων από τα λύματα, διαδικασία θεμελιώδη για τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας και την περιβαλλοντική προστασία·
- **Επαναστοχασμός (rethink)**, που λειτουργεί ως καταλύτης για τη συστημική αναδιάρθρωση ολόκληρης της αξιακής αλυσίδας που συνδέεται με τη χρήση και διαχείριση του νερού. Ο συγκεκριμένος άξονας αποκτά κεντρικό ρόλο στο μετασχηματισμό προς ένα κυκλικό οικονομικό πρότυπο, όχι μόνο στον υδατικό τομέα, αλλά και σε όλους τους τομείς της οικονομίας.

Οι παραπάνω στρατηγικές δεν θα πρέπει μόνο να ευθυγραμμίζονται με τις βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας, αλλά και να τηρούν την καθιερωμένη ιεράρχηση ενεργειών που διέπει τη βιώσιμη διαχείριση αποβλήτων. Στο πλαίσιο αυτό, οι παρεμβάσεις της ΚΟ κατατάσσονται από τις περισσότερο επιθυμητές (όπως η πρόληψη και η μείωση) έως τις λιγότερο ενδεδειγμένες (όπως η ανάκτηση ή η τελική διάθεση). Εξαίρεση αποτελεί ο επαναστοχασμός, ο οποίος δεν καταλαμβάνει συγκεκριμένη θέση στην ιεραρχία, καθώς εφαρμόζεται οριζόντια και ενισχυτικά σε όλα τα στάδια του κυκλικού μοντέλου.

Η συνολική δομή και φιλοσοφία του προτεινόμενου πλαισίου κυκλικής οικονομίας στον τομέα της ύδρευσης και των λυμάτων παρουσιάζεται σχηματικά στην παρακάτω απεικόνιση [Smol et al., 2020].



The CE model framework in the water and wastewater sector

Σχήμα 7. Πλαίσιο μοντέλου κυκλικής οικονομίας στον ευρωπαϊκό τομέα ύδρευσης και αποχέτευσης.

[Διάγραμμα βασισμένο στην Οδηγία-Πλαίσιο για τα Απόβλητα 2008/98/EK]

➤ Μείωση (Reduce)

Η μείωση αποτελεί την πρώτη και πλέον επιθυμητή επιλογή στο προτεινόμενο πλαίσιο και ταυτόχρονα τον αποτελεσματικότερο τρόπο για τη διατήρηση της περιβαλλοντικής ποιότητας. Η προσέγγιση αυτή επισημαίνει ότι το πρώτο βήμα στην πρόληψη της παραγωγής λυμάτων θα πρέπει να είναι η περιορισμένη χρήση νερού και η μείωση της ρύπανσης στην πηγή, μέσω καλύτερου σχεδιασμού και ορθότερου προγραμματισμού.

Σήμερα, οι ανθρώπινες δραστηριότητες καταναλώνουν περισσότερο από το ήμισυ του διαθέσιμου επιφανειακού απορροής νερού. Περίπου το 90% της συνολικής χρήσης νερού αφορά βιομηχανικούς σκοπούς, ενώ λιγότερο από 10% αφορά οικιακή κατανάλωση. Παρότι τα νοικοκυριά κατατάσσονται μεταξύ των μικρότερων καταναλωτών, εντούτοις διαθέτουν σημαντικό δυναμικό επίδρασης, καθώς προσφέρουν ένα πεδίο για την εφαρμογή στρατηγικών εξοικονόμησης νερού, οι οποίες μπορούν στη συνέχεια να υιοθετηθούν και σε ευρύτερους

κοινωνικούς και επαγγελματικούς χώρους. Η οικιακή κατανάλωση νερού είναι ο ταχύτερα αυξανόμενος τομέας χρήσης, με προβλεπόμενη αύξηση άνω του 80% τα επόμενα 25 χρόνια. Επιπλέον, λειτουργεί ως "πεδίο δοκιμής" για την ανάπτυξη στρατηγικών και κοινωνικών συμπεριφορών που απαιτούνται ώστε να μειωθεί η κατανάλωση νερού και στη γεωργία και στη βιομηχανία.

Η μείωση της κατανάλωσης νερού συνεπάγεται σημαντικά και πολυδιάστατα οφέλη. Συγκεκριμένα, συμβάλλει:

- στη μείωση του κόστους και του απαιτούμενου χρόνου για την εξασφάλιση υδάτινων πόρων,
- στον περιορισμό της ανάγκης για την επέκταση των υφιστάμενων υποδομών ύδρευσης,
- στην αποτροπή της κατασκευής νέων, ιδιαίτερα δαπανηρών, εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων,
- καθώς και στην ενίσχυση της διαθεσιμότητας νερού για άλλες κρίσιμες χρήσεις και σκοπούς [Danielsson, 2019].

Επιπλέον, αξίζει να τονιστεί ότι οι περιβαλλοντικές στάσεις και συμπεριφορές που υιοθετούνται σε οικιακό επίπεδο θα πρέπει ιδανικά να μεταφέρονται και στο εργασιακό περιβάλλον. Ωστόσο, σύμφωνα με ανασκοπήσεις της σχετικής βιβλιογραφίας, η αλλαγή στάσης δεν αποτελεί απαραίτητα προϋπόθεση για την αλλαγή συμπεριφοράς στον χώρο εργασίας [Wells et al., 2016]. Το εύρημα αυτό αναδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω ενίσχυση της περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης, με στόχο την ενθάρρυνση της υιοθέτησης βιώσιμων πρακτικών σε όλες τις πτυχές της καθημερινής ζωής, τόσο στο ιδιωτικό όσο και στο επαγγελματικό πλαίσιο.

Η κοινωνία φαίνεται να υιοθετεί ολοένα και περισσότερο περιβαλλοντικά συνειδητές στάσεις και θεωρείται πιθανό ότι σύντομα θα επιχειρήσει αλλαγές στις οικιακές και επαγγελματικές της πρακτικές, υπό την επιρροή κινήματων όπως η "μηδενική παραγωγή αποβλήτων" (zero waste) και των σχετικών περιβαλλοντικών τάσεων [Silva et al., 2017]. Αυτή η μεταφορά της συμπεριφοράς αποτελεί μια σημαντική ευκαιρία για την εφαρμογή πρακτικών μείωσης της κατανάλωσης νερού στις επιχειρήσεις — κάτι που είναι ιδιαίτερος κρίσιμος για βιομηχανικές εγκαταστάσεις που εξαρτώνται από τη χρήση υδάτινων πόρων.

➤ **Ανάκτηση (Reclamation)**

Η ανάκτηση σχετίζεται με τεχνικές υψηλής απόδοσης για την απομάκρυνση ρυπογόνων ουσιών από τα λύματα [Kowalewski et al., 2016] και καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση στην

προτεινόμενη ιεράρχηση ενεργειών. Η επεξεργασία των λυμάτων καθίσταται αναγκαία, καθώς αποσκοπεί στην εξασφάλιση υγειονομικών συνθηκών σε όσο το δυνατόν περισσότερες αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Παράλληλα, είναι απαραίτητη για την ασφαλή διάθεση των επεξεργασμένων εκροών στο περιβάλλον, τηρώντας τις προβλεπόμενες διατάξεις και προδιαγραφές διάθεσης [Kudlek & Dudziak, 2018].

Σύμφωνα με τη νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τα εθνικά νομικά πλαίσια, η επεξεργασία των λυμάτων αποτελεί υποχρεωτική διαδικασία [Council Directive 91/271/EEC], καθώς η απόρριψη ανεπεξέργαστων εκροών στους υδάτινους αποδέκτες οδηγεί σε ευτροφισμό, κινδύνους για τη δημόσια υγεία και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (όπως ο υποξείδιο του αζώτου και το μεθάνιο).

Επιπλέον, σύμφωνα με τις οδηγίες, τα επεξεργασμένα λύματα θα πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται, όπου αυτό κρίνεται κατάλληλο. Για να καταστεί δυνατή η επαναχρησιμοποίησή τους, είναι απαραίτητη η αποδόμηση ή απομάκρυνση επικίνδυνων ουσιών και ρυπαντών, όπως παθογόνοι μικροοργανισμοί, αιωρούμενα στερεά, θρεπτικά συστατικά, τοξικές οργανικές ενώσεις και λοιπά επιβλαβή στοιχεία [Macherzyński et al., 2018].

Υπάρχει πληθώρα τεχνικών επεξεργασίας, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τη φύση του εκάστοτε αποβλήτου (βιομηχανικά ή αστικά λύματα) και τις ιδιαιτερότητες της απαιτούμενης μεθοδολογίας. Στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (WWTPs), εφαρμόζονται βιολογικές, φυσικές, χημικές και συνδυασμένες τεχνικές για την επίτευξη συγκεκριμένων ποιοτικών στόχων [Smol & Włodarczyk-Makuła, 2017].

Σήμερα, τα επιμέρους στάδια επεξεργασίας συνδυάζονται ώστε να επιτυγχάνεται πρωτογενής, δευτερογενής και τριτογενής επεξεργασία [Gupta et al., 2012]. Στις ευρωπαϊκές μονάδες επεξεργασίας, περίπου το 3,1% του φορτίου επεξεργάζεται σε πρωτογενές επίπεδο, το 28,5% σε δευτερογενές και το 68,4% σε τριτογενές στάδιο [Europe's water in figures].

Η πρωτογενής επεξεργασία περιλαμβάνει φυσικές και χημικές διεργασίες, η δευτερογενής επεξεργασία αφορά τη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων, ενώ στο τριτογενές στάδιο, τα λύματα που έχουν ήδη υποβληθεί σε πρωτογενή και δευτερογενή κατεργασία μετατρέπονται σε νερό υψηλής ποιότητας, κατάλληλο τόσο για πόσιμη όσο και για μη πόσιμη χρήση (π.χ. για βιομηχανικούς σκοπούς). Στο τελικό αυτό στάδιο, επιτυγχάνεται σχεδόν πλήρης απομάκρυνση των ρύπων, με αποτέλεσμα την παραγωγή ασφαλούς νερού για συγκεκριμένες χρήσεις [Gupta et al., 2012].

Το επεξεργασμένο λύμα αποτελεί πλέον εναλλακτική πηγή υδάτινου πόρου, κάτι που είναι κρίσιμης σημασίας σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού. Από την άρδευση και τις βιομηχανικές εφαρμογές μέχρι την ύδρευση, η αξιοποίηση λυμάτων που έχουν επεξεργαστεί σύμφωνα με τα ποιοτικά πρότυπα μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην ενίσχυση των υδάτινων αποθεμάτων και στη μείωση του χάσματος μεταξύ προσφοράς και ζήτησης νερού [Voulvoulis, 2018].

➤ Επαναχρησιμοποίηση (Reuse)

Η επαναχρησιμοποίηση καταλαμβάνει την τρίτη θέση στο προτεινόμενο πλαίσιο μοντέλου. Το νερό μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για μη πόσιμες χρήσεις ως εναλλακτική πηγή γλυκού νερού, κυρίως για αρδευτικές εφαρμογές στη γεωργία, για άρδευση αστικών τοπίων και για άλλες αστικές ή βιομηχανικές δραστηριότητες [Commission of European Communities, 2012].

Η αξιοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων ως εναλλακτική πηγή υδροδότησης έχει αναγνωριστεί και ενσωματωθεί σε διεθνείς, ευρωπαϊκές και εθνικές στρατηγικές [Voulvoulis, 2018]. Ο Στόχος Βιώσιμης Ανάπτυξης 6 (SDG 6) των Ηνωμένων Εθνών εστιάζει ρητά στην ουσιαστική αύξηση της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης του νερού σε παγκόσμιο επίπεδο έως το 2030 [Assembly UG, 2015].

Επιπλέον, η επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελεί έναν από τους βασικούς τομείς προτεραιότητας στο Στρατηγικό Σχέδιο Εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Συνεργασίας Καινοτομίας για το Νερό, ενώ η μεγιστοποίηση της επαναχρησιμοποίησης είναι ένας από τους κεντρικούς στόχους της Ανακοίνωσης «Οδικός Χάρτης για την Προστασία των Υδάτινων Πόρων της Ευρώπης» [Commission of European Communities, 2012].

Έχει τεκμηριωθεί ότι η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να αποφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη. Μέσω της επαναχρησιμοποίησης, μπορεί να επιτευχθεί ποσοτική βελτίωση της κατάστασης του περιβάλλοντος και ταυτόχρονα ποιοτική αναβάθμιση (μέσω της μείωσης της επιβάρυνσης από τις απορρίψεις των αστικών μονάδων επεξεργασίας λυμάτων σε ευαίσθητες περιοχές) [Marszałek et al., 2016].

Σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές πηγές, όπως η αφαλάτωση ή η μεταφορά νερού, η επαναχρησιμοποίηση απαιτεί συχνά χαμηλότερο κόστος επένδυσης και ενέργειας. Στον γεωργικό τομέα, τα επεξεργασμένα λύματα προσφέρουν σταθερή παροχή νερού κατά την

άρδευτική περίοδο, συμβάλλοντας στην πρόληψη καταστροφών καλλιεργειών και απώλειας εισοδήματος.

Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων με ελεγχόμενη περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά, κάτι που μπορεί να περιορίσει την ανάγκη για πρόσθετη λίπανση, προσφέροντας έτσι οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη στους αγρότες, αλλά και μειώνοντας περαιτέρω την ανάγκη για εκτενή επεξεργασία των λυμάτων.

Σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η επαναχρησιμοποίηση του νερού συμβάλλει σημαντικά στον ευρύτερο τομέα διαχείρισης υδάτων, ο οποίος θεωρείται βασικός πυλώνας του ευρωπαϊκού οικο-βιομηχανικού τοπίου. Με βάση τις παραπάνω προβλέψεις, η επαναχρησιμοποίηση προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για δημιουργία νέων πράσινων θέσεων εργασίας στη βιομηχανία του νερού (υπολογίζεται ότι κάθε 1% αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης στον τομέα της Ε.Ε. μπορεί να δημιουργήσει έως και 20.000 νέες θέσεις εργασίας) [Water Reuse, EC 2019].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα επαναχρησιμοποίησης νερού στον τομέα των λυμάτων είναι η χρήση του "γκρι νερού" από ντους και νιπτήρες για σκοπούς άρδευσης. Το υπόλοιπο, το λεγόμενο "μαύρο νερό", μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για άρδευση, εφόσον προηγουμένως υποβληθεί σε συμβατική πρωτογενή ή δευτερογενή επεξεργασία (π.χ. φιλτράρισμα ή απολύμανση). Με αυτόν τον τρόπο, το επεξεργασμένο νερό ανακυκλώνεται πλήρως και μπορεί να αξιοποιηθεί για την άρδευση γηπέδων γκολφ, κοιμητηρίων, πάρκων και άλλων υπαίθριων χώρων.

Ένα ακόμη παράδειγμα ανακύκλωσης νερού είναι η συλλογή και αξιοποίηση όμβριων υδάτων, τα οποία προέρχονται από συστήματα απορροής σε αστικά περιβάλλοντα. Αυτό περιλαμβάνει την απορροή από στέγες, δρόμους και ακάλυπτους χώρους, τα οποία συνήθως διοχετεύονται μέσω δικτύων αποστράγγισης.

➤ Ανακύκλωση (Recycling)

Η ανακύκλωση αποτελεί την τέταρτη επιλογή στο πλαίσιο του προτεινόμενου μοντέλου κυκλικής οικονομίας. Η ανακύκλωση του νερού αφορά την ανάκτηση ή επανακατεργασία υδατικών ροών από λύματα με στόχο την παραγωγή πόσιμου νερού, το οποίο μπορεί να επανεισαχθεί στο υδρευτικό σύστημα είτε άμεσα είτε έμμεσα.

Αν και η ανακύκλωση συμβάλλει ουσιαστικά στη διατήρηση φυσικών πόρων και στον περιορισμό των αποβλήτων, αξίζει να επισημανθεί ότι συνδέεται με υψηλό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος, ιδιαίτερα όσον αφορά τη συλλογή και κατεργασία των λυμάτων [86]. Ως εκ τούτου, η ανακύκλωση θα πρέπει να εφαρμόζεται μόνο όταν δεν είναι εφικτές η μείωση ή η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων [4Rs, 2019].

Για την ανακύκλωση του νερού, απαιτείται η εφαρμογή τεχνολογιών υψηλής απόδοσης για την απομάκρυνση ρυπαντών από τα λύματα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τις μεμβρανικές τεχνικές, όπως η νανοδιήθηση (NF), η αντίστροφη όσμωση (RO) και η άμεση όσμωση (FO).

Η τεχνολογία μεμβρανών έχει ήδη εφαρμοστεί για την ανακύκλωση νερού από τα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείων φοινικέλαιου (Palm Oil Mill Effluent – POME). Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει υψηλό δυναμικό εξάλειψης περιβαλλοντικών προβλημάτων και, επιπλέον, προσφέρει μια εναλλακτική λύση επεξεργασίας που επιτρέπει την ανακύκλωση καθαρού νερού.

Το τελικό επεξεργασμένο εκροή χαρακτηρίζεται από υψηλή ποιότητα και διαύγεια, καθιστώντας το κατάλληλο τόσο για την παραγωγή πόσιμου νερού όσο και για τροφοδοσία λεβήτων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις [Ahmad et al., 2003].

➤ **Ανάκτηση (Recovery)**

Η ανάκτηση υλικών καταλαμβάνει την πέμπτη θέση στο πλαίσιο του προτεινόμενου μοντέλου κυκλικής οικονομίας. Τα αστικά λύματα παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες ενσωμάτωσης σε κυκλικές πρακτικές, καθώς περιέχουν ποικιλία δυνητικά αξιοποιήσιμων πόρων, όπως ανόργανα θρεπτικά συστατικά (π.χ. άζωτο και φώσφορο), οργανικά λιπάσματα, βιοαέριο, βιοπολυμερή, θερμότητα, κυτταρίνη, βαρέα μέταλλα, φαρμακευτικά κατάλοιπα και νερό.

Η ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων, και ειδικότερα του φωσφόρου, αναγνωρίζεται ως κρίσιμη στρατηγική ήδη από την πρώτη κανονιστική πράξη εφαρμογής του Σχεδίου Δράσης για την Κυκλική Οικονομία, με την πρόταση για καθιέρωση κανόνων διάθεσης λιπασμάτων με σήμανση ΚΟ στην αγορά [COM no. 157, 2016].

Ο φώσφορος (P) είναι ένα από τα σημαντικότερα υλικά που δύναται να ανακτηθούν από τον τομέα επεξεργασίας λυμάτων. Οι δυνατότητες ανάκτησης φωσφόρου εντοπίζονται σε διάφορα στάδια των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, όπως στην εκροή της μονάδας, στα υγρά

στραγγίσματα, στην αφυδατωμένη ιλύ και στην τέφρα αυτής [Krüger et al.,2016]. Σε κάθε διαδοχικό στάδιο επεξεργασίας, μειώνεται ο συνολικός όγκος του υποστρώματος, αλλά αυξάνεται η συγκέντρωση του φωσφόρου, φτάνοντας έως και τα 64 g P ανά κιλό ξηρής μάζας.

Μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνικές είναι η ανάκτηση φωσφόρου με τη μορφή στρουβίτη (struvite) από την υγρή φάση των λυμάτων. Η καθίζηση του στρουβίτη προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς:

- ✓ βελτιστοποιεί τη λειτουργία των διεργασιών επεξεργασίας λυμάτων, περιορίζοντας την εμφάνιση ανεπιθύμητων αποθέσεων σε σωληνώσεις και εξοπλισμό,
- ✓ μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκροών, περιορίζοντας τη ρύπανση στους φυσικούς υδάτινους αποδέκτες,
- ✓ και διασφαλίζει την ανάκτηση φωσφόρου από ανανεώσιμες πηγές, γεγονός ιδιαίτερα κρίσιμο για την ευρωπαϊκή οικονομία, καθώς η Ευρωπαϊκή Ένωση στερείται εγχώριων αποθεμάτων του εν λόγω στοιχείου. [Herzel et al., 2016].

Η Ευρώπη βασίζεται σε εισαγωγές φωσφόρου, κυρίως από χώρες που θεωρούνται γεωπολιτικά ασταθείς, όπως το Μαρόκο και η Ρωσία. Εφόσον ο φώσφορος περιέχεται κατά κύριο λόγο σε ορυκτά φωσφορικά άλατα, και η Ε.Ε. εισάγει πάνω από το 90% των αναγκών της, η ανάκτηση φωσφόρου από εγχώρια απόβλητα με υψηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο θα μπορούσε να καλύψει έως και 20–30% της ζήτησης της Ε.Ε. για φωσφορικά λιπάσματα.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναγνωρίσει ότι υπάρχει σημαντικό επενδυτικό δυναμικό το οποίο παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτο. Η αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης και η μείωση της εξάρτησης από τις εισαγωγές φωσφόρου θεωρούνται καίριας σημασίας για τη βιωσιμότητα της ευρωπαϊκής γεωργίας και περιλαμβάνονται στους βασικούς στόχους των επόμενων ετών, μετά την αναθεώρηση του Κανονισμού Λιπασμάτων της Ε.Ε., ώστε να επεκταθεί το πεδίο εφαρμογής του και σε θρεπτικά στοιχεία δευτερογενούς και οργανικής προέλευσης [Smol, 2019].

Μια επιπλέον δυνατότητα ανάκτησης θρεπτικών συστατικών από την ιλύ των λυμάτων είναι η κομποστοποίησή της. Το κομπόστ αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί, για παράδειγμα, στη γεωργία, σε βιολογική καλλιέργεια, σε κήπους, σε αστικό εξωραϊσμό ή καλλωπιστική κηπουρική. Ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί ότι η σύσταση της ιλύος είναι περίπλοκη, καθώς, εκτός από μικροστοιχεία και μακροστοιχεία, μπορεί να περιέχει τοξικές ενώσεις ή παθογόνους μικροοργανισμούς. Κατά συνέπεια, οι μέθοδοι επεξεργασίας της πρέπει να προσαρμόζονται ανάλογα με τις συνθήκες κάθε μονάδας επεξεργασίας λυμάτων. Επιπλέον, η ιλύς που μπορεί

να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα υπόκειται σε ρυθμιστικούς περιορισμούς βάσει της ευρωπαϊκής και εθνικής νομοθεσίας [COM no. 157, 2016].

➤ **Επαναστοχασμός (Rethink)**

Ο επαναστοχασμός αποτελεί την τελευταία επιλογή στο υιοθετημένο μοντέλο κυκλικής οικονομίας, αλλά ταυτόχρονα είναι και η σημαντικότερη από την άποψη της διαδικασίας μετάβασης προς αυτό το νέο υπόδειγμα, καθώς απαιτεί ολιστικές αλλαγές σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας του νερού και των λυμάτων, δηλαδή σε όλα τα προηγούμενα στάδια των κανόνων τύπου R.

Ως εκ τούτου, ο επαναστοχασμός οφείλει να εφαρμοστεί σε όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία του πλαισίου της κυκλικής οικονομίας. Η ουσία της κυκλικής οικονομίας έγκειται ακριβώς στη ριζική επανεξέταση του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιούμε τους πόρους, με σκοπό τη δημιουργία μιας βιώσιμης οικονομίας χωρίς απόβλητα και εκπομπές.

Η μετάβαση αυτή απαιτεί συστημική αλλαγή από το σημερινό γραμμικό μοντέλο «παίρνω–παράγω–απορρίπτω» σε ένα κυκλικό πρότυπο, όπου εφαρμόζεται στην πράξη η αλυσίδα «μείωση, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση → επαναστοχασμός» [COM no. 398, 2014].

10. Προκλήσεις και Εφαρμοστικά Εμπόδια στη Βιώσιμη Διακυβέρνηση WEFΕ

Οι φυσικοί πόροι είναι αλληλένδετοι και η κατανόηση των πιθανών συνεργειών και ανταλλαγών στη χρήση τους είναι καθοριστική. Για παράδειγμα, η γεωργική παραγωγή απαιτεί τόσο νερό όσο και ενέργεια· η διαχείριση υδάτων προϋποθέτει την κατανάλωση ενέργειας· και η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την ύπαρξη νερού. Συνεπώς, οποιαδήποτε μεταβολή σε έναν από αυτούς τους τομείς επιδρά και στους υπόλοιπους (Nhamo et al., 2018).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της διασύνδεσης είναι ο αγροτικός τομέας, ο οποίος ευθύνεται για το 70% των παγκόσμιων απολήψεων γλυκού νερού και για το 30% της

κατανάλωσης ενέργειας (FAO, 2017). Η ευπάθεια των φυσικών πόρων ενδέχεται να ενισχυθεί περαιτέρω μέσω κατακερματισμένης διαχείρισης ανά τομέα και πολιτικών που αγνοούν τη διασυννοριακή και διατομεακή φύση των πόρων (Taguta et al., 2022).

Η προσέγγιση Nexus δεσμός νερού–ενέργειας–τροφής–περιβάλλοντος (WEFE) λαμβάνει υπόψη αυτές τις αλληλεξαρτήσεις, παρέχοντας ένα πλαίσιο ολοκληρωμένης αξιολόγησης και υλοποίησης λύσεων για τη βιώσιμη ανάπτυξη, υπερβαίνοντας τις παραδοσιακές απομονωμένες πρακτικές διαχείρισης (Hoff, 2011). Η κοινωνικοοικολογική οπτική του πλαισίου WEFE υποστηρίζει μια συστημική προσέγγιση, απαραίτητη για την κατανόηση της ασφάλειας των φυσικών πόρων, ιδιαίτερα εν μέσω αυξανόμενων περιβαλλοντικών πιέσεων και των διττών απειλών της κλιματικής και οικολογικής κρίσης (Johnson et al., 2019). Παράλληλα, το πλαίσιο αυτό ευθυγραμμίζεται με διατομεακές πολιτικές και στόχους, όπως οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ (SDGs), οι οποίοι βασίζονται σε στρατηγικές που ενσωματώνουν νερό, ενέργεια, τροφή και οικοσυστήματα (Adamovic et al., 2019).

Αν και το WEFE nexus προσφέρει μια σημαντική οπτική διατομεακής διαχείρισης πόρων, η εφαρμογή του παραμένει σε μεγάλο βαθμό θεωρητική. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία επικεντρώνεται στη δυνητική χρησιμότητά του στις πολιτικές, όμως παρέχει περιορισμένες κατευθύνσεις για την πρακτική εφαρμογή του, ενώ τα παραδείγματα τεχνικών συνεισφορών είναι ελάχιστα. Η μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη παρεμποδίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η έλλειψη χρηματοδότησης, εξοπλισμού και εξειδικευμένου προσωπικού, η περιορισμένη κατανόηση των αναγκών των εμπλεκόμενων, η απουσία κατάλληλων εργαλείων και μοντέλων, η ανεπάρκεια σχετικών δεδομένων, οι πολιτικές και οικονομικές προκλήσεις στην κατανομή των πόρων καθώς και η έλλειψη επίγνωσης και δέσμευσης από τα ενδιαφερόμενα κράτη (Botai et al., 2021).

Επιπλέον, οι πολιτικές συχνά διαμορφώνονται σε ανώτερα κυβερνητικά επίπεδα χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές αξίες και ανάγκες, γεγονός που τις καθιστά μη εφαρμόσιμες στην πράξη. Οι τοπικοί φορείς παραμένουν σε μεγάλο βαθμό εκτός της διαδικασίας του nexus, με αποτέλεσμα η αξιολόγηση να μην ανταποκρίνεται στις πραγματικές τους ανάγκες (de Strasser et al., 2016). Η ουσιαστική εμπλοκή των τοπικών φορέων καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας μπορεί να γεφυρώσει το χάσμα ανάμεσα στην παραγωγή και στην αξιοποίηση της επιστημονικής γνώσης, διευκολύνοντας την εναρμόνιση πολιτικών με τις τοπικές συνθήκες και προτεραιότητες (Broek, 2019). Η ενσωμάτωση των αξιών των τοπικών εμπλεκόμενων ενισχύει τη βιωσιμότητα, την εγκυρότητα και την αποτελεσματικότητα της έρευνας στο πλαίσιο του nexus WEFE.

Η σημασία της συμμετοχής των εμπλεκομένων στη σχετική έρευνα αυξάνεται, ωστόσο συχνά οι φορείς εμπλέκονται μόνο ως τελικοί αποδέκτες τεχνικών πληροφοριών από μοντέλα, χωρίς συμμετοχή στον σχεδιασμό δεικτών και εργαλείων. Για την αντιμετώπιση αυτού του κενού, έχουν προταθεί αρχές ενίσχυσης της εφαρμογής του nexus, όπως η χρήση ποικίλων μεθόδων συμμετοχής (π.χ. εργαστήρια, συνεντεύξεις, δομημένα ερωτηματολόγια), η εφαρμογή κατάλληλων αναλυτικών μεθοδολογιών (όπως πίνακες συσχέτισης και γνωσιακή χαρτογράφηση), η ενίσχυση της θεσμικής αρχιτεκτονικής με καθετοποιημένη και οριζόντια διακυβέρνηση, η διεπιστημονική προσέγγιση, καθώς και η ενσωμάτωση σε υπηρεσίες κλιματικής πληροφόρησης (Bielicki et al., 2019).

11. Το Νερό στο Πλαίσιο του Nexus

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για το νερό, όχι μόνο υπό το πρίσμα του περιβαλλοντικού του ρόλου, αλλά και ως καθοριστικός παράγοντας για τη διασφάλιση της κοινωνικής και οικονομικής σταθερότητας. Ενδεικτικά, η έκθεση για τους Παγκόσμιους Κινδύνους του Παγκόσμιου Οικονομικού Φόρουμ (WEF, 2018), καθώς και η μελέτη της Παγκόσμιας Τράπεζας με τίτλο «High and Dry» (World Bank, 2016), αναδεικνύουν τις υδατικές κρίσεις ως σημαντικούς συστημικούς κινδύνους. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα, ορισμένες περιοχές του πλανήτη ενδέχεται να αντιμετωπίσουν μείωση του ρυθμού οικονομικής τους ανάπτυξης έως και 6% του ΑΕΠ μέχρι το 2050 εξαιτίας υδατικών απωλειών.

Η ζήτηση για νερό στον αγροτικό τομέα αναμένεται να αυξηθεί κατά 50%, ενώ για αστικές χρήσεις η αύξηση προβλέπεται μεταξύ 50% και 70%. Ο FAO (2018) εκτιμά ότι, προκειμένου να καλυφθούν οι διατροφικές ανάγκες ενός παγκόσμιου πληθυσμού που αναμένεται να φτάσει τα 9 δισεκατομμύρια έως το 2050, θα απαιτηθεί αύξηση της παραγωγής τροφίμων κατά 60%. Παράλληλα, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί έως και κατά 50% έως το 2035 (IEA, 2010).

Ωστόσο, οι περιορισμοί που σχετίζονται με την προσφορά ή διαθεσιμότητα του νερού ενδέχεται να υπονομεύσουν όχι μόνο την αξιοπιστία μελλοντικών έργων από φυσική, οικονομική και περιβαλλοντική άποψη, αλλά και την αποτελεσματικότητα υφιστάμενων υποδομών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η «υπόθεση του αμυγδάλου» στην

Καλιφόρνια (Le Monde, 2015). Παρά τη συνεχιζόμενη ξηρασία, η παραγωγή περίπου 900 τόνων αμυγδάλων ετησίως απαιτεί όση ποσότητα νερού καταναλώνουν για ύδρευση οι κάτοικοι των πόλεων Λος Άντζελες, Σαν Ντιέγκο και Σαν Φρανσίσκο, οι οποίες μαζί συγκεντρώνουν τα δύο τρίτα του συνολικού πληθυσμού της Πολιτείας. Κι αυτό, τη στιγμή που η παραγωγή αμυγδάλων συμβάλλει μόλις κατά 2% στο ΑΕΠ της Καλιφόρνιας.

Αντίστοιχα, στην Πολωνία το καλοκαίρι του 2015, ένα κύμα καύσωνα οδήγησε στη μείωση της στάθμης των ποταμών που χρησιμοποιούνται για την ψύξη των θερμοηλεκτρικών σταθμών, προκαλώντας διακοπές στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας (Reuters, 2016). Την ίδια χρονιά, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο δημοσίευσε έκθεση σχετικά με την εφαρμογή της υφιστάμενης νομοθεσίας για το νερό στην ΕΕ, υπογραμμίζοντας την ύπαρξη σημαντικών κενών, με τις ανεκμετάλλετες οικονομικές ωφέλειες να εκτιμώνται στα 2,8 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως (EPRS, 2015). Ένας από τους λόγους είναι ότι οι στόχοι της πολιτικής για την προστασία των υδάτων δεν ευθυγραμμίζονται πάντα με εκείνους που σχετίζονται με την ενέργεια και τη γεωργία, και πολλές φορές βρίσκονται σε σύγκρουση.

Οι περιορισμοί στην προσφορά ή διαθεσιμότητα του νερού μπορεί να είναι είτε φυσικής προέλευσης είτε να οφείλονται σε ανθρώπινες παρεμβάσεις, κυρίως λόγω της αυξανόμενης ανταγωνιστικότητας μεταξύ των τομέων χρήσης. Τα παραπάνω παραδείγματα καθιστούν σαφές ότι η ανθεκτικότητα των παγκόσμιων συστημάτων ενέργειας και τροφίμων εξαρτάται από τη δίκαιη και βιώσιμη κατανομή του νερού ανάμεσα στους σχετικούς τομείς. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς οι πιέσεις αναμένεται να ενταθούν τις επόμενες δεκαετίες, και μάλιστα σε συνάρτηση με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Αναγκαία είναι η υπέρβαση της αποσπασματικής θεώρησης των φυσικών πόρων ως μεμονωμένων στοιχείων και η ανάπτυξη μιας συστημικής κατανόησης. Αυτό μας οδηγεί στην αναγνώριση της αλληλεξάρτησης των πολιτικών και στην υιοθέτηση της έννοιας του Πλέγματος Νερού–Ενέργειας–Τροφίμων (Water–Energy–Food Nexus).

Η προσέγγιση Nexus για το Νερό–Ενέργεια–Τροφή (Water–Energy–Food Nexus) αποτελεί μια διατομεακή προοπτική, η οποία απαιτεί λύσεις που υπερβαίνουν τις παραδοσιακές τομεακές πολιτικές. Οι τρεις αυτοί τομείς – η ασφάλεια νερού, η ενεργειακή ασφάλεια και η επισιτιστική ασφάλεια (που αντιστοιχούν στους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης 6, 7 και 2 αντίστοιχα) – είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι, και κάθε παρέμβαση σε έναν από αυτούς επηρεάζει άμεσα ή έμμεσα και τους υπόλοιπους.

Ωστόσο, ένα τέταρτο, εξίσου κρίσιμο στοιχείο που πρέπει να ενταχθεί στο πλαίσιο του Nexus είναι τα οικοσυστήματα, καθώς βρίσκονται στον πυρήνα της παροχής και της διατήρησης των παραπάνω «ασφαλειών», μέσω των υπηρεσιών που προσφέρουν στους ανθρώπους και τις κοινωνίες. Η εκμετάλλευση υδατικών, γεωργικών και ενεργειακών πόρων δεν θα πρέπει να υπονομεύει τις οικοσυστημικές υπηρεσίες – ιδίως επειδή σε πολλές περιπτώσεις αυτές αποτελούν τη μοναδική πηγή πόρων για πληθυσμούς που ζουν σε συνθήκες φτώχειας (Baker et al., 2015).

Παράλληλα, ορισμένες από τις επηρεαζόμενες οικοσυστημικές υπηρεσίες μπορούν να υποστηρίξουν τόσο φυσικές όσο και τεχνητές υποδομές, οι οποίες παρέχουν υπηρεσίες σχετικές με το νερό – όπως για παράδειγμα, τη διαχείριση ιζημάτων σε φράγματα ή τον καθαρισμό υδάτων. Το Nexus, επομένως, αφορά την κατανόηση και τη διαχείριση συχνά ανταγωνιστικών συμφερόντων, με ταυτόχρονη διασφάλιση της ακεραιότητας των οικοσυστημάτων.

Σύμφωνα με τον FAO (2002), η διατροφική ασφάλεια ορίζεται ως η «διαθεσιμότητα και πρόσβαση σε επαρκή, ασφαλή και θρεπτικά τρόφιμα, τα οποία καλύπτουν τις διατροφικές ανάγκες και τις διατροφικές προτιμήσεις για μια ενεργή και υγιή ζωή. Η τροφή αναγνωρίζεται ως ανθρώπινο δικαίωμα. Η έννοια της επισιτιστικής ασφάλειας περιλαμβάνει γεωργικά προϊόντα, ζωικά προϊόντα (κρέας, γαλακτοκομικά, αυγά), ψάρια γλυκού νερού (αλιεία ή ιχθυοκαλλιέργεια), τροφές που συλλέγονται από τη φύση (όπως μανιτάρια, καρποί, έντομα), αλλά και θαλάσσια προϊόντα.

Αντίστοιχα, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) ορίζει την ενεργειακή ασφάλεια ως τη «συνεχή και αδιάλειπτη διαθεσιμότητα ενεργειακών πηγών σε προσιτή τιμή». Ο ΟΗΕ διευρύνει τον ορισμό ως «την πρόσβαση σε καθαρές, αξιόπιστες και οικονομικά προσβάσιμες ενεργειακές υπηρεσίες για βασικές ανάγκες όπως το μαγείρεμα, η θέρμανση, ο φωτισμός, η επικοινωνία και η παραγωγική χρήση». Η πρωτογενής ενέργεια παράγεται μέσω ορυκτών καυσίμων, πυρηνικής ενέργειας και ανανεώσιμων πηγών.

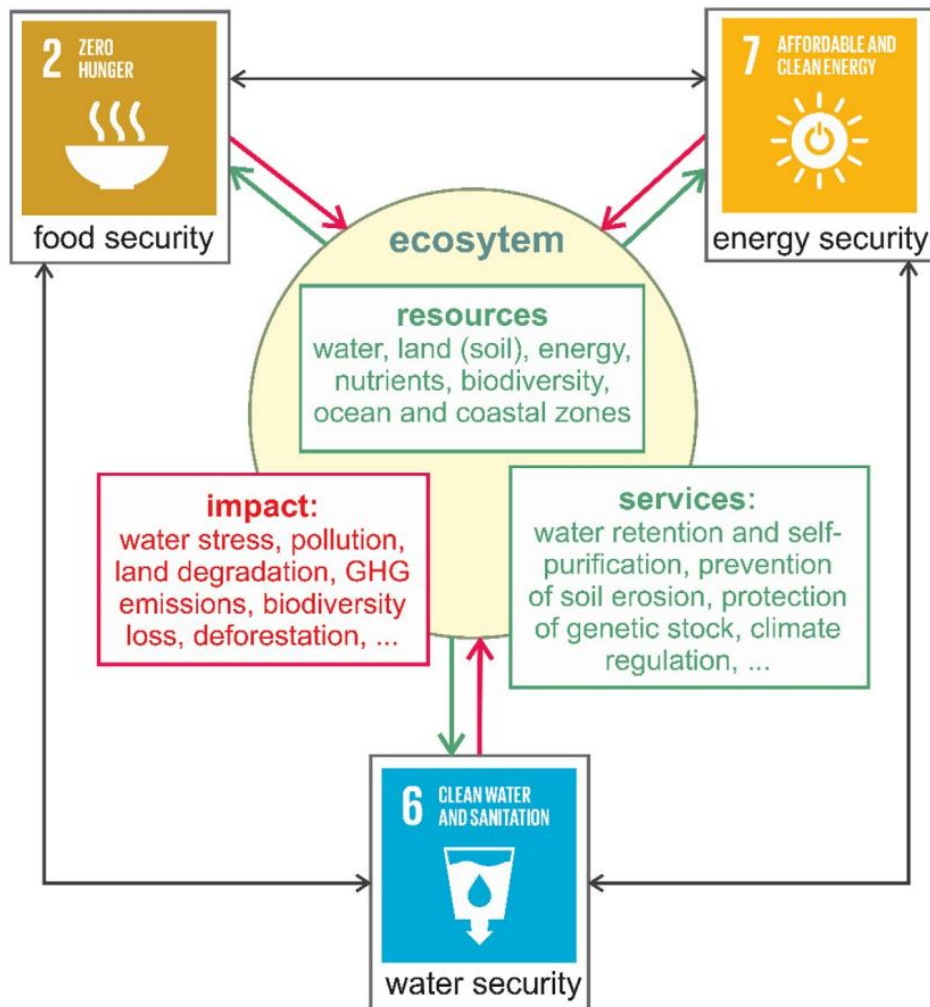
Η ασφάλεια νερού ορίζεται ως «η πρόσβαση σε ασφαλές πόσιμο νερό και αποχέτευση», δικαιώματα που πρόσφατα αναγνωρίστηκαν ως ανθρώπινα από τον ΟΗΕ (2010). Το νερό είναι ίσως ο πιο συχνά απαιτούμενος πόρος στο πλαίσιο του Nexus, καθώς αποτελεί τη βάση για τη μεγιστοποίηση συνεργειών και την ελαχιστοποίηση ανταλλαγών μεταξύ των τριών πυλώνων της ασφάλειας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, το διαθέσιμο νερό (πράσινο και μπλε) συνδέεται στενά με τη επισιτιστική, ενεργειακή και υδατική ασφάλεια.

Οι αλληλεξαρτήσεις αυτές είναι πολυάριθμες και συνεπώς οι πιθανές συγκρούσεις ή «ανταλλαγές» επίσης. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της σχέσης ενέργειας–τροφής: περίπου το 32% της παγκόσμιας τελικής κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιείται για την παραγωγή τροφίμων – από την καλλιέργεια μέχρι την κατανάλωση (FAO, 2011). Μόνο η πρωτογενής παραγωγή γεωργικών, κτηνοτροφικών και αλιευτικών προϊόντων ευθύνεται για το 6,6% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης.

Συνήθως, οι κυβερνήσεις και οι διεθνείς οργανισμοί διατηρούν ξεχωριστά υπουργεία ή διοικητικές μονάδες για το νερό, την ενέργεια και τη γεωργία. Οι πολιτικές σχεδιάζονται και εφαρμόζονται κατά τομέα, χωρίς συνοχή. Το ίδιο συμβαίνει και με την επιστημονική έρευνα: η εξειδίκευση παραμένει διαχωρισμένη σε ανεξάρτητες ομάδες, με περιορισμένη μεταξύ τους αλληλεπίδραση (SEI, 2014).

Ωστόσο, ακόμη και σε περιπτώσεις που εφαρμόζεται διατομεακός σχεδιασμός, όπως στη διαχείριση λεκανών απορροής, αυτός πραγματοποιείται κυρίως σε επίπεδο θεσμών. Η προσέγγιση Nexus επισημαίνει ότι το νερό, η ενέργεια, η τροφή και τα οικοσυστήματα είναι στενά συνδεδεμένα μέσω κύκλων χρήσης και επίδρασης που εκτείνονται από το τοπικό έως το παγκόσμιο επίπεδο.

Για την αποτελεσματική εφαρμογή της προσέγγισης αυτής, είναι απαραίτητο να αναγνωριστεί ότι πολλές κρίσιμες δραστηριότητες λαμβάνουν χώρα σε τοπικό επίπεδο – σε επίπεδο νοικοκυριών, αγροτών και μικρών κοινοτήτων. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να σχεδιαστούν επιλογές και μέτρα που να προσαρμόζονται στις τοπικές ανάγκες και ιδιαιτερότητες.



Σχήμα 8. Απεικόνιση του Πλαισίου Nexus Νερού–Ενέργειας–Τροφής–Περιβάλλοντος.

Η έννοια του Nexus συχνά αποδίδεται με διαφορετική ορολογία ή ακόμη και με εναλλακτικούς ορισμούς, αν και αναφέρεται στην ίδια βασική ιδέα. Διάφοροι επιστήμονες, ιδίως στον αμερικανικό χώρο, χρησιμοποιούν τον όρο *FEW Nexus* (Food–Energy–Water), δηλαδή Τροφή–Ενέργεια–Νερό (Chini et al., 2017). Άλλοι επιλέγουν διαφορετική σειρά των συνιστωσών, όπως *EFW Nexus*, όπου δίνεται έμφαση στην ενέργεια, μια επιλογή που συναντάται συχνότερα στον τομέα των ενεργειακών επιστημών (Liu et al., 2018).

Επιπλέον, ορισμένοι ερευνητές προτείνουν επεκτάσεις του βασικού σχήματος, εντάσσοντας πρόσθετους παράγοντες. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τον δεσμό *Γη–Νερό–Ενέργεια* (Land–Water–Energy Nexus) (Silalertruksa & Gheewala, 2018), τον *Νερό–Γη–Τροφή* Nexus (Rulli et al., 2016), τον *Γη–Νερό–Ενέργεια–Τροφή* Nexus (Siciliano et al., 2017), ή ακόμη πιο σύνθετες εκδοχές όπως τον *Νερό–Γη–Ενέργεια–Τροφή–Κλίμα* Nexus (Water–Land–Energy–Food–Climate Nexus – WLEFC) (Munaretto & Witmer, 2017). Αν και οι διάφορες αυτές ορολογικές

παραλλαγές επιχειρούν να αποτυπώσουν την πολυπλοκότητα του Nexus, συχνά αποκλίνουν από τον αρχικό ορισμό, όπως αυτός διατυπώθηκε από τον Hoff (2011). Συγκεκριμένα, περιλαμβάνουν στοιχεία όπως η γη ή το κλίμα, τα οποία δεν θεωρούνται «ασφάλειες» (securities) με την έννοια του ύδατος, της ενέργειας ή της τροφής, αλλά παράγοντες επίδρασης.

12. Διερεύνηση των Αλληλεξαρτήσεων στο Πλέγμα Νερό-Τροφή-Ενέργεια-Οικοσύστημα

Οι πόροι νερού, ενέργειας και τροφής συνδέονται μέσα από ένα σύνολο αλληλεπιδράσεων: το νερό είναι απαραίτητο για την παραγωγή ενέργειας (υδροηλεκτρική, ψύξη, βιοκαύσιμα κ.ά.), ενώ παράλληλα απαιτούνται σημαντικές ποσότητες ενέργειας για την άντληση, επεξεργασία και αφαλάτωση του νερού. Επιπλέον, η παραγωγή και διανομή τροφίμων βασίζεται τόσο στην κατανάλωση νερού όσο και ενέργειας.

Η χρήση νερού για άρδευση αυξάνει τη γεωργική παραγωγή, αλλά μπορεί ταυτόχρονα να μειώσει τις ροές των ποταμών και τη δυνατότητα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ενδέχεται να επιδεινώσει την ποιότητα του νερού και την υγεία των οικοσυστημάτων. Η καλλιέργεια ενεργειακών φυτών υπό συνθήκες αρδευόμενης γεωργίας οδηγεί σε αυξημένες απολήψεις νερού και ενδέχεται να απειλήσει τη διατροφική ασφάλεια. Παράλληλα, η μετατροπή της επιφανειακής άρδευσης σε πιεστικά συστήματα υψηλής απόδοσης ενδέχεται να μειώσει τις απώλειες νερού, αλλά και να αυξήσει την ενεργειακή κατανάλωση.

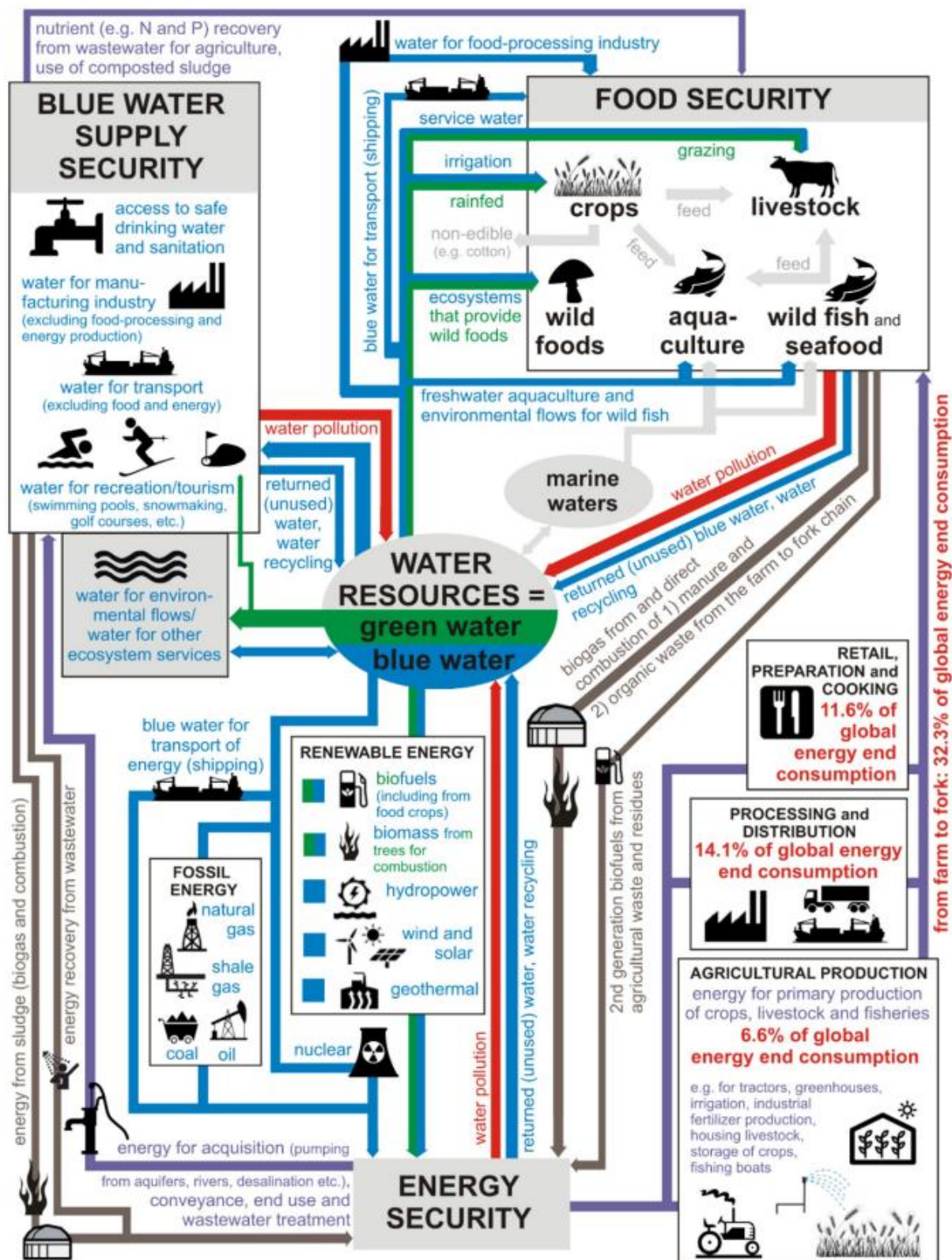
Ένα χαρακτηριστικό και αντιφατικό παράδειγμα της αλληλεξάρτησης νερού–ενέργειας αποτελεί η εκσυγχρονισμένη άρδευση στην Ισπανία την περίοδο 1950–2007 (González-Cebollada, 2015). Κατά την περίοδο αυτή, η συνολική κατανάλωση νερού από τη γεωργία τετραπλασιάστηκε, κυρίως λόγω της αλλαγής των καλλιεργειών προς είδη με αυξημένες υδατικές ανάγκες, εν μέρει εξαιτίας των επιδοτήσεων. Παρότι οι προσπάθειες επικεντρώθηκαν στη βελτίωση της αποδοτικότητας άρδευσης (από 67% σε 82,5%), η ενεργειακή κατανάλωση αυξήθηκε δεκαεννιά φορές, γεγονός που οδήγησε και σε σημαντική αύξηση του κόστους του νερού. Η υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών, χωρίς κατάλληλη εκτίμηση της εξάρτησης από την ενέργεια, ενδέχεται να αποτελέσει εμπόδιο για την οικονομική βιωσιμότητα ορισμένων καλλιεργειών ή περιοχών.

Επιπλέον, υφίστανται υδρο-οικονομικές αλληλεξαρτήσεις μεταξύ απομακρυσμένων γεωγραφικών περιοχών μέσω του εμπορίου, ιδίως σε ό,τι αφορά γεωργικά και βιομηχανικά προϊόντα (Vanham & Bidoglio, 2014). Αυτό σημαίνει ότι η κατανάλωση σε τοπικό επίπεδο μπορεί να βασίζεται σε υδατικούς πόρους που προέρχονται από άλλες περιοχές, αυξάνοντας τις εξαγωγές «εικονικού νερού» από τις περιοχές αυτές.

Το Πλαίσιο Nexus Νερού–Ενέργειας–Τροφής–Οικοσυστημάτων (WEFE) υπογραμμίζει την ανάγκη για ενιαία και συντονισμένη διαχείριση συνδυασμένων πόρων, αντί για την παραδοσιακή αποσπασματική προσέγγιση ανά πόρο, εφόσον στόχος είναι η βιώσιμη ανάπτυξη (Biggs et al., 2015). Η Ατζέντα του 2030 και οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) του ΟΗΕ ενισχύουν αυτή τη διατομεακή λογική, προωθώντας την κατανόηση των σχέσεων και εξαρτήσεων μεταξύ των επιμέρους στόχων, αντί να αντιμετωπίζονται αυτοτελώς.

Συνεπώς, η εφαρμογή της προσέγγισης Nexus μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην επίτευξη των δεσμεύσεων που απορρέουν από τους SDGs. Πράγματι, η κατανόηση των ανταλλαγών και συνεργειών στο πλαίσιο του WEFE ενισχύει την υλοποίηση αλληλένδετων στόχων. Το Nexus αφορά άμεσα τους εξής SDGs: ο Στόχος 6 (καθαρό νερό και αποχέτευση), ο Στόχος 7 (καθαρή και προσβάσιμη ενέργεια) και ο Στόχος 2 (μηδενική πείνα). Το τέταρτο σκέλος του πλαισίου WEFE – τα οικοσυστήματα – σχετίζεται επιπλέον με τους Στόχους 14 (ζωή κάτω από το νερό) και 15 (ζωή στη στεριά).

Κοινωνίες που έχουν εντοπίσει τις κρίσιμες αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των τομέων που κάνουν χρήση του νερού και έχουν αναπτύξει σχέσεις και συνεργασίες μεταξύ τους είναι περισσότερο ανθεκτικές και καλύτερα προετοιμασμένες να ανταποκριθούν σε κρίσεις που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους.



Σχήμα 9. Το Πλέγμα WEF για το μπλε και πράσινο νερό (Vanham, 2016).

13. Μεθοδολογία

Πριν την έναρξη της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε εκτενής και συστηματική προεργασία, με βασικό στόχο την εις βάθος κατανόηση του θεωρητικού, θεσμικού και επιστημονικού πλαισίου που διέπει το αντικείμενο της μελέτης. Η διαδικασία αυτή αποτέλεσε αναγκαία συνθήκη για τη θεμελίωση μιας στέρεης επιστημονικής βάσης και την ορθή οριοθέτηση του ερευνητικού πεδίου. Στο πλαίσιο της προεργασίας, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη συστηματική ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας, η οποία περιελάμβανε μελέτη εξειδικευμένων επιστημονικών συγγραμμάτων, σύγχρονων ερευνητικών άρθρων, καθώς και τεχνικών εκθέσεων.

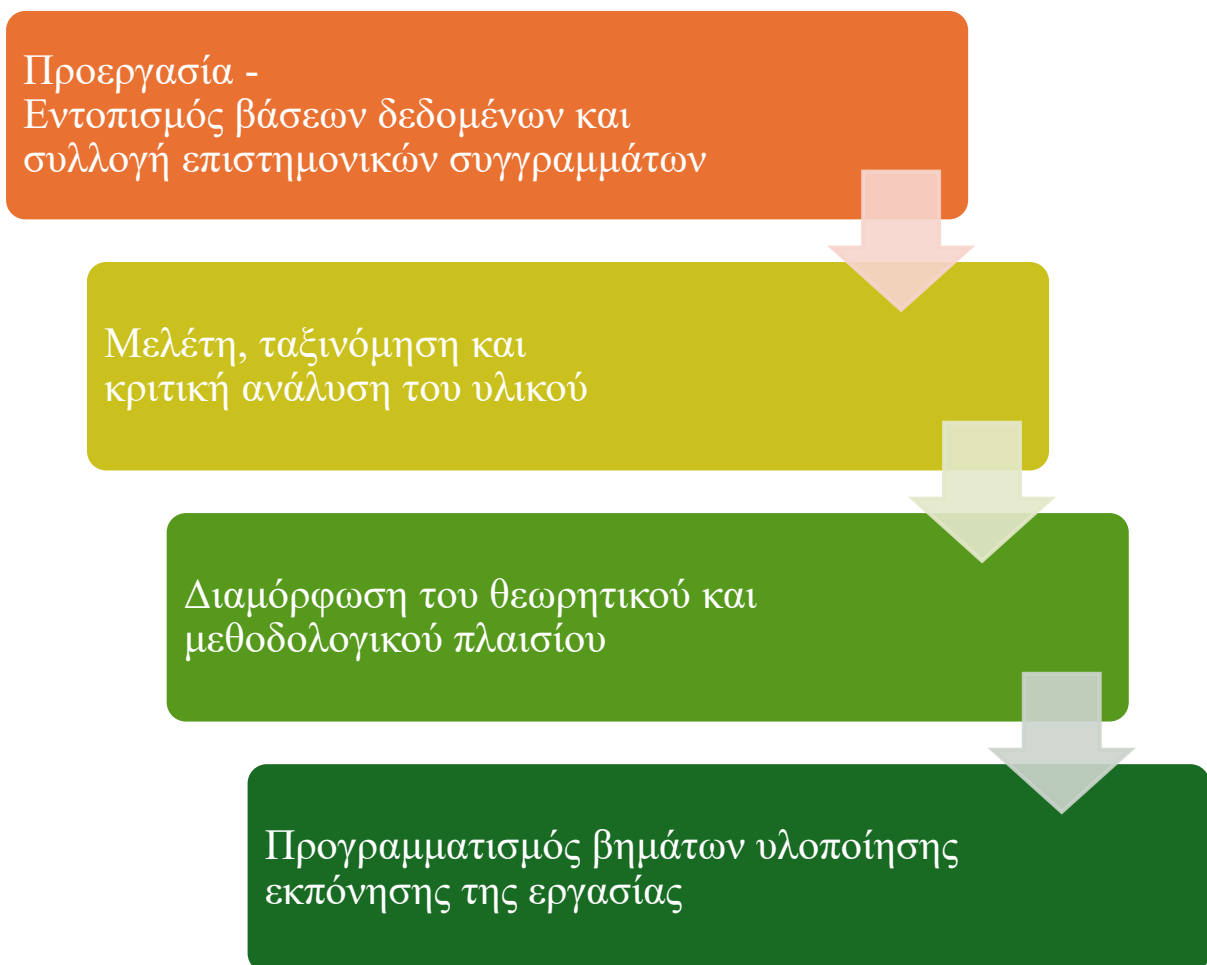
Η ερευνητική μεθοδολογία της παρούσας εργασίας στηρίζεται στην αρχή της πολυκριτηριακής και διατομεακής ανάλυσης, που προάγεται από τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της προσέγγισης Nexus. Η διερεύνηση των επιπτώσεων της επαναχρησιμοποίησης εκροών από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων δεν περιορίζεται σε μεμονωμένους τομείς – όπως η ποιότητα του νερού ή η παραγωγή τροφής – αλλά προσεγγίζεται ολιστικά, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις με την ενέργεια, την αγροτική παραγωγή και την προστασία των οικοσυστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, η μεθοδολογική προσέγγιση σχεδιάστηκε με στόχο την κατανόηση των δυνατοτήτων εφαρμογής αυτής της πρακτικής και των επιπτώσεων της στους τέσσερις διασυνδεδεμένους τομείς του πλέγματος Nexus: νερό, ενέργεια, τροφή και οικοσυστήματα (Water-Energy-Food-Ecosystems, WEFE).

Η έρευνα σχεδιάστηκε με γνώμονα μια συνδυαστική προσέγγιση, η οποία ενσωματώνει την ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, την καταγραφή εμπειριών, απόψεων και επιστημονικών θέσεων των εμπλεκόμενων φορέων μέσω ερωτηματολογίου, καθώς και την αξιολόγηση πραγματικών δεδομένων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων. Βασικές συνιστώσες της προσέγγισης αυτής αποτελούν:

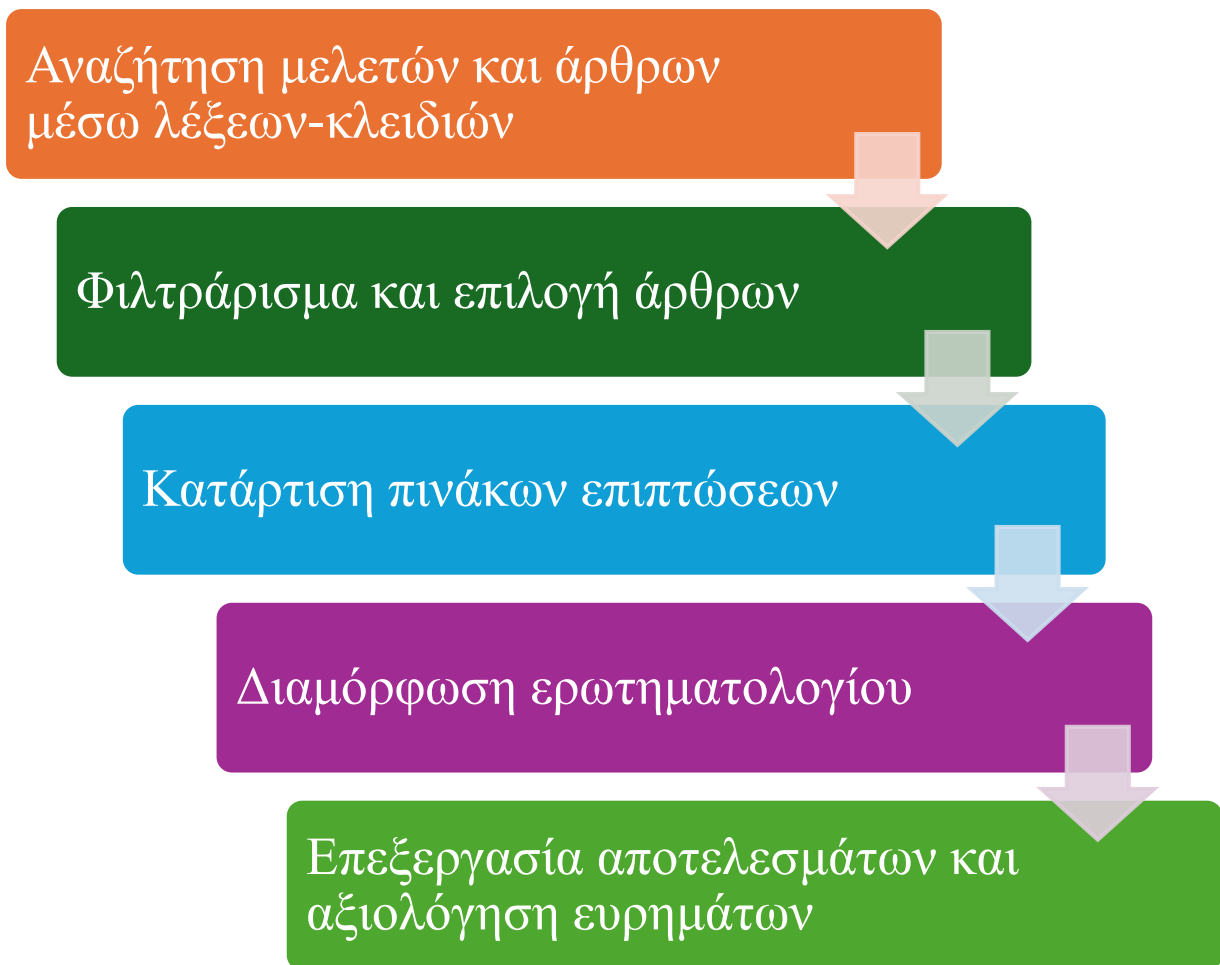
- η βιβλιογραφική ανασκόπηση,
- η αποτύπωση και αξιολόγηση των ωφελειών και των περιορισμών της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων εκροών
- η διαμόρφωση ερωτηματολογίου με άξονα τις καταγεγραμμένες επιπτώσεις,

- η συλλογή των απαντήσεων στο ερωτηματολόγιο είτε στο πλαίσιο ημιδομημένων συνεντεύξεων είτε επικοινωνίας μέσω ψηφιακής αλληλογραφίας.
- η ανάλυση δεδομένων από την Εθνική Βάση Δεδομένων Παρακολούθησης Λειτουργίας Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας λυμάτων.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αποτέλεσε το αφετηριακό και θεμελιώδες στάδιο της παρούσας μελέτης, λειτουργώντας ως το θεωρητικό υπόβαθρο για την εμβάθυνση στο πεδίο της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της προσέγγισης Nexus. Η κριτική προσέγγιση και η συγκριτική ανάλυση των πηγών αυτών συνέβαλαν στην αποσαφήνιση βασικών εννοιών, στην αναγνώριση κενών στη διεθνή βιβλιογραφία και στη διαμόρφωση των ερευνητικών ερωτημάτων της εργασίας. Η εν λόγω προεργασία δεν περιορίστηκε μόνο στη θεωρητική τεκμηρίωση, αλλά συνέβαλε καθοριστικά και στον σχεδιασμό της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την παραγωγή των πρωτογενών δεδομένων και την τεκμηριωμένη εξαγωγή συμπερασμάτων.



Σχήμα 10. Διαγραμματική αποτύπωση της προεργασίας για τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 11. Στάδια της μεθοδολογικής διαδικασίας: από τον εντοπισμό της βιβλιογραφίας έως την ανάλυση των αποτελεσμάτων και την αποτίμηση των επιπτώσεων στο πλαίσιο της προσέγγισης Nexus.

Προκειμένου να αποτυπωθεί με ακρίβεια η υφιστάμενη κατάσταση σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων εκροών στην Ελλάδα, η ερευνητική διαδικασία στηρίχθηκε σε συνδυασμό πρωτογενούς και δευτερογενούς συλλογής δεδομένων, με σκοπό την ολοκληρωμένη διερεύνηση των αλληλεπιδράσεις που αναδεικνύονται στο πλαίσιο της προσέγγισης Nexus και την ανάδειξη των πολυεπίπεδων σχέσεων και επιπτώσεων στους επιμέρους τομείς

Στο πεδίο της πρωτογενούς έρευνας αξιοποιήθηκε δομημένο ερωτηματολόγιο, το οποίο διαμοιράστηκε σε υπεύθυνους διαχείρισης εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Μέσω των απαντήσεων, συγκεντρώθηκαν κρίσιμες πληροφορίες και εμπειρικές γνώσεις που αφορούν προκλήσεις και ευκαιρίες από τις εφαρμοζόμενες πρακτικές επαναχρησιμοποίησης, όπως αυτές αναδεικνύονται μέσα από την καθημερινή λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Παράλληλα, για την υποστήριξη της ερευνητικής διαδικασίας, αξιοποιήθηκαν δευτερογενείς πηγές πληροφόρησης, κυρίως από το σύστημα παρακολούθησης της λειτουργίας των υποδομών και τις επίσημες βάσεις δεδομένων του αρμόδιου Υπουργείου Ενέργειας και Ανάπτυξης. Η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων επέτρεψε την αξιολόγηση των επιπτώσεων της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων εκροών στους τέσσερις βασικούς τομείς του πλέγματος Nexus – δηλαδή στο νερό, την ενέργεια, την τροφή και τα οικοσυστήματα – αναδεικνύοντας τις μεταξύ τους σχέσεις και τον τρόπο που επηρεάζουν τη συνολική βιωσιμότητα αυτής της πρακτικής στην ελληνική πραγματικότητα.

Για κάθε εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα βασικά λειτουργικά, τεχνικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της στη βάση δεδομένων της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων (<http://84.205.254.113/Default.aspx>). Στην αρχική ενότητα, παρατίθενται γενικά στοιχεία για τον φορέα όπως η ημερομηνία ολοκλήρωσης της κατασκευής, η ημερομηνία έναρξης της λειτουργίας, η ημερομηνία λήξης περιβαλλοντικών όρων, οι επεκτάσεις και αναβαθμίσεις που έχουν υλοποιηθεί. Γίνεται αναφορά στους εξυπηρετούμενους οικισμούς, τον ισοδύναμο πληθυσμό (Ι.Π.), τη σχεδιαστική δυναμικότητα και τον τύπο του δικτύου. Ακολουθεί καταγραφή πιθανών συνδεδεμένων βιομηχανιών που απορρίπτουν λύματα στην εγκατάσταση, καθώς και η ποσότητα εισερχόμενου ρυπαντικού φορτίου σε όρους BOD₅, COD και αιωρούμενων στερεών (SS), τόσο σε ημερήσια βάση όσο και με μορφή μέσων όρων. Στην ενότητα της παροχής, παρουσιάζεται η συνολική παροχή εισερχομένων και επεξεργασμένων λυμάτων, όπου διακρίνεται το επίπεδο επεξεργασίας των λυμάτων.

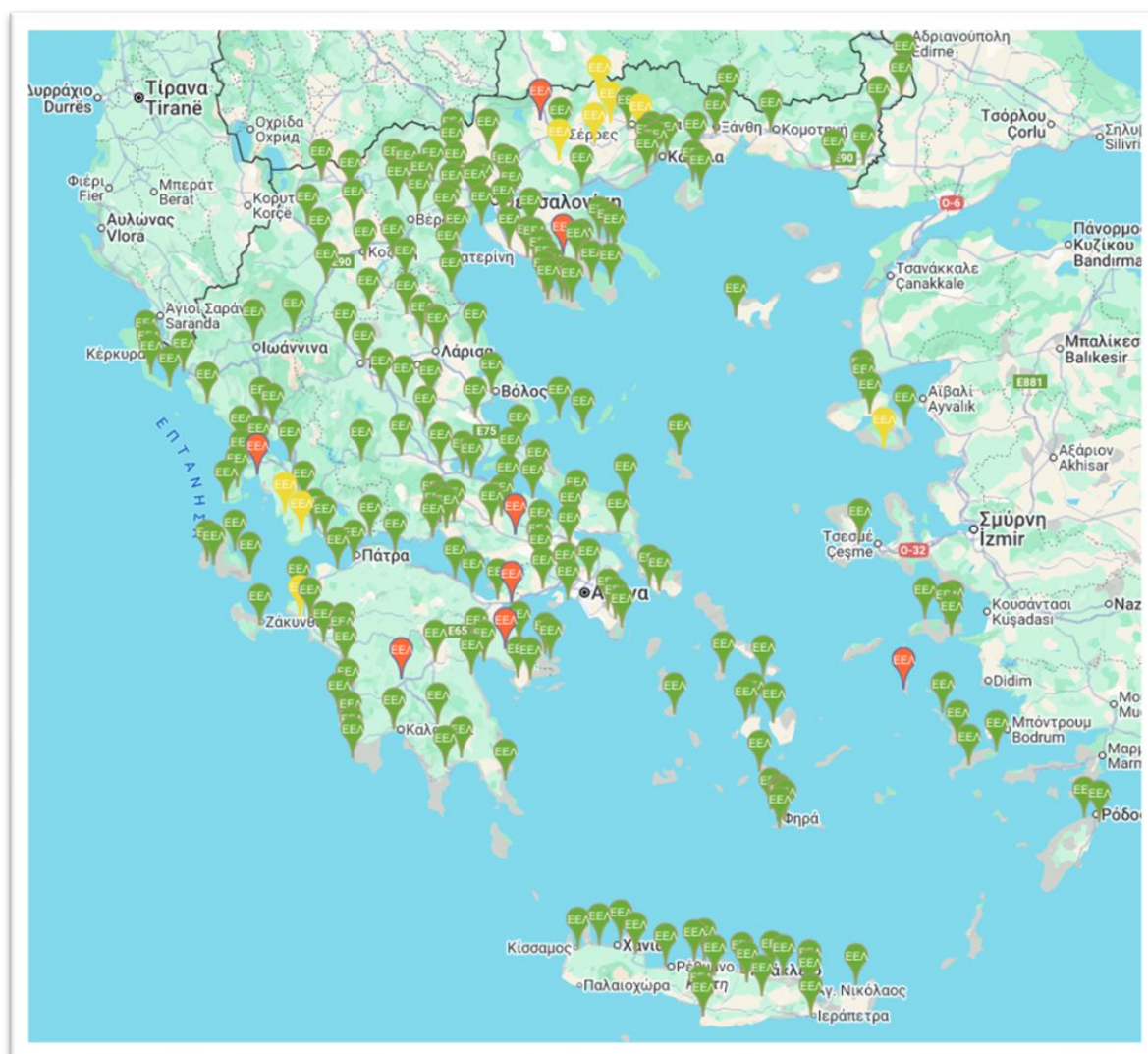
Παρατίθενται οι τεχνολογικές γραμμές επεξεργασίας τόσο για τα λύματα όσο και για τη διαχείριση της παραγόμενης ιλύος, καθώς και η τελική διάθεση της επεξεργασμένης εκροής, είτε σε υδάτινο αποδέκτη είτε για άλλες χρήσεις. Η τοποθεσία του αποδέκτη προσδιορίζεται χαρτογραφικά, ενώ αναγράφεται και το υδατικό σώμα που δέχεται τα λύματα (π.χ. ποτάμι, λίμνη, θάλασσα).

Στη συνέχεια, αναφέρεται αν υπάρχει επαναχρησιμοποίηση της εκροής, με λεπτομέρειες για την παραγόμενη ποσότητα (σε m³/έτος), τον τύπο χρήσης (π.χ. άρδευση, αστική χρήση, βιομηχανική) και τις εφαρμοζόμενες μεθόδους. Αναλόγως καταγράφεται και η διάθεση της παραγόμενης αφυδατωμένης ιλύος, είτε σε ΧΥΤΑ, είτε για αγροτική χρήση, είτε σε άλλες μορφές διάθεσης ή αποθήκευσης.

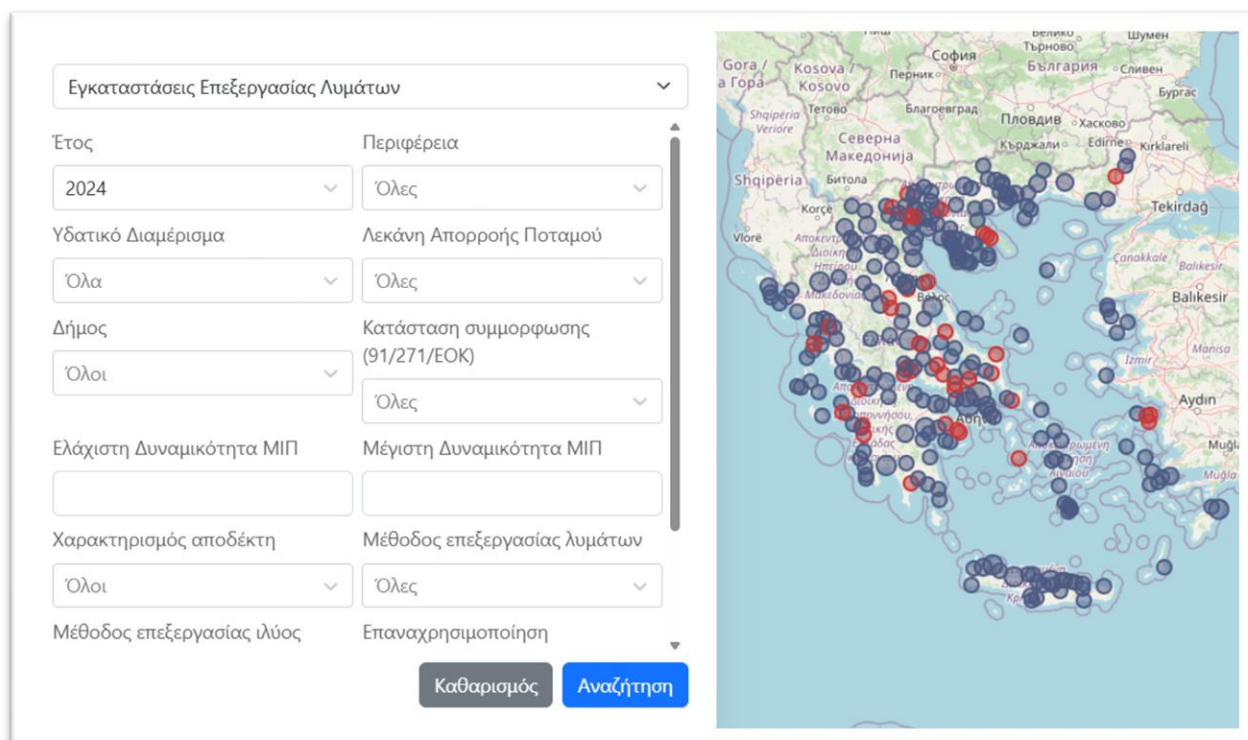
Ένα από τα βασικότερα σημεία της αναφοράς είναι ο πίνακας συμμόρφωσης με τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις λειτουργίας για την περίοδο 2011–2024, όπου αποτυπώνεται η τήρηση ή μη των ορίων εκροής για κρίσιμους δείκτες ποιότητας (BOD₅, COD, TSS, T–N, T–P). Η γραφική απεικόνιση επιτρέπει την άμεση αξιολόγηση της επίδοσης της ΕΕΛ ανά έτος. Τέλος, η ενότητα με τις μετρήσεις και αναλυτικά αποτελέσματα δειγματοληψιών δίνει πρόσβαση στα αναλυτικά δεδομένα της ποιότητας της εκροής, σύμφωνα με τις περιοδικές υποχρεωτικές δειγματοληψίες.

Η συγκεκριμένη αναφορά αποτελεί ολοκληρωμένη τεχνική καταγραφή της λειτουργικής κατάστασης μίας ΕΕΛ και μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο για σκοπούς περιβαλλοντικής εποπτείας όσο και για επιστημονικές ή τεχνικές αξιολογήσεις στο πλαίσιο μελετών που σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση, την ορθολογική διαχείριση υδατικών πόρων και την εφαρμογή της προσέγγισης Nexus.

Τέλος, η βάση δεδομένων συνοδεύεται από χαρτογραφική απεικόνιση των εγκαταστάσεων σε εθνική κλίμακα, η οποία επιτρέπει τη χωρική αποτύπωση της λειτουργικής κατάστασης, του βαθμού συμμόρφωσης και της ετοιμότητας για επαναχρησιμοποίηση, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη θεώρηση για τη δυναμική και τις προοπτικές των ΕΕΛ στην Ελλάδα.



Χάρτης 1. Γεωγραφική κατανομή των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) στον ελλαδικό χώρο, όπως αποτυπώνεται στη Βάση Δεδομένων της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων για τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (<http://84.205.254.113/Services/Pages/Browse.aspx>).



Χάρτης 2. Γεωγραφική κατανομή των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) στον ελληνικό χώρο, όπως αποτυπώνεται στην νέα ενημερωμένη πύλη Βάσης Δεδομένων της Γενικής Γραμματείας. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι Ε.Ε.Λ. σε μη συμμόρφωση βάσει της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ, ενώ με μπλε χρώμα οι Ε.Ε.Λ. σε συμμόρφωση (<https://astikalimata.ypeka.gr/queries>).

14. Βιβλιογραφική Έρευνα

Το πρώτο στάδιο της ερευνητικής μεθοδολογίας περιλάμβανε τη διεξαγωγή εκτεταμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης με στόχο την κατανόηση του θεωρητικού υποβάθρου της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων εκροών υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας και της προσέγγισης Nexus (Water–Energy–Food–Ecosystems – WEFE).

Η διαδικασία εντοπισμού και επιλογής των βιβλιογραφικών πηγών βασίστηκε σε αναζητήσεις σε έγκριτες επιστημονικές βάσεις δεδομένων, όπως:

- Google Scholar
- ScienceDirect
- SpringerLink

Κατά τη διερεύνηση της σχετικής βιβλιογραφίας, υιοθετήθηκε συνδυαστική χρήση λέξεων-κλειδίων που αντανakλούν τόσο τις τεχνολογικές πτυχές της επεξεργασίας λυμάτων με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση τους όσο και τις διατομεακές διασυνδέσεις του πλέγματος Nexus.

Οι κυριότερες θεματικές λέξεις-κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αναζήτηση της βιβλιογραφίας ήταν:

◆ **Γενικά για επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση λυμάτων**

- επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων (*treated wastewater reuse*)
- επεξεργασία αστικών λυμάτων (*urban wastewater treatment*)
- ανακυκλωμένο νερό (*recycled water*)
- δευτερογενές και τριτογενές νερό (*secondary and tertiary water*)
- ανακτημένο νερό (*reclaimed water*)
- απολύμανση λυμάτων (*wastewater disinfection*)
- μεμβρανικές τεχνολογίες επεξεργασίας (*membrane treatment technologies*)
- τεχνητοί υγροβιότοποι (*constructed wetlands*)
- κίνδυνοι επαναχρησιμοποίησης (*reuse risks*)
- μικρορρυπαντές στα λύματα (*micropollutants in wastewater*)
- επιπτώσεις επαναχρησιμοποίησης (*environmental impacts of wastewater reuse*)

◆ **Κυκλική οικονομία και νερό**

- κυκλική οικονομία στον τομέα του νερού (*circular economy in the water sector*)
- βιώσιμη διαχείριση υδάτινων πόρων (*sustainable water resource management*)
- ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση νερού (*water recycling and reuse*)
- επαναξιοποίηση υδάτινων αποβλήτων (*valorization of water waste*)
- κυκλική διαχείριση λυμάτων (*circular wastewater management*)
- παραγωγή ενέργειας από λύματα (*energy production from wastewater*)
- ανάκτηση θρεπτικών συστατικών (*nutrient recovery*)
- αστικά λύματα ως πόρος (*urban wastewater as a resource*)

♦ Πλέγμα Νερό-Ενέργεια-Τροφή-Οικοσυστήματα

Water-Energy-Food-Ecosystem WEF E Nexus

- πλέγμα Nexus (*Nexus approach*)
- σύνδεση νερού-ενέργειας-τροφής (*water-energy-food linkages*)
- επιπτώσεις στο πλέγμα WEF E (*impacts on the WEF E Nexus*)

♦ Περιβάλλον, κοινωνία και πολιτική

- Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης – ΣΒΑ (*Sustainable Development Goals – SDGs*)
- ανθεκτικότητα στις κλιματικές αλλαγές (*climate resilience*)
- περιβαλλοντικοί δείκτες (*environmental indicators*)
- περιβαλλοντική νομοθεσία για επαναχρησιμοποίηση (*reuse-related environmental legislation*)
- κανονιστικό πλαίσιο λυμάτων (*wastewater regulatory framework*)

♦ Τεχνολογία και καινοτομία

- καινοτόμες τεχνολογίες επεξεργασίας (*innovative treatment technologies*)
- ενεργειακή αποδοτικότητα ΕΕΛ (*energy efficiency in WWTPs*)

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση περιέλαβε πληθώρα έγκριτων πηγών, οι οποίες οργανώθηκαν θεματικά έτσι ώστε να καλύπτουν σφαιρικά τους τομείς που σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων εκροών, την κυκλική οικονομία και την προσέγγιση Nexus. Η ανασκόπηση υλοποιήθηκε με την εφαρμογή μιας μεθοδολογικής διαδικασίας πέντε σταδίων. Αρχικά, έγινε εντοπισμός των πηγών, στη συνέχεια επιλογή και αξιολόγησή τους, ενώ ακολούθησε συλλογή και ανάλυση των πληροφοριών.

Περισσότερα από 90 επιστημονικά άρθρα και εκθέσεις εξετάστηκαν, με την τελική επιλογή να βασίζεται στη θεματική συνάφεια και στην ποιότητα της επιστημονικής τεκμηρίωσης. Η κατανομή των άρθρων ανά θεματική ενότητα παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Θεματική Ενότητα	Αριθμός Άρθρων
Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης, ΟΗΕ & Κλιματική Αλλαγή	10
Επαναχρησιμοποίηση & Κυκλικότητα του Νερού	6
Κυκλική Οικονομία	8
Ευρωπαϊκές Οδηγίες & Νομοθεσία	6
Ποιότητα Νερού	9
Τροφή	5
Ενέργεια	4
Οικοσυστήματα	5
Πλέγμα Nexus	8

Η αποδελτίωση του υλικού επέτρεψε την απομόνωση κρίσιμων σημείων που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα, τους περιορισμούς, και τα περιβαλλοντικά, κοινωνικά ή τεχνολογικά οφέλη της επαναχρησιμοποίησης.

15. Αποτύπωση επιπτώσεων της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στους κρίσιμους τομείς του Πλέγματος Νερό-Τροφή-Ενέργεια-Οικοσύστημα (Nexus WEFEE)

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο τον εντοπισμό, καταγραφή και κατηγοριοποίηση των επιπτώσεων που συνδέονται με την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στις τέσσερις διαστάσεις του πλαισίου Nexus WEFEE, δηλαδή το νερό, την ενέργεια, την τροφή και τα οικοσυστήματα. Ειδικότερα, διερευνήθηκαν και απομονώθηκαν οι θετικές και οι αρνητικές επιπτώσεις της εφαρμογής πρακτικών επαναχρησιμοποίησης, όπως

αυτές καταγράφονται σε διεθνείς και εθνικές μελέτες, ερευνητικά άρθρα, τεχνικές εκθέσεις και επίσημες κατευθυντήριες οδηγίες.

Η πληροφορία που συγκεντρώθηκε, αφού αξιολογήθηκε και διασταυρώθηκε με βάση την επαναληψιμότητα, και την εγκυρότητά της, ταξινομήθηκε σε θεματικές κατηγορίες και αποτυπώθηκε σε οκτώ διακριτούς πίνακες. Οι πίνακες αυτοί καταγράφουν με συστηματικό, τεκμηριωμένο και οργανωμένο τρόπο τις επιπτώσεις ανά τομέα και ανά κατηγορία (θετική ή αρνητική επίπτωση). Η παρουσίαση σε πίνακες επέτρεψε την ολιστική και συγκριτική αποτύπωση της πληροφορίας, διευκολύνοντας την κατανόηση των σύνθετων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του πλέγματος Nexus.

Η χρήση συγκριτικών πινάκων κρίθηκε απαραίτητη για την ανάδειξη της πολυδιάστατης φύσης του αντικειμένου μελέτης. Οι πίνακες λειτούργησαν όχι μόνο ως αποθετήριο γνώσης, αλλά και ως εργαλείο προετοιμασίας για την επόμενη φάση της ερευνητικής διαδικασίας: τον σχεδιασμό του ερωτηματολογίου. Οι θεματικές ενότητες και τα επιμέρους κριτήρια που ενσωματώθηκαν στους πίνακες αποτέλεσαν τη βάση για τη διαμόρφωση των ερωτήσεων, τόσο ως προς το περιεχόμενο όσο και ως προς τη δομή τους. Επιδιώχθηκε η μετατροπή των βιβλιογραφικά καταγεγραμμένων επιπτώσεων σε μετρήσιμες παραμέτρους, ικανές να αποτιμηθούν μέσω ποσοτικής ή και ποιοτικής προσέγγισης από τους εμπλεκόμενους φορείς.

Η ενσωμάτωση των επιπτώσεων σε δομημένους πίνακες κατέστησε δυνατή τη στοχευμένη διαμόρφωση του ερωτηματολογίου σε ζητήματα ουσιαστικής σημασίας, ενώ παράλληλα διασφάλισε τη συνοχή μεταξύ των θεωρητικών θεμελιώσεων και του εμπειρικού μέρους της έρευνας. Οι πίνακες συνέβαλαν ουσιαστικά στην αποσαφήνιση του εύρους και της φύσης των ερωτήσεων, διασφαλίζοντας ότι η αποτύπωση των απόψεων των ερωτώμενων καλύπτει πλήρως τις κρίσιμες πτυχές της μελέτης.

Εν κατακλείδι, η ανάπτυξη συγκριτικών πινάκων βασισμένων στη βιβλιογραφία αποτέλεσε μια καίρια μεθοδολογική επιλογή, η οποία ενίσχυσε την επιστημονική εγκυρότητα της ερευνητικής προσέγγισης και διαμόρφωσε το απαραίτητο υπόβαθρο για την κατασκευή ενός αξιόπιστου και θεωρητικά θεμελιωμένου ερωτηματολογίου.

➤ Αρνητικές επιπτώσεις στο Νερό

Η διαχείριση του νερού στο πλαίσιο της προσέγγισης Nexus (Water–Energy–Food–Ecosystems) απαιτεί την κατανόηση του ρόλου του όχι ως αυτόνομου πόρου, αλλά ως διασυνδεδετικού παράγοντα μεταξύ φυσικών και κοινωνικοοικονομικών συστημάτων. Στο επίκεντρο αυτής της θεώρησης βρίσκεται η ποιότητα του διαθέσιμου νερού, η οποία καθορίζει τη δυνατότητα ασφαλούς χρήσης του και επηρεάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των επιμέρους τομέων του πλέγματος.

Η πρακτική της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων, παρότι προβάλλεται διεθνώς ως εργαλείο αντιμετώπισης της υδατικής ανεπάρκειας, εγείρει σοβαρά ζητήματα ποιότητας, ιδιαίτερα όταν δεν εφαρμόζεται υπό συνθήκες αυστηρού τεχνικού και θεσμικού ελέγχου. Το επεξεργασμένο λύμα αποτελεί ένα σύνθετο μίγμα υπολειμμάτων οργανικής και ανόργανης προέλευσης, το οποίο ενδέχεται να περιλαμβάνει ρύπους που διαφεύγουν της συμβατικής επεξεργασίας και παραμένουν στην τελική εκροή. Αυτοί οι ρύποι δεν περιορίζονται μόνο σε παθογόνους μικροοργανισμούς, αλλά περιλαμβάνουν πλέον προχωρημένους μικρορρύπους, όπως φαρμακευτικές ουσίες, ενδοκρινικούς διαταράκτες και νανοσωματίδια, των οποίων η περιβαλλοντική συμπεριφορά παραμένει εν πολλοίς αβέβαιη.

Η σταδιακή εισαγωγή αυτών των ενώσεων στο υδατικό περιβάλλον, μέσω της άμεσης ή έμμεσης διάθεσης ή διήθησης, οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιοτικής κατάστασης των υδάτων, με μακροχρόνιες και ενίοτε μη αναστρέψιμες συνέπειες. Η αλλοίωση των φυσικοχημικών παραμέτρων, η συσσώρευση ανθεκτικών παθογόνων, καθώς και η πιθανή τοξικότητα από σωρευτικές αλληλεπιδράσεις ρύπων θέτουν σε κίνδυνο τη χρησιμότητα του νερού ως μέσο παραγωγής, πόσης ή υποστήριξης οικοσυστημάτων.

Πέρα από τις τοπικές επιπτώσεις, η υποβάθμιση της ποιότητας του νερού έχει συστημική σημασία εντός του πλαισίου W-E-F-E: η αδυναμία χρήσης του σε κρίσιμους τομείς, όπως η γεωργία ή η υδροδότηση, επιτείνει τις πιέσεις στους διαθέσιμους πόρους, προκαλεί ενεργειακή επιβάρυνση για περαιτέρω επεξεργασία και μεταφέρει το πρόβλημα στους άλλους τομείς του πλέγματος. Καθίσταται, συνεπώς, σαφές ότι η ποιότητα του επαναχρησιμοποιούμενου νερού δεν αποτελεί απλώς τεχνική παράμετρο, αλλά κεντρικό ζήτημα βιωσιμότητας.

Στο πλαίσιο αυτό, ο Πίνακας 2 συνοψίζει τις κυριότερες κατηγορίες αρνητικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την ποιότητα του νερού κατά την εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων, όπως αυτές τεκμηριώνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας 2. Αρνητικές επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον από την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών, μικρορύπων και βαρέων μετάλλων στα επεξεργασμένα λύματα, σύμφωνα με τη σχετική διεθνή βιβλιογραφία.

Αρνητικές επιπτώσεις στο Νερό
Οι απορρίψεις λυμάτων, ακόμη και μετά από επεξεργασία, περιέχουν μεγάλο αριθμό ρύπων που ενδέχεται να είναι επικίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα. Ορισμένοι από αυτούς τους ρύπους, οι οποίοι εντοπίζονται όλο και συχνότερα στα ανακτημένα επεξεργασμένα λύματα, είναι παθογόνοι μικροοργανισμοί, μικρορρύποι, γονίδια ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά, νανοϋλικά, παραπροϊόντα απολύμανσης, προϊόντα προσωπικής φροντίδας και φαρμακευτικές ουσίες. (Guerra-Rodriguez et al., 2020) https://doi.org/10.3390/w12051431
Η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών στα επεξεργασμένα λύματα, χημικών ρύπων ή βαρέων μετάλλων λόγω ανεπαρκούς επεξεργασίας, μπορεί να αποτελέσει σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για την αποτελεσματική επαναχρησιμοποίηση στην αγροτική παραγωγή. Οι κυριότεροι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι από τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων σχετίζονται με τη ρύπανση των υδάτων από χημικές ουσίες και παθογόνα, ως αποτέλεσμα ανεπαρκούς επεξεργασίας ή/και ελλιπών κατευθυντήριων οδηγιών διαχείρισης. Ο βαθμός των επιπτώσεων εξαρτάται από το επίπεδο καθαρισμού, τη μέθοδο και τον τόπο επαναχρησιμοποίησης, και μπορεί να εκδηλωθεί με τη μορφή ρύπανσης του εδάφους, των υπόγειων ή των επιφανειακών υδάτων. (Papadopoulos 1995· Kretschmer et al. 2002) DOI: 10.1007/978-3-319-05768-2
Μακροπρόθεσμα, η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα και στην ποιότητα του εδάφους, όπως η συσσώρευση αλάτων και βαρέων μετάλλων. Ορισμένες ουσίες που ανιχνεύονται στα λύματα μπορεί να βρίσκονται σε συγκεντρώσεις τόσο υψηλές ώστε να είναι τοξικές για τα φυτά ή να προκαλούν περιβαλλοντική επιβάρυνση και πιθανή υποβάθμιση του εδάφους, λόγω οξίνισης ή συσσώρευσης βαρέων μετάλλων. Οι συνέπειες αυτές ταξινομούνται ως μειονεκτήματα και ενδέχεται να προκαλέσουν κινδύνους για τα υπόγεια ύδατα (λόγω βαρέων μετάλλων, νιτρικών και οργανικών ενώσεων) αλλά και για την ανθρώπινη υγεία, μέσω της διασποράς παθογόνων μικροοργανισμών. (Kretschmer et al. 2002) DOI: 10.1007/978-3-319-05768-1

Η βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι από τη ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων συνδέονται άμεσα με τη μεθοδολογία επεξεργασίας, τον τόπο επαναχρησιμοποίησης και την παρουσία ανεπαρκών μέτρων ελέγχου. Οι συνέπειες αυτές ενισχύουν την ανάγκη για αυστηρή συμμόρφωση με οδηγίες διαχείρισης και συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας των εκροών.

➤ Αρνητικές επιπτώσεις στην Ενέργεια

Η μετάβαση προς ολοκληρωμένα συστήματα κυκλικής διαχείρισης των υδατικών πόρων, μέσω της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων, συνοδεύεται από σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις, οι οποίες συχνά παραβλέπονται στο δημόσιο διάλογο περί βιωσιμότητας. Η προσέγγιση Nexus W-E-F-E αναδεικνύει την ανάγκη για συνεκτίμηση των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ νερού και ενέργειας, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν υψηλά επίπεδα τεχνολογικής επεξεργασίας και μεταφοράς.

Η επίτευξη υψηλής ποιότητας επεξεργασμένων εκροών, ικανών να επαναχρησιμοποιηθούν με ασφάλεια, συχνά προϋποθέτει προχωρημένες τεχνικές, όπως η τριτοβάθμια επεξεργασία, η απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία ή η απομάκρυνση ιχνορυπαντών μέσω ειδικών διεργασιών. Οι τεχνολογίες αυτές, αν και περιβαλλοντικά αποδοτικές, συνοδεύονται από αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και ανάγκες για συνεχή λειτουργία υποδομών υψηλής έντασης πόρων. Παράλληλα, η απόσταση μεταξύ των αστικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και των τελικών χρηστών, που συχνά βρίσκονται σε αγροτικές ή περιφερειακές περιοχές, επιτείνει τις απαιτήσεις για μεταφορά, αποθήκευση και διανομή του ανακτημένου νερού, επιβαρύνοντας περαιτέρω το ενεργειακό αποτύπωμα του συστήματος.

Σε αυτό το πλαίσιο, η ενεργειακή διάσταση της επαναχρησιμοποίησης δεν μπορεί να εξετάζεται αποκομμένα από την υπόλοιπη ανάλυση. Η επιτυχής ένταξη τέτοιων πρακτικών στον σχεδιασμό των πόλεων και των αγροτικών περιοχών απαιτεί όχι μόνο τεχνολογικές καινοτομίες, αλλά και χωρικό επανασχεδιασμό των δικτύων, στρατηγική χωροθέτηση υποδομών και αξιολόγηση του ενεργειακού κόστους σε σχέση με τα περιβαλλοντικά οφέλη.

Ο Πίνακας 3 που ακολουθεί συνοψίζει βασικές κατηγορίες αρνητικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την ενεργειακή επιβάρυνση των συστημάτων επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης λυμάτων, όπως αυτές τεκμηριώνονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας 3. Ενδεικτικές αρνητικές επιπτώσεις στον ενεργειακό τομέα από την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων, όπως καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι επιπτώσεις αφορούν τόσο τις αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις των προηγμένων μεθόδων επεξεργασίας όσο και το ενεργειακό κόστος που σχετίζεται με τη μεταφορά, αποθήκευση και διανομή των εκροών.

Αρνητικές επιπτώσεις στην Ενέργεια

Ένας σημαντικός οικονομικός περιορισμός αφορά το κόστος μεταφοράς του επεξεργασμένου υγρού αποβλήτου από τους σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων προς τις αγροτικές περιοχές, καθώς οι περισσότεροι μεγάλοι σταθμοί είναι εγκατεστημένοι εντός του αστικού ιστού, όπου συγκεντρώνεται ο κύριος πληθυσμός. (Papadopoulos 1995; Kretschmer et al. 2002).

Η απομάκρυνση αυγών ελμίνθων, βακτηρίων και ιών επιτυγχάνεται συνήθως μέσω λιμνοδεξαμενών σταθεροποίησης και άλλων φυσικών μεθόδων επεξεργασίας. Αντιθέτως, στις περισσότερες ενεργοβόρες και τεχνικά σύνθετες συμβατικές διεργασίες, όπως η επεξεργασία με ενεργό ιλύ, η εφαρμογή πρόσθετων απολυμαντικών σταδίων – όπως η χλωρίωση, η οξονοποίηση και η υπεριώδης ακτινοβολία – καθίσταται αναγκαία για την αδρανοποίηση παθογόνων μικροοργανισμών. Οι μέθοδοι αυτές είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην εξάλειψη βακτηρίων και ιών, αλλά εμφανίζουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα έναντι των αυγών ελμίνθων, λόγω της υψηλής ανθεκτικότητάς τους και της διαφορετικής συμπεριφοράς τους κατά την επεξεργασία (Jiménez, 2007). Συμπερασματικά, η αύξηση του βαθμού επεξεργασίας των λυμάτων συνεπάγεται και αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων, καθώς οι προηγμένες τεχνολογίες (όπως η τριτοβάθμια επεξεργασία, η απολύμανση και η απομάκρυνση μικρορρυπαντών) απαιτούν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και πόρων για την επίτευξη υψηλής ποιότητας εκροών.
(Σύγγραμμα - Wastewater Irrigation and Health by L Raschid-Sally)

Η άρδευση με λύματα συνεπάγεται πρόσθετο κόστος τόσο για τους διαχειριστές των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων όσο και για τους αγρότες. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει επιπλέον επενδύσεις για την περαιτέρω επεξεργασία της εκροής ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές επαναχρησιμοποίησης, καθώς και έξοδα μεταφοράς και αποθήκευσης. Το κόστος μεταφοράς περιλαμβάνει την κατασκευή δεξαμενών, αγωγών και συστημάτων άντλησης που απαιτούνται για τη μεταφορά των επεξεργασμένων λυμάτων στους τελικούς χρήστες. Σε περιπτώσεις όπου οι αγρότες δεν έχουν άμεση πρόσβαση στα επεξεργασμένα λύματα από τη μονάδα επεξεργασίας, απαιτείται η κατασκευή κατάλληλων υποδομών μεταφοράς και αποθήκευσης. Δυστυχώς, τα υφιστάμενα δίκτυα διανομής πόσιμου νερού δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά των λυμάτων στους αγρότες, γεγονός που καθιστά αναγκαία την κατασκευή νέων αγωγών διανομής. (Ruiz-Rosa et al., 2016)

➤ Αρνητικές επιπτώσεις στην Τροφή

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση αναδεικνύεται ως στρατηγική απάντηση στις αυξανόμενες ανάγκες της γεωργίας σε νερό, ιδίως σε περιοχές που πλήττονται από λειψυδρία και κλιματική μεταβλητότητα. Ωστόσο, η χρήση τέτοιου είδους νερού ενδέχεται να επιφέρει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις τόσο στη γεωργική παραγωγικότητα όσο και στη μακροπρόθεσμη γονιμότητα του εδάφους, υπονομεύοντας την επισιτιστική ασφάλεια και τη βιωσιμότητα του αγροδιατροφικού τομέα, βασικό σκέλος του πλέγματος Nexus.

Η ποιότητα του επαναχρησιμοποιούμενου νερού αποτελεί καθοριστικό παράγοντα: αυξημένες συγκεντρώσεις σε διαλυτά άλατα (αλυτότητα), νάτριο, βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις μπορούν να μεταβάλουν την ισορροπία του εδάφους, προκαλώντας υποβάθμιση της δομής, μείωση της υδατοϊκανότητας και φαινόμενα φυτοτοξικότητας. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά ο λόγος προσρόφησης νατρίου (SAR), ο οποίος συνδέεται άμεσα με τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων, τη διαπερατότητα του εδάφους και τη φυσιολογική ανάπτυξη των φυτών.

Επιπλέον, η μακροχρόνια χρήση λυμάτων στην άρδευση μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση αλάτων στο έδαφος (προσωρινή ή μόνιμη αλάτωση), να επηρεάσει δυσμενώς τη ριζική απορρόφηση νερού και να καταστήσει τις καλλιέργειες πιο ευάλωτες σε περιόδους ξηρασίας. Η συστηματική έκθεση των εδαφών και των καλλιεργειών σε θρεπτικά φορτία μεγαλύτερα των αναγκών της παραγωγής, ενδέχεται επίσης να οδηγήσει σε υπερλιπάνσεις και δευτερογενή προβλήματα, όπως φυτοτοξικότητα ή ρύπανση υπόγειων υδάτων.

Παρότι η επαναχρησιμοποίηση μπορεί να προσφέρει χρήσιμα θρεπτικά στοιχεία, η απουσία εξατομικευμένων προδιαγραφών με βάση τις τοπικές αγρονομικές συνθήκες καθιστά κρίσιμη την ανάγκη για στοχευμένη παρακολούθηση και προσαρμοσμένες πρακτικές διαχείρισης.

Ο Πίνακας 4 που ακολουθεί συνοψίζει τις κυριότερες αρνητικές επιπτώσεις της άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα στην αγροτική παραγωγή και στην ποιότητα του εδάφους, όπως αυτές έχουν καταγραφεί από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας 4. Αρνητικές επιπτώσεις της άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα στη γεωργική παραγωγή, στην ποιότητα του εδάφους και στη φυσιολογία των φυτών.

Αρνητικές επιπτώσεις στην Τροφή

Το κύριο πρόβλημα που σχετίζεται με τις εκροές από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Ε.Ε.Λ.), πέρα από τις αυξημένες τιμές BOD (βιοχημικής απαίτησης σε οξυγόνο), είναι τα υψηλά επίπεδα αλάτων. Τα προβλήματα αλατότητας είναι πιο συχνά σε μονάδες επεξεργασίας που βρίσκονται σε παράκτιες περιοχές, κυρίως λόγω της εισχώρησης θαλασσινού νερού ή της διείσδυσης υφάλμυρων υπόγειων υδάτων στο δημοτικό αποχετευτικό δίκτυο. Το νερό με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη αγροτική παραγωγικότητα και σε υποβάθμιση της ποιότητας της γεωργικής γης (Ilias et al., 2014).

Ο λόγος προσρόφησης νατρίου (Sodium Adsorption Ratio – SAR) εκφράζει την καταλληλότητα του νερού άρδευσης ως προς τις επιπτώσεις του στο έδαφος. Υπολογίζεται από τις συγκεντρώσεις των ιόντων ασβεστίου, νατρίου και μαγνησίου στο έδαφος ή στο νερό άρδευσης (Oster et al., 2016). Ουσιαστικά, ο δείκτης SAR αποτυπώνει την επίδραση των ιόντων νατρίου στη δομή του εδάφους (Marchuk and Rengasamy, 2010).

Τα εδάφη που αρδεύονται με λύματα παρουσιάζουν συνήθως υψηλότερες τιμές SAR σε σχέση με εκείνα που αρδεύονται με γλυκό νερό. Σε μία μελέτη παρατηρήθηκε αύξηση κατά 113,6% του δείκτη SAR στο έδαφος που αρδευόταν με επεξεργασμένα λύματα, σε σύγκριση με εκείνο που αρδευόταν με συμβατικό νερό (Zema et al., 2012).

Πολλές μελέτες σχετικά με την άρδευση με λύματα έχουν αναφέρει αύξηση του SAR στο έδαφος μετά την άρδευση, αποδίδοντας την αύξηση αυτή είτε στην υψηλή περιεκτικότητα σε νάτριο είτε στον αυξημένο SAR του αρδευτικού νερού (Bedbabis et al., 2014· Ganjgunte et al., 2017· SouDakouré et al., 2013).

Παράγοντες όπως η σύσταση των λυμάτων, ο τύπος και η συχνότητα της άρδευσης, το είδος του εδάφους και οι γεωργικές πρακτικές μπορούν να επηρεάσουν τον SAR στα εδάφη που αρδεύονται με λύματα. Ένας υψηλός SAR στο νερό άρδευσης μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στις καλλιέργειες και στο έδαφος.

Η άρδευση με λύματα μπορεί να προκαλέσει προσωρινή ή μακροπρόθεσμη αλάτωση, λόγω της περιεκτικότητάς τους σε άλατα (κατιόντα και ανιόντα). Σε καλλιέργειες ντομάτας που αρδευόταν με επεξεργασμένα λύματα παρατηρήθηκε προσωρινή αλάτωση κατά τη θερινή περίοδο, η οποία υποχώρησε στο τέλος του χειμώνα (Vergine et al., 2017a).

Η υψηλή αλατότητα του εδάφους μειώνει τη γεωργική παραγωγικότητα, προκαλώντας έλλειμμα στην πρόσληψη νερού από τα φυτά και μεταβάλλοντας τη φυσιολογία και την ανατομία τους. Θεωρείται σοβαρή απειλή για την επισιτιστική ασφάλεια.

(Karan and Subudhi, 2012) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>

Οι αρνητικές επιπτώσεις στη σχέση εδάφους-νερού που προκύπτουν από την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά και δυσμενώς τη γεωργική παραγωγή. Η ανάπτυξη των φυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σχέση εδάφους-νερού, καθώς και τα δύο αποτελούν τα βασικά μέσα στήριξης του φυτού.

Η μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, της ικανότητας κατακράτησης νερού και του ρυθμού διήθησης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επηρεάζει τη διαθεσιμότητα νερού στα φυτά. Η αδυναμία του εδάφους να συγκρατεί νερό μπορεί να περιορίσει τη διαθεσιμότητα νερού σε φυτά με ρηχό ριζικό σύστημα, ενώ η αδυναμία του να μεταφέρει νερό μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για φυτά με βαθύ ριζικό σύστημα, όσον αφορά την πρόσβαση στο νερό. Οι επιπτώσεις μπορεί να διαφέρουν σε κάθε ζώνη του εδαφικού προφίλ, ανάλογα με πρόσθετους παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά πρόσληψης νερού από τα φυτά.

(Assouline and Narkis, 2011). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>

Η Φυτοτοξικότητα αναφέρεται στη μείωση της ανάπτυξης και της ποιότητας των φυτών λόγω υπερβολικής συγκέντρωσης θρεπτικών συστατικών (Mccauley et al., 2011).

Η άρδευση καλλιεργειών με λύματα μπορεί να προκαλέσει φυτοτοξικότητα μέσω της παροχής μακροθρεπτικών στοιχείων, οργανικών ενώσεων και ιχνοστοιχείων. Έχει διαπιστωθεί ότι η άρδευση με λύματα αυξάνει τα επίπεδα ιχνοστοιχείων τόσο στο έδαφος όσο και στα φυτά.

(Galavi et al., 2010· Kalavrouziotis et al., 2012) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>

Η άρδευση με λύματα δεν προσφέρει μόνο θρεπτικά στοιχεία για την ενίσχυση της αγροτικής παραγωγής, αλλά καθιστά επίσης διαθέσιμο το νερό στους αγρότες, συμβάλλοντας στην αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών. Δεδομένου ότι τα λύματα δεν εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες (σε αντίθεση με τη βροχόπτωση), οι αγρότες μπορούν να έχουν συνεχή πρόσβαση σε νερό για άρδευση ακόμη και κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας.

(Verlicchi et al., 2012) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>

➤ Αρνητικές επιπτώσεις στα Οικοσυστήματα

Η περιβαλλοντική διάσταση της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της προσέγγισης Nexus W-E-F-E, καθώς η ποιότητα του νερού που επιστρέφει στο περιβάλλον ή χρησιμοποιείται σε παραγωγικές δραστηριότητες, δεν επηρεάζει μόνο τους άμεσους χρήστες αλλά και την οικολογική ισορροπία των οικοσυστημάτων. Τα λύματα, ακόμη και μετά από επεξεργασία, ενδέχεται να περιέχουν υπολειμματικούς ρύπους που δεν απομακρύνονται πλήρως και παρουσιάζουν βιοσυσσώρευση ή/και βιοδραστηριότητα.

Η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών, μικρορρυπαντών, φαρμακευτικών καταλοίπων, νανοϋλικών και υποπροϊόντων απολύμανσης μπορεί να διαταράξει σημαντικά τη δομή και λειτουργία των υδατικών και χερσαίων οικοσυστημάτων, ιδιαίτερα όταν αυτές οι ενώσεις είναι βιοανθεκτικές ή επιδεικνύουν ενδοκρινική ή τοξική δράση στους οργανισμούς. Πολλά από τα συστατικά αυτά ανιχνεύονται ολοένα και συχνότερα σε εδάφη, επιφανειακά νερά, αλλά και σε τροφικά πλέγματα, λόγω της επαναχρησιμοποίησης υδάτων για άρδευση, εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων ή εκροή σε φυσικούς αποδέκτες.

Τα οικοσυστήματα που εκτίθενται επανειλημμένα σε τέτοιες ενώσεις ενδέχεται να εμφανίσουν διαταραχές στην ποικιλότητα και αφθονία ειδών, τροποποίηση των τροφικών αλυσίδων, εμφάνιση μικροβιακής ανθεκτικότητας και μεταβολές στη χημική σύνθεση των ιζημάτων και του εδάφους. Η έμμεση ή άμεση επίδραση στην πανίδα και χλωρίδα δημιουργεί επιπτώσεις

μακροπρόθεσμης κλίμακας, πολλές εκ των οποίων δεν είναι άμεσα ανιχνεύσιμες αλλά ενδέχεται να είναι μη αναστρέψιμες.

Ο Πίνακας 5 που ακολουθεί συνοψίζει τις κυριότερες μορφές ρύπανσης που δύνανται να επηρεάσουν τα οικοσυστήματα μέσω της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων, όπως έχουν καταγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας 5. Αρνητικές επιπτώσεις σε οικοσυστήματα από την παρουσία υπολειμματικών ρύπων σε επεξεργασμένα λύματα.

Αρνητικές επιπτώσεις στα Οικοσυστήματα

Οι απορρίψεις λυμάτων, ακόμη και μετά την επεξεργασία τους, περιέχουν μεγάλο αριθμό ρυπαντών που ενδέχεται να είναι επικίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα.
[Behera et al., 2011] <https://doi.org/10.3390/w12051431>

Ορισμένοι από αυτούς τους ρυπαντές, οι οποίοι αναλύονται και ανιχνεύονται ολοένα και συχνότερα στα επαναχρησιμοποιούμενα λύματα (Behera et al., 2011), είναι παθογόνοι μικροοργανισμοί (Kulkarni et al., 2018), μικρορρυπαντές (Čelić et al., 2019), γονίδια ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά (Cerqueira et al., 2019), νανοϋλικά, υποπροϊόντα απολύμανσης, προϊόντα προσωπικής φροντίδας και φαρμακευτικά σκευάσματα. <https://doi.org/10.3390/w12051431>

Οι απορρίψεις λυμάτων, ακόμη και μετά την επεξεργασία τους, περιέχουν μεγάλο αριθμό ρυπαντών που ενδέχεται να είναι επικίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα. Ορισμένοι από αυτούς τους ρυπαντές, οι οποίοι αναλύονται και ανιχνεύονται ολοένα και συχνότερα στα επαναχρησιμοποιούμενα λύματα [Behera et al., 2011], είναι παθογόνοι μικροοργανισμοί [Kulkarni et al., 2018], μικρορρυπαντές [Čelić et al., 2019], γονίδια ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά [Cerqueira et al., 2019], νανοϋλικά, υποπροϊόντα απολύμανσης, προϊόντα προσωπικής φροντίδας και φαρμακευτικά σκευάσματα. Όσον αφορά την επαναχρησιμοποίηση του νερού, η παρουσία παθογόνων μικροβίων, όπως βακτήρια, ιοί ή πρωτόζωα, αποτελεί τη σοβαρότερη απειλή για την ανθρώπινη υγεία [Jasim et al., 2016], καθώς ευθύνονται για υδατογενείς ασθένειες. Ωστόσο, και οι χημικοί ρυπαντές, όπως φάρμακα, βαρέα μέταλλα, υδρογονάνθρακες κ.ά., μπορεί επίσης να συνιστούν κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Ο πληθυσμός μπορεί να εκτεθεί σε αυτούς τους ρυπαντές είτε άμεσα μέσω της κατανάλωσης μολυσμένου νερού, της εισπνοής ή της επαφής με το δέρμα, είτε έμμεσα μέσω της κατανάλωσης τροφίμων που έχουν παραχθεί ή εκτεθεί σε μολυσμένα εκροές νερού. <https://doi.org/10.3390/w12051431>

➤ Θετικές επιπτώσεις στο Νερό

Η παγκόσμια εντατικοποίηση της ζήτησης νερού, σε συνδυασμό με την αβεβαιότητα που προκαλεί η κλιματική αλλαγή, αναδεικνύει την ανάγκη μετάβασης προς βιώσιμες και κυκλικές πρακτικές διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων εντάσσεται σε αυτό το πλαίσιο ως μια στρατηγική επιλογή με πολλαπλά οφέλη τόσο σε τοπική όσο και σε περιφερειακή κλίμακα.

Σε επίπεδο υδατικής διαθεσιμότητας, η πρακτική αυτή συμβάλλει σημαντικά στην ενίσχυση των υδατικών αποθεμάτων, καθώς μειώνει την πίεση στους φυσικούς υδροφορείς και περιορίζει την ανάγκη για εξάντληση αποθεμάτων γλυκού νερού. Παράλληλα, προάγει τη σταθερότητα της προσφοράς νερού, ιδίως σε περιοχές που εξαρτώνται από άνισα κατανομημένους ή εποχικούς υδάτινους πόρους. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η εφαρμογή της στην αστική και αγροτική υδρονομία, όπου το ανακτημένο νερό μπορεί να υποκαταστήσει το πόσιμο ή αρδευτικό νερό σε χρήσεις που δεν απαιτούν υψηλή ποιότητα.

Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει συνοπτικά τις κυριότερες θετικές επιπτώσεις που μπορεί να έχει η ορθά οργανωμένη επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων στην ενίσχυση των υδατικών πόρων, όπως καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας 6. Θετικές επιπτώσεις της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στο νερό.

Θετικές επιπτώσεις στο Νερό
Η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων αποτελεί μια εξαιρετική επιλογή για την ενίσχυση των υδατικών πόρων, μειώνοντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. (Salgot & Folch, 2018) https://doi.org/10.3390/w12051431
Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν τη βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας των επενδύσεων στην επεξεργασία λυμάτων και στην άρδευση, τη διατήρηση των αποθεμάτων γλυκού νερού, καθώς και την αξιοποίηση των θρεπτικών συστατικών που περιέχονται στα λύματα (όπως το άζωτο και το φώσφορο). Χρησιμοποιώντας επεξεργασμένα λύματα αντί για πόσιμο νερό στη γεωργία, εξοικονομείται πολύτιμο γλυκό νερό για άλλες χρήσεις (Choukr-Allah 2011).

➤ Θετικές επιπτώσεις στην Ενέργεια

Η παραγωγή και διανομή ανακτημένου νερού από υφιστάμενες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων συχνά απαιτεί λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με την παροχή νερού από συμβατικές πηγές (ιδίως όταν απαιτείται άντληση από βαθιά υδροφόρα στρώματα ή μεταφορά από μεγάλες αποστάσεις). Η εξοικονόμηση αυτή ενισχύεται ακόμη περισσότερο όταν η επαναχρησιμοποίηση συνδυάζεται με μέτρα επανατροφοδότησης υδροφορέων ή άρδευσης σε γειτνιάζουσες περιοχές, μειώνοντας το ενεργειακό αποτύπωμα.

Πέρα από τις λειτουργικές ωφέλειες, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν και οι οικονομικές και μη χρηματικές αποδόσεις της επαναχρησιμοποίησης. Η αρχή "ο ρυπαίνων πληρώνει", η αποφυγή τελών απόρριψης ρυπαντικού φορτίου και η δυνατότητα συμμόρφωσης με αυστηρότερες περιβαλλοντικές απαιτήσεις συνδέονται άμεσα με ενεργειακά και χρηματοοικονομικά οφέλη. Παράλληλα, η αποφυγή επιβάρυνσης των φυσικών αποδεκτών έχει σημαντική αξία που συχνά δεν εκφράζεται με χρηματικούς όρους, αλλά επηρεάζει τη μακροπρόθεσμη ενεργειακή και περιβαλλοντική ανθεκτικότητα του συστήματος.

Ο Πίνακας 7 που ακολουθεί συνοψίζει τις βασικές κατηγορίες θετικών ενεργειακών και οικονομικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την ορθή αξιοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων, βάσει σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας.

Πίνακας 7. Θετικές επιπτώσεις της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων στον ενεργειακό τομέα

Θετικές επιπτώσεις στην Ενέργεια
Τα επεξεργασμένα λύματα απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή και την παροχή τους, και επίσης παράγουν λιγότερες εκπομπές CO ₂ . (Santos et al., 2021) https://doi.org/10.3390/w13141911
Η μη χρηματική αξία μπορεί να φτάσει έως και τα 0,31 € ανά κυβικό μέτρο νερού και ενδέχεται ακόμη και να υπερβαίνει το κόστος της περαιτέρω επεξεργασίας (τελικής καθαριστικής φάσης) των επεξεργασμένων λυμάτων για επαναχρησιμοποίηση (Alcon et al., 2010). Τα οικονομικά οφέλη είναι τεράστια και περιλαμβάνουν τόσο χρηματικές όσο και μη χρηματικές αποδόσεις, ωστόσο πολύ συχνά τα μη χρηματικά οφέλη παραβλέπονται. Η μη χρηματική αξία (ή άυλη αξία, στα αγγλικά non-market value) αναφέρεται στα οφέλη που αποδίδει ένα αγαθό ή μια υπηρεσία τα οποία δεν αντανακλώνται άμεσα σε χρηματικές συναλλαγές ή τιμές της αγοράς. Παραδείγματα μη χρηματικής αξίας: Η βελτίωση της δημόσιας υγείας λόγω μειωμένης ρύπανσης. Η προστασία του περιβάλλοντος (π.χ. λιγότερα λύματα σε ποτάμια). Η αισθητική και ψυχαγωγική αξία μιας καθαρής λίμνης ή αγροτικού τοπίου. Η ασφάλεια τροφίμων και η διατήρηση φυσικών πόρων για τις μελλοντικές γενιές. Στην περίπτωση των λυμάτων: Αν, για παράδειγμα, η επαναχρησιμοποίηση νερού μειώνει τη ρύπανση, προστατεύει τα υπόγεια ύδατα και ενισχύει την αγροτική ανθεκτικότητα χωρίς να αγοράζεται τίποτα σε χρηματική αξία, τότε αυτά τα οφέλη θεωρούνται μη χρηματικά.

Οικονομικά οφέλη μπορούν να προκύψουν από τη μείωση των τελών που καταβάλλουν οι διαχειριστές των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων προς τις αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές· πρόκειται για την εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει», σύμφωνα με την οποία, σε ορισμένες χώρες, οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων υποχρεούνται να καταβάλλουν συγκεκριμένο τέλος για την απόρριψη εκροών σε υδάτινους πόρους. Συνήθως, το τέλος αυτό εξαρτάται από τον όγκο ή τη συγκέντρωση του ρυπαντικού φορτίου· επομένως, η μείωση του όγκου των εκροών μπορεί να οδηγήσει σε χρηματοοικονομικές εξοικονομήσεις. (Alcon et al., 2012· Verlicchi et al., 2012)

➤ Θετικές επιπτώσεις στην Τροφή

Τα λύματα, ανάλογα με τον βαθμό επεξεργασίας τους, μπορούν να λειτουργήσουν ως πολύτιμη πηγή μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών συστατικών (άζωτο, φώσφορος, κάλιο, μαγνήσιο, ιχνοστοιχεία), μειώνοντας την ανάγκη για χημικά λιπάσματα. Παράλληλα, η υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα και άλλες οργανικές ενώσεις μπορεί να βελτιώσει τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, ενισχύοντας τη δομή, τη γονιμότητα και τη μικροβιακή δραστηριότητα. Αυτές οι ιδιότητες συνδέονται άμεσα με την αύξηση της παραγωγικότητας και την ενίσχυση της βιωσιμότητας των καλλιεργειών.

Επιπλέον, μελέτες έχουν δείξει ότι η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων αγροτικών προϊόντων, χωρίς να ξεπερνά κρίσιμα όρια ασφαλείας για επιβλαβείς ουσίες. Η σταθερή διαθεσιμότητα υδατικών και θρεπτικών πόρων ενισχύει τη γεωργική ανθεκτικότητα, κυρίως σε περιοχές με περιοδική ξηρασία ή ασταθή πρόσβαση σε καθαρό αρδευτικό νερό.

Η επαναχρησιμοποίηση, όταν εφαρμόζεται με κατάλληλο σχεδιασμό και παρακολούθηση, συμβάλλει στην επίτευξη επισιτιστικής ασφάλειας, μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικές εισροές, ενισχύοντας τη σταθερότητα των αποδόσεων και υποστηρίζοντας την αυτάρκεια των γεωργικών συστημάτων.

Ο Πίνακας 8 που ακολουθεί συνοψίζει τα κυριότερα οφέλη της άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα για τη γεωργική παραγωγή, την ποιότητα του εδάφους και τη βιωσιμότητα του αγροδιατροφικού τομέα, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας 8. Θετικές επιπτώσεις της χρήσης επεξεργασμένων λυμάτων στην αγροτική παραγωγή και στο έδαφος

Θετικές επιπτώσεις στην Τροφή

Διάφορες μελέτες έδειξαν αύξηση τόσο στην ποσότητα όσο και στην ποιότητα των καλλιεργειών που αρδεύονται με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα.

(Alkhamisi & Ahmed, 2014) DOI:10.1007/978-3-319-05768-2

Αν το νερό από τα λύματα υποστεί λιγότερη επεξεργασία, τότε περιέχει περισσότερα θρεπτικά συστατικά, κάτι που μειώνει το κόστος για λιπάσματα. Επίσης, το κόστος άρδευσης μπορεί να είναι χαμηλότερο, αν η τιμή του νερού είναι ανάλογη με το μικρότερο κόστος καθαρισμού. Παρ' όλα αυτά, οι αποδόσεις των καλλιεργειών και οι τιμές των αγροτικών προϊόντων μπορεί να πέσουν, αν τα θρεπτικά του νερού δεν ταιριάζουν με τις ανάγκες των φυτών. Alkhamisi & Ahmed, 2014). DOI:10.1007/978-3-319-05768-2

Η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων αύξησε την παραγωγή χωρίς να ξεπεραστούν τα όρια ασφαλείας για επιβλαβείς ουσίες στα φυτά. (MAF 2011)

Απόδοση και Αποδοτικότητα Χρήσης Νερού του Καλαμποκιού για Ζωοτροφή (*Zea mays* L.) υπό Άρδευση με Επεξεργασμένα Λύματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι τα φυτά που αρδεύτηκαν με επεξεργασμένα λύματα περιείχαν υψηλότερες συγκεντρώσεις αζώτου σε όλα τα επίπεδα ποσότητας νερού σε σύγκριση με εκείνα που αρδεύτηκαν με καθαρό νερό. Ωστόσο, η απορρόφηση καλίου (K), φωσφόρου (P), ασβεστίου (Ca), μαγνησίου (Mg), σιδήρου (Fe), θείου (S), βορίου (B), ψευδαργύρου (Zn), χαλκού (Cu) και μαγγανίου (Mn) από το καλαμπόκι για ζωοτροφή δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο ειδών άρδευσης. Τα φυτά που ποτίστηκαν με TWW εμφάνισαν επίσης μεγαλύτερους ρυθμούς ανάπτυξης (ως προς το ύψος του φυτού) σε σύγκριση με εκείνα που ποτίστηκαν με καθαρό νερό. (Alkhamisi et al. 2011)

Επιπτώσεις στο έδαφος - Παροχή θρεπτικών συστατικών: Η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα προσθέτει σημαντικά μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά στοιχεία στο έδαφος. Τα λύματα αποτελούν πολύτιμη πηγή αζώτου (N), καλίου (K), φωσφόρου (P), ψευδαργύρου (Zn), σιδήρου (Fe), μαγγανίου (Mn) και χαλκού (Cu), λόγω της σύστασής τους.

(Qadir and Scott, 2010) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>

Η χρήση επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση καλλιεργειών μπορεί να βελτιώσει την περιεκτικότητα του εδάφους σε άζωτο, λειτουργώντας ως λίπασμα, καθώς αποτελεί καλή πηγή ανόργανου αζώτου (αμμωνίου και νιτρικών). Συνεπώς, τα λύματα αυξάνουν τη διαθεσιμότητα του αζώτου στο έδαφος. Εκτός από πηγή αζώτου, η άρδευση με λύματα ενισχύει τον ρυθμό ανοργανοποίησης και διευκολύνει την πρόσληψη αζώτου από τις καλλιέργειες

(Quemada et al., 2016). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>

Συμπέρασμα επιστημονικής ομάδας του άρθρου:

Επομένως, η συμβολή της άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα στην παροχή επιπλέον αζώτου είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη βιωσιμότητα της γεωργίας και την ασφάλεια των τροφίμων.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>

Η περιεκτικότητα των λυμάτων σε οργανικό άνθρακα/οργανική ουσία μπορεί να είναι υψηλή σε σύγκριση με άλλες πηγές νερού (π.χ. υπόγεια νερά). Συνεπώς, η επαναχρησιμοποίηση λυμάτων θα μπορούσε να αποτελέσει μια βιώσιμη και πολύτιμη πηγή οργανικού άνθρακα για το έδαφος, προάγοντας την ανάπτυξη των φυτών. Ο Galavi και συνεργάτες. (2010) ανέφεραν αύξηση του ποσοστού οργανικού άνθρακα/οργανικής ουσίας σε έδαφος που αρδευόταν με λύματα σε σύγκριση με το έδαφος ελέγχου. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>

➤ Θετικές επιπτώσεις στα Οικοσυστήματα

Η εφαρμογή τεχνικών τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων, μέσω επιφανειακής κατείσδυσης ή άλλων μορφών φυσικής διήθησης, μπορεί να ενισχύσει την αναπλήρωση εξαντλημένων αποθεμάτων, να μειώσει την υφαλμύρωση και να βελτιώσει τη σταθερότητα των υδροτοπικών και παράκτιων οικοσυστημάτων. Η χρήση επεξεργασμένου νερού για εμπλουτισμό υδροφορέων ή για έμμεσες πόσιμες χρήσεις συνιστά πλέον αναγνωρισμένη διεθνώς πρακτική, όταν εφαρμόζεται υπό κατάλληλες συνθήκες προεπεξεργασίας και παρακολούθησης. Παράλληλα, οι λεκάνες κατείσδυσης λειτουργούν ως **φυσικά φίλτρα**, απομακρύνοντας παθογόνους μικροοργανισμούς και αιωρούμενα σωματίδια, ενώ το οργανικό φορτίο των λυμάτων μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση της μικροβιακής δραστηριότητας του εδάφους.

Σε περιοχές με υπερβολική άντληση, η σταθερή εισροή καθαρά επεξεργασμένων λυμάτων σε υπόγεια στρώματα ή επιφανειακούς αποδέκτες περιορίζει την υποβάθμιση της στάθμης των υδάτων, διατηρώντας τη συνοχή των οικολογικών ροών και συμβάλλοντας στην επιβίωση της χλωρίδας και της πανίδας. Επιπρόσθετα, η ενέργεια που περιέχεται στα λύματα μπορεί να ανακτηθεί, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ενισχύοντας τον συνολικό περιβαλλοντικό κύκλο.

Ο Πίνακας 9 που ακολουθεί συνοψίζει τα βασικά περιβαλλοντικά και οικοσυστημικά οφέλη από την ελεγχόμενη και τεχνικά επαρκή επαναχρησιμοποίηση λυμάτων, με βάση τεκμηριωμένα δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Πίνακας 9. Θετικές επιπτώσεις της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στην οικολογική ισορροπία,

Θετικές επιπτώσεις στα Οικοσυστήματα
Τα επεξεργασμένα λύματα αποτελούν μια εναλλακτική πηγή νερού, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου το νερό είναι περιορισμένο. Από την άρδευση και τις βιομηχανικές χρήσεις έως την πόσιμη παροχή, τα λύματα που έχουν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να ενισχύσουν τα διαθέσιμα αποθέματα νερού και να μειώσουν το χάσμα μεταξύ ζήτησης και διαθεσιμότητας. (IWA, 2015) https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005
Η δυνατότητα άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κάλυψη της ζήτησης νερού στη γεωργία και την αποσυμφόρηση των πιέσεων που δέχονται οι πηγές γλυκού νερού (Jaramillo and Restrepo, 2017).
Το επεξεργασμένο νερό έχει επαναχρησιμοποιηθεί για έμμεσες πόσιμες χρήσεις κυρίως μέσω του τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφορέων. Water Reuse via Groundwater Recharge - Takashi Asano https://www.iges.or.jp/en/publication_documents/pub/peer/en/1196/IRES_Vol.6-2_205.pdf Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων μέσω επιφανειακής κατείδυσης Η επιφανειακή κατείδυση αποτελεί τη απλούστερη, παλαιότερη και ευρύτερα εφαρμοζόμενη μέθοδο τεχνητού εμπλουτισμού (Todd, 1980). Στην επιφανειακή κατείδυση, τα ύδατα εμπλουτισμού —όπως τα επεξεργασμένα αστικά λύματα— διηθούνται από τις λεκάνες κατείδυσης διαμέσου του ακόρεστου εδαφικού στρώματος (ζώνη vadose). Οι λεκάνες κατείδυσης θεωρούνται η πλέον προτιμώμενη μέθοδος εμπλουτισμού, καθώς επιτρέπουν αποδοτική χρήση του χώρου και απαιτούν απλή συντήρηση. Γενικά, τα ποσοστά κατείδυσης είναι υψηλότερα σε εδάφη και βλάστηση που δεν έχουν διαταραχθεί. Όταν οι υδρογεωλογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές, η ανακύκλωση λυμάτων μπορεί να εφαρμοστεί σχετικά εύκολα μέσω της διαδικασίας SAT (Soil Aquifer Treatment). Η απαιτούμενη επεξεργασία επιτυγχάνεται συχνά μέσω της φυσικής διήθησης, καθώς τα λύματα κατεισδύουν διαμέσου της ζώνης vadose και στη συνέχεια κινούνται πλευρικά μέσα στον υδροφορέα. Η προτεινόμενη προεπεξεργασία για τα αστικά λύματα που προορίζονται για SAT περιλαμβάνει πρωτοβάθμια επεξεργασία (ή χρήση λιμνών σταθεροποίησης) και επίπλευση με διαλυμένο αέρα (DAF). Θα πρέπει να αποφεύγονται προεπεξεργασίες που οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτού (άλγης) στο νερό εμπλουτισμού, καθώς τα άλγη μπορούν να προκαλέσουν σοβαρό φραγμό στο έδαφος των λεκανών κατείδυσης. Αν και το ανανεωμένο νερό από τη διαδικασία SAT παρουσιάζει πολύ καλύτερη ποιότητα από τα εισερχόμενα λύματα, ενδέχεται να έχει χαμηλότερη ποιότητα από το φυσικό υπόγειο νερό. Συνεπώς, η διαδικασία SAT θα πρέπει να σχεδιάζεται και να διαχειρίζεται κατά τρόπο ώστε να αποφεύγεται η εισχώρηση στο φυσικό υπόγειο νερό και να χρησιμοποιείται μόνο ένα μέρος του υδροφορέα. Η απόσταση και ο χρόνος διέλευσης μεταξύ των λεκανών κατείδυσης και των φρεατίων ή αγωγών απορροής θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν

μεγαλύτερα —συνήθως τουλάχιστον 50–100 μέτρα και ενδεχομένως έξι μήνες— ώστε να διασφαλίζεται επαρκής επεξεργασία μέσω του SAT (Bouwer, 1978). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, προτιμάται η χρήση τριτοβάθμιας επεξεργασίας με διήθηση μέσω κοκκώδους μέσου και απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία (UV) για την επιφανειακή κατείσδυση.

Πλεονεκτήματα του τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων μέσω επιφανειακής κατείσδυσης:

(α) είναι δυνατή η αναπλήρωση των υπόγειων αποθεμάτων σε περιοχές κοντά σε μητροπολιτικά ή αγροτικά κέντρα όπου η υπεράντληση είναι σοβαρή, και

(β) η επιφανειακή κατείσδυση παρέχει τα πρόσθετα οφέλη της φυσικής επεξεργασίας μέσω του εδάφους και των δυνατοτήτων μεταφοράς του υδροφορέα.

Μια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων καταναλώνει από 0,45 έως 1,25 kWh/m³, ανάλογα με το μέγεθος της και τα είδη επεξεργασίας που πραγματοποιούνται σε αυτή. Η ενέργεια αυτή συνήθως παρέχεται εξωτερικά στη μονάδα, από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Gude, τα αστικά λύματα (WW) διαθέτουν συνολική ενεργειακή περιεκτικότητα που μπορεί να φτάσει έως και τα 9,7 kWh/m³. Υποθέτοντας ότι η μέση κατανάλωση ενέργειας στις μονάδες επεξεργασίας είναι 0,85 kWh/m³, το νερό μπορεί να περιέχει έως και 12 φορές περισσότερη ενέργεια από αυτήν που απαιτείται για την επεξεργασία του. Η ενέργεια αυτή που περιέχεται στα λύματα μπορεί να διακριθεί σε χημική (από το οργανικό φορτίο που υπάρχει στο νερό), θερμική και δυναμική ενέργεια, και μπορεί να ανακτηθεί από το νερό μέσω διαφόρων τεχνολογιών.

<https://doi.org/10.3390/w12051431>

16. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε συλλογή και ανάλυση δεδομένων από δεκαπέντε (15) εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) σε εθνικό επίπεδο, με στόχο την αποτίμηση της αποδοτικότητάς τους όσον αφορά την απομάκρυνση οργανικών και στερεών ρύπων. Η αξιολόγηση αυτή αποτελεί κρίσιμο βήμα για την κατανόηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των εγκαταστάσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα του επεξεργασμένου νερού που καταλήγει είτε στο περιβάλλον είτε σε συστήματα επαναχρησιμοποίησης.

Για καθεμία από τις 15 εγκαταστάσεις συλλέχθηκαν, μέσω της επίσημης ηλεκτρονικής πλατφόρμας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (<https://astikalimata.ypeka.gr/queries>), οι μέσες τιμές τριών βασικών παραμέτρων ποιότητας των αστικών λυμάτων:

- το BOD₅ (βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πενταήμερου),
- το COD (χημικά απαιτούμενο οξυγόνο) και
- τα TSS (ολικά αιωρούμενα στερεά).

Οι παράμετροι αυτοί επιλέχθηκαν επειδή αποτελούν διεθνώς καθιερωμένους δείκτες για την εκτίμηση του οργανικού και στερεού ρυπαντικού φορτίου στα λύματα, καθώς και της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας που υφίστανται.

Οι τιμές αυτές καταγράφηκαν ξεχωριστά για τις εισροές και τις εκροές κάθε μονάδας. Οι εισροές αντιπροσωπεύουν το ακατέργαστο φορτίο ρύπων που δέχεται η κάθε εγκατάσταση, ενώ οι εκροές καταγράφουν την τελική ποιότητα του νερού μετά την επεξεργασία. Η παράθεση των μέσων τιμών για τις παραμέτρους εισροών παρουσιάζεται στον Πίνακα 10a., ενώ οι αντίστοιχες τιμές των εκροών στον Πίνακα 10b. Η καταγραφή μέσων τιμών θεωρήθηκε η καταλληλότερη προσέγγιση, καθώς εξομαλύνει πιθανές βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μεμονωμένα ή ακραία αποτελέσματα και επιτρέπει τη σύγκριση των εγκαταστάσεων σε αντιπροσωπευτική χρονική βάση.

Πίνακας 10a. Μέσες τιμές παραμέτρων (BOD₅, COD, TSS) εισροών για 15 ΕΕΛ, βάσει δεδομένων από την επίσημη ηλεκτρονική πλατφόρμα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (<https://astikalimata.ypeka.gr/queries>)

Μέσες τιμές παραμέτρων κάθε Εγκατάσης Επεξεργασίας Λυμάτων:	BOD ₅ (mg/l) in	COD (mg/l) in	TSS (mg/l) in
ΕΕΛ1	289.78	602.91	239.61
ΕΕΛ2	255.53	836.65	95.63
ΕΕΛ3	117.41	166.98	140.24
ΕΕΛ4	262.92	754.54	108.04
ΕΕΛ5	63.42	225.83	83.82
ΕΕΛ6	367.29	584.75	142.08
ΕΕΛ7	174.92	470.00	254.83
ΕΕΛ8	254.00	553.33	217.50
ΕΕΛ9	377.92	757.42	349.04
ΕΕΛ10	210.72	395.31	143.29
ΕΕΛ11	118.00	236.67	
ΕΕΛ12	639.58	809.58	101.58
ΕΕΛ13	114.83	236.83	98.50
ΕΕΛ14	334.17	550.08	275.04
ΕΕΛ15	174.82	496.00	106.93

Πίνακας 10b. Μέσες τιμές παραμέτρων (BOD₅, COD, TSS) εισροών για 15 Ε.Ε.Λ., βάσει δεδομένων από επίσημη βάση δεδομένων.

Μέσες τιμές παραμέτρων κάθε Εγκατάσης Επεξεργασίας Λυμάτων:	BOD ₅ (mg/l) out	COD (mg/l) out	TSS (mg/l) out
ΕΕΛ1	9.40	36.37	9.52
ΕΕΛ2	4.71	29.59	4.73
ΕΕΛ3	5.79	12.61	8.31
ΕΕΛ4	9.38	80.32	8.13
ΕΕΛ5	10.08	30.33	11.72
ΕΕΛ6	17.75	74.96	14.38
ΕΕΛ7	5.58	17.17	7.17
ΕΕΛ8	7.75	37.08	16.67
ΕΕΛ9	7.50	42.16	4.99
ΕΕΛ10	3.67	19.62	3.64
ΕΕΛ11	9.33	24.33	
ΕΕΛ12	13.75	13.17	2.91
ΕΕΛ13	4.83	15.83	14.42
ΕΕΛ14	10.38	29.21	11.46
ΕΕΛ15	7.49	38.21	8.22

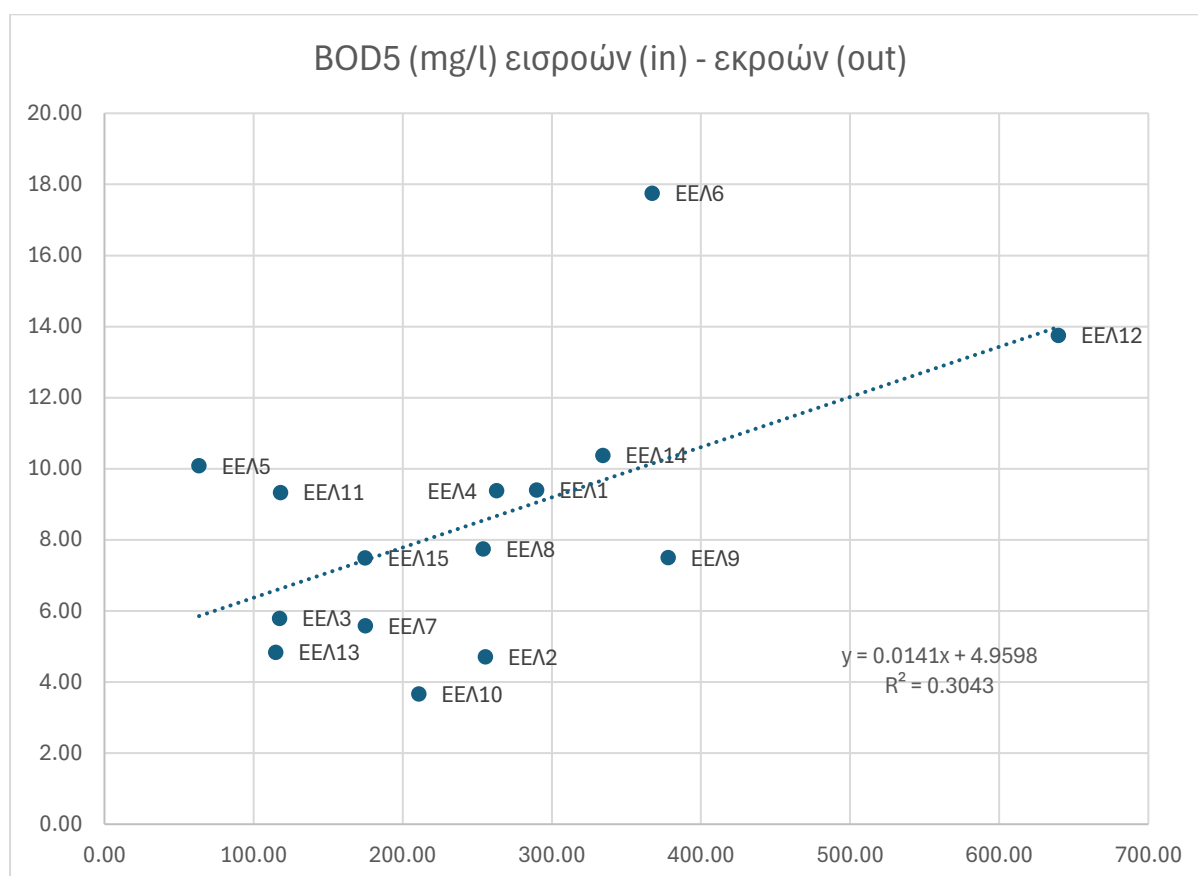
Στη συνέχεια, τα δεδομένα αξιοποιήθηκαν για τη δημιουργία τριών διαγραμμάτων διασποράς (scatter plots), καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μία από τις παραμέτρους (BOD₅, COD, TSS). Σε κάθε διάγραμμα απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ της μέσης τιμής της παραμέτρου στην είσοδο (άξονας x) και της αντίστοιχης τιμής στην έξοδο (άξονας y), για το σύνολο των 15 εγκαταστάσεων. Δηλαδή, κάθε σημείο στο γράφημα αντιπροσωπεύει μία Ε.Ε.Λ. και καταγράφει την επίδοσή της ως προς τη συγκεκριμένη παράμετρο.

Πάνω σε κάθε διάγραμμα προστέθηκε γραμμική γραμμή παλινδρόμησης, η οποία έχει ως στόχο να αποτυπώσει τη συνολική τάση που επικρατεί στα δεδομένα. Η γραμμή αυτή δεν εκφράζει την απόδοση κάποιας μεμονωμένης εγκατάστασης, αλλά παρουσιάζει το γενικότερο πρότυπο συσχέτισης μεταξύ των μέσων τιμών εισόδου και εξόδου. Η ερμηνεία της γραμμής, και ιδιαίτερα της κλίσης της, προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το πώς επηρεάζει η ποιότητα των εισερχόμενων λυμάτων την απόδοση επεξεργασίας, και κατ' επέκταση, την ποιότητα του τελικού αποδέκτη.

Η χρήση της γραμμής παλινδρόμησης ως αναλυτικού εργαλείου κρίθηκε απαραίτητη, καθώς παρέχει έναν μέσο όρο της «συμπεριφοράς» όλων των μονάδων του δείγματος, συμβάλλοντας

έτσι στην κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ ρυπαντικού φορτίου και τελικής ποιότητας επεξεργασμένων λυμάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Για την αποτίμηση της σχέσης μεταξύ της συγκέντρωσης οργανικών ρύπων που εισέρχονται σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων και της τελικής ποιότητας του επεξεργασμένου νερού που αποβάλλεται, αξιοποιήθηκαν γραφικές μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων. Ειδικότερα, κατασκευάστηκε διάγραμμα διασποράς στο οποίο αποτυπώνεται η συσχέτιση μεταξύ της μέσης τιμής BOD₅ στις εισροές ετησίως και της αντίστοιχης τιμής στις εκροές ετησίως για τις 15 εγκαταστάσεις που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της μελέτης. Η παράμετρος BOD₅ επιλέχθηκε ως δείκτης, καθώς αποτελεί βασικό μέτρο της περιεκτικότητας των λυμάτων σε βιοαποδομήσιμο οργανικό φορτίο και, συνεπώς, άμεσο δείκτη της αποτελεσματικότητας της βιολογικής επεξεργασίας. Η οπτική αναπαράσταση των τιμών πλαισιώθηκε με γραμμική γραμμή παλινδρόμησης, με στόχο την ανάλυση της γενικής τάσης που παρατηρείται ανάμεσα στις δύο μεταβλητές και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της ποιότητας των εισροών στη συμπεριφορά των εκροών.



Διάγραμμα 1. Σχέση μέσης συγκέντρωσης BOD₅ εισροών και εκροών για τις 15 ΕΕΛ.

Το παρόν διάγραμμα διασποράς απεικονίζει τη συσχέτιση μεταξύ των μέσων συγκεντρώσεων BOD₅ (mg/l) στις εισροές και στις εκροές δεκαπέντε (15) εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Η παράμετρος BOD₅ αποτελεί θεμελιώδη δείκτη του οργανικού ρυπαντικού φορτίου και χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της βιολογικής απόδοσης μιας μονάδας επεξεργασίας.

Κάθε σημείο στο γράφημα αντιπροσωπεύει μια εγκατάσταση, με τη θέση του να καθορίζεται από τη μέση τιμή BOD₅ στην είσοδο (x-άξονας) και στην έξοδο (y-άξονας). Πάνω στα δεδομένα εφαρμόστηκε γραμμική παλινδρόμηση, αποτυπωμένη με διακεκομμένη γραμμή. Η εξίσωση της ευθείας είναι:

$$y = 0.0141x + 4.9598$$

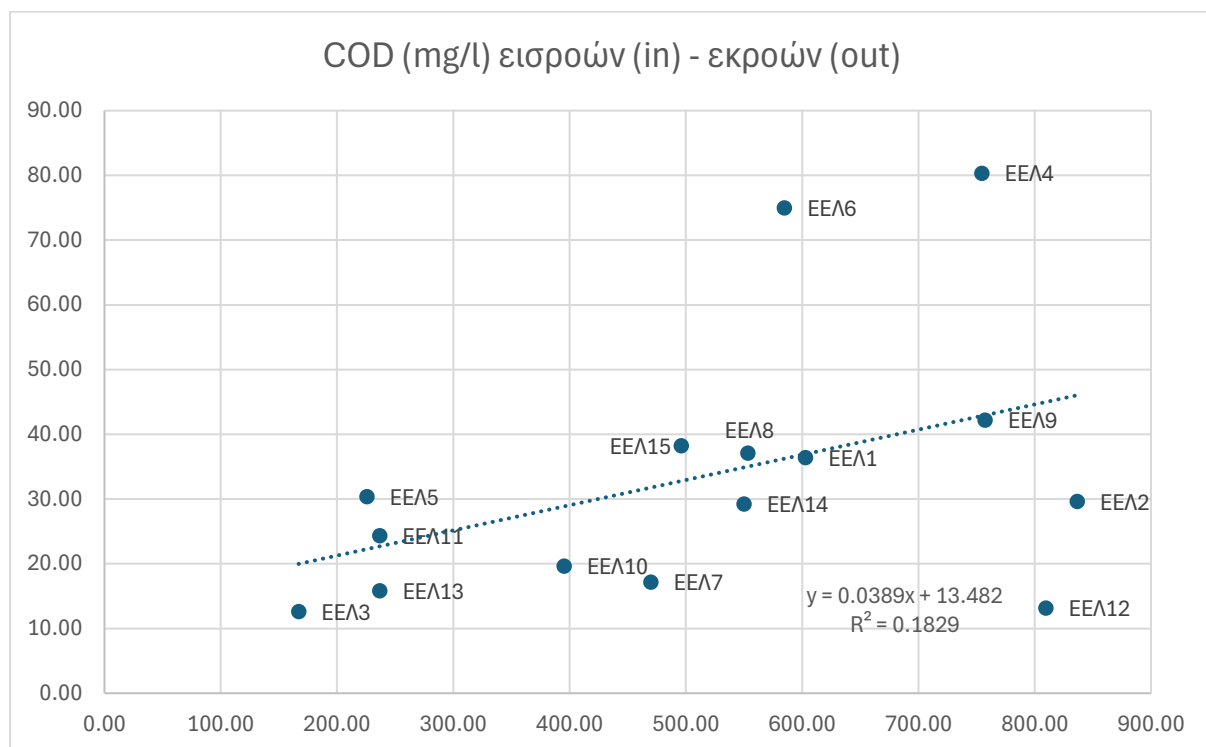
Η κλίση της ευθείας (0.0141) δείχνει ότι, κατά μέσο όρο, για κάθε 100 mg/l αύξηση του BOD₅ στις εισροές, η αντίστοιχη αύξηση στις εκροές είναι μόλις 1.41 mg/l. Η τιμή αυτή υποδηλώνει χαμηλή εξάρτηση της ποιότητας της εκροής από τη ρύπανση της εισροής, γεγονός που ερμηνεύεται ως θετικό στοιχείο καθότι οι περισσότερες εγκαταστάσεις φαίνεται να διατηρούν ικανοποιητική απόδοση, ακόμα και όταν το εισερχόμενο φορτίο είναι αυξημένο.

Ωστόσο, η παρουσία μονάδων όπως η ΕΕΛ6 και η ΕΕΛ12, οι οποίες παρουσιάζουν υψηλές τιμές εκροών, αποκαλύπτει διακυμάνσεις στην απόδοση ανά εγκατάσταση. Παρότι ο συνολικός μέσος όρος δείχνει ότι οι εγκαταστάσεις αποδίδουν σταθερά, οι αποκλίσεις αυτές υπογραμμίζουν ότι κάποιες μονάδες ενδέχεται να λειτουργούν κοντά στα όριά τους ή να χρειάζονται λειτουργική βελτίωση.

Ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.3043$ δηλώνει μέτρια συσχέτιση μεταξύ εισροών και εκροών, επιβεβαιώνοντας ότι ενώ υπάρχει κάποια επίδραση του ρυπαντικού φορτίου εισόδου στην ποιότητα της εξόδου, δεν είναι καθοριστική. Άρα, η απόδοση εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η τεχνολογία επεξεργασίας, η λειτουργική συντήρηση ή το προσωπικό διαχείρισης.

Συμπερασματικά, το διάγραμμα BOD₅ in-out δείχνει ότι οι εξεταζόμενες Ε.Ε.Λ. εμφανίζουν γενικά ικανοποιητική και σταθερή απόδοση, με την ποιότητα της εκροής να επηρεάζεται μόνο ήπια από το ρυπαντικό φορτίο εισόδου. Παρ' όλα αυτά, η ύπαρξη μεμονωμένων αποκλίσεων ενισχύει την ανάγκη για συστηματική παρακολούθηση και προσαρμογή της λειτουργίας, ώστε να εξασφαλίζεται η συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς στόχους ακόμη και υπό αυξημένα φορτία.

Η παράμετρος COD (Chemical Oxygen Demand – Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο) χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της συνολικής συγκέντρωσης οργανικών ενώσεων – βιοαποδομήσιμων και μη – στα αστικά λύματα. Σε αντίθεση με το BOD₅, το οποίο αντανακλά μόνο το βιοδιασπάσιμο οργανικό φορτίο, το COD περιλαμβάνει και τις χημικά οξειδώσιμες ενώσεις, γεγονός που το καθιστά έναν συνολικότερο δείκτη ρύπανσης. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, κατασκευάστηκε διάγραμμα διασποράς στο οποίο αποτυπώνεται η συσχέτιση μεταξύ των μέσων συγκεντρώσεων COD στις εισροές και στις εκροές των 15 εξεταζόμενων Ε.Ε.Λ. Με στόχο την ανάδειξη της συνολικής τάσης, προστέθηκε γραμμική γραμμή παλινδρόμησης, της οποίας η κλίση προσφέρει κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με την αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων ως προς την απομάκρυνση χημικά απαιτούμενου οξυγόνου.



Διάγραμμα 2. Σχέση μέσης συγκέντρωσης COD εισροών και εκροών για τις 15 ΕΕΛ.

Το συγκεκριμένο διάγραμμα δείχνει πώς σχετίζεται η ποσότητα COD στην είσοδο μιας εγκατάστασης με την ποσότητα που απομένει μετά την επεξεργασία, στην έξοδο. Όσο πιο δεξιά είναι ένα σημείο, τόσο περισσότερο φορτίο περιέχουν τα λύματα που μπήκαν στην

εγκατάσταση. Όσο πιο ψηλά είναι το σημείο, τόσο περισσότερο ρυπαντικό φορτίο έμεινε στα επεξεργασμένα λύματα.

Η διακεκομμένη γραμμή στο διάγραμμα δείχνει τη μέση τάση: γενικά, όσο αυξάνεται το COD στις εισροές, αυξάνεται και στις εκροές. Αυτό σημαίνει ότι, σε αρκετές περιπτώσεις, όταν η εγκατάσταση δέχεται πιο ρυπασμένα λύματα, δυσκολεύεται να διατηρήσει χαμηλή την εκροή. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν και εγκαταστάσεις που τα καταφέρνουν πολύ καλά (όπως η ΕΕΛ12), ενώ κάποιες παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένες τιμές εκροής, παρότι τα εισερχόμενα λύματα δεν είναι υπερβολικά ρυπασμένα (όπως η ΕΕΛ4 και η ΕΕΛ6).

Το διάγραμμα αποτυπώνει τη γραφική συσχέτιση μεταξύ των μέσων τιμών COD εισροών και εκροών για τις 15 εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων που εξετάστηκαν. Το COD, ως δείκτης του συνολικού οργανικού φορτίου (βιοαποδομήσιμου και μη), παρέχει σημαντική πληροφορία για τη συνολική ικανότητα οξείδωσης των οργανικών ρύπων από τις εγκαταστάσεις.

Η εξίσωση της γραμμής παλινδρόμησης είναι:

$$y = 0.0389x + 13.482$$

Η κλίση της ευθείας είναι 0.0389, που σημαίνει ότι για κάθε 100 mg/l αύξηση του COD στις εισροές, η μέση εκροή αυξάνεται κατά περίπου 3.89 mg/l. Πρόκειται για μια μετρίως υψηλή κλίση, η οποία υποδηλώνει ότι το φορτίο των εκροών επηρεάζεται περισσότερο από τις εισροές, συγκριτικά με το διάγραμμα του BODs. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι πολλές από τις ενώσεις που συμβάλλουν στο COD δεν είναι εύκολα βιοαποδομήσιμες και απαιτούν πιο προηγμένες ή εντατικές μεθόδους απομάκρυνσης, τις οποίες ορισμένες Ε.Ε.Λ. ενδέχεται να μην διαθέτουν.

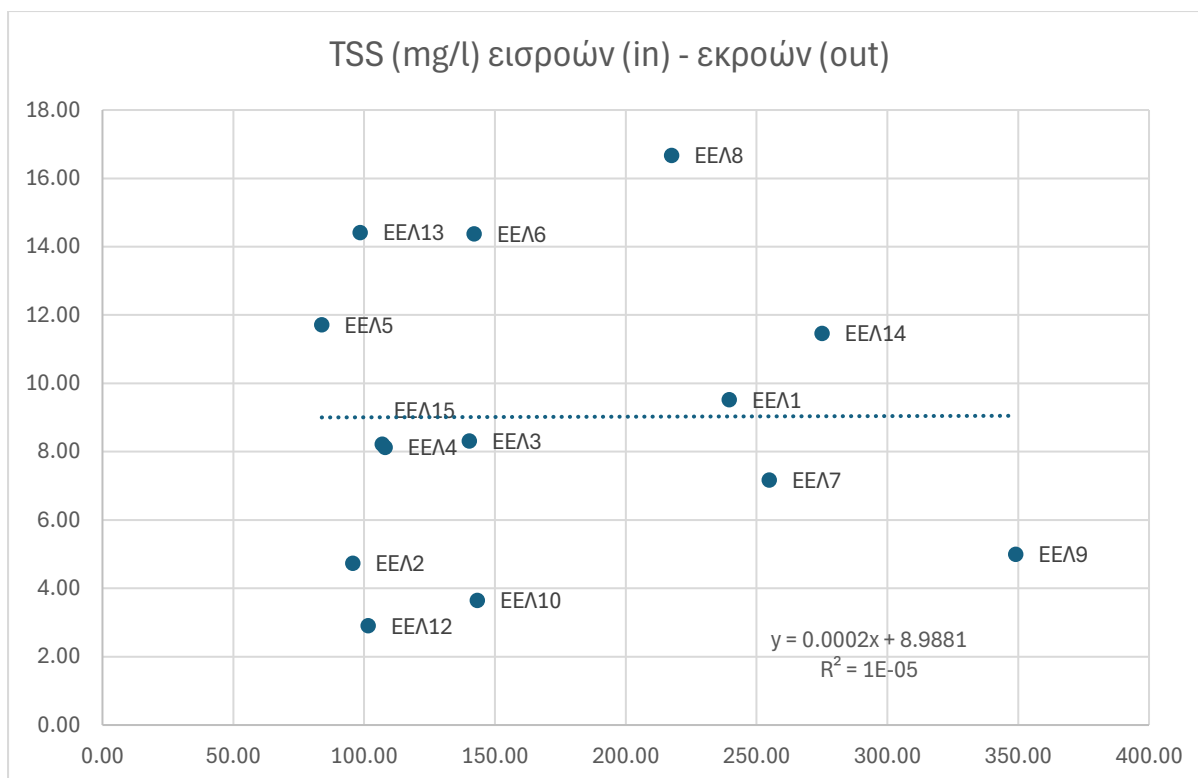
Ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.1829$ φανερώνει ασθενή έως μέτρια συσχέτιση, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι, αν και η αύξηση των εισροών COD σχετίζεται με αύξηση των εκροών, δεν αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα που επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Οι διακυμάνσεις μπορεί να σχετίζονται με τη φύση των οργανικών ενώσεων, τη διαθεσιμότητα οξυγόνου, την αποτελεσματικότητα των συστημάτων αερισμού, αλλά και την ηλικία ή τεχνολογία της κάθε εγκατάστασης.

Η ΕΕΛ4 και η ΕΕΛ6 παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές εκροής COD, παρά το γεγονός ότι δεν έχουν απαραίτητα το υψηλότερο φορτίο εισόδου. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως ένδειξη

χαμηλής απόδοσης ή ανεπαρκούς χημικής/βιολογικής επεξεργασίας. Αντίθετα, η ΕΕΛ12 καταγράφει εξαιρετικά χαμηλή εκροή COD, παρόλο που δέχεται από τα υψηλότερα φορτία, γεγονός που την καθιστά παράδειγμα καλής πρακτικής.

Συμπερασματικά, το διάγραμμα COD δείχνει ότι η ποιότητα της εκροής εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη ρύπανση της εισροής, σε σχέση με το BOD₅. Η μέτρια κλίση και οι σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των εγκαταστάσεων υπογραμμίζουν την ανάγκη για πιο στοχευμένη επεξεργασία όταν το COD των εισροών είναι υψηλό, καθώς και για αναβάθμιση των υποδομών σε ορισμένες περιπτώσεις. Η ανάλυση της κλίσης αποκαλύπτει κρίσιμες διαφορές στην αποτελεσματικότητα μεταξύ των μονάδων και μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη τεχνικών ή διαχειριστικών μέτρων βελτίωσης.

Η παράμετρος TSS (Total Suspended Solids – Ολικά Αιωρούμενα Στερεά) αποτελεί έναν από τους βασικότερους δείκτες της φυσικοχημικής κατάστασης των αστικών λυμάτων. Εκφράζει τη συγκέντρωση στερεών σωματιδίων που παραμένουν αιωρούμενα στο νερό και δεν έχουν κατακαθίσει, τα οποία μπορούν να προέρχονται από οργανική ή ανόργανη ύλη. Η απομάκρυνσή τους είναι κρίσιμη για την ποιότητα των εκροών, καθώς σχετίζεται με τη διαύγεια του νερού, τη μεταφορά μικροβιολογικών παραγόντων και τη ρύπανση του τελικού αποδέκτη. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, κατασκευάστηκε διάγραμμα διασποράς που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ των μέσων συγκεντρώσεων TSS στις εισροές και στις εκροές των 15 Ε.Ε.Λ., ενώ εφαρμόστηκε και γραμμική παλινδρόμηση για την αποτύπωση της γενικής τάσης.



Διάγραμμα 3. Σχέση μέσης συγκέντρωσης ολικών αιωρούμενων στερεών στις εισροές και εκροές των 15 ΕΕΛ.

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει πόσο επηρεάζεται η ποσότητα των αιωρούμενων στερεών (TSS) στην έξοδο μιας εγκατάστασης από την ποσότητα που υπήρχε αρχικά στην είσοδο. Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα, κάθε σημείο αντιπροσωπεύει μία εγκατάσταση. Αν το σημείο είναι πιο δεξιά, σημαίνει ότι το αρχικό νερό είχε πιο πολλά στερεά. Αν είναι πιο ψηλά, σημαίνει ότι και μετά την επεξεργασία, παρέμειναν αρκετά.

Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη γενική τάση όλων των εγκαταστάσεων. Παρατηρούμε ότι η γραμμή είναι σχεδόν οριζόντια, που σημαίνει πως ανεξάρτητα από το πόσο «φορτωμένα» ήταν τα λύματα στην είσοδο, οι εκροές δεν αλλάζουν πολύ. Αυτό είναι θετικό: δείχνει ότι οι εγκαταστάσεις μπορούν να απομακρύνουν σταθερά τα αιωρούμενα στερεά, ακόμα κι όταν αυτά είναι σε μεγαλύτερες ποσότητες στην αρχή.

Το διάγραμμα TSS παρουσιάζει τη γραφική συσχέτιση μεταξύ των μέσων συγκεντρώσεων ολικών αιωρούμενων στερεών στις εισροές και τις εκροές των 15 εξεταζόμενων εγκαταστάσεων. Το TSS συνδέεται με το φυσικό φορτίο των λυμάτων και απομακρύνεται κυρίως μέσω μηχανικών διεργασιών (πρωτοβάθμια καθίζηση, δευτεροβάθμια καθίζηση, διήθηση κ.λπ.).

Η εξίσωση της παλινδρόμησης είναι:

$$y = 0.0002x + 8.9881$$

Η κλίση της ευθείας, ίση με 0.0002, είναι σχεδόν μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε 100 mg/l αύξηση των TSS στις εισροές, η αύξηση στις εκροές είναι μόλις 0.02 mg/l – πρακτικά αμελητέα. Με άλλα λόγια, η εκροή διατηρείται σταθερή ανεξαρτήτως της ποιότητας των εισερχόμενων λυμάτων. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ιδιαίτερα υψηλή και σταθερή αποδοτικότητα των μονάδων επεξεργασίας όσον αφορά τα αιωρούμενα στερεά.

Επιπλέον, ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 1E-05$ δείχνει ανυπαρξία στατιστικά σημαντικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών εισόδου και εξόδου. Η διακύμανση στις τιμές των εκροών δεν εξηγείται από τις τιμές εισόδου, αλλά πιθανότατα από επιμέρους λειτουργικά χαρακτηριστικά ή ειδικές συνθήκες σε κάθε μονάδα.

Ορισμένες εγκαταστάσεις, όπως οι ΕΕΛ6, ΕΕΛ8 και ΕΕΛ13, παρουσιάζουν υψηλές εκροές, κάτι που ενδεχομένως συνδέεται με προβλήματα σε στάδια καθίζησης ή συντηρήσεων. Αντίθετα, μονάδες όπως οι ΕΕΛ12, ΕΕΛ2 και ΕΕΛ10 εμφανίζουν πολύ χαμηλά επίπεδα εκροής, δείχνοντας άριστη απόδοση.

Συμπερασματικά, το διάγραμμα των TSS αναδεικνύει τη σημαντική σταθερότητα των εγκαταστάσεων ως προς την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, ανεξάρτητα από την επιβάρυνση των εισροών. Η σχεδόν μηδενική κλίση της ευθείας παλινδρόμησης και η πολύ χαμηλή τιμή του R^2 συνηγορούν στο συμπέρασμα ότι οι μονάδες εφαρμόζουν αποτελεσματικές φυσικοχημικές διεργασίες, οι οποίες εξασφαλίζουν σταθερή ποιότητα εκροής. Ωστόσο, οι αποκλίσεις σε συγκεκριμένες Ε.Ε.Λ. επισημαίνουν την ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης και ενίσχυσης της μηχανικής απόδοσης, κυρίως μέσω βελτίωσης καθίζησης, απομάκρυνσης ενεργού ιλύος ή εγκατάστασης πρόσθετων μονάδων διήθησης όπου απαιτείται.

17. Προδιαγραφές ποιότητας εκροών από ΕΕΛ σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία

Βάσει της Οδηγίας (ΕΕ) 2024/3019 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Νοεμβρίου 2024 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων, καθορίζονται συγκεκριμένες απαιτήσεις για τις απορρίψεις εκροών από σταθμούς επεξεργασίας αστικών

λυμάτων, όπως ορίζονται στο άρθρο 6 της εν λόγω οδηγίας. Οι απαιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν οριακές τιμές συγκέντρωσης και ποσοστά μείωσης για κρίσιμες παραμέτρους ρύπανσης, με σκοπό την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος και τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας.

Οι εν λόγω προδιαγραφές εφαρμόζονται είτε ως απόλυτες τιμές συγκέντρωσης είτε ως ποσοστά μείωσης, ανάλογα με το φορτίο των εισερχόμενων λυμάτων και τις συνθήκες λειτουργίας των μονάδων επεξεργασίας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι βασικές απαιτήσεις για τις κυριότερες παραμέτρους, εξαιρουμένου του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC), ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ως εναλλακτική μέτρηση, σύμφωνα με τις σημειώσεις της οδηγίας.

Το εν λόγω πλαίσιο συμβάλλει στον καθορισμό εναρμονισμένων προτύπων ποιότητας για την εκροή από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, με στόχο τη μείωση της ρύπανσης και τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτινων σωμάτων, σύμφωνα με τους στόχους της ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής πολιτικής.

Οι μέσες τιμές εισροών και εκροών αντλήθηκαν από την επίσημη βάση δεδομένων του Υπουργείου Περιβάλλοντος, ενώ η αξιολόγηση βασίστηκε στις προδιαγραφές της Οδηγίας (ΕΕ) 2024/3019.

Τα αποτελέσματα του πίνακα 10b. δείχνουν ότι οι περισσότερες εγκαταστάσεις πληρούν τα προβλεπόμενα όρια, εξασφαλίζοντας ικανοποιητική ποιότητα εκροών για απόρριψη ή επαναχρησιμοποίηση.

Πίνακας 11. Απαιτήσεις για απορρίψεις από σταθμούς επεξεργασίας αστικών λυμάτων βάσει του άρθρου 6 της Οδηγίας 2024/3019

Παράμετροι	Συγκέντρωση	Ελάχιστο ποσοστό μείωσης (βλ. σημείωση 4)	Μέθοδος μέτρησης αναφοράς
Βιοχημικές ανάγκες σε οξυγόνο (BOD ₅ στους 20 °C) χωρίς νιτροποίηση (βλ. σημείωση 1)	25 mg/l O ₂	70-90 % 40 δυνάμει άρθρου 6 παράγραφος 4	Ομογενοποιημένο, αδιήθητο, ακατακάθιστο δείγμα. Προσδιορισμός του διαλελυμένου οξυγόνου πριν και μετά πενθήμερη επώαση στους 20 °C ± 1 °C, σε απόλυτο σκοτός. Προσθήκη αναστολέα νιτροποίησης
Χημικές ανάγκες σε οξυγόνο (COD) (βλ. σημείωση 2)	125 mg/l O ₂	75 %	Ομογενοποιημένο, αδιήθητο, ακατακάθιστο δείγμα. Διχρωμικό κάλιο
Ολικός οργανικός άνθρακας (βλ. σημείωση 2)	37 mg/l	75 %	EN 1484
Ολικά αιωρούμενα στερεά	35 mg/l (βλ. σημείωση 3)	90 %	— Διήθηση αντιπροσωπευτικού δείγματος μέσω φίλτρου μεμβράνης των 0,45 μm. Ξήρανση σε θερμοκρασία 105 °C και ζύγιση — Φυγοκέντρηση αντιπροσωπευτικού δείγματος (επί 5 τουλάχιστον λεπτά, με μέση επιτάχυνση 2 800-3 200 g). Ξήρανση σε θερμοκρασία 105 °C και ζύγιση
Σημείωση 1: Η παράμετρος αυτή μπορεί να αντικατασταθεί από άλλη: ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) ή ολικές ανάγκες σε οξυγόνο (TOD) εάν μπορεί να ευρεθεί σχέση μεταξύ του BOD₅ και της υποκατάστατης παραμέτρου. Σημείωση 2: Τα κράτη μέλη μετρούν είτε τις χημικές ανάγκες σε οξυγόνο (COD) είτε τον ολικό οργανικό άνθρακα. Σημείωση 3: Η απαίτηση αυτή είναι προαιρετική. Σημείωση 4: Μείωση ανάλογα με το φορτίο των εισερχόμενων λυμάτων.			

Ακολουθούν οι πίνακες που αφορούν τις απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων για δύο βασικές χρήσεις: την περιορισμένη άρδευση και τη βιομηχανική χρήση. Η περιορισμένη άρδευση εφαρμόζεται σε περιοχές όπου δεν υπάρχει πρόσβαση του κοινού, όπως σε δενδροκαλλιέργειες χωρίς επαφή των καρπών με το έδαφος, ή σε βιομηχανικές καλλιέργειες (καπνός, βαμβάκι), καλλιέργειες ζωοτροφών και λιβάδια. Στη βιομηχανία ως νερό ψύξης μίας χρήσης. Για τις χρήσεις αυτές, το ανακτημένο νερό πρέπει να πληροί τις συγκεκριμένες ποιοτικές προδιαγραφές του πίνακα 12a. Το μικροβιακό φορτίο *Escherichia coli* δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 200 μονάδες ανά 100 ml, ως διάμεση τιμή. Οι παράμετροι BOD₅ και αιωρούμενα στερεά (SS) πρέπει να είναι εντός των ορίων που ορίζονται στην Κοινή Υπουργική Απόφαση 5673/400/1997. Ως ελάχιστο επίπεδο επεξεργασίας απαιτείται δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία, συνοδευόμενη από απολύμανση, συνήθως μέσω χλωρίωσης και η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού γίνεται τακτικά.

Αντίστοιχα, παρουσιάζονται στον πίνακα 12b. τα όρια για μικροβιολογικές και συμβατικές παραμέτρους καθώς και η κατ' ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία και συχνότητα

δειγματοληψιών και αναλύσεων στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για απεριόριστη άρδευση και βιομηχανική χρήση πλην νερού ψύξης μιας χρήσης

Πίνακας 12α. Προδιαγραφές για επαναχρησιμοποίηση στην Άρδευση και τη Βιομηχανία

Τύπος επαναχρησιμοποίησης	<i>Escherichia coli</i> (EC/100 ml)	BOD5 (mg/l)	SS (mg/l)	Θολότητα (NTU)	Κατ ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία	Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων νερού προς επαναχρησιμοποίηση
Περιορισμένη άρδευση Περιοχές όπου δεν αναμένεται πρόσβαση του κοινού, καλλιέργειες ζωοτροφών, βιομηχανικές καλλιέργειες, λιβάδια, δένδρα (μη συμπεριλαμβανομένων των οπωροφόρων), με την προϋπόθεση ότι κατά τη συλλογή οι καρποί δεν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, καλλιέργειες σπόρων και καλλιέργειες που παράγουν προϊόντα τα οποία υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία πριν την κατανάλωσή τους. Άρδευση με καταιονισμό δεν θα εφαρμόζεται Βιομηχανική χρήση Νερό ψύξης μιας χρήσης Τροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων που δεν εμπίπτουν στις διατάξεις του άρθρου 7 του ΠΔ 51/2-3-2007, (με την επιφύλαξη των παραγράφων 4 και 5 του άρθρου 5 της παρούσας), με διήθηση διαμέσου εδαφικού στρώματος με επαρκές πάχος και κατάλληλα χαρακτηριστικά ⁽⁶⁾	≤ 200 διάμεση τιμή	Σύμφωνά με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/1997	Σύμφωνά με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/1997	-	Δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία ^{(α), (β)} Απολύμανση ^(γ)	BOD₅, SS, N, P: σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/5.3.97 (ΦΕΚ 192/Β/14.3.97) EC: μια ανά εβδομάδα Υπολειμματικό χλώριο: συνεχώς (εφόσον εφαρμόζεται χλωρίωση)

Πίνακας 12β. Προδιαγραφές για επαναχρησιμοποίηση στην Άρδευση και τη Βιομηχανία

Τύπος επαναχρησιμοποίησης	<i>Escherichia coli</i> (EC/100 ml)	BOD5 (mg/l)	SS (mg/l)	Θολότητα (NTU)	Κατ ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία	Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων νερού προς επαναχρησιμοποίηση
Απεριόριστη άρδευση Όλες οι καλλιέργειες όπως οπωροφόρα δένδρα, λαχανικά, αμπέλια ή καλλιέργειες των οποίων τα προϊόντα καταναλώνονται ωμά, θερμική. Η απεριόριστη άρδευση επιτρέπει την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων εφαρμογής της άρδευσης συμπεριλαμβανομένου του καταιονισμού. Βιομηχανική χρήση πλην νερού ψύξης μιας χρήσης επανακυκλοφορούμενο νερό ψύξης, νερό για λέβητες, νερό διεργασιών κλπ ^(α)	≤ 5 για το 80% των δειγμάτων και ≤ 50 για το 95 % των δειγμάτων	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων	≤ 2 διάμεση τιμή	Δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία ^(α) ακολουθούμενη από Τριτοβάθμια επεξεργασία ^(στ) και Απολύμανση ^(δ)	BOD₅, SS, N, P: σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/5.3.97 (ΦΕΚ 192/Β/14.3.97) Θολότητα και διαπερατότητα: για ανακτημένο νερό από εγκαταστάσεις επεξεργασίας με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 50000 κατοίκους τέσσερις ανά εβδομάδα και δύο ανά εβδομάδα στις υπόλοιπες περιπτώσεις EC: για ανακτημένο νερό από εγκαταστάσεις επεξεργασίας με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 50000 κατοίκους τέσσερις ανά εβδομάδα και δύο ανά εβδομάδα στις υπόλοιπες περιπτώσεις.. Κατ εξαίρεση για νησιωτικές περιοχές με τεκμηριωμένη έλλειψη κατάλληλης εργαστηριακής υποδομής μία ανά εβδομάδα Υπολειμματικό Cl₂ συνεχώς (εφόσον εφαρμόζεται χλωρίωση)

18. Αποτίμηση της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων στις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων

➤ Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων 1

Υδατικοί πόροι (Νερό)

Η συμβολή της ΕΕΛ1 στην ενίσχυση των τοπικών υδατικών πόρων χαρακτηρίζεται ως ελάχιστη, καθώς η ποσότητα των επεξεργασμένων λυμάτων προς επαναχρησιμοποίηση αντιστοιχεί σε μικρό ποσοστό των συνολικών αναγκών άρδευσης. Ωστόσο, αναμένεται σημαντική αύξηση της δυναμικότητας (30.000 m³/ημέρα) με την ολοκλήρωση του έργου της τριτοβάθμιας επεξεργασίας, γεγονός που θα ενισχύσει την αποδοτικότητα της μονάδας. Για την απολύμανση εφαρμόζεται συνδυασμός χλωρίωσης και υπεριώδους ακτινοβολίας (UV). Η περιοχή εμφανίζει φαινόμενα ανομβρίας με συχνότητα μεγαλύτερη της μίας φορές τον χρόνο. Η κύρια πηγή νερού για άρδευση είναι οι γεωτρήσεις, ενώ υπάρχει σύστημα αποθήκευσης και ενδιάμεσες δεξαμενές για τη διαχείριση της εκροής. Η μέση στάθμη του υδροφορέα παρακολουθείται τακτικά. Παρά τη χαμηλή δυναμικότητα, αναγνωρίζεται σημαντική συμβολή στην εξισορρόπηση του υδατικού ισοζυγίου. Δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για την απόσταση των πηγών γλυκού νερού ή της ΕΕΛ από τα σημεία άρδευσης, ούτε για ενδεχόμενες θερμικές επιβαρύνσεις των αποδεκτών.

Τροφή

Η κάλυψη των αρδευτικών αναγκών μέσω επεξεργασμένων λυμάτων δεν έχει ακόμη αποτιμηθεί. Δεν καταγράφεται αυξημένη αλατότητα και δεν έχουν εντοπιστεί ενδείξεις φυτοτοξικότητας. Διενεργούνται αναλύσεις νατρίου και SAR, χωρίς όμως να υπάρχουν στοιχεία για πιθανές επιπτώσεις στη δομή ή τη γονιμότητα των εδαφών. Η παρακολούθηση ιχνοστοιχείων περιορίζεται στα επεξεργασμένα λύματα. Δεν αρδεύονται βρώσιμα προϊόντα, ενώ η επίδραση της επαναχρησιμοποίησης στη σταθερότητα της αγροτικής παραγωγής παραμένει αδιευκρίνιστη.

Οικοσυστήματα

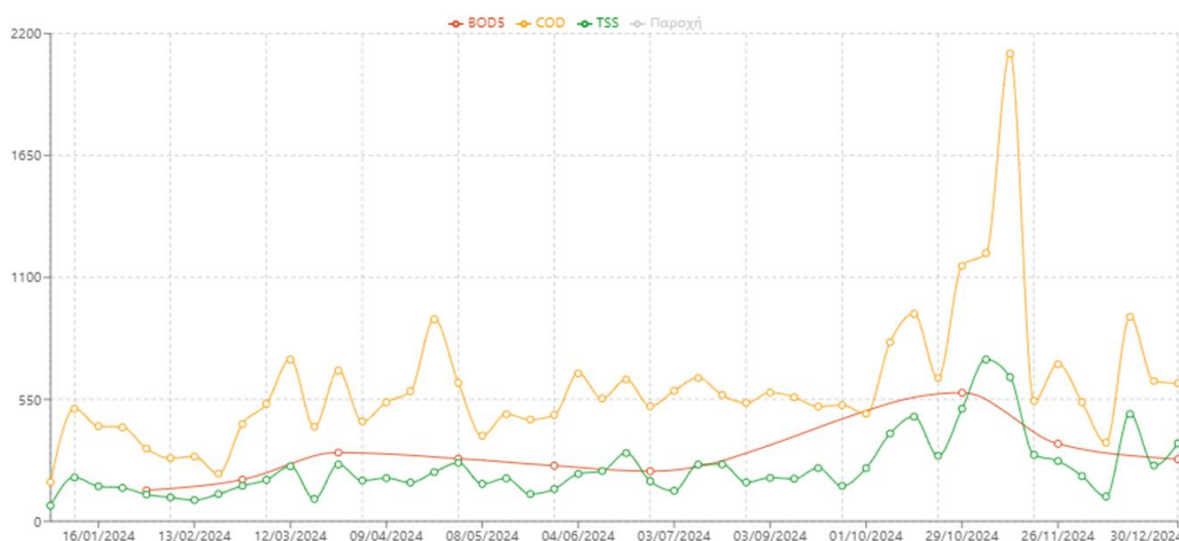
Δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για την παρουσία βαρέων μετάλλων στα αρδευόμενα εδάφη, ενώ δεν έχουν καταγραφεί περιστατικά ή ενδείξεις επιπτώσεων στη δημόσια υγεία. Η ΕΕΛ7 εφαρμόζει προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας, όπως UV, οζονισμό και μεμβράνες, με στόχο την απομάκρυνση ρυπαντών, και πραγματοποιεί αναλύσεις για συγκεκριμένες ουσίες ή κατηγορίες. Παρότι δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για την κατάσταση της τοπικής πανίδας ή για φαινόμενα ευτροφισμού, αναγνωρίζεται ότι η εφαρμογή έχει οδηγήσει σε περιβαλλοντικά οφέλη: μείωση της εκροής ρυπαντικών φορτίων σε φυσικούς αποδέκτες, περιορισμό της υπεράντλησης υδάτων και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε σύγκριση με άλλες λύσεις.

Ενέργεια

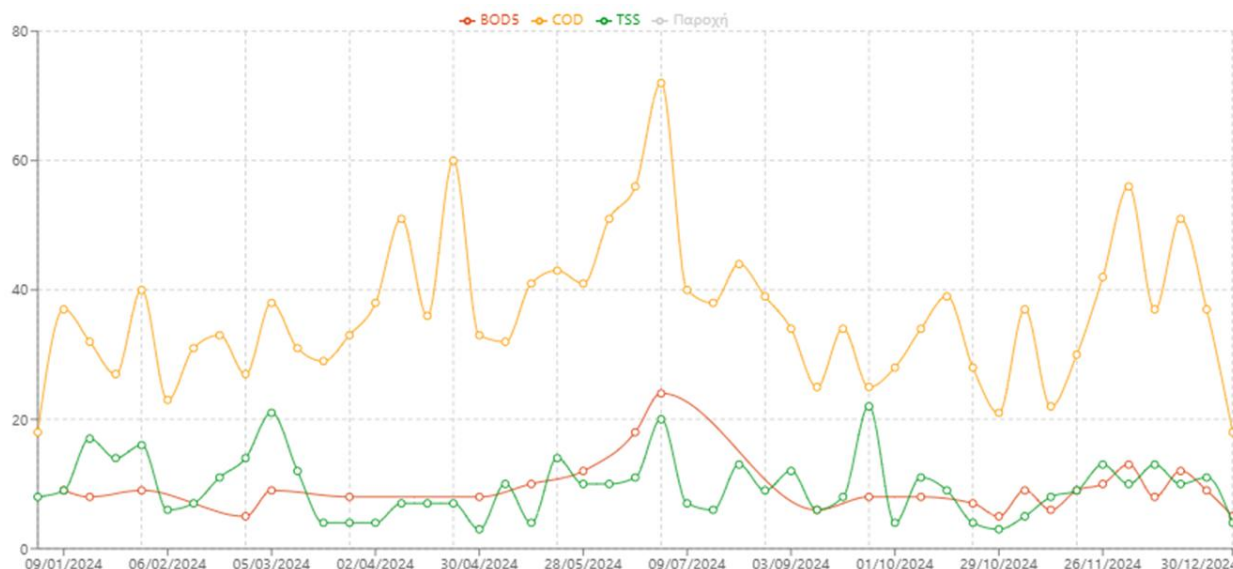
Η δυναμικότητα της υφιστάμενης τριτοβάθμιας επεξεργασίας και η απουσία αυτόνομου δικτύου άρδευσης αποτελούν βασικά περιοριστικά εμπόδια για την αξιοποίηση των εκροών. Υπάρχει αναλυτική παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά στάδιο επεξεργασίας, γεγονός που ενισχύει τη διαχειριστική διαφάνεια. Δεν έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις για το οικονομικό όφελος των αγροτών. Το κόστος μεταφοράς καλύπτεται από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων. Σημαντικό πλεονέκτημα της μονάδας είναι η εφαρμογή τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας από τα επεξεργασμένα λύματα. Δεν είναι γνωστό αν έχουν εξεταστεί εναλλακτικές λύσεις όπως η χρήση αφαλατωμένου νερού για άρδευση.

Γενικές Παρατηρήσεις

Η ΕΕΛ1 βρίσκεται σε φάση αναβάθμισης, με σαφή προσανατολισμό στην επέκταση της δυναμικότητας και τη βελτίωση της ποιότητας εκροής.



Διάγραμμα 4a. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην είσοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.



Διάγραμμα 4b. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην έξοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

➤ Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων 4

Υδατικοί πόροι (Νερό)

Η ΕΕΛ4 παρουσιάζει ελάχιστη ενίσχυση των τοπικών υδατικών πόρων μέσω επαναχρησιμοποίησης, ενώ εφαρμόζονται δύο μέθοδοι απολύμανσης: η χλωρίωση για λόγους κόστους και αποτελεσματικότητας, και η υπεριώδης ακτινοβολία (UV) για υψηλή ποιότητα χωρίς χημικά κατάλοιπα στην τριτοβάθμια επεξεργασία. Στην περιοχή παρατηρούνται φαινόμενα ανομβρίας με συχνότητα άνω της μίας φορές τον χρόνο. Η κύρια πηγή νερού για άρδευση είναι μικτή, καθώς χρησιμοποιούνται τόσο υπόγειοι όσο και επιφανειακοί υδατικοί πόροι.

Αν και υπάρχουν ενδεικτικά στοιχεία για τη στάθμη του υδροφορέα, δεν πραγματοποιείται συστηματική παρακολούθηση, ενώ η απόσταση της ΕΕΛ και του γλυκού νερού από τα σημεία άρδευσης δεν είναι γνωστή. Παρόλα αυτά, η ΕΕΛ διαθέτει σύστημα αποθήκευσης, όπως λιμνοδεξαμενές ή ταμιευτήρες, καθώς και αρδευτικό δίκτυο μήκους 7 χιλιομέτρων. Η επίδραση της επαναχρησιμοποίησης στο υδατικό ισοζύγιο χαρακτηρίζεται ως υπαρκτή αλλά περιορισμένη.

Τροφή

Η ΕΕΛ3 δεν βρίσκεται ακόμη σε πλήρη φάση λειτουργίας ως προς την επαναχρησιμοποίηση, με αποτέλεσμα να μην έχει καταγραφεί ακόμα η συμβολή των εκροών στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Παρ' όλα αυτά, καταγράφεται αυξημένη αλατότητα, ενώ δεν πραγματοποιούνται αναλύσεις για το νάτριο ή τον δείκτη SAR. Επομένως, δεν είναι δυνατή η αποτίμηση πιθανών επιπτώσεων στη δομή και γονιμότητα των εδαφών ή εμφάνιση

φυτοτοξικότητας. Η παρακολούθηση ιχνοστοιχείων περιορίζεται στα επεξεργασμένα λύματα, χωρίς επέκταση σε εδάφη ή φυτικό υλικό.

Δεν αναφέρεται κάποια τεκμηριωμένη συμβολή στη σταθερότητα της αγροτικής παραγωγής, ενώ τα επεξεργασμένα λύματα δεν χρησιμοποιούνται για άρδευση βρώσιμων προϊόντων, αν και οι καταναλωτές εμφανίζονται πρόθυμοι να αποδεχθούν τέτοια προϊόντα υπό προϋποθέσεις.

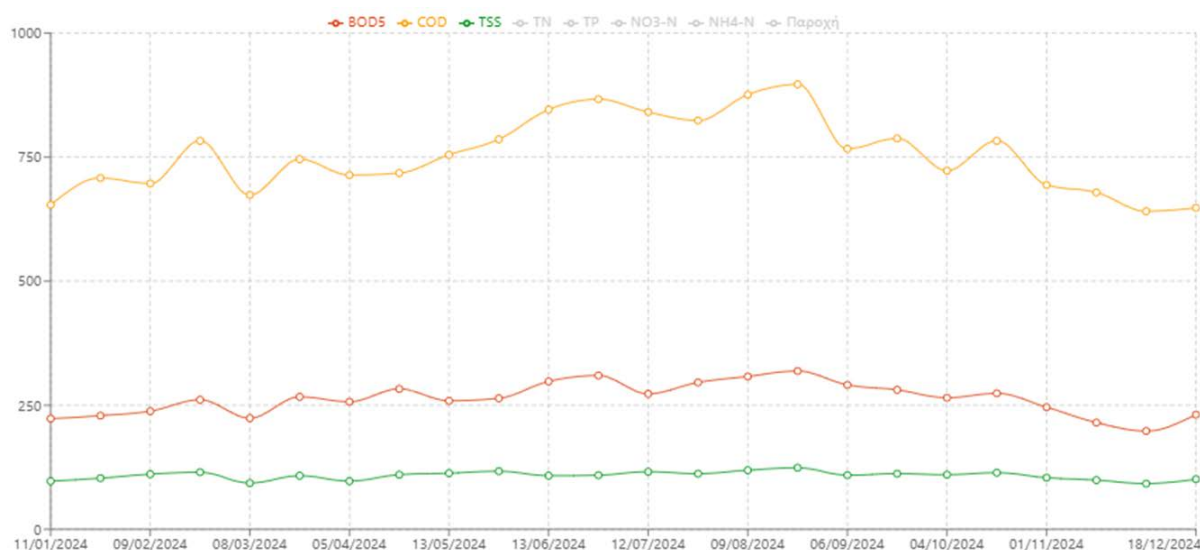
Οικοσυστήματα

Δεν πραγματοποιούνται αναλύσεις βαρέων μετάλλων στα αρδευόμενα εδάφη και δεν υπάρχουν δεδομένα για προβλήματα υγείας ή περιβαλλοντικά περιστατικά. Παράλληλα, δεν έχουν υιοθετηθεί ειδικές πρακτικές ή τεχνολογίες για τον περιορισμό ρυπαντών, ενώ δεν καταγράφεται χρήση των επεξεργασμένων εκροών εκτός της καλλιεργητικής περιόδου. Δεν υφίσταται παρακολούθηση για ενδεχόμενες αλλαγές στην τοπική πανίδα ή την εμφάνιση ευτροφισμού. Οποιαδήποτε πιθανή περιβαλλοντική ωφέλεια δεν έχει ακόμα τεκμηριωθεί επαρκώς.

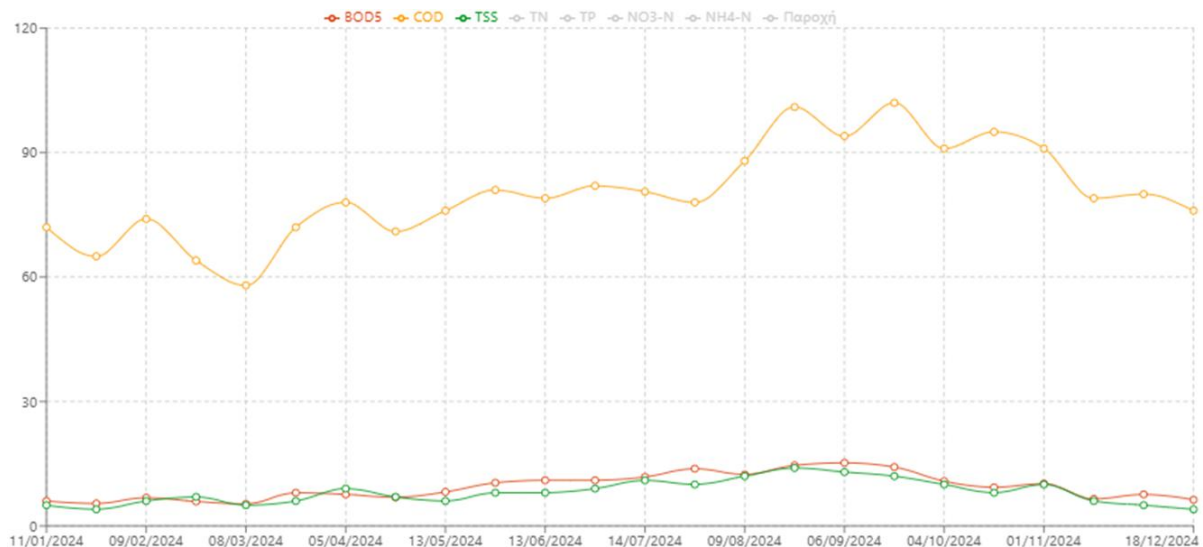
Ενέργεια

Η αξιοποίηση των εκροών της ΕΕΛ4 περιορίζεται από σοβαρά εμπόδια, όπως η έλλειψη υποδομών αποθήκευσης και διανομής, καθώς και η καχυποψία της τοπικής κοινωνίας και των χρηστών σχετικά με την ασφάλεια του ανακυκλωμένου νερού. Η ενεργειακή κατανάλωση καταγράφεται σε γενικές γραμμές, αλλά δεν υπάρχουν αναλυτικά δεδομένα. Το κόστος μεταφοράς επιβαρύνει τον τελικό χρήστη.

Δεν εφαρμόζονται τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα, ενώ η χρήση μονάδων αφαλάτωσης δεν έχει εξεταστεί ως επιλογή για άρδευση.



Διάγραμμα 5α. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην είσοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.



Διάγραμμα 5b. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην έξοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

➤ Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων 8

Υδατικοί πόροι (Νερό)

Η ενίσχυση των τοπικών υδατικών πόρων μέσω της επαναχρησιμοποίησης αξιολογείται ως μέτρια, καθώς η επεξεργασμένη εκροή χρησιμοποιείται επικουρικά και σε συνδυασμό με υπόγειες πηγές (γεωτρήσεις). Η μονάδα εφαρμόζει δύο μεθόδους απολύμανσης: χλωρίωση για λόγους αποτελεσματικότητας και κόστους, και υπεριώδη ακτινοβολία (UV) για την εξασφάλιση υψηλής ποιότητας χωρίς χημικά κατάλοιπα. Η περιοχή παρουσιάζει φαινόμενα ανομβρίας συχνότερα από μία φορά ετησίως, ενώ υπάρχουν συστηματικές μετρήσεις της στάθμης του υδροφορέα. Η απόσταση του σημείου λήψης των επεξεργασμένων λυμάτων από τα αγροτεμάχια είναι μικρότερη συγκριτικά με τις πηγές γλυκού νερού. Επιπλέον, έχει εγκατασταθεί σύστημα αποθήκευσης που διευκολύνει τη διαχείριση των εκροών. Η συμβολή στην εξισορρόπηση του υδατικού ισοζυγίου αξιολογείται ως σημαντική, παρότι δεν καταγράφονται στοιχεία για ενδεχόμενη θερμική επιβάρυνση των αποδεκτών.

Τροφή

Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών καλύπτει σε μεγάλο βαθμό τις αρδευτικές ανάγκες, διασφαλίζοντας αδιάλειπτη παροχή (24/7). Δεν έχει παρατηρηθεί αύξηση της αλατότητας ούτε έχουν εντοπιστεί ενδείξεις φυτοτοξικότητας. Διενεργούνται αναλύσεις για το νάτριο και τον δείκτη SAR, χωρίς όμως να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για επιπτώσεις στη δομή ή τη γονιμότητα των εδαφών. Η παρακολούθηση ιχνοστοιχείων περιορίζεται στα επεξεργασμένα λύματα και δεν επεκτείνεται στα αρδευόμενα εδάφη ή στις καλλιέργειες. Η χρήση της εκροής συνέβαλε θετικά στη σταθερότητα της αγροτικής παραγωγής, ιδίως κατά τις κρίσιμες περιόδους, αν και δεν χρησιμοποιείται για την άρδευση βρώσιμων προϊόντων.

Οικοσυστήματα

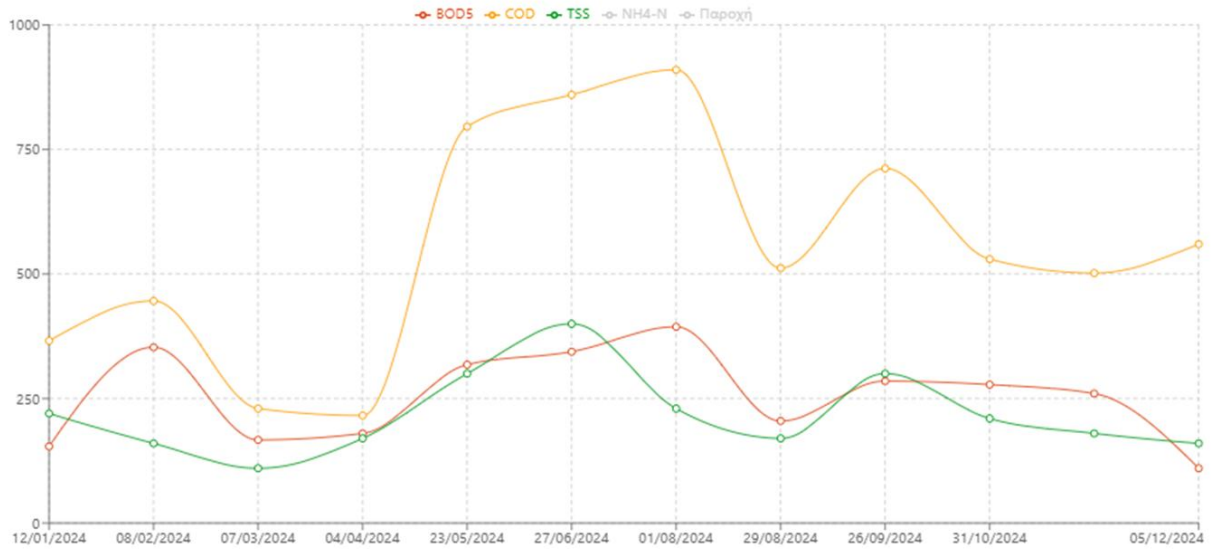
Δεν πραγματοποιούνται αναλύσεις βαρέων μετάλλων στα αρδευόμενα εδάφη, ούτε έχουν καταγραφεί περιστατικά που να υποδεικνύουν επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Παρότι εφαρμόζονται προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας, όπως UV, οζονισμός και μεμβράνες, με στόχο την απομάκρυνση ρυπαντών και μικρορρυπαντών, η παρακολούθηση αφορά συγκεκριμένες κατηγορίες ουσιών. Εκτός καλλιεργητικής περιόδου, τα επεξεργασμένα λύματα διοχετεύονται σε φυσικούς αποδέκτες υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Δεν έχουν καταγραφεί φαινόμενα ευτροφισμού, ενώ επισημαίνεται η συμβολή της εφαρμογής στον περιορισμό της υπεράντλησης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για αλλαγές στην τοπική πανίδα ή για ενδεχόμενη μείωση της χρήσης αγροχημικών.

Ενέργεια

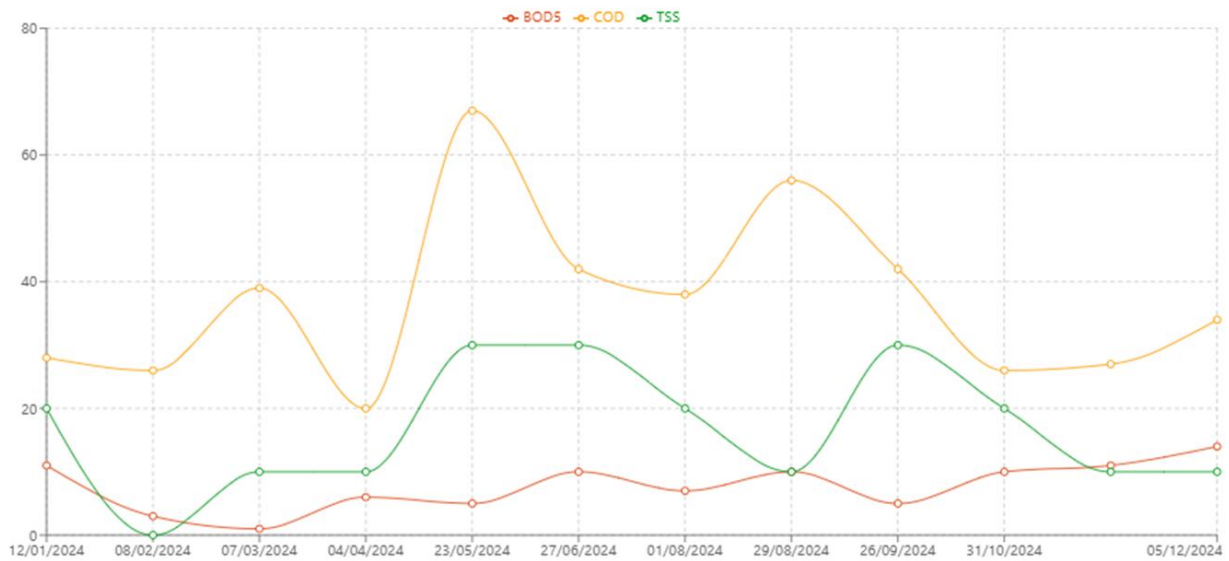
Ο κυριότερος περιοριστικός παράγοντας που σχετίζεται με τη βιωσιμότητα και επέκταση της επαναχρησιμοποίησης εντοπίζεται στην αποδοχή από την τοπική κοινωνία και την καχυποψία των τελικών χρηστών ως προς την ασφάλεια του νερού. Υπάρχει αναλυτική παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά στάδιο επεξεργασίας, όμως δεν εφαρμόζονται τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα. Δεν έχουν πραγματοποιηθεί σχετικές μετρήσεις για το άμεσο οικονομικό όφελος προς τους αγρότες. Το κόστος μεταφοράς των εκροών καλύπτεται από την ίδια την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων, ενώ δεν έχει εξεταστεί το ενδεχόμενο αξιοποίησης μονάδων αφαλάτωσης ως εναλλακτική πηγή άρδευσης.

Γενικές Παρατηρήσεις

Η ΕΕΛ8 παρουσιάζει πιο αναπτυγμένη υποδομή και τεχνικές δυνατότητες, γεγονός που επιτρέπει τη σταθερότερη ενσωμάτωση της επαναχρησιμοποίησης στην τοπική γεωργική πρακτική.



Διάγραμμα 6α. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην είσοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων



Διάγραμμα 6β. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην έξοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

➤ Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων 9

Υδατικοί πόροι (Νερό)

Η ενίσχυση των τοπικών υδατικών πόρων μέσω της επαναχρησιμοποίησης των εκροών από την ΕΕΛ9 χαρακτηρίζεται ως ελάχιστη, χωρίς ουσιαστική συμβολή στην εξισορρόπηση του υδατικού ισοζυγίου. Η μέθοδος απολύμανσης που εφαρμόζεται είναι η χλωρίωση, ενώ η περιοχή αντιμετωπίζει φαινόμενα ανομβρίας με συχνότητα άνω της μίας φορές τον χρόνο. Η κύρια πηγή άρδευσης παραμένουν οι γεωτρήσεις. Σημειώνεται ότι το σημείο λήψης του γλυκού νερού βρίσκεται εγγύτερα στα σημεία άρδευσης από ό,τι η ΕΕΛ, κάτι που περιορίζει τη χρήση των εκροών. Δεν υπάρχουν αναλύσεις για την πιθανή θερμική επιβάρυνση του αποδέκτη, ούτε καταγραφή της στάθμης του υδροφορέα. Το υφιστάμενο σύστημα συλλογής και μεταφοράς χαρακτηρίζεται ως «άλλο», χωρίς περαιτέρω εξειδίκευση.

Τροφή

Η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση δεν εφαρμόζεται, με αποτέλεσμα η κάλυψη των αρδευτικών αναγκών να εξαρτάται αποκλειστικά από εναλλακτικές πηγές. Παρά την καταγραφή αυξημένης αλατότητας και την περιοδική παρακολούθηση παραμέτρων όπως ο δείκτης SAR, οι εκροές δεν χρησιμοποιούνται σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, γεγονός που αποτρέπει την εκτίμηση πιθανών επιπτώσεων στη δομή ή γονιμότητα του εδάφους. Η παρακολούθηση ιχνοστοιχείων περιορίζεται στα λύματα και δεν εκτείνεται στα αρδευόμενα εδάφη ή φυτά. Η εμπιστοσύνη των καταναλωτών στα βρώσιμα προϊόντα καταγράφεται ως υψηλή, αν και δεν αρδεύονται καλλιεργείες με επεξεργασμένα λύματα. Η συμβολή στη σταθερότητα της αγροτικής παραγωγής κρίνεται αμελητέα.

Οικοσυστήματα

Στον άξονα του περιβάλλοντος, αν και δεν πραγματοποιούνται αναλύσεις βαρέων μετάλλων στα εδάφη, η μονάδα διενεργεί εξειδικευμένους ελέγχους σε επιλεγμένες ουσίες για τον περιορισμό ρυπαντών. Δεν καταγράφονται περιστατικά ευτροφισμού, ωστόσο έχουν παρατηρηθεί αλλαγές στην τοπική πανίδα, με ενδείξεις ότι αυτές συσχετίζονται με τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων. Η κυριότερη περιβαλλοντική επίδραση που έχει μειωθεί είναι η εκροή ρυπαντικών φορτίων στον θαλάσσιο αποδέκτη, γεγονός που έχει συμβάλει θετικά στη βελτίωση της ποιότητας των παράκτιων υδάτων και στη διατήρηση της βιοποικιλότητας. Εκτός της καλλιεργητικής περιόδου, η χρήση των εκροών περιορίζεται σε βιομηχανική χρήση και στην άρδευση του περιβάλλοντος χώρου της εγκατάστασης.

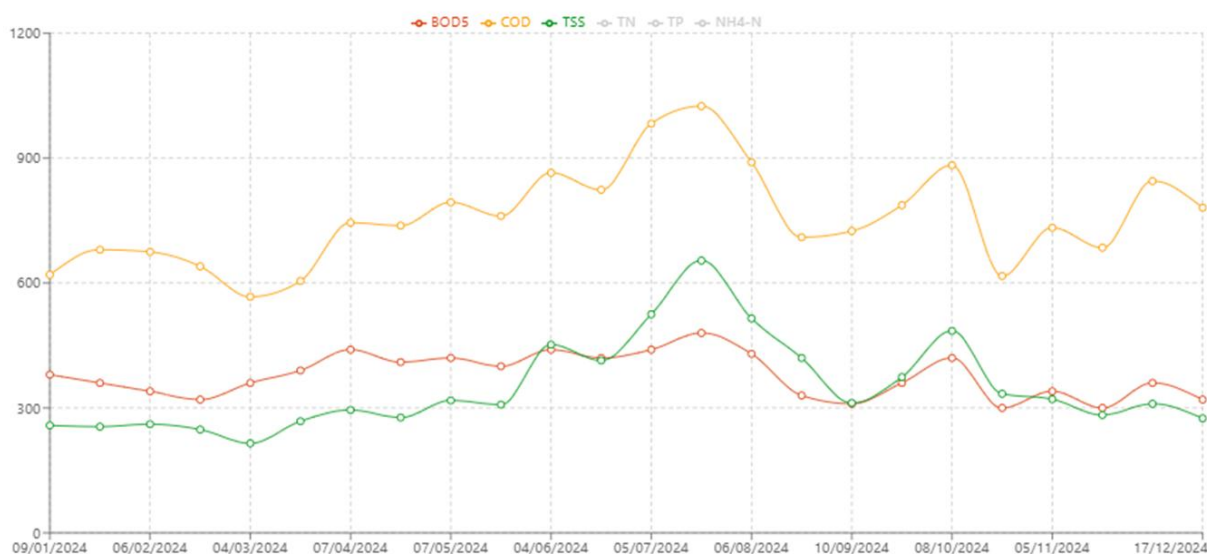
Ενέργεια

Η επαναχρησιμοποίηση των εκροών στην ΕΕΛ2 προσκρούει σε τρεις βασικούς περιοριστικούς παράγοντες: το υψηλό ενεργειακό κόστος λόγω απόστασης, την κοινωνική καχυποψία σχετικά με την ασφάλεια του ανακυκλωμένου νερού, και την έλλειψη κατάλληλων υποδομών αποθήκευσης και διανομής. Η μονάδα καταγράφει αναλυτικά την ενεργειακή της κατανάλωση, διαθέτει αερόβια χώνευση, αλλά δεν εφαρμόζει τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας. Η εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης, η οποία θα επέτρεπε την παραγωγή βιοαερίου, δεν έχει υλοποιηθεί. Έχουν εξεταστεί εναλλακτικές λύσεις άρδευσης μέσω

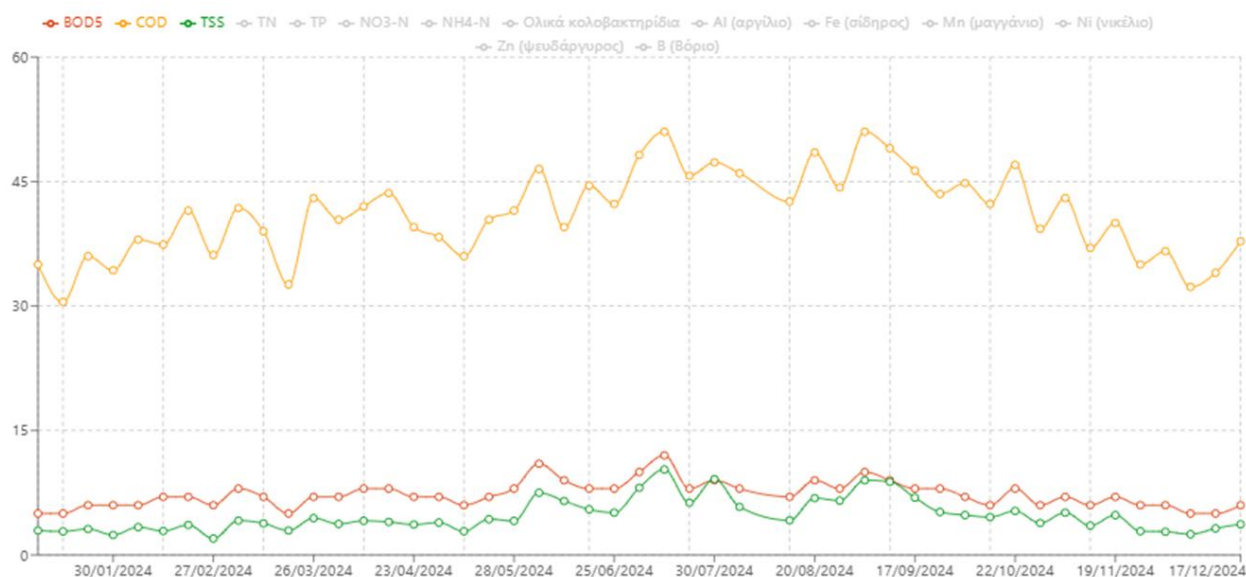
αφαλάτωσης, ωστόσο απορρίφθηκαν λόγω του υψηλού κόστους, ιδιαίτερα εξαιτίας των απαιτήσεων της μεθόδου ηλεκτρόλυσης.

Γενικές Παρατηρήσεις

Η διαχείριση και η κατανομή των υδατικών πόρων στην περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονες κοινωνικές και θεσμικές αντιπαραθέσεις, όπως καταγράφεται στις παρατηρήσεις των υπευθύνων. Παρά τους περιορισμούς στην επαναχρησιμοποίηση των εκροών για άρδευση, η λειτουργία της εγκατάστασης έχει επιφέρει σημαντική βελτίωση στην ποιότητα του θαλάσσιου αποδέκτη, μέσω της επεξεργασίας και της ορθής διάθεσης των λυμάτων.



Διάγραμμα 7α. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην είσοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων



Διάγραμμα 7β. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην έξοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

➤ Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων 10

Υδατικοί πόροι (Νερό)

Η ενίσχυση των τοπικών υδατικών πόρων μέσω της αξιοποίησης επεξεργασμένων εκροών χαρακτηρίζεται ως μέτρια, καθώς εφαρμόζεται επικουρικά, σε συνδυασμό με άλλες πηγές, όπως υπόγεια και επιφανειακά ύδατα. Η απολύμανση επιτυγχάνεται με συνδυασμό χλωρίωσης και υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), εξασφαλίζοντας αποτελεσματικότητα και υψηλή ποιότητα χωρίς χημικά κατάλοιπα. Δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τη συχνότητα εμφάνισης ανομβρίας, την καταγραφή θερμικής επιβάρυνσης των αποδεκτών ή τη μέση στάθμη του υδροφορέα. Η κύρια πηγή άρδευσης είναι ο συνδυασμός γεωτρήσεων και επιφανειακών υδάτων (ποτάμια, ταμιευτήρες). Παρότι η έξοδος της ΕΕΛ οδηγείται σε παρακείμενη τάφρο που καταλήγει στον ποταμό Στρυμόνα, επισημαίνεται σημαντική συμβολή στην εξισορρόπηση του υδατικού ισοζυγίου.

Τροφή

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων καλύπτει μεγάλο μέρος των αρδευτικών αναγκών, αν και δεν καταγράφονται ενδείξεις για επιπτώσεις σε έδαφος ή καλλιέργειες. Δεν πραγματοποιούνται μετρήσεις για δείκτες όπως η αλατότητα ή ο SAR, γεγονός που δυσχεραίνει την αξιολόγηση μακροχρόνιων επιπτώσεων στη δομή και γονιμότητα των εδαφών. Δεν υπάρχουν αναφορές για φυτοτοξικότητα, ενώ η παρακολούθηση ιχνοστοιχείων περιορίζεται στα επεξεργασμένα λύματα. Η συμβολή στη σταθερότητα της αγροτικής παραγωγής δεν έχει αξιολογηθεί, ενώ η χρήση των εκροών αποκλείει την άρδευση βρώσιμων προϊόντων.

Οικοσυστήματα

Η περιβαλλοντική παρακολούθηση παραμένει περιορισμένη, καθώς δεν πραγματοποιούνται αναλύσεις βαρέων μετάλλων στα αρδευόμενα εδάφη και δεν υπάρχουν δεδομένα για περιστατικά ευτροφισμού ή αλλαγές στην τοπική πανίδα. Δεν έχουν αναφερθεί προβλήματα υγείας, ούτε έχουν ληφθεί ειδικά μέτρα για τον περιορισμό ρυπαντών. Η διάθεση των εκροών είναι συνεχής και κατευθύνεται προς παρακείμενη τάφρο, χωρίς να εφαρμόζονται εποχιακά μέτρα διαχείρισης. Η μόνη καταγεγραμμένη θετική περιβαλλοντική επίδραση αφορά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με άλλες εναλλακτικές λύσεις.

Ενέργεια

Η μονάδα αντιμετωπίζει σημαντικούς περιορισμούς, όπως η απόσταση μεταφοράς των επεξεργασμένων λυμάτων από την μονάδα προς τις αρδευόμενες περιοχές, η έλλειψη υποδομών αποθήκευσης και διανομής, καθώς και η καχυποψία των τελικών χρηστών ως προς την ασφάλεια του νερού. Δεν έχει εκπονηθεί μελέτη για την ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας, ούτε εφαρμόζονται τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα. Το οικονομικό

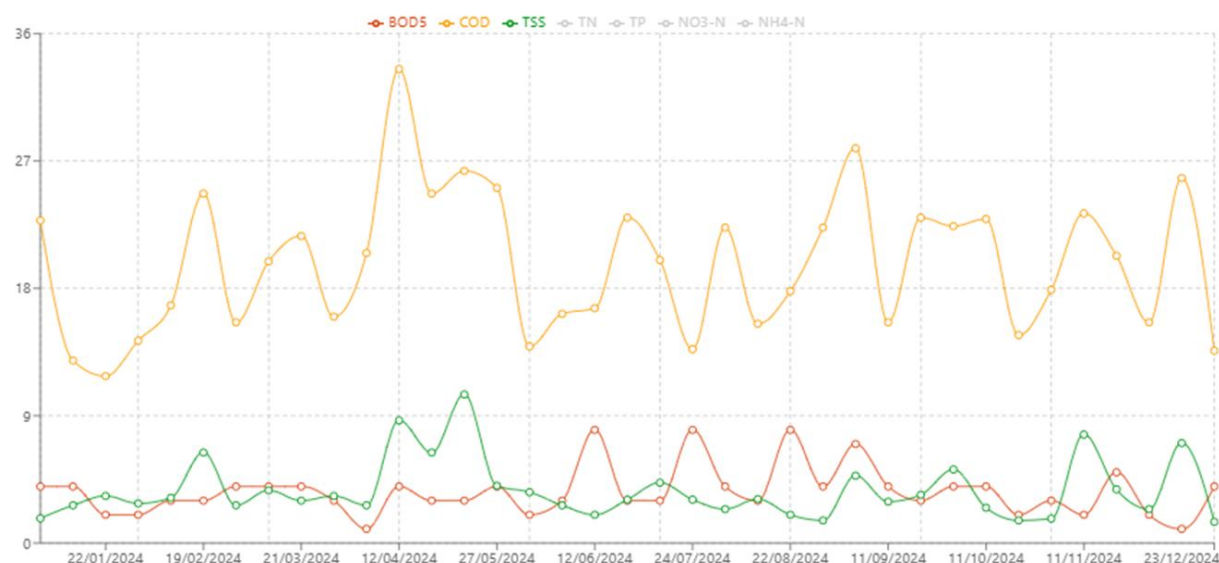
όφελος για τους αγρότες δεν έχει αποτιμηθεί και το κόστος μεταφοράς δεν έχει διευκρινιστεί. Επιπλέον, δεν έχουν εξεταστεί εναλλακτικές λύσεις άρδευσης μέσω μονάδων αφαλάτωσης.

Γενικές Παρατηρήσεις

Η ΕΕΛ10 εκβάλλει ετησίως περίπου 6.000.000 m³ επεξεργασμένου λύματος, χωρίς να διαθέτει εγκεκριμένη άδεια επαναχρησιμοποίησης. Προγραμματίζεται στο μέλλον η αναβάθμιση των εγκαταστάσεων μέσω μεμβρανών υπερδιήθησης, προκειμένου να διασφαλιστεί η δυνατότητα απεριόριστης επαναχρησιμοποίησης σύμφωνα με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο. Μέχρι τότε, η διάθεση των εκροών πραγματοποιείται σύμφωνα με υφιστάμενη άδεια, μέσω της παρακείμενης τάφρου που εκβάλλει στον ποταμό .



Διάγραμμα 8α. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην είσοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων



Διάγραμμα 8β. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην έξοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

➤ Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων 13

Υδατικοί πόροι (Νερό)

Η ενίσχυση των τοπικών υδατικών πόρων μέσω της επαναχρησιμοποίησης στην ΕΕΛ13 αξιολογείται ως ελάχιστη, κυρίως λόγω του περιορισμένου όγκου ημερήσιας εκροής (περίπου 1000 m³/d). Η εφαρμοζόμενη μέθοδος απολύμανσης είναι η χλωρίωση, ενώ το φαινόμενο της ανομβρίας σημειώνεται με συχνότητα άνω της μίας φορές τον χρόνο. Παρά την αναγνώριση ορισμένης συμβολής στην εξισορρόπηση του υδατικού ισοζυγίου, αυτή χαρακτηρίζεται ως περιορισμένη. Η κύρια πηγή άρδευσης εξακολουθούν να είναι οι γεωτρήσεις, ενώ δεν καταγράφεται διαθέσιμη πληροφόρηση για τη στάθμη του υδροφορέα ή για την απόσταση μεταξύ της ΕΕΛ, των σημείων γλυκού νερού και των αγροτεμαχίων. Δεν εφαρμόζονται συστηματικά αναλύσεις για την καταγραφή θερμικών επιπτώσεων στους αποδέκτες.

Τροφή

Η κάλυψη των αρδευτικών αναγκών μέσω της αξιοποίησης των επεξεργασμένων εκροών αξιολογείται ως μέτρια, αν και περιορίζεται στο μη βρώσιμο φάσμα της γεωργικής παραγωγής. Δεν καταγράφεται αυξημένη αλατότητα, ούτε πραγματοποιούνται αναλύσεις για δείκτες όπως ο SAR ή για ιχνοστοιχεία, περιορίζοντας την ικανότητα αποτίμησης μακροχρόνιων επιπτώσεων σε έδαφος και καλλιέργειες. Η πιθανότητα φυτοτοξικότητας ή η συσχέτιση με τη σταθερότητα της αγροτικής παραγωγής δεν αξιολογούνται, ενώ η καλλιέργεια βρώσιμων ειδών αποκλείεται, σύμφωνα με τις τρέχουσες πρακτικές.

Οικοσυστήματα

Σε ό,τι αφορά την περιβαλλοντική διάσταση, δεν πραγματοποιούνται αναλύσεις βαρέων μετάλλων στα αρδευόμενα εδάφη, ούτε καταγράφονται ενδείξεις επιπτώσεων στη δημόσια υγεία ή στην τοπική πανίδα. Δεν εφαρμόζονται πρακτικές ή τεχνολογίες για την απομάκρυνση επικίνδυνων ρυπαντών (π.χ. μικρορρυπαντές ή παθογόνα), καθώς η ΕΕΛ1 δεν διαθέτει σχετικές υποδομές. Ωστόσο, η χρήση των επεξεργασμένων εκροών εκτείνεται πέραν της καλλιεργητικής περιόδου για αρδευτικούς σκοπούς σε πράσινες ζώνες ή για βιομηχανική χρήση. Αναγνωρίζεται συμβολή στη μείωση των ρυπαντικών φορτίων στο περιβάλλον, παρότι δεν υφίσταται τεκμηρίωση περιστατικών ευτροφισμού ή αλλαγών στην τοπική βιοποικιλότητα.

Ενέργεια

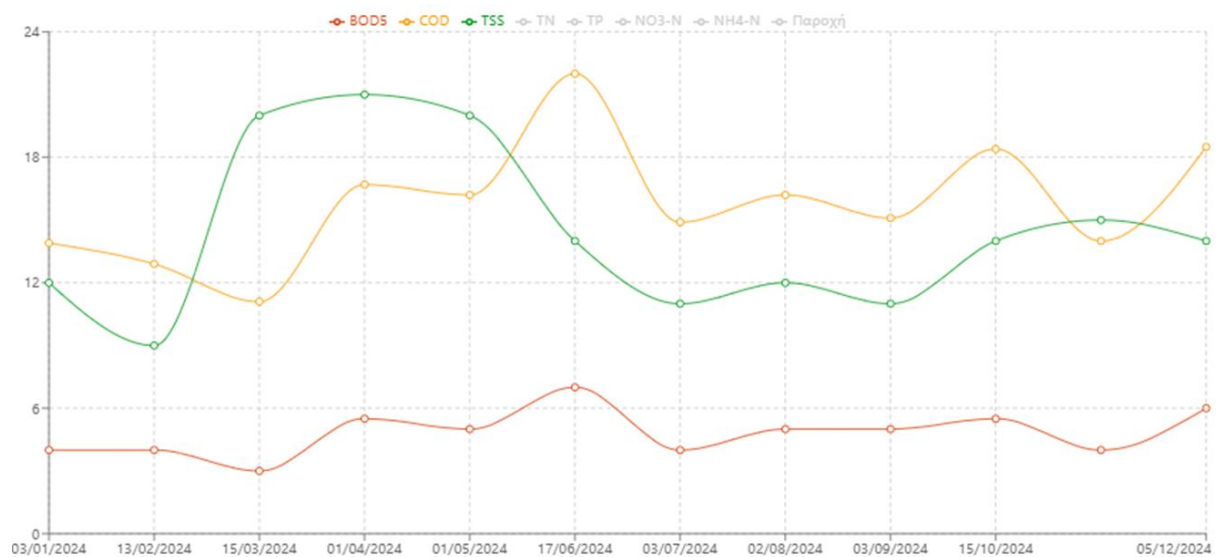
Η κύρια πρόκληση που περιορίζει την επέκταση της επαναχρησιμοποίησης εντοπίζεται στην απουσία υποδομών αποθήκευσης και διανομής, ενώ δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για την ενεργειακή κατανάλωση ή το κόστος επεξεργασίας. Δεν εφαρμόζονται τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα, ούτε έχει εξεταστεί η χρήση μονάδων αφαλάτωσης ως εναλλακτική λύση για άρδευση. Το κόστος μεταφοράς των εκροών δεν υφίσταται, καθώς τα επεξεργασμένα λύματα εκρέουν σε ρέμα και διηθούνται στο υπέδαφος.

Γενικές Παρατηρήσεις

Η μικρή κλίμακα λειτουργίας της μονάδας αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών σε ευρύτερη κλίμακα.



Διάγραμμα 9α. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην είσοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων



Διάγραμμα 9β. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην έξοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

➤ Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων 15

Υδατικοί πόροι (Νερό)

Η αξιοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων στην ΕΕΛ15 συμβάλλει σημαντικά στην ενίσχυση των τοπικών υδατικών πόρων, υποκαθιστώντας σε μεγάλο βαθμό ή και πλήρως άλλες πηγές ύδρευσης. Η εφαρμοζόμενη μέθοδος απολύμανσης είναι η χλωρίωση, η οποία επιλέγεται λόγω της αποτελεσματικότητάς της και του χαμηλού κόστους. Δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τη συχνότητα φαινομένων ανομβρίας ή για πιθανές θερμικές επιπτώσεις στους αποδέκτες. Η κύρια πηγή νερού για άρδευση εξακολουθεί να είναι οι γεωτρήσεις, ενώ διαπιστώνεται ότι το σημείο λήψης των επεξεργασμένων λυμάτων είναι πιο κοντά στα αγροτεμάχια από ό,τι οι άλλες πηγές νερού. Υπάρχει σύστημα αποθήκευσης πριν από τη διάθεση, ενώ η συμβολή της μονάδας στην εξισορρόπηση του υδατικού ισοζυγίου χαρακτηρίζεται ως σημαντική. Η παρακολούθηση της στάθμης του υδροφορέα πραγματοποιείται αποσπασματικά και όχι σε συστηματική βάση.

Τροφή

Η μονάδα καλύπτει πλήρως τις αρδευτικές ανάγκες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, παρέχοντας σταθερή παροχή (24/7). Έχουν καταγραφεί αυξημένα επίπεδα αλατότητας στην εκροή, χωρίς όμως να προκαλούνται προβλήματα στα εδάφη ή στις καλλιέργειες, καθώς τα επίπεδα κρίνονται χαμηλά. Διενεργούνται αναλύσεις νατρίου και δείκτης SAR, χωρίς ενδείξεις επιπτώσεων στη δομή ή τη γονιμότητα των εδαφών. Δεν έχουν αναφερθεί περιστατικά φυτοτοξικότητας. Η παρακολούθηση ιχνοστοιχείων περιορίζεται στα επεξεργασμένα λύματα, ενώ δεν εφαρμόζεται σε εδάφη ή φυτικό υλικό. Η συμβολή στην αγροτική παραγωγή είναι σημαντική, καθώς έχει διασφαλιστεί η σταθερότητα της απόδοσης. Δεν πραγματοποιείται άρδευση βρώσιμων προϊόντων.

Οικοσυστήματα

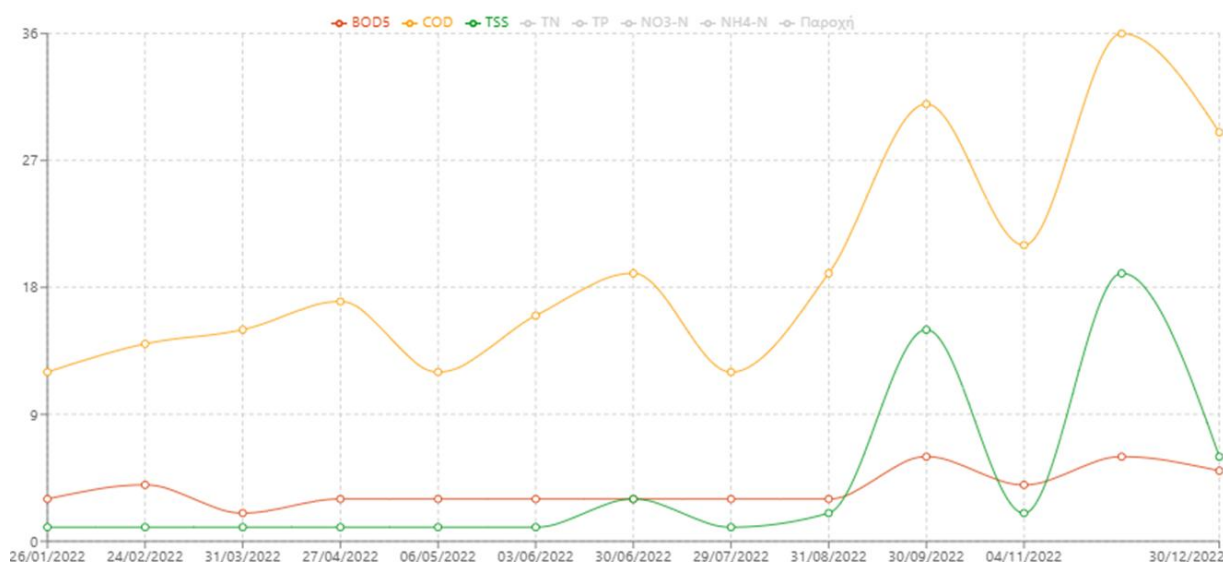
Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για βαρέα μέταλλα στα αρδευόμενα εδάφη ή για επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Δεν έχουν αναφερθεί περιστατικά προβλημάτων υγείας, ενώ προς το παρόν δεν εφαρμόζονται ειδικά μέτρα για την απομάκρυνση ρυπαντών πέραν της χλωρίωσης, που εστιάζει στους παθογόνους μικροοργανισμούς. Ωστόσο, στο πλαίσιο επεκτάσεων και αναβάθμισης της ΕΕΛ, προβλέπεται η εγκατάσταση μονάδας υπερδιήθησης (UF), η οποία αναμένεται να ενισχύσει τον έλεγχο και την απομάκρυνση μικρορρυπαντών. Εκτός της καλλιεργητικής περιόδου, τα λύματα διοχετεύονται σε φυσικούς αποδέκτες υπό ελεγχόμενες συνθήκες, ενώ αξιοποιούνται και για άλλες χρήσεις όπως άρδευση πρασίνου ή βιομηχανική χρήση. Δεν υπάρχουν αναφορές για φαινόμενα ευτροφισμού ή αλλαγές στην τοπική πανίδα. Η περιβαλλοντική επίπτωση που έχει περιοριστεί αφορά κυρίως στη μείωση της εκροής ρυπαντικών φορτίων στους φυσικούς αποδέκτες και στη συγκράτηση της υπεράντλησης υπόγειων και επιφανειακών υδάτων.

Ενέργεια

Δεν είναι γνωστή η ενεργειακή κατανάλωση ανά στάδιο επεξεργασίας. Τα υπάρχοντα δεδομένα αφορούν τη συνολική λειτουργία της εγκατάστασης. Δεν εφαρμόζονται τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα. Παρά την απουσία λεπτομερούς οικονομοτεχνικής αποτίμησης, εκτιμάται ότι υπάρχει όφελος για τους αγρότες. Το κόστος μεταφοράς επωμίζεται η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων. Τέλος, δεν έχει εξεταστεί η δυνατότητα χρήσης μονάδων αφαλάτωσης για άρδευση.



Διάγραμμα 10a. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην είσοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων



Διάγραμμα 10b. Μηνιαία μεταβολή οργανικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών (BOD₅, COD, TSS) στην έξοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων.

19. Η ωριμότητα της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων στην Ελλάδα: Αποτύπωση βάσει στοιχείων από ΕΕΛ

Η επισκόπηση των απαντήσεων των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), όπως καταγράφηκαν στο ερωτηματολόγιο, επιτρέπει την ανάδειξη τόσο των θετικών όσο και των αρνητικών επιπτώσεων από την εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων. Μεταξύ των θετικών επιδράσεων που τεκμηριώνονται εμπειρικά από τις απαντήσεις των υπευθύνων, αναγνωρίζεται η συμβολή της επαναχρησιμοποίησης στην ενίσχυση των υδατικών πόρων, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή συχνότητα φαινομένων ανομβρίας. Η αξιοποίηση των εκροών, αν και σε διαφορετικό βαθμό μεταξύ των εγκαταστάσεων, παρέχει δυνατότητα ενίσχυσης του υδατικού ισοζυγίου, είτε μέσω της άμεσης άρδευσης είτε έμμεσα, μέσω της επανατροφοδότησης του υδροφόρου ορίζοντα. Σε ορισμένες εγκαταστάσεις, η χρήση των εκροών επιτρέπει τη μερική ή ολική υποκατάσταση των γεωτρήσεων, συντελώντας στη μείωση της υπεράντλησης των υπόγειων αποθεμάτων.

Η επαναχρησιμοποίηση έχει επίσης συμβάλει στη μείωση των ρυπαντικών φορτίων προς τους φυσικούς αποδέκτες, ιδιαίτερα όταν οι εκροές παλαιότερα κατέληγαν ανεπεξέργαστες στο περιβάλλον. Ορισμένες εγκαταστάσεις σημειώνουν αισθητή βελτίωση της ποιότητας των επιφανειακών ή θαλάσσιων υδάτων. Παράλληλα, η διαθεσιμότητα επεξεργασμένου νερού έχει υποστηρίξει την κάλυψη αρδευτικών αναγκών σε περιόδους ξηρασίας, ενώ σε τουλάχιστον μία περίπτωση αναφέρεται η βελτίωση της σταθερότητας της αγροτικής παραγωγής. Επιπλέον, κάποιες εγκαταστάσεις αναπτύσσουν υποδομές (δεξαμενές, δίκτυα, λιμνοδεξαμενές) που βελτιώνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης και διανομής. Σε επίπεδο κοινωνικής αποδοχής, ορισμένοι υπεύθυνοι σημειώνουν ότι η εμπιστοσύνη των καταναλωτών απέναντι σε προϊόντα που αρδεύονται με ανακυκλωμένο νερό παραμένει υψηλή.

Ωστόσο, αναδεικνύονται και πληθώρα προκλήσεων που περιορίζουν τη δυναμική της επαναχρησιμοποίησης. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις χαρακτηρίζουν τη χρήση των εκροών ως περιορισμένη, κυρίως λόγω έλλειψης αδειοδοτήσεων, γεωγραφικών περιορισμών, απουσίας υποδομών αποθήκευσης ή διανομής, καθώς και εξαιτίας του υψηλού κόστους μεταφοράς. Σε άλλες περιπτώσεις, η επαναχρησιμοποίηση δεν εφαρμόζεται καθόλου ή εφαρμόζεται μόνο εντός του χώρου της μονάδας, χωρίς να επεκτείνεται σε αγροτικές περιοχές. Η άρδευση με επεξεργασμένα λύματα δεν περιλαμβάνει βρώσιμα προϊόντα, ενώ η επίδραση των εκροών στη γονιμότητα των εδαφών ή τη φυτοτοξικότητα δεν παρακολουθείται συστηματικά. Οι αναλύσεις ιχνοστοιχείων πραγματοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στα λύματα και όχι στα αρδευόμενα φυτά ή εδάφη, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η αξιολόγηση της μακροχρόνιας επίδρασης στη γεωργική παραγωγή.

Προβληματισμοί εντοπίζονται επίσης ως προς τη διαχείριση ρυπαντών υψηλού κινδύνου, όπως βαρέα μέταλλα, μικροπλαστικά, φαρμακευτικά κατάλοιπα ή ανθεκτικά παθογόνα, καθώς στις περισσότερες εγκαταστάσεις δεν πραγματοποιούνται στοχευμένες αναλύσεις, ούτε εφαρμόζονται τεχνολογίες προηγμένης απομάκρυνσης. Επίσης, δεν καταγράφονται

επιδημιολογικά δεδομένα που να συσχετίζουν προβλήματα υγείας με την έκθεση σε επεξεργασμένα λύματα, ούτε υπάρχουν ενδείξεις για αρνητικές επιπτώσεις στην τοπική πανίδα. Η περιβαλλοντική παρακολούθηση είναι σε μεγάλο βαθμό αποσπασματική, ενώ φαινόμενα ευτροφισμού στους αποδέκτες δεν αναφέρονται, χωρίς όμως να τεκμηριώνονται μετρήσεις.

Στον ενεργειακό τομέα, η εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης φαίνεται να προσκρούει στην απουσία τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας και στην έλλειψη αναλυτικής καταγραφής της κατανάλωσης. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις δεν εφαρμόζουν συστήματα όπως η αναερόβια χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου, ούτε έχουν εκπονήσει μελέτες για τη συσχέτιση της επαναχρησιμοποίησης με μείωση του ενεργειακού κόστους. Το κόστος μεταφοράς συνήθως μετακυλίνεται στους τελικούς χρήστες, ενώ δεν έχει αξιολογηθεί η δυνατότητα άρδευσης μέσω μονάδων αφαλάτωσης ως εναλλακτική. Τέλος, εντοπίζονται κοινωνικά εμπόδια, όπως η επιφυλακτικότητα ή η καχυποψία των χρηστών απέναντι στη χρήση ανακτώμενου νερού.

Συνολικά, το σύνολο των απαντήσεων αποτυπώνει έναν ενδιάμεσο βαθμό ωριμότητας ως προς την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων, με τη θετική δυναμική να εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα υποδομών, την τεχνολογία επεξεργασίας, το θεσμικό πλαίσιο, την κοινωνική αποδοχή και τη συστηματική παρακολούθηση των περιβαλλοντικών και αγρονομικών παραμέτρων.

20. Συμπεράσματα και προτάσεις για την αντιμετώπιση των αδυναμιών στην επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την ενίσχυση των υδατικών πόρων, ιδίως σε περιοχές με έντονη υδατική πίεση. Ωστόσο, από την καταγραφή των δεδομένων σε διάφορες ΕΕΛ, εντοπίζονται σημαντικά εμπόδια, τόσο τεχνικά όσο και κοινωνικοοικονομικά. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των αδυναμιών, απαιτείται ένα συνδυαστικό πλαίσιο παρεμβάσεων:

1. **Αναβάθμιση των υποδομών επεξεργασίας:** Η ενσωμάτωση τεχνολογιών τριτοβάθμιας επεξεργασίας, όπως μεμβράνες υπερδιήθησης (UF), UV, οζονισμός και ενεργός άνθρακας, μπορεί να μειώσει τους ρυπαντές (παθογόνα, μικρορρυπαντές, βαρέα μέταλλα), διασφαλίζοντας την ποιότητα του νερού για γεωργική ή άλλη χρήση.
2. **Παρακολούθηση και έλεγχος ποιότητας:** Η συστηματική ανάλυση δεικτών όπως το SAR, η αλατότητα, τα βαρέα μέταλλα και τα ιχνοστοιχεία τόσο στην εκροή όσο και στα εδάφη και τις καλλιέργειες, είναι απαραίτητη για την αποτροπή σωρευτικών επιπτώσεων και την τεκμηρίωση ασφάλειας.
3. **Ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης και διανομής:** Η έλλειψη ενδιάμεσων δεξαμενών, δικτύων μεταφοράς και εποχικής αποθήκευσης μειώνει την αξιοποίηση των εκροών. Σχεδιασμένα δίκτυα άρδευσης και δεξαμενές μπορούν να εξομαλύνουν την παροχή και να επιτρέψουν ευέλικτη χρήση.
4. **Κοινωνική αποδοχή και ενημέρωση:** Η καχυποψία των αγροτών και των καταναλωτών αποτελεί σοβαρό περιορισμό. Ενημερωτικές εκστρατείες, πιλοτικά προγράμματα και προβολή θετικών αποτελεσμάτων μπορούν να ενισχύσουν την εμπιστοσύνη και τη συμμετοχή των ενδιαφερομένων.
5. **Οικονομικά κίνητρα και υποστήριξη:** Η επιδότηση έργων αναβάθμισης, η κάλυψη του κόστους μεταφοράς και η διάθεση του νερού με χαμηλό ή μηδενικό κόστος μπορούν να ενθαρρύνουν τους χρήστες. Επίσης, απαιτείται αποτίμηση του οικονομικού οφέλους προς τους αγρότες για την ενίσχυση της αποδοχής.
6. **Ενεργειακή αποδοτικότητα και κυκλική διαχείριση:** Η εφαρμογή τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα μπορεί να μειώσει το λειτουργικό κόστος και να ενισχύσει τη βιωσιμότητα των ΕΕΛ. Παράλληλα, η ένταξη της επαναχρησιμοποίησης σε στρατηγικές κυκλικής οικονομίας ενισχύει τη συνολική απόδοση των υποδομών.

Η αντιμετώπιση των παραπάνω αδυναμιών προϋποθέτει ολιστικό σχεδιασμό, θεσμική συνέργεια και χρηματοδοτική στήριξη, με στόχο τη μετάβαση από αποσπασματικές εφαρμογές σε οργανωμένα, ασφαλή και αποδεκτά συστήματα επαναχρησιμοποίησης.

Βιβλιογραφία

1. Adamovic et al., 2019 - M. Adamovic, W. Al-Zubari, A. Amani, I. Ameztoy Aramendi, C. Bacigalupi, S. Barchiesi, B. Bisselink, K. Bodis, F. Bouraoui, S. Caucci, J. Dalton, A. De Roo, H. Dudu, C. Dupont, J. El Kharraz, A. Embid, N. Farajalla, R. Fernandez Blanco Carramolino, E. Ferrari, ..., G. Zaragoza - Position Paper on Water, Energy, Food and Ecosystem (WEFE) Nexus and Sustainable Development Goals (SDGs) (2019)
2. Ahmad AL, Ismail S, Bhatia S (2003) Water recycling from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. *Desalination* 157(1–3):87–95
3. A.N. Angelakis, T. Asano, A. Bahri, B.E. Jimenez, G. Tchobanoglous - Water reuse: from ancient to modern times and the future -Retrieved from *Front. Environ. Sci.*, 6 (26) (2018) doi:10.3389/fenvs.2018.00026
4. Angelakis, A.N.; Gikas, P. Water Reuse: Overview of current practices and trends in the World with emphasis in EU. *Water Utility J.* **2014**, 6, 67–78.
5. Ashton, J.; Ubido, J. The Healthy City and the Ecological Idea. *J. Soc. Soc. Hist. Med.* **1991**, 4, 173–181.
6. Assembly UG (2015) Transforming our world: the 2030 Agenda for sustainable development. New York: United Nations 2015 (UN 2015)
7. Baker T, Kiptala J, Olaka L, Oates N, Hussain A, and McCartney M (2015) Baseline review and ecosystem services assessment of the Tana River Basin, Kenya. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI) p.107. (IWMI Working Paper 165). <https://doi.org/10.5337/2015.223>.
8. J.M. Bielicki, M.A. Beetstra, J.B. Kast, Y. Wang, S. Tang - Stakeholder perspectives on sustainability in the food-energy-water nexus - *Front. Environ. Sci.*, 7 (FEB) (2019), 10.3389/fenvs.2019.00007
9. J.O. Botai, C.M. Botai, K.P. Ncongwane, S. Mpandeli, L. Nhamo, M. Masinde, A.M. Adeola, M.G. Mengistu, H. Tazvinga, M.D. Murambadoro, S. Lottering, I. Motochi, P. Hayombe, N.N. Zwane, E.K. Wamiti, T. Mabhaudhi - A review of the Water–Energy–Food Nexus research in Africa - *Sustainability*, 13 (4) (2021), p. 1762, 10.3390/su13041762
10. Braungart, M., & McDonough, W. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*.
11. K.L. Broek - Stakeholders' perceptions of the socio-economic and environmental challenges at Lake Victoria Lakes Reserv.: *Sci. Pol. Manag. Sustain. Use*, 24 (3) (2019), pp. 239-245, 10.1111/lre.12275
12. Z. Chen, H.H. Ngo, W. Guo - A critical review on the end uses of recycled water (2013)
13. Chini CM, Konar M, and Stillwell AS (2017) Direct and indirect urban water footprints of the United States. *Water Resources Research* 53: 316–327.
14. Council Directive 91/271/EEC concerning urban waste-water treatment (91/271/EEC)
15. Commission of European Communities (2012) Communication No. 673, 2012. A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources (COM no. 673, 2012)
16. Commission of European Communities. Communication on the Circular Economy Package. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down rules on the making available on the market of CE marked fertilizing products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 (COM no. 157, 2016)
17. Commission of European Communities (2014) Communication No. 398, 2014. Towards a circular economy: a zero waste programme for Europe (COM no. 398, 2014)

18. Danielsson - Reduce Water Consumption at Home. <https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-use/hardwares/optimisation-water-use-home/reduce-water-consumption-at-home>, 2019 (Reduce Water Consumption at Home, 2019). Accessed 22 Aug 2019
19. M.A. Dawoud, M.M. Al Mulla - Environmental impacts of seawater desalination: Arabian Gulf case study - *Int J Environ Sustain*, 1 (3) (2012), pp. 22-37
20. De Pauw, I., Karana, E., & Kandachar, P. (2013). Cradle to cradle in product development: A case study of closed-loop design. In *Re-engineering manufacturing for sustainability* (pp. 47–52). Singapore: Springer.
21. de Strasser et al., 2016 - L. de Strasser, A. Lipponen, M. Howells, S. Stec, C. Bréthaut - A methodology to assess the water energy food ecosystems nexus in transboundary river basins *Water*, 8 (2) (2016), p. 59, 10.3390/w8020059
22. K. Duong, J.-D.M. Saphores - Obstacles to wastewater reuse: an overview - Retrieved from Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Mol. Sci.: *Water*, 2 (3) (2015), pp. 199-214, doi:10.1002/wat2.1074 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wat2.1074>
23. EASAC (The European Academies Science Advisory Council). (2015). Circular economy: A commentary from the perspectives of the natural and social sciences. Preston.
24. Environmental Performance Index - Water resources - (2017)
25. Esposito, M., Tse, T., & Soufani, K. (2017a). Is the circular economy a new fast-expanding market? *Thunderbird International Business Review*, 59(1), 9–14.
26. EPA - 2012 guidelines for water reuse
27. EPRS 2015. Water legislation. Cost of non-Europe Report, EPRS-European Parliamentary Research Service, European Parliament.
28. European Commission - Pollutants in urban waste water and sewage sludge (2001)
29. European Commission - DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (2009)
30. Water reuse, European Commission (2018) ec.europa.eu/environment/water/reuse.htm (Water Reuse, EC 2019)
31. European Environmental Agency (2012) EEA report no 12/2012. European Environmental Agency; 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe — an indicator-based report.
32. Europe's water in figures. An overview of the European drinking water and waste water sectors. The European Federation of National Water Services 2017, www.danva.dk/media/3645/eureau_water_in_figures.pdf (Europe's water in figures 2017). Accessed 22 Aug 2019
33. T.E. Evans - The effects of changes in the world hydrological cycle on availability of water resources - Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes, John Wiley & Sons Ltd., Chistester, England (1996)
34. FAO 2011. Energy-smart food for people and climate—Issue paper. Rome.
35. FAO - Irrigation water requirement and water withdrawal by country (2012)
36. FAO - The Future of Food and Agriculture – Trends and Challenges (2017)
37. FAO (2018) <http://www.fao.org/land-water/water/watergovernance/waterfoodenergynexus/en/>.

38. D. Fatta-Kassinos, D.D. Dionysiou - Advanced treatment technologies for urban wastewater reuse (the handbook of environmental chemistry) - Springer (2016)
39. A. Forslund, B. Malm Renöfält, S. Barchiesi, K. Cross, S. Davidson, T. Ferrel, L. Korsgaard, K. Krchnak, M. McClain, K. Meijer, M. Smith - Securing water for ecosystems and human well-being: the importance of environmental flows - Swedish Water House Report 24 (2009)
40. K.J.A. Fowler, M.C. Peel, A.W. Western, L. Zhang, T.J. Peterson -Simulating runoff under changing climatic conditions: revisiting an apparent deficiency of conceptual rainfall-runoff models - Retrieved from Water Resour. Res., 52 (3) (2016), pp. 1820-1846 - doi:10.1002/2015wr018068
41. Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32.
42. Ghosh, S. K. (2021). Introduction to circular economy and summary analysis of chapters. In S. K. Ghosh (Ed.), *Circular Economy: Global Perspective* (pp. 1–23). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8509-8_1
43. González-Cebollada C (2015) Water and energy consumption after the modernization of irrigation in Spain. *WIT Transactions on the Built Environment* 168: 457–465.
44. Gupta VK, Ali I, Saleh TA, Nayak A, Agarwal S (2012) Chemical treatment technologies for waste-water recycling—an overview. *RSC Adv* 2(16):6380–6388
45. Herzel H, Krüger O, Hermann L, Adam C (2016) Sewage sludge ash—a promising secondary phosphorus source for fertilizer production. *Sci Total Environ* 542:1136–1143
46. Hicks, C., & Dietmar, R. (2007). Improving cleaner production through the application of environmental management tool in China. *Journal of Cleaner Production*, 15, 395–408.
47. Hoff, 2011 - H. Hoff - Understanding the Nexus - SEI: Stockholm Environment Institute (2011)
48. Huang, Y., Bird, R. N., & Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58–73.
49. IEA (2010) World energy outlook 2010. Paris: OECD/International Energy Agency.
50. IWA - Alternative water resources: a review of concepts, solutions and experiences (2015)
51. Johnson, 2010 - J. Johnson -Climate change and fishery sustainability in Lake Victoria Afr. J. Trop. Hydrobiol. Fish., 12 (1) (2010), 10.4314/ajthf.v12i1.57368
52. Kaaya, L.T. and Lugomela, G.V. (2015) Local Pressures and Drivers of aquatic ecosystem change in: *Ecosystem Services and River Basin Ecohydrology* by Luis Chicharo and Felix Müller, Springer.
53. Kamizoulis, G.; Bahri, A.; Brissaud, F.; Angelakis, A.N. Wastewater Recycling and Reuse Practices in Mediterranean Region: Recommended Guidelines. 2003. Available online: http://www.a-angelakis.gr/files/pubrep/recycling_med.pdf (accessed on 11 June 2015).
54. Kowalewski Z, Neverova-Dziopak E, Preisner M (2016) Computer simulation of activated sludge process to obtain the minimum eutrophication potential of municipal wastewater. *Ochrona Srodowiska* 38(3):23–28
55. Krüger O, Fattah KP, Adam C (2016) Phosphorus recovery from the wastewater stream—necessity and possibilities. *Desalin Water Treat* 57(33):15619–15627
56. Kudlek E, Dudziak M (2018) The assessment of changes in the membrane surface during the filtration of wastewater treatment plant effluent. *Desalin Water Treat* 128:298–305

57. Le Monde. 2015. L'amande, suspect idéal de la sécheresse californienne, http://www.lemonde.fr/ameriques/article/2015/06/01/l-amande-suspect-ideal-de-la-secheresse-californienne_4644791_3222.html.
58. Macherzyński B, Włodarczyk-Makuła M, Wojewódka D (2018) Control of PAHs degradation process under reducing conditions. *Desalin Water Treat* 117:290–300
59. Maidment, D.R., *Handbook of Hydrology*, D.R. Maidment, ed., Chapter 1, McGraw-Hill, 1993
60. McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. New York, NY: North Point Press.
61. McDonough, W., Braungart, M., Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). Applying the principles of green engineering to cradle-to-cradle design. *Environmental Science & Technology*, 37(23), 434A–441A.
62. Macedonio, F., Drioli, E., Gusev, A. A., Bardow, A., Semiat, R. and Kurihara, M. - Efficient technologies for worldwide clean water supply. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 51: 2–17 (2012).
63. Ellen MacArthur Foundation. (2012). *Towards the circular economy: Economic business rationale for an accelerated transition*.
64. Ellen MacArthur Foundation. (2017). *The new plastics economy: Catalysing action*.
65. Ellen Macarthur Foundation. (2019). *Completing the picture how the circular economy tackles climate change*.
https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Completing_The_Picture_How_The_Circular_Economy- Tackles_Climate_Change_V3_26_September.pdf
66. Marszałek M, Kowalski Z, Makara A (2016) Application of pressure-driven membrane techniques for the recovery of water and fertilising components from pig slurry. *Czasopismo Techniczne* 1(4):77–90
67. Molajou, A.; Afshar, A.; Khosravi, M.; Soleimanian, E.; Vahabzadeh, M.; Variani, H.A. A new paradigm of water, food, and energy nexus. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021, 1–11.
68. Mudgal, S.; van Long, L.; Saidi, N.; Haines, R.; McNeil, D.; Jeffrey, P.; Smith, H.; Knox, J. *Optimization Water Reuse in EU: Final Report*; BIO by Deloitte: Brussels, Belgium, 2015; p. 199.
69. Munaretto S and Witmer M (2017) *Water-land-energy-food-climate: Policies and policy coherence at European and international scale*. Netherlands Environmental Assessment Agency: PBL.
70. L. Nhamo, B. Ndlela, C. Nhemachena, T. Mabhaudhi, S. Mpandeli, G. Matchaya - The water-energy-food nexus: climate risks and opportunities in Southern Africa - *Water (Switzerland)*, vol. 10, issue 5, MDPI AG (2018), [10.3390/w10050567](https://doi.org/10.3390/w10050567)
71. Obaideen K., Shehata N., Sayed , Abdelkareem, Mahmoud, Olabi, The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
72. . Petrovic, A. Ginebreda, V. Acuna, R.J. Batalla, A. Elosegi, H. Guasch – Combined scenarios of chemical and ecological quality under water scarcity in Mediterranean rivers *Trac Trends Anal Chem*, 30 (2011), pp. 1269-1278
73. D.A. Roberts, E.L. Johnston, N.A. Knott - Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies Retrieved from *Water Res.*, 44 (18) (2010), pp. 5117-5128, 10.1016/j.watres.2010.04.036

74. Rulli MC, Bellomi D, Cazzoli A, de Carolis G, and D'odorico P (2016) The water-land-food nexus of first-generation biofuels. *Scientific Reports* 6: 22521.
75. Schröder P. , Anggraeni K. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals, DOI:[10.1111/jiec.12732](https://doi.org/10.1111/jiec.12732)
76. SEI (2014) Managing environmental systems: The water-energy-food nexus. Research synthesis briefs. Stockholm Environmental Institute.
77. Siciliano G, Rulli MC, and D'odorico P (2017) European large-scale farmland investments and the land-water-energy-food nexus. *Advances in Water Resources* 110: 579–590.
78. Silalertruksa T and Gheewala SH (2018) Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand. *Journal of Cleaner Production* 182: 521–528.
79. Silva A, Rosano M, Stocker L, Gorissen L (2017) From waste to sustainable materials management: three case studies of the transition journey. *Waste Manag* 61:547–557
80. Smol, M., Adam, C. & Preisner, M. Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. *J Mater Cycles Waste Manag* 22, 682–697 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>
81. Smol M, Włodarczyk-Makuła M (2017) The effectiveness in the removal of PAHs from aqueous solutions in physical and chemical processes: a review. *Polycycl Aromat Compd* 37(4):292–313
82. Smol M (2019) The importance of sustainable phosphorus management in the circular economy (CE) model: the Polish case study. *J Mater Cycles Waste Manag* 21(2):227–238
83. Snyder, S.A. Emerging Chemical Contaminants: Looking for Better Harmony. *J. Am. Water Works Assoc.* **2014**, 106, 38–52.
84. Taguta et al., 2022 - C. Taguta, A. Senzanje, Z. Kiala, M. Malota, T. Mabhaudhi, Water-Energy-Food Nexus tools in theory and practice: a systematic review *Front. Water*, 4 (2022), p. 40, 10.3389/frwa.2022.837316
85. The 4Rs—reduction, reuse, recycling and recovery, https://www.iisd.org/business/tools/bt_4r.aspx (4Rs, IISD, 2019).
86. UN Water. (2015b). United Nations World Water Development - Report 2015: Water for a Sustainable World. <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf>
87. UN - The United Nations world water development Report 2017 (2017)
88. Vanham D and Bidoglio G (2014) The water footprint of agricultural products in European river basins. *Environmental Research Letters* 9: 064007.
89. Vanham D (2016) Does the water footprint concept provide relevant information to address the water–food–energy–ecosystem nexus? *Ecosystem Services* 17: 298–307.
90. Visser, W. (2010). The age of responsibility: CSR 2.0 and the new DNA of business. *Journal of Business Systems, Governance and Ethics*, 5(3), 7
91. N. Voulvoulis - Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>
92. Wells VK, Taheri B, Gregory-Smith D, Manika D (2016) The role of generativity and attitudes on employees home and workplace water and energy saving behaviours. *Tour Manag* 56:63–74
93. World Bank (2016) High and dry: Climate change, water, and the economy. Washington, DC: World Bank.
94. World Economic Forum - Global risks 2015 (2015)

95. Yuan, Z. W., et al. (2006). The circular ecology: A new development strategy in China. *Journal of Industrial Ecology*, 10, 4–8.
96. K.G. Zuurbier, K.J. Raat, M. Paalman, A.T. Oosterhof, P.J. Stuyfzand - How subsurface water technologies (SWT) can provide robust, effective, and cost-efficient solutions for freshwater management in coastal zones - Retrieved from *Water Resour. Manag.*, 31 (2) (2017), pp. 671-687, 10.1007/s11269-016-1294-x, doi:10.1007/s11269-016-1294-x

Παράρτημα 1



ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Η ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΕΣΜΟ ΝΕΡΟΥ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΤΡΟΦΗΣ - ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Χατζηγεωργίου Μιχάλης

Αφαίρεση προσωπικών δεδομένων (Υπηρεσία Βιβλιοθήκης & Πληροφόρησης Πανεπιστημίου Θεσσαλίας)

Βιώσιμη Διαχείριση Περιβαλλοντικών Αλλαγών και Κυκλική Οικονομία

Επιβλέπων Διδάσκων: Δρ. Κοφινάς

Εισαγωγικό Σημείωμα

- ✓ Στο πλαίσιο της διπλωματικής μου εργασίας, πραγματοποιείται συλλογή ερωτηματολογίων από Υπεύθυνους Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων, με σκοπό την ανάλυση του επιπέδου επαναχρησιμοποίησης στην Ελλάδα και την ανάδειξη σχετικών προκλήσεων.
- ✓ Το ερωτηματολόγιο περιλαμβάνει ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής, στις οποίες μπορείτε να τροποποιήσετε τις απαντήσεις ώστε να αποτυπώνεται η πραγματική κατάσταση. Μπορείτε επίσης να προσθέσετε παρατηρήσεις ή σχόλια για την πληρέστερη αποτύπωση της εμπειρίας σας. Μπορείτε να υπογραμμίσετε, να κάνετε highlight, **bold** ή να σημειώσετε με ένα σύμβολο (Σ) τη σωστή απάντηση (ότι σας διευκολύνει).
- ✓ Ό,τι μοιράξετε μαζί μας αποτελεί πολύτιμο υλικό για την πληρέστερη κατανόηση του θέματος.

🌈 Η συμμετοχή σας είναι ιδιαίτερα σημαντική και σας ευχαριστώ εκ των προτέρων για τον χρόνο που θα διαθέσετε.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

❖ Νερό

➤ Ερώτηση 1

Σε ποιο βαθμό θεωρείτε ότι η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων από τη μονάδα σας έχει συμβάλει στην ενίσχυση των τοπικών υδατικών πόρων όπως μείωση άντλησης, σταθερή παροχή άρδευσης κ.τ.λ. ;

α) Πολύ σημαντικά – υποκαθιστά πλήρως άλλες πηγές νερού

β) Μέτρια – χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες πηγές

γ) Ελάχιστα – περιορισμένη χρήση

δ) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ Ερώτηση 2

Ποιες από τις παρακάτω μεθόδους απολύμανσης εφαρμόζονται στη μονάδα σας;

(Μπορείτε να επιλέξετε περισσότερες από μία)

α) Χλωρίωση – λόγω αποτελεσματικότητας και χαμηλού κόστους

β) Υπεριώδης ακτινοβολία (UV) – για υψηλή ποιότητα χωρίς χημικά κατάλοιπα

γ) Οζονοποίηση – για απαιτητική ποιότητα αλλά με αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση

δ) Φυσικές μέθοδοι (π.χ. λιμνοδεξαμενές) – λόγω χαμηλής ενεργειακής απαίτησης

ε) Άλλο (παρακαλώ διευκρινίστε): _____

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ Ερώτηση 3

Πόσο συχνά καταγράφονται φαινόμενα ανομβρίας στην περιοχή σας;

Ως διάστημα ανομβρίας νοείται η χρονική περίοδος κατά την οποία δεν σημειώνεται ουσιαστική βροχόπτωση για τουλάχιστον 30 έως 45 ημέρες.

α) Μία φορά τον χρόνο

β) Περισσότερες από μια φορά τον χρόνο

γ) Κάθε 2–3 χρόνια

δ) Σπάνια (κάθε 5 χρόνια ή περισσότερο) / Δεν εμφανίζονται φαινόμενα ανομβρίας

ε) Δεν γνωρίζω / Δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ Ερώτηση 4

Έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις ή υπάρχουν ενδείξεις ότι η διάθεση επεξεργασμένων λυμάτων αυξάνει τη θερμοκρασία σε υδάτινα συστήματα της περιοχής, επηρεάζοντας την ποιότητα του νερού;

α) Ναι – έχουν καταγραφεί αυξήσεις θερμοκρασίας και σχετικές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού

β) Ναι – υπάρχουν ενδείξεις αλλά όχι συστηματικές μετρήσεις

γ) Όχι – δεν έχει παρατηρηθεί θερμική επίδραση από τα επεξεργασμένα λύματα

δ) Δεν υπάρχουν σχετικές αναλύσεις ή στοιχεία

ε) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 5**

Ποια είναι η κύρια πηγή νερού που χρησιμοποιείται για άρδευση στην περιοχή σας;

- α) Υπόγειο νερό (γεωτρήσεις)
- β) Επιφανειακό νερό (ποτάμια, λίμνες, ταμιευτήρες)
- γ) Συνδυασμός και των δύο
- δ) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 6**

Υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τη μέση στάθμη του υπόγειου υδροφορέα στην περιοχή σας;

- α) Ναι – υπάρχουν τακτικές μετρήσεις και παρακολούθηση
- β) Υπάρχουν ενδεικτικά στοιχεία, αλλά όχι συστηματική παρακολούθηση
- γ) Όχι – δεν υπάρχουν σχετικά δεδομένα
- δ) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 7**

Η απόσταση μεταφοράς των επεξεργασμένων λυμάτων έως τα σημεία άρδευσης είναι συγκρίσιμη με την απόσταση μεταφοράς του γλυκού νερού (επιφανειακού και όχι υπόγειου);

Σημείωση: Η ερώτηση αφορά μόνο την οριζόντια απόσταση.

- α) Οι αποστάσεις είναι περίπου ίδιες
- β) Το σημείο λήψης του γλυκού νερού βρίσκεται πιο κοντά στα σημεία άρδευσης
- γ) Το σημείο λήψης των επεξεργασμένων λυμάτων βρίσκεται πιο κοντά στα σημεία άρδευσης
- δ) Δεν γνωρίζω / Δεν εφαρμόζεται

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ Ερώτηση 8

Πώς γίνεται η συλλογή και η μεταφορά των επεξεργασμένων λυμάτων από τη μονάδα σας προς τους τελικούς χρήστες;

- α) Υπάρχει σύστημα αποθήκευσης (π.χ. ταμιευτήρας, λιμνοδεξαμενή) πριν τη διάθεση
- β) Τα επεξεργασμένα λύματα διοχετεύονται απευθείας στους τελικούς χρήστες
- γ) Δεν υπάρχει οργανωμένο σύστημα μεταφοράς και αποθήκευσης
- δ) Δεν γνωρίζω
- ε) Άλλο (παρακαλώ διευκρινίστε): _____

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

❖ Τροφή

➤ Ερώτηση 9

Με βάση την εμπειρία σας, πόσο συμβάλλει η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων στη βελτίωση της κάλυψης των αρδευτικών αναγκών ειδικά σε περιόδους ξηρασίας ;

- α) Καθόλου – εξαρτόμαστε από εναλλακτικές πηγές
- β) Λίγο – βοηθά συμπληρωματικά
- γ) Μέτρια – καλύπτει μεγάλο μέρος των αναγκών
- δ) Ιδιαίτερα – εξασφαλίζει 24/7 άρδευση
- ε) Δεν γνωρίζουμε

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ Ερώτηση 10

10α. Έχει καταγραφεί αυξημένη αλατότητα στα επεξεργασμένα λύματα της μονάδας σε σχέση με το γλυκό νερό ;

- α) Ναι
- β) Όχι

10β. Αν ναι, ποια είναι η επίδραση στις καλλιέργειες ή στα εδάφη που αρδεύονται με αυτά ;

α) Ναι – υπάρχουν αυξημένα επίπεδα αλάτων και έχουν εντοπιστεί επιπτώσεις στην απόδοση της παραγωγής ή στην ποιότητα του εδάφους

β) Ναι – εντοπίζεται αυξημένη αλατότητα αλλά χωρίς εμφανή επίδραση (μέχρι στιγμής)

γ) Όχι – τα επίπεδα αλάτων είναι χαμηλά και δεν δημιουργούν πρόβλημα

δ) Δεν γνωρίζουμε / δεν έχουμε μετρήσεις αλατότητας στην εκροή

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ Ερώτηση 11

11α. Πραγματοποιούνται στη μονάδα σας αναλύσεις νατρίου (δείκτης SAR) στα επεξεργασμένα λύματα ή/και στα εδάφη που αρδεύονται με αυτό ;

α) Ναι

β) Όχι

11β. Αν ναι, έχουν παρατηρηθεί επιπτώσεις στη δομή ή στη γονιμότητα των εδαφών που αρδεύονται με επεξεργασμένα λύματα, λόγω υψηλών συγκεντρώσεων νατρίου ;

α) Ναι – έχουν καταγραφεί περιπτώσεις υποβάθμισης ή μείωσης της παραγωγής

β) Ναι – αλλά οι επιπτώσεις είναι περιορισμένες και διαχειρίσιμες

γ) Όχι – δεν έχουν εντοπιστεί τέτοιου είδους προβλήματα

δ) Δεν υπάρχουν δεδομένα ή σχετική παρακολούθηση

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 12**

Έχουν παρατηρηθεί ή καταγραφεί περιπτώσεις φυτοτοξικότητας (όπως περιορισμένη ανάπτυξη, αλλοιώσεις και αλλαγή χρώματος φυλλώματος, μειωμένα καρπών) σε καλλιέργειες που αρδεύονται με επεξεργασμένα λύματα της μονάδας σας ;

α) Ναι – και έχουν συσχετιστεί με την ποιότητα του αρδευτικού νερού

β) Ναι – αλλά αποδίδονται κυρίως σε άλλους παράγοντες (π.χ. λίπανση, φυτοπροστασία)

γ) Όχι – δεν έχουν εντοπιστεί ενδείξεις φυτοτοξικότητας

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 13**

Διενεργούνται αναλύσεις για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης ιχνοστοιχείων (όπως Zn, Cu, Mn, Fe) είτε στα επεξεργασμένα λύματα είτε στα φυτά που αρδεύονται με αυτό ;

α) Ναι – τόσο στα επεξεργασμένα λύματα όσο και στα φυτά

β) Ναι – μόνο στα επεξεργασμένα λύματα

γ) Όχι – δεν πραγματοποιούνται τέτοιες αναλύσεις

δ) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 14**

Σε ποιο βαθμό έχει συμβάλει η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων στη σταθερότητα της αγροτικής παραγωγής στην περιοχή σας ;

α) Πολύ – συνέβαλε καθοριστικά στη διατήρηση σταθερής παραγωγής

β) Αρκετά – βοήθησε συμπληρωματικά σε κρίσιμες περιόδους

γ) Λίγο ή καθόλου

ε) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 15**

Ποια είναι η εμπιστοσύνη των καταναλωτών απέναντι σε βρώσιμα προϊόντα που αρδεύονται με επεξεργασμένα λύματα ;

- α) Μεγαλη
- β) Είναι επιφυλακτικοί
- γ) Δεν υπάρχει ενημέρωση
- δ) Δεν αρδεύονται βρώσιμα προϊόντα

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

❖ **Οικοσύστημα**

➤ **Ερώτηση 16**

Διενεργούνται αναλύσεις για πιθανή συσσώρευση βαρέων μετάλλων στα αρδευόμενα εδάφη με επεξεργασμένα λύματα ;

- α) Ναι, διενεργούνται αναλύσεις
- β) Όχι, δεν υπάρχουν δεδομένα
- γ) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 17**

Έχουν καταγραφεί στο παρελθόν περιστατικά ή ενδείξεις προβλημάτων υγείας που σχετίζονται με την έκθεση σε επεξεργασμένα λύματα στην περιοχή ευθύνης της εγκατάστασης (όπως παρασιτικές λοιμώξεις, γαστρεντερικά, επαφή εργατών/καλλιεργητών με επεξεργασμένα λύματα) ;

- α) Ναι – υπάρχουν τεκμηριωμένα κρούσματα από επίσημους φορείς
- β) Υπάρχουν ανεπίσημες αναφορές ή υπόνοιες χωρίς τεκμηρίωση
- γ) Όχι – δεν έχουν αναφερθεί σχετικά περιστατικά ή δεν υπάρχουν στοιχεία

δ) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 18**

Ποιες πρακτικές ή τεχνολογίες εφαρμόζονται στη μονάδα σας για τον περιορισμό ρυπαντών υψηλού κινδύνου ή αναδυόμενων ρυπαντών, οι οποίοι ενδέχεται να παραμένουν ακόμη και μετά την επεξεργασία των λυμάτων όπως μικροπλαστικά, μικρορρυπαντές, φαρμακευτικές ουσίες, παθογόνοι μικροοργανισμοί ή γονίδια ανθεκτικότητας σε αντιβιοτικά ;

α) Εφαρμόζονται τεχνολογίες προηγμένης επεξεργασίας όπως UV, οζονισμός, μεμβράνες για την απομάκρυνση αυτών των ρυπαντών

β) Διενεργούνται αναλύσεις για συγκεκριμένες ουσίες ή κατηγορίες

γ) Δεν υπάρχει δυνατότητα παρακολούθησης αυτών των ρυπαντών

δ) Δεν έχουν ακόμη ληφθεί ειδικά μέτρα για την αντιμετώπισή τους

ε) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 19**

Πώς διαχειρίζεστε τα επεξεργασμένα λύματα που παράγονται εκτός της καλλιεργητικής περιόδου, δεδομένου ότι η ζήτηση μειώνεται σημαντικά ;

α) Αποθηκεύονται προσωρινά σε δεξαμενές ή λιμνοδεξαμενές με επαρκή επεξεργασία

β) Διοχετεύονται σε φυσικούς αποδέκτες υπό ελεγχόμενες συνθήκες

γ) Χρησιμοποιούνται για άλλες χρήσεις όπως άρδευση πρασίνου ή βιομηχανική κ.τ.λ.

δ) Δεν υπάρχει σύστημα αποθήκευσης – δημιουργούνται προβλήματα υπερχειλίσης

ε) Άλλο (παρακαλώ διευκρινίστε) _____

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 20**

Έχετε παρατηρήσει μείωση στη χρήση χημικών λιπασμάτων ως αποτέλεσμα της εφαρμογής επεξεργασμένων λυμάτων στη γεωργία ;

- α) Πολύ
- β) Λίγο
- γ) Καθόλου
- δ) Δεν γνωρίζω

* Υπάρχουν διαθέσιμα σχετικά δεδομένα ; _____

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 21**

Έχουν παρατηρηθεί αλλαγές στην τοπική πανίδα που θα μπορούσαν να σχετίζονται με την επεξεργασία ή/και την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων ;

- α) Ναι – έχουν παρατηρηθεί αλλαγές και υπάρχουν ενδείξεις σύνδεσης με τη χρήση επεξεργασμένων λυμάτων
- β) Όχι – δεν έχουν παρατηρηθεί αλλαγές στην τοπική πανίδα
- γ) Δεν υπάρχει παρακολούθηση ή σχετική τεκμηρίωση
- δ) Δεν γνωρίζω
- ε) Άλλο (παρακαλώ διευκρινίστε): _____

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ Ερώτηση 22

Έχουν καταγραφεί περιστατικά ευτροφισμού σε υδάτινους αποδέκτες (όπως ποτάμια, λίμνες, λιμνοδεξαμενές) που ενδέχεται να σχετίζονται με τη χρήση ή τη διάθεση επεξεργασμένων λυμάτων ;

- α) Ναι – έχουν καταγραφεί περιστατικά ευτροφισμού που αποδίδονται σε εκροή επεξεργασμένων λυμάτων
- β) Ναι – έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα, αλλά δεν υπάρχει σαφής αιτιώδης σύνδεση
- γ) Όχι – δεν έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα ευτροφισμού
- δ) Δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία
- ε) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ Ερώτηση 23

Ποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις θεωρείτε ότι έχουν μειωθεί χάρη στην επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων της μονάδας ;

- α) Μείωση εκροής ρυπαντικών φορτίων σε φυσικούς αποδέκτες
- β) Περιορισμός της υπεράντλησης επιφανειακών/υπόγειων υδάτων
- γ) Ενίσχυση βιοποικιλότητας
- δ) Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με άλλες λύσεις
- ε) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

❖ **Ενέργεια**

➤ **Ερώτηση 24**

Ποιοι από τους παρακάτω παράγοντες λειτουργούν ως περιορισμοί για την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων στην περίπτωση σας ;

Επιτρέπεται η πολλαπλή επιλογή.

α) Το ενεργειακό κόστος

β) Η απόσταση μεταφοράς των επεξεργασμένων λυμάτων από την μονάδα προς τις αρδευόμενες περιοχές

γ) Ζητήματα αποδοχής από την τοπική κοινωνία και τους τελικούς χρήστες ή καχυποψία για την ασφάλεια του νερού

δ) Η έλλειψη υποδομών αποθήκευσης και διανομής

ε) Άλλο (παρακαλώ διευκρινίστε): _____

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 25**

Έχει αξιολογηθεί η επίδραση του βαθμού επεξεργασίας (δευτεροβάθμια, τριτοβάθμια) στην ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας σας μέσω μετρήσεων ανά στάδιο ;

α) Ναι – υπάρχει αναλυτική παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά στάδιο

β) Υπάρχει γενική εικόνα αλλά όχι αναλυτικά στοιχεία

γ) Όχι – δεν έχει πραγματοποιηθεί σχετική μελέτη για την ενεργειακή κατανάλωση

δ) Δεν γνωρίζω

ε) Άλλο (παρακαλώ διευκρινίστε): _____

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 26**

Έχει διαπιστωθεί μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ΣΤΟΝ ΑΓΡΟΤΗ όταν χρησιμοποιούνται επεξεργασμένα λύματα έναντι του φρέσκου (γλυκού) νερό ;

- α) Ναι – υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις που δείχνουν μείωση κατανάλωσης ενέργειας ανά m^3
- β) Ναι – εκτιμάται μείωση, αλλά δεν υπάρχουν αναλυτικές μετρήσεις
- γ) Όχι – δεν έχει παρατηρηθεί διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας
- δ) Δεν έχουν πραγματοποιηθεί σχετικές μετρήσεις ή αναλύσεις
- ε) Δεν γνωρίζω

*Υπάρχουν σχετικά στοιχεία ή μετρήσεις ανά κυβικό μέτρο νερού ;

Ποιος επωμίζεται το κόστος μεταφοράς ποιος πληρώνει ;

- α) ο αγρότης
- β) η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων
- γ) άλλος (παρακαλώ προσδιορίστε):

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 27**

Έχουν εφαρμοστεί στη μονάδα σας τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα (όπως παραγωγή βιοαερίου) με στόχο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης της εγκατάστασης ;

- α) Ναι
- β) Όχι
- γ) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 28**

Κατά τη γνώμη σας, συμβάλλει η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων στη βελτίωση ή εξισορρόπηση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής ;

- α) Ναι, σε σημαντικό βαθμό
- β) Ναι, αλλά περιορισμένα
- γ) Όχι, δεν έχει ουσιαστική επίδραση
- δ) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

➤ **Ερώτηση 29**

Έχουν εξεταστεί ή προταθεί λύσεις άρδευσης μέσω νερού από μονάδες αφαλάτωσης στην περιοχή ;

- α) Ναι, έχουν προταθεί και/ή αξιολογηθεί
- β) Έχουν συζητηθεί ανεπίσημα, αλλά όχι τεκμηριωμένα
- γ) Όχι, δεν έχει τεθεί ως επιλογή
- δ) Δεν γνωρίζω

Σχόλια / Παρατηρήσεις:

 **Παρακαλώ καταγράψτε τυχόν γενικά σχόλια, παρατηρήσεις ή εμπειρίες που θεωρείτε χρήσιμο να μοιραστείτε μαζί μας:**

- 1.
- 2.
- 3.

Σας ευχαριστούμε θερμά για τη συμμετοχή σας !

Οι απαντήσεις σας είναι πολύτιμες για την ολοκλήρωση της εργασίας!

ΑΡΧΕΙΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΥΠΕΥΘΥΝΟΥΣ ΕΕΛ



FILE-RESPONSES.xls