



**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕ ΘΕΜΑ :**

**Τεχνικοοικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση προκατασκευασμένων
συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων»**

**Όνομα: Σούρσος Νικόλαος Αποστόλης
Α.Μ. : 168130**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΜΑΝΑΡΙΩΤΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ

ΜΑΙΟΣ 2026

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2026

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου. Η εργασία με τίτλο: «Τεχνικοοικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων» αποτελεί πνευματικό έργο του φοιτητή Νικόλαου Σούρσου και εκπονήθηκε υπό την ακαδημαϊκή επίβλεψη του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου. Η παρούσα εργασία και τα αποτελέσματά της μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκπαιδευτικούς, ερευνητικούς και επιστημονικούς σκοπούς, υπό την προϋπόθεση της ορθής αναφοράς του τίτλου της εργασίας, του συγγραφέα και του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου στο οποίο εκπονήθηκε. Ο συγγραφέας διατηρεί την ευθύνη για το περιεχόμενο, τα συμπεράσματα και τις απόψεις που διατυπώνονται στην παρούσα εργασία.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Τεχνικοοικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων» εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Τεχνικών Έργων (ΔΧΤ)» της Σχολής Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2025–2026.

Η επεξεργασία και η ορθολογική διαχείριση των λυμάτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές προκλήσεις της σύγχρονης εποχής. Η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων για προστασία των υδατικών πόρων, η ανάγκη συμμόρφωσης με το ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο και η προώθηση των αρχών της βιώσιμης ανάπτυξης καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή αποδοτικών και ενεργειακά βιώσιμων λύσεων επεξεργασίας λυμάτων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποκεντρωμένα προκατασκευασμένα συστήματα, τα οποία μπορούν να προσφέρουν αξιόπιστες λύσεις σε μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις και απομακρυσμένες περιοχές όπου η εφαρμογή συμβατικών κεντρικών εγκαταστάσεων είναι συχνά τεχνικά ή οικονομικά δυσχερές.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί τη συγκριτική τεχνική, ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση σύγχρονων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων, με στόχο την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων, των περιορισμών και των πεδίων εφαρμογής κάθε συστήματος, συμβάλλοντας στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων έργων περιβαλλοντικών υποδομών.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Μαναριώτη για την καθοδήγηση, τις παρατηρήσεις και την πολύτιμη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον Β' αξιολογητή κ. Νικόλαο Φουρνιώτη για τον χρόνο και τη συμβολή του στην αξιολόγηση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους διδάσκοντες του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Τεχνικών Έργων» για τις γνώσεις και τις εμπειρίες που μου μετέδωσαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ειδικότερα ευχαριστώ τους κ.

Κωνσταντίνο Τσαγκαράκη (ΔΧΤ50), κ. Γεώργιο Χατζηγεωργίου (ΔΧΤ51), κ. Παναγιώτη Μαρχαβίλα (ΔΧΤ60), καθώς και τους κ. Αθανάσιο Χασιακό και κ. Σωτήριο Τσιβίλη (ΔΧΤ61), για τη συμβολή τους στην επιστημονική μου κατάρτιση και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών και της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χωρίς τη συμπαράστασή της η ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας θα ήταν πολύ πιο δύσκολη.

«Να φτάνεις εκεί που δεν μπορείς.»

Νίκος Καζαντζάκης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την τεχνικοοικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση προκατασκευασμένων (compact) και αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν σημαντική ανάπτυξη ως εναλλακτικές λύσεις έναντι των συμβατικών κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας.

Η αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση υγρών αποβλήτων, η προστασία των υδατικών πόρων, η επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού και οι περιορισμοί σε διαθέσιμο χώρο και ενεργειακούς πόρους καθιστούν τα προκατασκευασμένα συστήματα ιδιαίτερα σημαντικά για μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις, απομακρυσμένες περιοχές και αποκεντρωμένες εφαρμογές.

Η εργασία βασίζεται σε εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση σύγχρονων τεχνολογιών βιολογικής επεξεργασίας και υβριδικών προκατασκευασμένων συστημάτων, με έμφαση στη λειτουργική αποδοτικότητα, την ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, την απαιτούμενη έκταση εγκατάστασης και την ποιότητα της τελικής εκροής.

Παράλληλα, αξιολογούνται οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ενός συστήματος, όπως τα χαρακτηριστικά των λυμάτων, οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις, οι διαθέσιμοι οικονομικοί πόροι, η ευκολία λειτουργίας και η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης ή επαναχρησιμοποίησης του νερού. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του ισχύοντος ευρωπαϊκού και εθνικού νομοθετικού πλαισίου για την επεξεργασία, διάθεση και επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων

Από τη συγκριτική αξιολόγηση προκύπτει ότι δεν υπάρχει μια καθολικά βέλτιστη τεχνολογία για όλες τις εφαρμογές, αλλά η καταλληλότητα κάθε συστήματος εξαρτάται από τις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης και τους στόχους επεξεργασίας. Συστήματα υψηλής τεχνολογίας και αυξημένης αυτοματοποίησης εφαρμόζονται κυρίως σε ανεπτυγμένες χώρες με αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα, όπως χώρες της Ευρώπης και η Ιαπωνία, όπου δίνεται έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση νερού, στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος και στην υψηλή ποιότητα εκροής. Αντίθετα, σε αναπτυσσόμενες ή οικονομικά περιορισμένες περιοχές προτιμώνται απλούστερες και χαμηλού κόστους τεχνολογίες, με μικρές απαιτήσεις συντήρησης και λειτουργίας.

Παράλληλα, διαπιστώνεται ότι και στην Ελλάδα παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για προκατασκευασμένα αποκεντρωμένα συστήματα, κυρίως σε νησιωτικές και τουριστικές περιοχές όπου υπάρχουν περιορισμοί χώρου και αυξημένες εποχικές διακυμάνσεις φορτίου.

Συμπερασματικά, η εργασία αναδεικνύει ότι η ορθή επιλογή προκατασκευασμένων συστήματος επεξεργασίας λυμάτων απαιτεί συνδυαστική αξιολόγηση τεχνικών, ενεργειακών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ αποδοτικότητας, βιωσιμότητας και λειτουργικού κόστους.

Λέξεις-κλειδιά

- Επεξεργασία λυμάτων
- προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας
- Αποκεντρωμένα συστήματα
- Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση
- Ενεργειακή αξιολόγηση
- Βιολογική επεξεργασία λυμάτων
- Υβριδικά συστήματα επεξεργασίας
- Ενεργειακή αποδοτικότητα
- Βιωσιμότητα
- Επαναχρησιμοποίηση νερού
- Μεμβρανικές τεχνολογίες
- Απομάκρυνση θρεπτικών
- Διαχείριση υγρών αποβλήτων
- Περιβαλλοντική διαχείριση
- Compact wastewater treatment systems

Abstract

This postgraduate thesis examines the techno-economic and energy assessment of compact and decentralized wastewater treatment systems, which in recent years have emerged as important alternatives to conventional centralized wastewater treatment plants. The increasing need for sustainable wastewater management, protection of water resources, reuse of treated effluent, and limitations related to available space

and energy resources make compact systems particularly important for small communities, tourist facilities, remote areas, and decentralized applications.

The study is based on an extensive literature review of modern biological treatment technologies and hybrid compact wastewater treatment systems, focusing on operational efficiency, energy consumption, installation and maintenance costs, required land area, and effluent quality. In addition, the factors affecting the selection of an appropriate treatment system are evaluated, including wastewater characteristics, environmental requirements, available financial resources, operational simplicity, and the potential for future expansion or water reuse. The assessment is conducted taking into account the requirements of the current European and national legislative framework regarding wastewater treatment, disposal, and reuse.

The comparative evaluation indicates that there is no universally optimal technology for all applications, as the suitability of each system depends on the specific conditions of the installation area and the treatment objectives. Advanced and highly automated systems are mainly implemented in developed countries with strict environmental standards, such as European countries and Japan, where emphasis is placed on water reuse, reduction of the energy footprint, and high effluent quality. In contrast, developing or economically constrained regions tend to prefer simpler and lower-cost technologies with reduced operational and maintenance requirements. Furthermore, increasing interest in compact decentralized wastewater treatment systems is also observed in Greece, particularly in island and tourist areas where space limitations and seasonal load fluctuations are significant.

In conclusion, the study demonstrates that the proper selection of a compact wastewater treatment system requires a combined evaluation of technical, energy, economic, and environmental parameters in order to achieve the optimal balance between treatment efficiency, sustainability, and operational cost.

Keywords

- Wastewater treatment
- Compact treatment systems
- Decentralized systems
- Techno-economic assessment
- Energy assessment
- Biological wastewater treatment
- Hybrid treatment systems
- Energy efficiency
- Sustainability
- Water reuse
- Membrane technologies
- Nutrient removal
- Wastewater management
- Environmental management
- Compact wastewater treatment systems

Πίνακας Περιεχομένων

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Πίνακας Περιεχομένων.....	9
Κατάλογος Συντομογραφιών.....	14
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων.....	16
Κατάλογος Πινάκων.....	17
ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1.....	19
1.1 Σημασία της επεξεργασίας λυμάτων.....	19
1.1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	20
1.1.2 Η σημασία της επεξεργασίας λυμάτων για τη δημόσια υγεία.....	23
1.1.3 Προστασία υδατικών πόρων και περιβάλλοντος.....	24
1.1.4 Επαναχρησιμοποίηση νερού και βιώσιμη ανάπτυξη.....	25
1.2 Ανάγκη για αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων.....	27
1.2.1 Περιορισμοί των κεντρικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων	28
1.2.2 Ιδιαίτερες ανάγκες μικρών οικισμών, νησιωτικών και τουριστικών περιοχών.....	29
1.2.3 Η διεθνής τάση προς την αποκεντρωμένη διαχείριση λυμάτων.....	31

1.2.4 Ο ρόλος των προκατασκευασμένων συστημάτων και σύντομη παρουσίαση των τεχνολογιών.....	32
1.3 Στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας.....	34
1.4 Μεθοδολογία και βιβλιογραφική προσέγγιση.....	36
1.5 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	40
2.1 Νομοθετικό Πλαίσιο και Κανονισμοί.....	40
2.1.1 Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων.....	41
2.1.2 Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ.....	43
2.1.3 Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 για την επαναχρησιμοποίηση του νερού	44
2.1.4 Αναθεωρημένη Οδηγία για τα Αστικά Λύματα (Urban Wastewater Treatment Directive – 2024).....	46
2.2 Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση και επεξεργασία λυμάτων	48
2.2.1 ΚΥΑ 5673/400/1997 – Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων.....	49
2.2.2 Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 και οι επιπτώσεις στα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων.....	50
2.2.3 Νόμος 3199/2003 – Προστασία και διαχείριση των υδάτων.....	51
2.2.4 Προεδρικό Διάταγμα 51/2007 – Καθορισμός μέτρων και διαδικασιών για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων.....	52
2.2.5 ΚΥΑ 145116/2011 – Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.....	54

2.2.6 Κατευθυντήριες οδηγίες για μικρούς οικισμούς και αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων.....	55
2.3 Όρια εκροής και περιβαλλοντικές απαιτήσεις.....	58
2.3.1 Βασικές παράμετροι ελέγχου της ποιότητας εκροής.....	59
2.3.2 Νομοθετικά όρια εκροής σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ και την ΚΥΑ 5673/400/1997.....	60
2.3.3 Πρόσθετες απαιτήσεις για ευαίσθητες περιοχές.....	62
2.3.4 Απαιτήσεις για επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων..	64
2.3.5 Σύνδεση των νομοθετικών απαιτήσεων με τα αποκεντρωμένα προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	67
3. Βασικές έννοιες και κατηγοριοποίηση συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.....	67
3.1.1 Φυσικά χαρακτηριστικά.....	68
3.1.2 Χημικά χαρακτηριστικά.....	70
3.1.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά.....	72
3.2 Βασικές παράμετροι επεξεργασίας λυμάτων.....	74
3.2.1 Χαρακτηριστικά λυμάτων.....	74
3.2. Λειτουργικά χαρακτηριστικά.....	76
3.2.3 Ενεργειακή κατανάλωση και λειτουργική αποδοτικότητα.....	78
3.2.4 Στάδια επεξεργασίας λυμάτων.....	80
3.3 Κατηγοριοποίηση συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.....	81
3.3.1 Κεντρικά και αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων...	82

3.3.2 Συμβατικά και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων.....	85
3.3.3 Αερόβια και αναερόβια συστήματα επεξεργασίας λυμάτων.....	87
3.3.4 Συστήματα αιωρούμενης και προσκολλημένης βιομάζας (Suspended Growth and Attached Growth Systems).....	89
3.3.5 Βιολογικά, φυσικοχημικά και υβριδικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	95
4. Τεχνολογίες Αποκεντρωμένων Συστημάτων Επεξεργασίας Λυμάτων....	95
4.1 Βιολογικές διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων.....	96
4.1.1. Διεργασία ενεργού ιλύος.....	96
4.1.2 Διεργασίες βιοφίλμ.....	101
4.1.3 Αναερόβιες διεργασίες.....	106
4.1.4 Νιτροποίηση και απονιτροποίηση.....	107
4.2 Φυσικοχημικές διεργασίες.....	110
4.2.1 Κροκίδωση – Καθίζηση.....	111
4.2.2 Διήθηση και απολύμανση.....	114
4.2.3 Προσρόφηση και προηγμένες διεργασίες.....	117
4.3 Συστήματα μικροφυκών.....	120
4.3.1 Αρχές λειτουργίας.....	121
4.3.2 Απομάκρυνση θρεπτικών και παραγωγή βιομάζας.....	124
4.3.3 Περιβαλλοντικά οφέλη και περιορισμοί.....	126

4.4 Υβριδικές τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων.....	128
4.4.1 Συνδυασμός βιολογικών και μεμβρανικών διεργασιών.....	129
4.4.2 Συνδυασμός αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών.....	131
4.4.3 προκατασκευασμένα και αρθρωτά υβριδικά συστήματα.....	133
Κεφαλαίο 5.....	136
5.1 Ατομικά προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων.....	136
5.1.1 Αντιδραστήρας Διαλείπουσας Λειτουργίας, Σύστημα SBR.....	137
5.1.2 — Βιοαντιδραστήρας Κινούμενης Κλίνης Βιοφίλμ MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor).....	141
5.1.3 Αντιδραστήρας με μεμβράνες (MBR).....	145
5.1.4 Οξειδωτική τάφος (OD).....	148
5.1.5 Αντιδραστήρες σταθερής κλίνης (FBBR).....	151
5.1.6 SAF Βυθισμένο Αεριζόμενο Φίλτρο (SAF).....	154
5.1.7 Περιστρεφόμενοι Βιολογικοί Δίσκοι (RBC).....	158
5.1.8 Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Χωρίσματα (ABR).....	161
5.1.9 Μεμβρανικός Αεριζόμενος Βιοαντιδραστήρας Βιοφίλμ MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor).....	164
5.1.10 Βυθισμένος Αερόβιος Αντιδραστήρας Σταθερού Βιοφίλμ SAFF..	167
5.2 Υβριδικά προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων...	170
5.2.1 Συνδυασμένο Σύστημα Ενεργού Ιλύος και Βιοφίλμ (IFAS) – Integrated Fixed-Film Activated Sludge.....	171
5.2.2 Αναερόβιος Μεμβρανικός Βιοαντιδραστήρας AnMBR Anaerobic Membrane Bioreactor.....	175

5.2.3 Υβριδικά Συστήματα SBR–MBR (Sequencing Batch Reactor – Membrane Bioreactor).....	179
5.2.4 Υβριδικά Συστήματα που Συνδυάζουν ABR με Άλλες Βιολογικές Διεργασίες.....	183
5.2.5 Αεριζόμενος Κατασκευασμένος Υγρότοπος Κάθετης Ροής (AVFSW) Aerated Vertical Flow Constructed Wetland.....	186
5.2.6 Υβριδικά Συστήματα Βασισμένα σε Τεχνολογία Μεμβρανικού Αεριζόμενου Βιοαντιδραστήρα Βιοφίλμ MABR (MABR-Based Hybrid Systems).....	189
5.2.7 Μεμβρανικός Βιοαντιδραστήρας Αναερόβιας–Ανοξικής–Αερόβιας Διεργασίας A2O-MBR (Anaerobic–Anoxic–Oxic Membrane Bioreactor)	192
5.2.8 Σύστημα Μηδενικής Απόρριψης Υγρών Αποβλήτων (ZLD) Zero Liquid Discharge (ZLD).....	196
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	201
6.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	201
6.1.1 Κριτήρια τεχνικής αξιολόγησης.....	202
6.1.2 Συγκριτική απόδοση απομάκρυνσης ρύπων.....	204
6.1.3 Απαιτήσεις χώρου και δυναμικότητα εφαρμογής.....	208
6.1.4 Λειτουργική σταθερότητα και αντοχή σε μεταβολές φορτίου.....	212
6.1.5 Συνολική τεχνική αξιολόγηση.....	215
6.2 Συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση.....	220
6.2.1 Κριτήρια ενεργειακής αξιολόγησης.....	220

6.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση ενεργειακών απαιτήσεων των εξεταζόμενων συστημάτων.....	221
6.2.3 Συνολική ενεργειακή αξιολόγηση.....	225
6.3 Συγκριτική οικονομική αξιολόγηση.....	228
6.3.1 Κριτήρια οικονομικής αξιολόγησης.....	229
6.3.2 Συγκριτική αξιολόγηση κόστους επένδυσης (CAPEX).....	231
6.3.3 Συγκριτική αξιολόγηση λειτουργικού κόστους (OPEX).....	234
6.3.4 Συνολική οικονομική αξιολόγηση.....	237
6.4 Σύγκριση απαιτήσεων συντήρησης και λειτουργίας.....	240
6.4.1 Κριτήρια αξιολόγησης απαιτήσεων συντήρησης και λειτουργίας.....	241
6.4.2 Συγκριτική αξιολόγηση απαιτήσεων συντήρησης.....	243
6.4.3 Συγκριτική αξιολόγηση λειτουργικών απαιτήσεων.....	246
6.4.4 Συνολική αξιολόγηση συντήρησης και λειτουργίας.....	249
6.5 Καταλληλότητα συστημάτων ανά εφαρμογή.....	252
6.5.1 Μικροί οικισμοί και αγροτικές περιοχές.....	253
6.5.2 Τουριστικές μονάδες και ξενοδοχεία.....	254
6.5.3 Απομακρυσμένες και αναπτυσσόμενες περιοχές.....	256
6.5.4 Εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης εκροής.....	257
6.5.5 Περιοχές με περιορισμένη διαθέσιμη έκταση.....	259
6.5.6 Συνολική αξιολόγηση καταλληλότητας εφαρμογών.....	261
6.6 Διεθνείς τάσεις και εφαρμογές αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.....	263

6.6.1 Ευρώπη.....	263
6.6.2 Ελλάδα.....	265
6.6.3 Ιαπωνία και Ασία.....	267
6.6.4 Αναπτυσσόμενες χώρες.....	268
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	271
7.1 Συμπεράσματα.....	271
7.2 Τεχνική και ενεργειακή αποτίμηση.....	273
7.3 Επιλογή κατάλληλου συστήματος ανά εφαρμογή.....	274
7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	276
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	278

Κατάλογος Συντομογραφιών

- A2O: *Anaerobic–Anoxic–Oxic* — Αναερόβια–Ανοξική–Αερόβια Διεργασία
- A2O-MBR: *Anaerobic–Anoxic–Oxic Membrane Bioreactor* — Μembranικός Βιοαντιδραστήρας Αναερόβιας–Ανοξικής–Αερόβιας Διεργασίας
- ABR: *Anaerobic Baffled Reactor* — Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Διαφράγματα
- AnMBR: *Anaerobic Membrane Bioreactor* — Αναερόβιος Μembranικός Βιοαντιδραστήρας
- AVFCW: *Aerated Vertical Flow Constructed Wetland* — Αεριζόμενος Κατασκευασμένος Υγρότοπος Κάθετης Ροής
- BOD: *Biochemical Oxygen Demand* — Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο
- BNR: *Biological Nutrient Removal* — Βιολογική Απομάκρυνση Θρεπτικών
- COD: *Chemical Oxygen Demand* — Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο
- CW: *Constructed Wetland* — Κατασκευασμένος Υγρότοπος
- DO: *Dissolved Oxygen* — Διαλυμένο Οξυγόνο
- EPS: *Extracellular Polymeric Substances* — Εξωκυτταρικές Πολυμερικές Ουσίες
- FBBR: *Fluidized Bed Biofilm Reactor* — Βιοαντιδραστήρας Ρευστοποιημένης Κλίνης Βιοφίλμ
- HFCW: *Horizontal Flow Constructed Wetland* — Κατασκευασμένος Υγρότοπος Οριζόντιας Ροής
- HLR: *Hydraulic Loading Rate* — Υδραυλικός Ρυθμός Φόρτισης
- HRT: *Hydraulic Retention Time* — Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής
- IFAS: *Integrated Fixed-Film Activated Sludge* — Συνδυασμένο Σύστημα Ενεργού Ιλύος και Βιοφίλμ
- MABR: *Membrane Aerated Biofilm Reactor* — Μembranικός Αεριζόμενος Βιοαντιδραστήρας Βιοφίλμ
- MBBR: *Moving Bed Biofilm Reactor* — Βιοαντιδραστήρας Κινούμενης Κλίνης Βιοφίλμ
- MBR: *Membrane Bioreactor* — Μembranικός Βιοαντιδραστήρας

- MLSS: *Mixed Liquor Suspended Solids* — Αιωρούμενα Στερεά Μικτού Υγρού
- OD: *Oxidation Ditch* — Τάφος Οξείδωσης
- OLR: *Organic Loading Rate* — Οργανικός Ρυθμός Φόρτισης
- PAOs: *Polyphosphate Accumulating Organisms* — Μικροοργανισμοί Συσσώρευσης Πολυφωσφορικών
- PABR: *Passive Aeration Biofilm Reactor* — Βιοαντιδραστήρας Βιοφίλμ Παθητικού Αερισμού
- RBC: *Rotating Biological Contactor* — Περιστρεφόμενος Βιολογικός Επαφίας
- SAF: *Submerged Aerated Filter* — Βυθισμένο Αεριζόμενο Φίλτρο
- SAFF: *Submerged Aerated Fixed Film* — Βυθισμένο Αεριζόμενο Σύστημα Σταθερού Βιοφίλμ
- SBR: *Sequencing Batch Reactor* — Αντιδραστήρας Διαλείπουσας Λειτουργίας
- SMP: *Soluble Microbial Products* — Διαλυτά Μικροβιακά Προϊόντα
- SRT: *Solids Retention Time* — Χρόνος Παραμονής Στερεών
- SS: *Suspended Solids* — Αιωρούμενα Στερεά
- TN: *Total Nitrogen* — Ολικό Άζωτο
- TP: *Total Phosphorus* — Ολικός Φώσφορος
- TSS: *Total Suspended Solids* — Ολικά Αιωρούμενα Στερεά
- VFCW: *Vertical Flow Constructed Wetland* — Κατασκευασμένος Υγρότοπος Κάθετης Ροής

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 Βασική διάταξη συστήματος ενεργού ιλύος , (Bing Images, 2026).....	99
Εικόνα 2 Σχηματική απεικόνιση της ανάπτυξης βιοφίλμ πάνω σε στερεό υπόστρωμα και των ζωνών μεταφοράς οξυγόνου και υποστρώματος (Nihao Water, 2025).....	104
Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων πήξης, κροκίδωσης και καθίζησης κατά την επεξεργασία λυμάτων (Bing Images, 2026).....	115
Εικόνα 4 Σχηματική απεικόνιση της συνεργασίας μικροφυκών και βακτηρίων κατά την επεξεργασία λυμάτων και την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών (MDPI, 2022).....	125
Εικόνα 5 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) , Netsol Water (2024).....	145
Εικόνα 6 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MBR (Membrane Bioreactor), (Hitachi Aqua-Tech, 2026).....	149
Εικόνα 7 Σχηματική απεικόνιση συστήματος FBBR (Fixed-Bed Biofilm Reactor) (Netsol Water, 2024).....	155
Εικόνα 8 Σχηματική απεικόνιση συστήματος SAF (Submerged Aerated Filter).....	158
Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση συστήματος RBC (Rotating Biological Contactor), SlideServe (n.d.).....	161
Εικόνα 10 Σχηματική απεικόνιση συστήματος ABR (Anaerobic Baffled Reactor)... (Akvopedia, 2026).....	164
Εικόνα 11 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor, SUEZ Water Technologies & Solutions (2026).....	168
Εικόνα 12 Σχηματική απεικόνιση συστήματος IFAS (Integrated Fixed-Film Activated Sludge), iGreen Ion (2026).....	175
Εικόνα 13 Σχηματική διάταξη αποκεντρωμένου υβριδικού συστήματος SBR–MBR για επεξεργασία λυμάτων. Πηγή: Journal of Membrane Science (2013).....	184
Εικόνα 14 Σχηματική απεικόνιση υβριδικού συστήματος επεξεργασίας λυμάτων τύπου ABR–MBBR. Πηγή: Chemical Engineering Journal (2015). Να μπει σωστά η πηγή....	187
Εικόνα 15. Σχηματική απεικόνιση συστήματος Aerated Vertical Flow Constructed Wetland (AVFCW). Πηγή: Wu et al. (2016).....	190
Εικόνα 16 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MABR–IFAS (Membrane Aerated Biofilm Reactor – Integrated Fixed-film Activated Sludge).....	193
Εικόνα 17 Σχηματική απεικόνιση συστήματος A2O–MBR (Anaerobic–Anoxic–Oxic Membrane Bioreactor), Πηγή: Nikkan Technologies (2026).....	197
Εικόνα 18 Σχηματική απεικόνιση συστήματος Zero Liquid Discharge (ZLD), Netsol Water (2024). https://www.netsolwater.com/zero-liquid-discharge-an-absolute-necessity.php?blog=3565	

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Βασικές παράμετροι αξιολόγησης της ποιότητας των αστικών λυμάτων.....	62
Πίνακας 2 Απαιτούμενα όρια εκροής σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για κανονικούς και ευαίσθητους αποδέκτες.....	64
Πίνακας 3 Βασικά φυσικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων.....	72
Πίνακας 4 Βασικά χημικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων.....	74
Πίνακας 5 Βασικοί μικροοργανισμοί που απαντώνται στα αστικά λύματα.....	75
Πίνακας 6 Βασικές παράμετροι αξιολόγησης λυμάτων.....	78
Πίνακας 7 Βασικές λειτουργικές παράμετροι επεξεργασίας λυμάτων.....	80
Πίνακας 8 Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργική αποδοτικότητα.....	82
Πίνακας 9 Σύγκριση κεντρικών και αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.....	86
Πίνακας 10 Σύγκριση συμβατικών και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.....	88
Πίνακας 11 Σύγκριση αερόβιων και αναερόβιων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων...	91
Πίνακας 12 Σύγκριση συστημάτων αιωρούμενης και προσκολλημένης βιομάζας.....	93
Πίνακας 13 Κατηγορίες συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων βάσει των διεργασιών που χρησιμοποιούνται.....	95
Πίνακας 14 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διεργασίας ενεργού ιλύος.....	101
Πίνακας 15 Βασικά χαρακτηριστικά διεργασιών βιοφίλμ.....	105
Πίνακας 16 Ταξινόμηση των εξεταζόμενων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων με βάση τη βιολογική διεργασία και τον τρόπο λειτουργίας τους.....	140
Πίνακας 17 Κατηγοριοποίηση των εξεταζόμενων υβριδικών προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων με βάση τον συνδυασμό των επιμέρους τεχνολογιών.....	174
Πίνακας 18 Συγκριτική τεχνική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων ως προς την απομάκρυνση BOD ₅ , COD, TSS, ολικού αζώτου (TN) και ολικού φωσφόρου (TP).....	210

Πίνακας 19 Συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων ως προς τις απαιτήσεις εγκατάστασης και την καταλληλότητά τους για εφαρμογές περιορισμένου διαθέσιμου χώρου.....	214
Πίνακας 20 Συγκριτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των προκατασκευασμένων και υβριδικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων σε υδραυλικές και οργανικές διακυμάνσεις.....	217
Πίνακας 21 Συνολική τεχνική κατάταξη των εξεταζόμενων τεχνολογιών με βάση την απόδοση επεξεργασίας, τις απαιτήσεις χώρου και τη λειτουργική σταθερότητα.....	221
Πίνακας 22 Συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση των εξεταζόμενων τεχνολογιών με βάση τις απαιτήσεις αερισμού, τον βοηθητικό εξοπλισμό και τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση.....	226
Πίνακας 23 Συνολική ενεργειακή αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων.....	229
Πίνακας 24 Συγκριτική κατάταξη των εξεταζόμενων τεχνολογιών ως προς το απαιτούμενο κόστος αρχικής επένδυσης (CAPEX).....	235
Πίνακας 25 Συγκριτική αξιολόγηση λειτουργικού κόστους (OPEX).....	237
Πίνακας 26 Συνολική οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων.....	240
Πίνακας 27 Συγκριτική αξιολόγηση απαιτήσεων συντήρησης.....	246
Πίνακας 28 Συγκριτική αξιολόγηση λειτουργικών απαιτήσεων.....	249
Πίνακας 29 Συνολική αξιολόγηση συντήρησης και λειτουργίας.....	251
Πίνακας 30 Συνολική αξιολόγηση καταλληλότητας τεχνολογιών ανά εφαρμογή.....	261
Πίνακας 31 Συνολική αξιολόγηση καταλληλότητας τεχνολογιών ανά εφαρμογή.....	262
Πίνακας 32 Ερμηνεία της κλίμακας βαθμολόγησης καταλληλότητας.....	262

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 Σημασία της επεξεργασίας λυμάτων

Η επεξεργασία λυμάτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές υποδομές των σύγχρονων κοινωνιών, καθώς συμβάλλει ουσιαστικά στην προστασία της δημόσιας υγείας, στη διατήρηση της ποιότητας των υδατικών πόρων και στη βιώσιμη διαχείριση του φυσικού περιβάλλοντος. Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού, η αστικοποίηση, η βιομηχανική ανάπτυξη και η εντατικοποίηση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων οδηγούν στην παραγωγή ολοένα μεγαλύτερων ποσοτήτων υγρών αποβλήτων, τα οποία απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία πριν από τη διάθεσή τους στο περιβάλλον. Η ανεξέλεγκτη απόρριψη ανεπεξέργαστων λυμάτων μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ρύπανση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, εξάπλωση παθογόνων μικροοργανισμών, υποβάθμιση των οικοσυστημάτων και σημαντικούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία (Metcalf & Eddy, 2014).

Η ανάπτυξη οργανωμένων συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για τη βελτίωση των συνθηκών υγιεινής και της ποιότητας ζωής στις αστικές περιοχές. Σήμερα, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων δεν περιορίζονται μόνο στην απομάκρυνση οργανικών και μικροβιολογικών ρύπων, αλλά συμβάλλουν επίσης στη μείωση των φορτίων αζώτου και φωσφόρου που ευθύνονται για φαινόμενα ευτροφισμού, καθώς και στην προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων από μακροχρόνιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Tchobanoglous et al., 2004).

Παράλληλα, η σύγχρονη αντίληψη για τη διαχείριση των λυμάτων συνδέεται άμεσα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης. Τα λύματα δεν θεωρούνται πλέον αποκλειστικά απόβλητο προς διάθεση, αλλά δυναμική πηγή πολύτιμων πόρων, όπως το νερό, η ενέργεια και τα θρεπτικά συστατικά. Μέσω κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού για άρδευση, αστικές χρήσεις ή εμπλουτισμό υδροφορέων, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση υδατικών πόρων και στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων της λειψυδρίας και της κλιματικής αλλαγής (UNESCO, 2020).

Επιπλέον, η ανάγκη παροχής αποτελεσματικών λύσεων επεξεργασίας σε μικρούς οικισμούς, απομακρυσμένες περιοχές, τουριστικές εγκαταστάσεις και μεμονωμένες κατοικίες έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν τη δυνατότητα τοπικής επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων με μικρότερες απαιτήσεις σε υποδομές, χαμηλότερο κόστος και αυξημένη περιβαλλοντική βιωσιμότητα, αποτελώντας μία σημαντική εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας.

Η σημασία της επεξεργασίας λυμάτων αναγνωρίζεται πλέον διεθνώς ως βασική προϋπόθεση για την προστασία της δημόσιας υγείας, τη διατήρηση της ποιότητας των φυσικών πόρων και την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης. Για τον λόγο αυτό, η εξέλιξη των τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων συνεχίζεται διαρκώς, με στόχο την επίτευξη υψηλότερης αποδοτικότητας, χαμηλότερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος και μεγαλύτερης δυνατότητας ανάκτησης πόρων.

1.1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η διαχείριση και επεξεργασία των λυμάτων αποτελεί μία από τις αρχαιότερες τεχνολογικές δραστηριότητες που συνδέονται άμεσα με τη δημόσια υγεία, την προστασία του περιβάλλοντος και την ανάπτυξη των ανθρώπινων κοινωνιών. Η ανάγκη απομάκρυνσης των υγρών αποβλήτων εμφανίστηκε ήδη από τις πρώτες οργανωμένες αστικές εγκαταστάσεις, καθώς η συγκέντρωση πληθυσμού σε μόνιμους οικισμούς δημιούργησε προβλήματα υγιεινής και μόλυνσης των υδάτινων πόρων (Angelakis et al., 2005; Lofrano & Brown, 2010).

Οι πρώτες καταγεγραμμένες πρακτικές διαχείρισης λυμάτων εντοπίζονται στους αρχαίους πολιτισμούς της Μεσοποταμίας και της Κουιάδας του Ινδού, όπου έχουν βρεθεί στοιχεία οργανωμένων αποχετευτικών συστημάτων ήδη από την τρίτη χιλιετία π.Χ. Στην πόλη Mohenjo-Daro, για παράδειγμα, υπήρχαν κλειστά δίκτυα αποχέτευσης και συστήματα απομάκρυνσης οικιακών αποβλήτων, γεγονός που αποδεικνύει την προηγμένη αντίληψη των κοινωνιών αυτών σχετικά με την υγιεινή και την προστασία της δημόσιας υγείας (Jansen, 1989; De Feo et al., 2014).

Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε η συμβολή των αρχαίων ελληνικών πολιτισμών. Στη Μινωική Κρήτη (περίπου 3000–1100 π.Χ.) αναπτύχθηκαν ολοκληρωμένα συστήματα ύδρευσης, αποχέτευσης και αποστράγγισης, τα οποία θεωρούνται από τα πλέον προηγμένα της αρχαιότητας. Τα ανάκτορα της Κνωσού διέθεταν αγωγούς αποχέτευσης, συστήματα συλλογής όμβριων υδάτων και εγκαταστάσεις απομάκρυνσης λυμάτων, αποδεικνύοντας ότι οι Μινωίτες είχαν αντιληφθεί τη σημασία της καθαριότητας και της διαχείρισης των αποβλήτων για την εύρυθμη λειτουργία των οικισμών τους (Angelakis et al., 2005; Angelakis, Kanoulaki & Dialynas, 2014). Αντίστοιχες πρακτικές συναντώνται και σε άλλες πόλεις της αρχαίας Ελλάδας, όπου η προστασία των πηγών πόσιμου νερού αποτελούσε βασική προτεραιότητα.

Η τεχνογνωσία αυτή εξελίχθηκε περαιτέρω κατά τη ρωμαϊκή περίοδο. Οι Ρωμαίοι κατασκεύαζαν εκτεταμένα υδραυλικά έργα, υδραγωγεία και αποχετευτικά δίκτυα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την Cloaca Maxima στη Ρώμη, η οποία θεωρείται ένα από τα πρώτα μεγάλης κλίμακας συστήματα αποχέτευσης στην ιστορία. Τα έργα αυτά επέτρεψαν τη μεταφορά και απομάκρυνση λυμάτων από τις αστικές περιοχές, συμβάλλοντας σημαντικά στη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης και στη μείωση των κινδύνων για τη δημόσια υγεία (De Feo et al., 2014; Lofrano & Brown, 2010).

Κατά τον Μεσαίωνα, η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της υγιεινής παρουσίασε σημαντική επιβράδυνση. Η έλλειψη οργανωμένων συστημάτων αποχέτευσης στις ευρωπαϊκές πόλεις οδήγησε στη συσσώρευση αποβλήτων στους δρόμους και στα επιφανειακά νερά, με αποτέλεσμα την εκδήλωση σοβαρών επιδημιών, όπως η πανώλη και ο τύφος. Η κατάσταση αυτή ανέδειξε τη στενή σχέση μεταξύ της διαχείρισης λυμάτων και της δημόσιας υγείας, αν και η επιστημονική κατανόηση των μηχανισμών μετάδοσης ασθενειών παρέμεινε περιορισμένη για αρκετούς αιώνες (Brown, 2005; Vuorinen et al., 2007).

Η Βιομηχανική Επανάσταση και η ταχεία αστικοποίηση του 18ου και 19ου αιώνα δημιούργησαν νέες προκλήσεις. Η συγκέντρωση μεγάλων πληθυσμών σε πόλεις χωρίς επαρκείς υποδομές αποχέτευσης προκάλεσε σοβαρή υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων και επαναλαμβανόμενες επιδημίες χολέρας. Οι επιδημίες αυτές αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη των σύγχρονων αποχετευτικών δικτύων και των πρώτων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Στα μέσα του 19ου αιώνα

κατασκευάστηκαν τα πρώτα μεγάλης κλίμακας αποχετευτικά έργα σε πόλεις όπως το Λονδίνο και το Παρίσι, ενώ παράλληλα αναπτύχθηκαν οι πρώτες μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων (Burian et al., 2000; Brown, 2005).

Ο σημαντικότερος ίσως σταθμός στην εξέλιξη της επεξεργασίας λυμάτων ήταν η ανάπτυξη της διεργασίας της ενεργού ιλύος (Activated Sludge Process) από τους Arden και Lockett το 1914. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε στην αξιοποίηση μικροοργανισμών για τη βιολογική αποδόμηση των οργανικών ρύπων και αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκε η σύγχρονη βιολογική επεξεργασία λυμάτων. Από τότε έως σήμερα, η ενεργός ιλύς παραμένει μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες παγκοσμίως, ενώ αποτέλεσε το θεμέλιο για την ανάπτυξη πολλών νεότερων τεχνολογιών (Arden & Lockett, 1914; Metcalf & Eddy, 2014).

Κατά τον 20ό αιώνα, η αύξηση των περιβαλλοντικών απαιτήσεων και η ανάγκη προστασίας των υδατικών οικοσυστημάτων οδήγησαν στην ανάπτυξη πιο εξελιγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας. Συστήματα όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), οι αντιδραστήρες βιοφίλμ (MBBR, IFAS, MABR), οι τεχνητοί υγρότοποι και τα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας σχεδιάστηκαν ώστε να επιτυγχάνουν υψηλότερη απομάκρυνση οργανικών και θρεπτικών ρύπων, μικρότερο αποτύπωμα εγκατάστασης και μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα (Lazarova & Manem, 2000; Tchobanoglous et al., 2004).

Παράλληλα, η έννοια της επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού απέκτησε ιδιαίτερη σημασία, ιδίως σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους. Η σύγχρονη προσέγγιση της διαχείρισης λυμάτων δεν περιορίζεται πλέον μόνο στην προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος, αλλά επεκτείνεται στην ανάκτηση νερού, ενέργειας και πολύτιμων πόρων, ενσωματώνοντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης (Angelakis & Snyder, 2015; Angelakis et al., 2018).

Σήμερα, η επεξεργασία λυμάτων αποτελεί βασικό στοιχείο της περιβαλλοντικής πολιτικής διεθνώς. Οι σύγχρονες τεχνολογίες επιδιώκουν όχι μόνο την αποτελεσματική απομάκρυνση των ρύπων, αλλά και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, την ανάκτηση πόρων και την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του νερού. Η ιστορική εξέλιξη των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων αποδεικνύει ότι η διαχείριση των υγρών αποβλήτων

υπήρξε διαχρονικά στενά συνδεδεμένη με την υγεία, την ευημερία και τη βιωσιμότητα των ανθρώπινων κοινωνιών.

1.1.2 Η σημασία της επεξεργασίας λυμάτων για τη δημόσια υγεία

Η επεξεργασία των λυμάτων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους μηχανισμούς προστασίας της δημόσιας υγείας, καθώς συμβάλλει στην απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών και επικίνδυνων ρύπων πριν από την απόρριψη των υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον. Τα αστικά λύματα περιέχουν μεγάλο αριθμό μικροβιολογικών και χημικών ρυπαντών, οι οποίοι προέρχονται από οικιακές, εμπορικές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Αν τα λύματα διατεθούν ανεπεξέργαστα σε φυσικούς αποδέκτες, μπορούν να αποτελέσουν σημαντική πηγή μετάδοσης ασθενειών και να προκαλέσουν σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (WHO, 2017; Metcalf & Eddy, 2014).

Η στενή σχέση μεταξύ λυμάτων και δημόσιας υγείας έχει αναγνωριστεί ήδη από τον 19ο αιώνα, όταν επιδημίες χολέρας, τύφου και δυσεντερίας συνδέθηκαν με τη ρύπανση των πηγών πόσιμου νερού από ανθρώπινα απόβλητα. Η ανάπτυξη οργανωμένων αποχετευτικών δικτύων και εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα για τη μείωση της εξάπλωσης υδατογενών ασθενειών και τη βελτίωση των συνθηκών υγιεινής στις αστικές περιοχές (WHO, 2018).

Τα αστικά λύματα περιέχουν πλήθος παθογόνων μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, ιούς, πρωτόζωα και παράσιτα. Μεταξύ των σημαντικότερων βακτηρίων που ανιχνεύονται στα λύματα περιλαμβάνονται τα *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp. και *Vibrio cholerae*, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές γαστρεντερικές λοιμώξεις. Παράλληλα, στα λύματα συναντώνται ιοί όπως οι νοροϊοί, οι εντεροϊοί, οι αδενοϊοί και οι ιοί της ηπατίτιδας Α και Ε, οι οποίοι είναι δυνατόν να μεταδοθούν μέσω μολυσμένου νερού ή τροφίμων. Επιπλέον, πρωτόζωα όπως τα *Giardia* spp. και *Cryptosporidium* spp., καθώς και διάφορα παρασιτικά σκουλήκια, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες κινδύνου για τη δημόσια υγεία, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η επεξεργασία των λυμάτων είναι ανεπαρκής (Pepper et al., 2015; Gerardi, 2006).

Η λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων στοχεύει στη σημαντική μείωση ή και πλήρη απομάκρυνση των παραπάνω παθογόνων οργανισμών. Μέσω φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του

οργανικού φορτίου, των αιωρούμενων στερεών και μεγάλου μέρους των μικροοργανισμών. Στα τελικά στάδια επεξεργασίας εφαρμόζονται συνήθως διαδικασίες απολύμανσης, όπως η χλωρίωση, η υπεριώδης ακτινοβολία (UV) ή η χρήση όζοντος, οι οποίες εξασφαλίζουν περαιτέρω μείωση των παθογόνων και συμβάλλουν στην ασφαλή διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού (Tchobanoglous et al., 2004; Metcalf & Eddy, 2014).

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί, η προστασία της δημόσιας υγείας μέσω της επεξεργασίας λυμάτων εξακολουθεί να αντιμετωπίζει νέες προκλήσεις. Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η ταχεία αστικοποίηση, η εμφάνιση ανθεκτικών στα αντιβιοτικά μικροοργανισμών και η παρουσία νέων αναδυόμενων ρύπων, όπως τα φαρμακευτικά κατάλοιπα και οι μικρορύποι, δημιουργούν αυξημένες απαιτήσεις για πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες επεξεργασίας. Παράλληλα, η κλιματική αλλαγή και τα ακραία καιρικά φαινόμενα μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία των αποχετευτικών δικτύων και των εγκαταστάσεων επεξεργασίας, αυξάνοντας τον κίνδυνο ανεξέλεγκτης διάθεσης λυμάτων στο περιβάλλον (WHO, 2017).

Συνεπώς, η επεξεργασία λυμάτων δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντική αναγκαιότητα αλλά και βασικό μέτρο προστασίας της δημόσιας υγείας. Η αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων επεξεργασίας συμβάλλει στην πρόληψη της εξάπλωσης ασθενειών, στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και στη διασφάλιση ασφαλών συνθηκών διαβίωσης για τον πληθυσμό.

1.1.3 Προστασία υδατικών πόρων και περιβάλλοντος

Οι υδατικοί πόροι αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους για την επιβίωση του ανθρώπου, την οικονομική ανάπτυξη και τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας. Τα επιφανειακά νερά, όπως ποτάμια, λίμνες και παράκτιες περιοχές, καθώς και τα υπόγεια υδάτινα αποθέματα, χρησιμοποιούνται για ύδρευση, άρδευση, βιομηχανικές δραστηριότητες και αναψυχή. Η προστασία τους από τη ρύπανση αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διασφάλιση της ποιότητας του νερού και τη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων (UNESCO, 2020).

Η ανεξέλεγκτη διάθεση ανεπεξέργαστων ή ανεπαρκώς επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να προκαλέσει σημαντική υποβάθμιση των υδάτινων αποδεκτών. Τα λύματα

περιέχουν οργανικές ουσίες, θρεπτικά στοιχεία, παθογόνους μικροοργανισμούς και διάφορους χημικούς ρύπους, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Η συσσώρευση αυτών των ρύπων οδηγεί σε αλλοίωση των φυσικών χαρακτηριστικών των υδάτινων οικοσυστημάτων και περιορίζει τη δυνατότητα αξιοποίησης των υδατικών πόρων για ανθρώπινες και περιβαλλοντικές χρήσεις (Metcalf & Eddy, 2014).

Μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές συνέπειες της απόρριψης λυμάτων είναι ο ευτροφισμός, δηλαδή ο υπερβολικός εμπλουτισμός των υδάτων με θρεπτικά στοιχεία, κυρίως άζωτο και φώσφορο. Το φαινόμενο αυτό ευνοεί την υπερβολική ανάπτυξη φυκών και άλλων υδρόβιων οργανισμών, γεγονός που μπορεί να διαταράξει τη φυσική ισορροπία των οικοσυστημάτων. Η εμφάνιση έντονων ανθίσεων φυκών συνδέεται συχνά με υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, δυσάρεστες οσμές και αρνητικές επιπτώσεις στην υδρόβια ζωή (UNEP, 2016).

Παράλληλα, η ρύπανση των υδάτινων σωμάτων επηρεάζει τη βιοποικιλότητα και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων. Η υποβάθμιση των φυσικών ενδιαιτημάτων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των πληθυσμών υδρόβιων οργανισμών και σε διαταραχή των τροφικών αλυσίδων. Επιπλέον, η διείσδυση ρύπων στους υπόγειους υδροφορείς αποτελεί ιδιαίτερα σοβαρό πρόβλημα, καθώς τα υπόγεια νερά αποτελούν σημαντική πηγή πόσιμου νερού σε πολλές περιοχές του κόσμου (WWAP, 2020).

Η επεξεργασία των λυμάτων συμβάλλει ουσιαστικά στην προστασία των υδατικών πόρων και στη διατήρηση της περιβαλλοντικής ποιότητας. Μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας μειώνεται η επιβάρυνση των φυσικών αποδεκτών, προστατεύονται τα οικοσυστήματα και διασφαλίζεται η αειφόρος διαχείριση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων. Για τον λόγο αυτό, η προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος αποτελεί βασικό στόχο των σύγχρονων πολιτικών διαχείρισης λυμάτων και των σχετικών νομοθετικών πλαισίων, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

1.1.4 Επαναχρησιμοποίηση νερού και βιώσιμη ανάπτυξη

Η αυξανόμενη ζήτηση νερού, η κλιματική αλλαγή και η υποβάθμιση των υδατικών πόρων έχουν αναδείξει την ανάγκη υιοθέτησης πρακτικών που συμβάλλουν στη βιώσιμη διαχείριση του νερού. Σε πολλές περιοχές του κόσμου, ιδιαίτερα σε άνυδρες και

ημιάνυδρες ζώνες, η διαθεσιμότητα γλυκού νερού μειώνεται συνεχώς, δημιουργώντας πιέσεις στις υφιστάμενες υδατικές υποδομές και καθιστώντας αναγκαία την αξιοποίηση εναλλακτικών υδατικών πόρων (UNESCO, 2024).

Η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες στρατηγικές αντιμετώπισης της λειψυδρίας και προώθησης της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων. Μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας, τα λύματα μπορούν να μετατραπούν από απόβλητο σε πολύτιμο υδατικό πόρο, μειώνοντας την εξάρτηση από φυσικά αποθέματα νερού και περιορίζοντας τις πιέσεις στα επιφανειακά και υπόγεια υδάτινα συστήματα (UN-Water, 2021).

Το επεξεργασμένο νερό μπορεί να αξιοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η γεωργική άρδευση, η άρδευση αστικού πρασίνου, η βιομηχανική χρήση, ο εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων και, υπό αυστηρές προϋποθέσεις, ακόμη και η έμμεση επαναχρησιμοποίηση για σκοπούς ύδρευσης. Η αξιοποίηση αυτών των εναλλακτικών πηγών συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης πόσιμου νερού για χρήσεις που δεν απαιτούν υψηλή ποιότητα, ενισχύοντας την αποδοτικότερη κατανομή των διαθέσιμων υδατικών πόρων (World Health Organization, 2017).

Η επαναχρησιμοποίηση νερού συνδέεται άμεσα με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας. Η σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση λυμάτων δεν περιορίζεται μόνο στην προστασία του περιβάλλοντος, αλλά αντιμετωπίζει τα λύματα ως πηγή ανακτήσιμων πόρων, όπως νερό, ενέργεια και θρεπτικά συστατικά. Η μετάβαση από το γραμμικό μοντέλο «χρήση-απόρριψη» σε ένα κυκλικό μοντέλο διαχείρισης αποτελεί βασικό στόχο των διεθνών πολιτικών για τη βιώσιμη ανάπτυξη και την προστασία των φυσικών πόρων (United Nations, 2015).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν τα αποκεντρωμένα και προκτασκευασμένα (compact) συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία μπορούν να παράγουν επεξεργασμένο νερό κοντά στο σημείο κατανάλωσης και να διευκολύνουν την τοπική επαναχρησιμοποίησή του. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τα συστήματα αυτά ιδιαίτερα ελκυστικά για μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις, απομακρυσμένες περιοχές και νησιωτικές κοινότητες, όπου οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι είναι συχνά περιορισμένοι. Για τον λόγο αυτό, η επαναχρησιμοποίηση νερού αποτελεί έναν από τους βασικούς άξονες ανάπτυξης των σύγχρονων αποκεντρωμένων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων.

1.2 Ανάγκη για αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή λυμάτων, η έντονη αστικοποίηση, η αύξηση της ζήτησης υδατικών πόρων και οι απαιτήσεις για υψηλότερο επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας έχουν καταστήσει τη διαχείριση των λυμάτων μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις των σύγχρονων κοινωνιών. Για πολλές δεκαετίες, η συλλογή και επεξεργασία των λυμάτων βασίστηκε κυρίως σε κεντρικά συστήματα μεγάλης κλίμακας, τα οποία εξυπηρετούν εκτεταμένες γεωγραφικές περιοχές μέσω μεγάλων δικτύων αποχέτευσης και κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Η προσέγγιση αυτή συνέβαλε σημαντικά στη βελτίωση της δημόσιας υγείας και στη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης, ιδιαίτερα στα μεγάλα αστικά κέντρα (Metcalf & Eddy, 2014).

Ωστόσο, η εφαρμογή κεντρικών συστημάτων δεν είναι πάντοτε η πλέον κατάλληλη λύση. Σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε μικρούς οικισμούς, απομακρυσμένες περιοχές, νησιωτικά συμπλέγματα και περιοχές με έντονη εποχιακή μεταβολή του πληθυσμού, η κατασκευή και λειτουργία εκτεταμένων αποχετευτικών δικτύων συνοδεύεται από υψηλό οικονομικό κόστος και σημαντικές τεχνικές δυσκολίες. Παράλληλα, η μεταφορά των λυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις αυξάνει τις απαιτήσεις σε ενέργεια και συντήρηση, ενώ δημιουργεί πρόσθετους περιβαλλοντικούς κινδύνους που σχετίζονται με πιθανές διαρροές ή αστοχίες των δικτύων (Massoud et al., 2009).

Οι περιορισμοί αυτοί οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη και εφαρμογή αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία πραγματοποιούν την επεξεργασία κοντά στο σημείο παραγωγής των αποβλήτων. Η φιλοσοφία της αποκεντρωμένης διαχείρισης βασίζεται στη μείωση των αναγκών μεταφοράς, στην αύξηση της ευελιξίας σχεδιασμού και στη δυνατότητα προσαρμογής των εγκαταστάσεων στις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε περιοχής. Παράλληλα, τα συστήματα αυτά διευκολύνουν την τοπική επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού, ενισχύοντας τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και τις αρχές της κυκλικής οικονομίας (Capodaglio, 2017).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα λεγόμενα προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρό απαιτούμενο χώρο εγκατάστασης, υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης και δυνατότητα προκατασκευασμένης ή

αρθρωτής (modular) κατασκευής. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να εγκατασταθούν εύκολα σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα χώρου και να προσφέρουν υψηλή ποιότητα εκροής, ικανή να καλύψει τόσο τις απαιτήσεις ασφαλούς διάθεσης όσο και τις προδιαγραφές επαναχρησιμοποίησης του νερού.

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα αποτελούν πλέον βασικό πυλώνα των σύγχρονων στρατηγικών διαχείρισης λυμάτων, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η εφαρμογή συμβατικών κεντρικών λύσεων είναι οικονομικά ή τεχνικά δυσχερής. Για τον λόγο αυτό, η μελέτη και αξιολόγηση των συστημάτων αυτών παρουσιάζει αυξανόμενο επιστημονικό και πρακτικό ενδιαφέρον. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι βασικοί περιορισμοί των κεντρικών συστημάτων, οι ειδικές ανάγκες συγκεκριμένων περιοχών και η εξέλιξη των αποκεντρωμένων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων που εφαρμόζονται σήμερα διεθνώς.

1.2.1 Περιορισμοί των κεντρικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

Για πολλές δεκαετίες, τα κεντρικά συστήματα συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων αποτέλεσαν την κυρίαρχη προσέγγιση διαχείρισης αστικών αποβλήτων στις περισσότερες χώρες. Τα συστήματα αυτά βασίζονται στη μεταφορά των λυμάτων μέσω εκτεταμένων αποχετευτικών δικτύων προς μία κεντρική εγκατάσταση επεξεργασίας, όπου πραγματοποιούνται οι απαραίτητες διεργασίες καθαρισμού πριν από τη διάθεση ή την επαναχρησιμοποίηση του νερού. Η προσέγγιση αυτή συνέβαλε σημαντικά στη βελτίωση της δημόσιας υγείας και στην προστασία του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα στα μεγάλα αστικά κέντρα (Metcalf & Eddy, 2014).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα κεντρικά συστήματα παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζονται σε περιοχές με μικρό πληθυσμό ή μεγάλη γεωγραφική διασπορά. Η κατασκευή εκτεταμένων δικτύων αποχέτευσης απαιτεί υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, ενώ η λειτουργία και συντήρησή τους συνεπάγεται σημαντικές οικονομικές απαιτήσεις. Σε πολλές περιπτώσεις, το κόστος των δικτύων μεταφοράς μπορεί να υπερβαίνει το κόστος της ίδιας της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων (Massoud et al., 2009).

Επιπλέον, η μεταφορά των λυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις συνεπάγεται αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, υψηλότερες ανάγκες συντήρησης και μεγαλύτερη πιθανότητα

εμφάνισης βλαβών ή διαρροών. Οι διαρροές από παλαιά ή ανεπαρκώς συντηρημένα δίκτυα μπορούν να οδηγήσουν σε ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων, ενώ τα έντονα καιρικά φαινόμενα και η κλιματική αλλαγή αυξάνουν την ευπάθεια των κεντρικών υποδομών (UNESCO, 2024).

Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα αφορά τη δυσκολία εξυπηρέτησης απομακρυσμένων περιοχών, μικρών οικισμών και νησιωτικών περιοχών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η κατασκευή μεγάλων δικτύων συλλογής συχνά δεν είναι τεχνικά ή οικονομικά βιώσιμη, με αποτέλεσμα πολλές περιοχές να παραμένουν χωρίς επαρκή συστήματα επεξεργασίας λυμάτων ή να βασίζονται σε προσωρινές λύσεις χαμηλής απόδοσης (Capodaglio, 2017).

Η ανάγκη αντιμετώπισης των παραπάνω περιορισμών οδήγησε σταδιακά στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία επιτρέπουν την επεξεργασία των αποβλήτων κοντά στο σημείο παραγωγής τους. Η προσέγγιση αυτή μειώνει τις απαιτήσεις σε δίκτυα μεταφοράς, περιορίζει το κόστος υποδομών και διευκολύνει την τοπική επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού, συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων.

1.2.2 Ιδιαίτερες ανάγκες μικρών οικισμών, νησιωτικών και τουριστικών περιοχών

Η διαχείριση και επεξεργασία των λυμάτων σε μικρούς οικισμούς, νησιωτικές περιοχές και τουριστικούς προορισμούς παρουσιάζει σημαντικές ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα μεγάλα αστικά κέντρα. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται συχνά από μικρό και γεωγραφικά διασκορπισμένο πληθυσμό, γεγονός που αυξάνει το κόστος κατασκευής και λειτουργίας εκτεταμένων δικτύων αποχέτευσης και μεγάλων κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Παράλληλα, η περιορισμένη διαθεσιμότητα οικονομικών πόρων και εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού δυσχεραίνει τη λειτουργία πολύπλοκων εγκαταστάσεων, καθιστώντας αναγκαία την αναζήτηση απλούστερων και περισσότερο ευέλικτων λύσεων επεξεργασίας. (Massoud et al., 2009)

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για μικρές κοινότητες, καθώς μειώνουν σημαντικά τις απαιτήσεις σε δίκτυα μεταφοράς, περιορίζουν το συνολικό κόστος επένδυσης και διευκολύνουν τη σταδιακή επέκταση των υποδομών ανάλογα με τις ανάγκες

του πληθυσμού. Επιπλέον, η επεξεργασία πραγματοποιείται κοντά στο σημείο παραγωγής των λυμάτων, γεγονός που περιορίζει τις απώλειες πόρων και διευκολύνει την τοπική αξιοποίηση του επεξεργασμένου νερού. (Massoud et al., 2009; Capodaglio, 2017)

Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελούν οι νησιωτικές περιοχές, όπου η διαθεσιμότητα γλυκού νερού είναι συχνά περιορισμένη και η προστασία των παράκτιων και υπόγειων υδάτων αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Σε πολλά νησιά, η υπεράντληση υπόγειων υδροφορέων και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής επιτείνουν τα προβλήματα λειψυδρίας, καθιστώντας απαραίτητη την εφαρμογή τεχνολογιών που επιτρέπουν όχι μόνο την αποτελεσματική επεξεργασία των λυμάτων αλλά και την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού για αρδευτικές ή άλλες χρήσεις. Η αποκεντρωμένη επεξεργασία μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην επίτευξη των στόχων αυτών, ενισχύοντας τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων. (UNESCO, 2024; Capodaglio, 2017)

Παρόμοιες προκλήσεις παρατηρούνται και στις τουριστικές περιοχές, όπου οι υδραυλικές παροχές και τα οργανικά φορτία μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια του έτους. Η έντονη εποχικότητα του τουρισμού οδηγεί συχνά σε μεγάλες διακυμάνσεις του πληθυσμού, με αποτέλεσμα οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας να καλούνται να λειτουργούν αποτελεσματικά τόσο σε περιόδους χαμηλού όσο και σε περιόδους ιδιαίτερα αυξημένου φορτίου. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται τεχνολογίες με υψηλή λειτουργική ευελιξία και δυνατότητα προσαρμογής σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας χωρίς σημαντική μείωση της αποδοτικότητάς τους. (Libralato et al., 2012)

Η ανάγκη για περιορισμό του απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών. Σε πολλές τουριστικές και νησιωτικές περιοχές η διαθέσιμη γη είναι περιορισμένη ή ιδιαίτερα ακριβή, γεγονός που καθιστά ελκυστικές τις τεχνολογίες επεξεργασίας με προκατασκευασμένα συστήματα. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή αποδοτικότητα σε μικρό όγκο εγκατάστασης, δυνατότητα προκατασκευασμένης κατασκευής και ευκολότερη ενσωμάτωση στον υφιστάμενο οικιστικό ή φυσικό χώρο. (Capodaglio, 2017)

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων. Ιδιαίτερα για μικρούς οικισμούς, νησιά και

τουριστικές περιοχές, τα συστήματα αυτά μπορούν να προσφέρουν αξιόπιστες και οικονομικά βιώσιμες λύσεις, συμβάλλοντας παράλληλα στην προστασία του περιβάλλοντος και στην προώθηση της επαναχρησιμοποίησης του νερού. (Libralato et al., 2012; UNESCO, 2024)

1.2.3 Η διεθνής τάση προς την αποκεντρωμένη διαχείριση λυμάτων

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η διαχείριση των λυμάτων έχει μεταβληθεί σημαντικά σε διεθνές επίπεδο, με την παραδοσιακή προσέγγιση των μεγάλων κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας να συμπληρώνεται ολοένα και περισσότερο από αποκεντρωμένα συστήματα μικρότερης κλίμακας. Η τάση αυτή συνδέεται με την ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων, την αύξηση του κόστους κατασκευής και συντήρησης εκτεταμένων δικτύων αποχέτευσης, καθώς και την ανάγκη προσαρμογής στις τοπικές κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. (Libralato et al., 2012)

Η αποκεντρωμένη διαχείριση λυμάτων βασίζεται στην επεξεργασία των αποβλήτων κοντά στο σημείο παραγωγής τους, σε αντίθεση με τα κεντρικά συστήματα που απαιτούν μεταφορά των λυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις. Η προσέγγιση αυτή μειώνει τις απαιτήσεις σε δίκτυα συλλογής και άντλησης, περιορίζει τις ενεργειακές καταναλώσεις και διευκολύνει την τοπική αξιοποίηση των ανακτημένων πόρων, όπως το νερό, τα θρεπτικά συστατικά και η ενέργεια. Για τον λόγο αυτό, πολλοί διεθνείς οργανισμοί θεωρούν την αποκεντρωμένη επεξεργασία σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας. (Capodaglio, 2017; UNESCO, 2024)

Η εφαρμογή αποκεντρωμένων συστημάτων έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη τόσο στις αναπτυσσόμενες όσο και στις ανεπτυγμένες χώρες. Σε αναπτυσσόμενες περιοχές, τα συστήματα αυτά προσφέρουν οικονομικά προσιτές λύσεις για πληθυσμούς που δεν διαθέτουν πρόσβαση σε κεντρικές υποδομές αποχέτευσης. Παράλληλα, σε ανεπτυγμένες χώρες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για την εξυπηρέτηση απομακρυσμένων κοινοτήτων, τουριστικών περιοχών, βιομηχανικών εγκαταστάσεων και νέων οικιστικών αναπτύξεων, όπου η κατασκευή μεγάλων δικτύων δεν θεωρείται οικονομικά αποδοτική. (Massoud et al., 2009)

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της αποκεντρωμένης διαχείρισης διαδραματίζουν οι τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν σημειωθεί τα τελευταία χρόνια. Η ανάπτυξη

προκατασκευασμένων συστημάτων υψηλής απόδοσης, όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), οι αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης βιοφίλμ (MBBR), τα συστήματα ακολουθιακής λειτουργίας (SBR), οι υβριδικές διεργασίες βιοφίλμ και οι σύγχρονοι κατασκευασμένοι υγρότοποι, έχει βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα της εκροής και έχει μειώσει τις απαιτήσεις σε χώρο εγκατάστασης. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την επίτευξη υψηλών αποδόσεων επεξεργασίας ακόμη και σε μικρές αποκεντρωμένες μονάδες. (Capodaglio, 2017)

Παράλληλα, η αυξανόμενη έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση του νερού έχει ενισχύσει περαιτέρω τη σημασία των αποκεντρωμένων συστημάτων. Η δυνατότητα παραγωγής επεξεργασμένου νερού κοντά στο σημείο κατανάλωσης διευκολύνει την αξιοποίησή του για άρδευση, αστικές χρήσεις, βιομηχανικές εφαρμογές ή εμπλουτισμό υπόγειων υδροφόρων οριζόντων. Η πρακτική αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους, όπου η επαναχρησιμοποίηση συμβάλλει στην ενίσχυση της υδατικής ασφάλειας και στη μείωση της πίεσης στα φυσικά αποθέματα νερού. (UNESCO, 2024)

Σήμερα, η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι τα αποκεντρωμένα συστήματα δεν αντιμετωπίζονται πλέον ως δευτερεύουσα επιλογή έναντι των κεντρικών εγκαταστάσεων, αλλά ως συμπληρωματικό και πολλές φορές ισοδύναμο εργαλείο διαχείρισης λυμάτων. Η επιλογή μεταξύ κεντρικής και αποκεντρωμένης προσέγγισης εξαρτάται από τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε περιοχής, με ολοένα περισσότερες χώρες να υιοθετούν συνδυαστικά μοντέλα διαχείρισης που αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα και των δύο προσεγγίσεων. (Libralato et al., 2012; Massoud et al., 2009)

1.2.4 Ο ρόλος των προκατασκευασμένων συστημάτων και σύντομη παρουσίαση των τεχνολογιών

Η αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμες, ευέλικτες και οικονομικά αποδοτικές λύσεις επεξεργασίας λυμάτων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας ευρείας κατηγορίας τεχνολογιών γνωστών ως προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από μικρό απαιτούμενο χώρο εγκατάστασης, υψηλή αποδοτικότητα επεξεργασίας και δυνατότητα λειτουργίας σε αποκεντρωμένες εφαρμογές, όπως μικροί οικισμοί, τουριστικές εγκαταστάσεις, νησιωτικές περιοχές και απομακρυσμένες

κοινότητες. Παράλληλα, προσφέρουν αυξημένη ευελιξία ως προς την εγκατάσταση, την επέκταση και την προσαρμογή τους στις τοπικές ανάγκες, συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και στην ενίσχυση της επαναχρησιμοποίησης του νερού. (Capodaglio, 2017; Massoud et al., 2009)

Η ανάπτυξη των προκατασκευασμένων συστημάτων συνδέεται άμεσα με τη συνεχή εξέλιξη της περιβαλλοντικής μηχανικής και των βιολογικών διεργασιών επεξεργασίας λυμάτων. Μέσω της αξιοποίησης προηγμένων βιολογικών, φυσικών και υβριδικών διεργασιών, τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης οργανικών ρυπαντών, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών στοιχείων, ενώ παράλληλα περιορίζουν τις απαιτήσεις σε χώρο και υποδομές. Σε πολλές περιπτώσεις, η ποιότητα της εκροής είναι κατάλληλη ακόμη και για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω τη σημασία τους στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης. (UNESCO, 2024)

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα στα προκατασκευασμένα και αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων παρουσιάζουν σημαντική ποικιλομορφία. Στην κατηγορία των αερόβιων βιολογικών διεργασιών περιλαμβάνονται συστήματα όπως οι αντιδραστήρες διαδοχικών κύκλων λειτουργίας (Sequencing Batch Reactors – SBR), οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (Membrane Bioreactors – MBR), οι αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης βιοφίλμ (Moving Bed Biofilm Reactors – MBBR), οι αντιδραστήρες σταθερής κλίνης βιοφίλμ (FBFR), τα βυθισμένα αεριζόμενα φίλτρα (SAF), οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι (RBC), τα συστήματα Oxidation Ditch και οι υβριδικές τεχνολογίες IFAS και MABR. Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται είτε στην ανάπτυξη αιωρούμενης βιομάζας είτε στη δημιουργία βιοφίλμ σε κατάλληλα μέσα υποστήριξης, επιτυγχάνοντας υψηλή απομάκρυνση οργανικών ενώσεων και θρεπτικών στοιχείων. (Metcalf & Eddy, 2014)

Παράλληλα, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι αναερόβιες τεχνολογίες, όπως οι αντιδραστήρες με διαφράγματα (Anaerobic Baffled Reactors – ABR), οι περιοδικοί αντιδραστήρες PABR και οι αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (AnMBR). Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, της μειωμένης παραγωγής ιλύος και της δυνατότητας παραγωγής βιοαερίου μέσω της αναερόβιας αποδόμησης της οργανικής ύλης. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια

αναπτύσσονται υβριδικές διατάξεις που συνδυάζουν αναερόβια και αερόβια στάδια επεξεργασίας με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την περαιτέρω μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. (Massoud et al., 2009)

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι φυσικές και ημιφυσικές τεχνολογίες επεξεργασίας, όπως οι κατασκευασμένοι υγρότοποι (Constructed Wetlands), καθώς και οι σύγχρονες παραλλαγές τους, όπως τα αεριζόμενα συστήματα κάθετης ροής (Aerated Vertical Flow Constructed Wetlands – AVFCW). Οι τεχνολογίες αυτές αξιοποιούν φυσικές, βιολογικές και φυτοτεχνολογικές διεργασίες για την επεξεργασία των λυμάτων, προσφέροντας χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και αυξημένη περιβαλλοντική συμβατότητα. Παράλληλα, πιο εξειδικευμένες προσεγγίσεις, όπως τα συστήματα μηδενικής υγρής απόρριψης (Zero Liquid Discharge – ZLD), εξετάζονται για εφαρμογές όπου η μέγιστη δυνατή ανάκτηση νερού αποτελεί πρωταρχικό στόχο. (UNESCO, 2024)

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται αναλυτικά οι βασικές τεχνολογίες προκατασκευασμένων και αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων, οι αρχές λειτουργίας τους, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, καθώς και η περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγησή τους. Στόχος είναι η συγκριτική διερεύνηση των διαθέσιμων επιλογών και η ανάδειξη των πλέον κατάλληλων τεχνολογιών για εφαρμογές μικρής κλίμακας και αποκεντρωμένης διαχείρισης λυμάτων.

1.3 Στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας

Η αυξανόμενη ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση των λυμάτων, η προστασία των υδατικών πόρων, η προώθηση της επαναχρησιμοποίησης του νερού και η απαίτηση για βιώσιμες λύσεις μικρής κλίμακας έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός μεγάλου αριθμού αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων. Οι τεχνολογίες αυτές διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τον τρόπο λειτουργίας, τις απαιτήσεις εγκατάστασης, την ενεργειακή κατανάλωση, την αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων και το συνολικό κόστος εφαρμογής. Ως αποτέλεσμα, η επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας για κάθε εφαρμογή αποτελεί ένα σύνθετο ζήτημα που απαιτεί τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγηση. (Capodaglio, 2017; UNESCO, 2024)

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συστηματική ανασκόπηση και συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων που εφαρμόζονται διεθνώς για οικιακές και μικρής κλίμακας εφαρμογές. Η εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση των βασικών τεχνολογιών βιολογικής επεξεργασίας, των υβριδικών συστημάτων και των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας, με στόχο την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων, των περιορισμών και των δυνατοτήτων εφαρμογής τους σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Ειδικότερα, οι επιμέρους στόχοι της εργασίας είναι:

- Η καταγραφή και ταξινόμηση των κυριότερων αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων.
- Η περιγραφή των βασικών αρχών λειτουργίας κάθε συστήματος και των μηχανισμών απομάκρυνσης των ρύπων.
- Η αξιολόγηση της αποδοτικότητας των τεχνολογιών ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών στοιχείων.
- Η διερεύνηση των απαιτήσεων λειτουργίας, συντήρησης και ενεργειακής κατανάλωσης των συστημάτων.
- Η σύγκριση των τεχνολογιών από περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιά.
- Η διερεύνηση της καταλληλότητας των συστημάτων για εφαρμογή σε μικρούς οικισμούς, νησιωτικές περιοχές, τουριστικές εγκαταστάσεις και άλλες αποκεντρωμένες εφαρμογές.
- Η ανάδειξη σύγχρονων τάσεων και καινοτόμων προσεγγίσεων στον τομέα της αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων.

Με βάση τους παραπάνω στόχους, η εργασία επιχειρεί να απαντήσει στα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

1. Ποιες είναι οι κυριότερες τεχνολογίες αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων με προκατασκευασμένα συστήματα που εφαρμόζονται σήμερα διεθνώς;
2. Ποιες είναι οι βασικές διαφορές μεταξύ των τεχνολογιών ως προς τον τρόπο λειτουργίας και την αποδοτικότητα επεξεργασίας;

3. Ποια συστήματα παρουσιάζουν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα όσον αφορά την απομάκρυνση οργανικών ρύπων και θρεπτικών στοιχείων;
4. Πώς συγκρίνονται οι τεχνολογίες ως προς τις απαιτήσεις χώρου, ενέργειας και συντήρησης;
5. Ποιες τεχνολογίες εμφανίζουν τις καλύτερες προοπτικές εφαρμογής σε μικρές και αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις;
6. Ποιος είναι ο ρόλος των σύγχρονων υβριδικών και καινοτόμων τεχνολογιών στη βελτίωση της περιβαλλοντικής και οικονομικής απόδοσης των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων;

Η απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα αναμένεται να συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση των διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών και να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επιλογή κατάλληλων λύσεων επεξεργασίας λυμάτων σε αποκεντρωμένες εφαρμογές, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις περιβαλλοντικές όσο και τις οικονομικές παραμέτρους.

1.4 Μεθοδολογία και βιβλιογραφική προσέγγιση

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται σε μεθοδολογία βιβλιογραφικής ανασκόπησης με στόχο τη συστηματική καταγραφή, ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων που εφαρμόζονται διεθνώς. Η έρευνα επικεντρώθηκε στη διερεύνηση τεχνολογιών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικρής κλίμακας εφαρμογές, όπως μικροί οικισμοί, τουριστικές εγκαταστάσεις, απομακρυσμένες κοινότητες και νησιωτικές περιοχές.

Για τη συλλογή της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε αναζήτηση επιστημονικών δημοσιεύσεων σε διεθνείς ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων και επιστημονικές πλατφόρμες, όπως οι Scopus, ScienceDirect, Web of Science και Google Scholar. Οι βάσεις αυτές επιλέχθηκαν λόγω της ευρείας κάλυψης επιστημονικών περιοδικών υψηλού κύρους στους τομείς της περιβαλλοντικής μηχανικής, της διαχείρισης υδάτων και της επεξεργασίας λυμάτων. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν τεχνικές εκθέσεις και δημοσιεύσεις διεθνών οργανισμών, όπως η UNESCO, το United Nations Environment Programme (UNEP) και η

International Water Association (IWA), οι οποίες παρέχουν επικαιροποιημένα στοιχεία για τη διαχείριση υδάτων και λυμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας συνδυασμούς λέξεων-κλειδίων στην αγγλική γλώσσα, όπως *decentralized wastewater treatment, compact wastewater treatment systems, onsite wastewater treatment, small-scale wastewater treatment, Membrane Bioreactor (MBR), Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), Sequencing Batch Reactor (SBR), Anaerobic Baffled Reactor (ABR), Membrane Aerated Biofilm Reactor (MABR), constructed wetlands* και *water reuse*. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμοί λέξεων που αφορούσαν περιβαλλοντικές και οικονομικές αξιολογήσεις των συστημάτων, όπως *energy consumption, life cycle assessment, operational cost* και *resource recovery*.

Εκτός από τη διεθνή βιβλιογραφία, αξιοποιήθηκαν και ελληνικές πηγές πληροφόρησης, όπως νομοθετικά κείμενα, τεχνικές οδηγίες και μελέτες αρμόδιων φορέων που σχετίζονται με τη διαχείριση υγρών αποβλήτων και την επεξεργασία λυμάτων στην Ελλάδα. Ειδικότερα, εξετάστηκαν στοιχεία από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), την Ειδική Γραμματεία Υδάτων, τη σχετική εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία, καθώς και τεχνικές μελέτες και διπλωματικές εργασίες ελληνικών πανεπιστημίων που αφορούν αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων και επαναχρησιμοποίηση νερού

Η επιλογή των πηγών βασίστηκε σε συγκεκριμένα κριτήρια. Προτιμήθηκαν δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά με σύστημα κρίσης (*peer-reviewed journals*), βιβλία αναφοράς και τεχνικές εκθέσεις διεθνών οργανισμών. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε σε πρόσφατες δημοσιεύσεις της τελευταίας δεκαπενταετίας, ώστε να αποτυπωθούν οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων. Ωστόσο, συμπεριλήφθηκαν και παλαιότερες εργασίες οι οποίες θεωρούνται θεμελιώδεις για την κατανόηση ορισμένων τεχνολογιών και βιολογικών διεργασιών.

Στο πλαίσιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους, όπως η αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρυπαντών και θρεπτικών στοιχείων, οι απαιτήσεις σε χώρο εγκατάστασης, η ενεργειακή κατανάλωση, η παραγωγή ιλύος, η λειτουργική πολυπλοκότητα, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, καθώς και η δυνατότητα εφαρμογής τους σε αποκεντρωμένα περιβάλλοντα. Η ανάλυση αυτή επέτρεψε

την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών κάθε τεχνολογίας και τη διερεύνηση της καταλληλότητάς της για διαφορετικές εφαρμογές.

Τέλος, τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας οργανώθηκαν θεματικά και παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας, όπου εξετάζονται αναλυτικά οι τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων, η περιβαλλοντική και οικονομική τους αξιολόγηση, καθώς και οι δυνατότητες εφαρμογής τους σε αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα.

1.5 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, με έμφαση στις σύγχρονες βιολογικές, αναερόβιες, φυσικές και υβριδικές τεχνολογίες. Η εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια, τα οποία αναπτύσσονται με τρόπο που επιτρέπει τη σταδιακή κατανόηση του αντικειμένου και την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογικών λύσεων.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται η εισαγωγή της εργασίας, όπου αναλύεται η σημασία της επεξεργασίας λυμάτων για τη δημόσια υγεία, την προστασία των υδατικών πόρων και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Παράλληλα, εξετάζεται η ανάγκη ανάπτυξης αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, διατυπώνονται οι στόχοι και τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας και παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το ισχύον νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο που διέπει την επεξεργασία λυμάτων σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Εξετάζονται οι σχετικές ευρωπαϊκές οδηγίες, η ελληνική νομοθεσία, τα όρια εκροής και οι απαιτήσεις που σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύονται οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με τα λύματα και τις διεργασίες επεξεργασίας τους. Παρουσιάζονται τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων, οι βασικές παράμετροι αξιολόγησης της απόδοσης των συστημάτων (BOD, COD, TSS, TN, TP, HRT, SRT κ.ά.), καθώς και η κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών επεξεργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται εισαγωγή στις βασικές τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων. Παρουσιάζονται οι κυριότερες βιολογικές, φυσικοχημικές, υβριδικές και βασισμένες σε μικροφύκη διεργασίες, καθώς και οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των ρύπων που αξιοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα επεξεργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση των επιμέρους αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Εξετάζονται οι αρχές λειτουργίας, οι επιδόσεις, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και οι δυνατότητες εφαρμογής βιολογικών, αναερόβιων, φυσικών και υβριδικών τεχνολογιών.

Στο **Κεφάλαιο 6** πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των συστημάτων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η αξιολόγηση βασίζεται σε τεχνικά, ενεργειακά και οικονομικά κριτήρια, ενώ εξετάζεται και η καταλληλότητα κάθε τεχνολογίας για διαφορετικές εφαρμογές και γεωγραφικές περιοχές.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας, συνοψίζονται τα κυριότερα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα και περαιτέρω ανάπτυξη των αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Νομοθετικό Πλαίσιο και Κανονισμοί

Η αποτελεσματική διαχείριση και επεξεργασία των αστικών λυμάτων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την προστασία της δημόσιας υγείας, των υδατικών πόρων και του φυσικού περιβάλλοντος. Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού, η αστικοποίηση, η εντατικοποίηση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και οι αυξανόμενες απαιτήσεις για προστασία των υδάτων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου νομοθετικού πλαισίου σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Το πλαίσιο αυτό καθορίζει τις απαιτήσεις για τη συλλογή, επεξεργασία, διάθεση και επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, καθώς και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που πρέπει να πληρούν οι εκροές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας (European Union, 1991; European Union, 2000).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει διαμορφώσει διαχρονικά ένα σύνολο οδηγιών και κανονισμών που αποσκοπούν στην πρόληψη της ρύπανσης των υδάτων και στη διασφάλιση της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων. Κεντρική θέση στο πλαίσιο αυτό κατέχει η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων, η οποία αποτέλεσε το θεμέλιο για την οργάνωση των υποδομών επεξεργασίας λυμάτων στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Union, 1991). Παράλληλα, η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ εισήγαγε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση προστασίας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων μέσω της διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής (European Union, 2000). Επιπλέον, νεότερα νομοθετήματα, όπως ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 για την επαναχρησιμοποίηση του νερού, ενσωματώνουν τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, της βιώσιμης αξιοποίησης των φυσικών πόρων και της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή (European Union, 2020).

Στην Ελλάδα, οι ευρωπαϊκές οδηγίες έχουν ενσωματωθεί στο εθνικό δίκαιο μέσω σχετικών νόμων, προεδρικών διαταγμάτων και κοινών υπουργικών αποφάσεων, διαμορφώνοντας το θεσμικό πλαίσιο που διέπει τη διαχείριση των αστικών λυμάτων. Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η δυνατότητα εφαρμογής αποκεντρωμένων ή άλλων κατάλληλων συστημάτων επεξεργασίας σε μικρούς οικισμούς, όπου η κατασκευή

εκτεταμένων δικτύων αποχέτευσης δεν είναι τεχνικά ή οικονομικά εφικτή. Η πρόβλεψη αυτή αναγνωρίζεται τόσο από την ευρωπαϊκή νομοθεσία όσο και από τις Κατευθυντήριες Γραμμές της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων για τη διαχείριση λυμάτων μικρών οικισμών, οι οποίες προωθούν την αξιολόγηση εναλλακτικών και αποκεντρωμένων λύσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές ευρωπαϊκές και εθνικές νομοθετικές διατάξεις που σχετίζονται με την επεξεργασία λυμάτων, τα όρια εκροής, τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις και τις προδιαγραφές επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις διατάξεις που επηρεάζουν τον σχεδιασμό και την εφαρμογή αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία αποτελούν το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

2.1.1 Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων

Η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία εκδόθηκε στις 21 Μαΐου 1991, αποτελεί το βασικό νομοθετικό κείμενο για τη συλλογή, επεξεργασία και διάθεση των αστικών λυμάτων στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σκοπός της οδηγίας είναι η προστασία του περιβάλλοντος από τις αρνητικές επιπτώσεις που προκαλούνται από την απόρριψη ανεπεξέργαστων ή ανεπαρκώς επεξεργασμένων αστικών λυμάτων, καθώς και ορισμένων κατηγοριών βιομηχανικών αποβλήτων (European Union, 1991).

Πριν από την εφαρμογή της οδηγίας, η διαχείριση των αστικών λυμάτων διέφερε σημαντικά μεταξύ των κρατών μελών, γεγονός που οδηγούσε σε άνισο επίπεδο προστασίας των υδάτινων αποδεκτών και σε σοβαρά προβλήματα ρύπανσης ποταμών, λιμνών, παράκτιων περιοχών και υπόγειων υδροφορέων. Η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ θεσπίστηκε με στόχο τη δημιουργία ενός ενιαίου πλαισίου απαιτήσεων για τη συλλογή, επεξεργασία και διάθεση των λυμάτων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων σε ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση (European Commission, 2024).

Βασική έννοια της οδηγίας αποτελεί ο **ισοδύναμος πληθυσμός (Population Equivalent – p.e.)**, ο οποίος χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση των οικισμών και τον καθορισμό των απαιτούμενων επιπέδων επεξεργασίας. Ένας ισοδύναμος κάτοικος αντιστοιχεί στο οργανικό φορτίο που παράγει κατά μέσο όρο ένα άτομο ημερησίως και

εκφράζεται ως βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD_5) ίσο με 60 g O_2 ανά ημέρα (European Union, 1991).

Η οδηγία καθορίζει ότι οι οικισμοί άνω συγκεκριμένων ορίων ισοδύναμου πληθυσμού οφείλουν να διαθέτουν κατάλληλα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων. Παράλληλα, προβλέπει διαφορετικά επίπεδα επεξεργασίας ανάλογα με το μέγεθος του οικισμού και τα χαρακτηριστικά του αποδέκτη. Για τις περιοχές που χαρακτηρίζονται ως «ευαίσθητοι αποδέκτες», απαιτούνται αυστηρότερα μέτρα επεξεργασίας με στόχο τη μείωση των φορτίων αζώτου και φωσφόρου που συμβάλλουν στον ευτροφισμό των υδάτινων οικοσυστημάτων (European Union, 1991).

Ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα εργασία παρουσιάζει το άρθρο 3 της οδηγίας, σύμφωνα με το οποίο η κατασκευή δικτύων αποχέτευσης δεν είναι υποχρεωτική σε περιπτώσεις όπου το κόστος είναι δυσανάλογα υψηλό ή όταν δεν προκύπτει ουσιαστικό περιβαλλοντικό όφελος. Στις περιπτώσεις αυτές επιτρέπεται η χρήση «μεμονωμένων ή άλλων κατάλληλων συστημάτων» που εξασφαλίζουν ισοδύναμο επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος (European Union, 1991). Η διάταξη αυτή αποτελεί τη σημαντικότερη ευρωπαϊκή νομοθετική βάση για την ανάπτυξη και εφαρμογή αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα σε μικρούς οικισμούς, απομακρυσμένες κοινότητες, νησιωτικές περιοχές και περιοχές με έντονες γεωμορφολογικές ιδιαιτερότητες.

Η σημασία αυτής της πρόβλεψης αναγνωρίζεται και στην Ελλάδα. Σύμφωνα με τις Κατευθυντήριες Γραμμές της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων για τη διαχείριση λυμάτων μικρών οικισμών, οι κοινότητες κάτω των 2.000 ισοδύναμων κατοίκων δεν υποχρεούνται απαραίτητα να κατασκευάζουν εκτεταμένα αποχετευτικά δίκτυα, αλλά μπορούν να εφαρμόζουν κατάλληλα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας, εφόσον εξασφαλίζεται η προστασία του περιβάλλοντος και η συμμόρφωση με τα προβλεπόμενα όρια εκροής (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Επιπλέον, η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ καθορίζει συγκεκριμένες απαιτήσεις παρακολούθησης και ελέγχου των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Οι βασικές παράμετροι που αξιολογούνται περιλαμβάνουν το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), ενώ σε ευαίσθητες περιοχές προβλέπεται και η παρακολούθηση του ολικού αζώτου (TN) και του ολικού φωσφόρου (TP). Μέσω των απαιτήσεων αυτών διασφαλίζεται ότι οι

εγκαταστάσεις επεξεργασίας επιτυγχάνουν το απαιτούμενο επίπεδο προστασίας των υδάτινων αποδεκτών (European Union, 1991).

Συνολικά, η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ αποτέλεσε το θεμέλιο της ευρωπαϊκής πολιτικής για τα αστικά λύματα και συνέβαλε σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων στην Ευρώπη. Παράλληλα, μέσω της πρόβλεψης για «κατάλληλα συστήματα» σε μικρούς οικισμούς, δημιούργησε το θεσμικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη των αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων που αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

2.1.2 Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ

Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, γνωστή ως Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα (Water Framework Directive – WFD), εκδόθηκε στις 23 Οκτωβρίου 2000 και αποτελεί το βασικό νομοθετικό εργαλείο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προστασία και ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων. Σε αντίθεση με προηγούμενες νομοθετικές πρωτοβουλίες που επικεντρώνονταν σε επιμέρους μορφές ρύπανσης ή συγκεκριμένες κατηγορίες υδάτων, η Οδηγία 2000/60/ΕΚ εισήγαγε μια ενιαία και ολοκληρωμένη προσέγγιση διαχείρισης όλων των επιφανειακών, υπόγειων, μεταβατικών και παράκτιων υδάτων (European Union, 2000).

Κύριος στόχος της οδηγίας είναι η επίτευξη και διατήρηση της «καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης» όλων των υδάτινων σωμάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Για τον σκοπό αυτό, η οδηγία απαιτεί από τα κράτη μέλη να εφαρμόζουν μέτρα πρόληψης και ελέγχου της ρύπανσης, να προστατεύουν τα υδάτινα οικοσυστήματα και να διασφαλίζουν τη βιώσιμη χρήση των υδάτινων πόρων. Η προστασία των υδάτων αντιμετωπίζεται πλέον ως ενιαίο περιβαλλοντικό ζήτημα και όχι ως σύνολο αποσπασματικών δράσεων (European Union, 2000).

Μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ είναι η διαχείριση των υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Η προσέγγιση αυτή αναγνωρίζει ότι οι υδατικοί πόροι δεν ακολουθούν διοικητικά ή πολιτικά όρια και επομένως απαιτείται ολοκληρωμένος σχεδιασμός και συντονισμός σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Για τον λόγο αυτό, τα κράτη μέλη υποχρεώθηκαν να εκπονήσουν Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΣΔΛΑΠ), στα οποία καθορίζονται οι πιέσεις, οι περιβαλλοντικοί

στόχοι και τα απαραίτητα μέτρα προστασίας των υδάτων (European Union, 2000; ΥΠΕΝ, 2024).

Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων αποτελεί βασικό μέσο επίτευξης των στόχων της οδηγίας. Η ανεπαρκής συλλογή ή επεξεργασία λυμάτων μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, σε φαινόμενα ευτροφισμού και σε σημαντικές επιπτώσεις στα υδάτινα οικοσυστήματα. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της ευρωπαϊκής πολιτικής για την προστασία των υδάτων (European Environment Agency, 2023).

Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Σε πολλές περιπτώσεις μικρών οικισμών, νησιωτικών περιοχών και απομακρυσμένων κοινοτήτων, η επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων της οδηγίας μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά μέσω αποκεντρωμένων τεχνολογιών επεξεργασίας, οι οποίες συμβάλλουν στη μείωση των ρυπαντικών φορτίων και στην προστασία των τοπικών υδατικών αποδεκτών. Η προσέγγιση αυτή είναι σύμφωνη με τις αρχές της βιώσιμης διαχείρισης των υδάτων και της προστασίας των οικοσυστημάτων που προωθεί η οδηγία.

Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα εξακολουθεί να αποτελεί μέχρι σήμερα τον βασικό πυλώνα της ευρωπαϊκής πολιτικής διαχείρισης υδάτων και λειτουργεί συμπληρωματικά με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για τα αστικά λύματα, καθορίζοντας το ευρύτερο περιβαλλοντικό πλαίσιο μέσα στο οποίο σχεδιάζονται και λειτουργούν οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

2.1.3 Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 για την επαναχρησιμοποίηση του νερού

Η αυξανόμενη πίεση στους υδατικούς πόρους λόγω της κλιματικής αλλαγής, της πληθυσμιακής αύξησης και των αυξανόμενων αναγκών σε νερό οδήγησε την Ευρωπαϊκή Ένωση στην ανάπτυξη νέων πολιτικών για την προώθηση της κυκλικής διαχείρισης του νερού. Στο πλαίσιο αυτό εκδόθηκε ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση του νερού, ο οποίος τέθηκε σε εφαρμογή τον Ιούνιο του 2023 (European Union, 2020).

Βασικός στόχος του κανονισμού είναι η προώθηση της ασφαλούς επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων αστικών λυμάτων, κυρίως για γεωργική άρδευση, συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και στη μείωση της πίεσης που ασκείται στα φυσικά αποθέματα γλυκού νερού. Παράλληλα, ο κανονισμός ενισχύει την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας, καθώς το επεξεργασμένο νερό αντιμετωπίζεται πλέον ως πολύτιμος πόρος και όχι ως απόβλητο προς διάθεση (European Commission, 2023).

Ο Κανονισμός 2020/741 καθορίζει ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας για το ανακτημένο νερό, καθώς και διαδικασίες παρακολούθησης και διαχείρισης κινδύνου. Για τον σκοπό αυτό θεσπίζονται τέσσερις κατηγορίες ποιότητας ανακτημένου νερού (Α, Β, Γ και Δ), οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών και μεθόδους άρδευσης. Οι απαιτήσεις αφορούν παραμέτρους όπως τα αιωρούμενα στερεά (TSS), το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5), η θολότητα και η μικροβιολογική ποιότητα του νερού μέσω δεικτών όπως το *Escherichia coli* (European Union, 2020).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εφαρμογή ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης κινδύνου (Water Reuse Risk Management Plans), τα οποία αξιολογούν πιθανούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και τις γεωργικές δραστηριότητες. Η προσέγγιση αυτή ακολουθεί τις αρχές της προληπτικής περιβαλλοντικής διαχείρισης και διασφαλίζει ότι η επαναχρησιμοποίηση του νερού πραγματοποιείται με ασφαλή και ελεγχόμενο τρόπο (European Union, 2020).

Ο κανονισμός παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία για τις τεχνολογίες αποκεντρωμένης και προκατασκευασμένα επεξεργασίας λυμάτων. Πολλά σύγχρονα συστήματα, όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), τα υβριδικά συστήματα SBR-MBR, τα A2O-MBR και ορισμένες προηγμένες τεχνολογίες βιοφίλμ, μπορούν να παράγουν εκροή υψηλής ποιότητας που πληροί τις απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης. Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους, όπως οι νησιωτικές και ξηροθερμικές περιοχές της Μεσογείου, όπου η ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση νερού μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην αντιμετώπιση της λειψυδρίας (European Commission, 2023).

Για την Ελλάδα, η σημασία του Κανονισμού 2020/741 είναι ιδιαίτερα αυξημένη λόγω των εποχικών ελλείψεων νερού που παρατηρούνται σε πολλές περιοχές της χώρας. Η

εφαρμογή συστημάτων επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να μειώσει τις πιέσεις στους υδατικούς πόρους, να ενισχύσει τη γεωργική παραγωγή και να συμβάλει στην προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. Παράλληλα, ο κανονισμός λειτουργεί συμπληρωματικά προς την ελληνική νομοθεσία επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα της παρούσας εργασίας.

Συνολικά, ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς τη βιώσιμη διαχείριση του νερού στην Ευρωπαϊκή Ένωση, προωθώντας την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων και ενισχύοντας τον ρόλο των σύγχρονων τεχνολογιών επεξεργασίας στην επίτευξη των στόχων της κυκλικής οικονομίας και της περιβαλλοντικής προστασίας.

2.1.4 Αναθεωρημένη Οδηγία για τα Αστικά Λύματα (Urban Wastewater Treatment Directive – 2024)

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αναγνωρίζοντας τις νέες περιβαλλοντικές προκλήσεις και τις αυξανόμενες απαιτήσεις για βιώσιμη διαχείριση των υδάτων, προχώρησε το 2024 στην αναθεώρηση της Οδηγίας για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων. Η νέα Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 αντικαθιστά σταδιακά το προηγούμενο πλαίσιο της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ, εισάγοντας αυστηρότερες απαιτήσεις και ενσωματώνοντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, της ενεργειακής αποδοτικότητας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας (European Union, 2024).

Ένας από τους βασικούς στόχους της αναθεωρημένης οδηγίας είναι η περαιτέρω μείωση των επιπτώσεων των αστικών λυμάτων στα υδάτινα οικοσυστήματα. Για τον σκοπό αυτό προβλέπεται η σταδιακή επέκταση των απαιτήσεων συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων σε μικρότερους οικισμούς, καθώς και η εφαρμογή αυστηρότερων προτύπων απομάκρυνσης οργανικών ρυπαντών και θρεπτικών στοιχείων, ιδιαίτερα σε περιοχές που παρουσιάζουν αυξημένη περιβαλλοντική ευαισθησία (European Commission, 2024).

Ιδιαίτερη καινοτομία της νέας οδηγίας αποτελεί η εισαγωγή μέτρων για την αντιμετώπιση των λεγόμενων «αναδυόμενων ρύπων» (emerging pollutants), όπως τα φαρμακευτικά κατάλοιπα, οι ορμόνες, τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας και οι

μικρορύποι που δεν απομακρύνονται πλήρως από τις συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Για πρώτη φορά προβλέπεται η εφαρμογή τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας (quaternary treatment) σε μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, με στόχο τη σημαντική μείωση των μικρορύπων που καταλήγουν στους υδάτινους αποδέκτες (European Union, 2024).

Παράλληλα, η αναθεωρημένη οδηγία δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ενεργειακή απόδοση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Προβλέπεται η σταδιακή μετάβαση των μεγάλων εγκαταστάσεων προς την ενεργειακή ουδετερότητα (energy neutrality), μέσω της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και της αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και παραγόμενου βιοαερίου. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τον ρόλο των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων ως μονάδων ανάκτησης πόρων και όχι απλώς ως υποδομών περιβαλλοντικής προστασίας (European Commission, 2024).

Επιπλέον, η νέα οδηγία προωθεί την επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού, την ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων και την εφαρμογή πρακτικών κυκλικής οικονομίας. Η αξιοποίηση του επεξεργασμένου νερού για άρδευση, η ανάκτηση φωσφόρου από την ιλύ και η παραγωγή ενέργειας από αναερόβιες διεργασίες αποτελούν βασικές κατευθύνσεις της σύγχρονης ευρωπαϊκής πολιτικής για τη διαχείριση λυμάτων (European Union, 2024).

Η αναθεωρημένη Οδηγία 2024/3019 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Οι νέες απαιτήσεις για υψηλή ποιότητα εκροής, χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης νερού ευνοούν την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών, όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), οι αντιδραστήρες βιοφίλμ με αεριζόμενες μεμβράνες (MABR), τα υβριδικά συστήματα και οι σύγχρονες φυσικές διεργασίες επεξεργασίας. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στην επίτευξη των νέων ευρωπαϊκών περιβαλλοντικών στόχων, ιδιαίτερα σε μικρούς οικισμούς και αποκεντρωμένες εφαρμογές.

Συνολικά, η αναθεωρημένη Οδηγία για τα Αστικά Λύματα σηματοδοτεί τη μετάβαση από τη συμβατική διαχείριση λυμάτων σε ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο διαχείρισης πόρων, όπου η προστασία του περιβάλλοντος, η εξοικονόμηση ενέργειας και η επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελούν αλληλένδετους στόχους.

2.2 Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση και επεξεργασία λυμάτων

Η ελληνική νομοθεσία για τη διαχείριση και επεξεργασία των αστικών λυμάτων έχει διαμορφωθεί σε μεγάλο βαθμό μέσω της ενσωμάτωσης των σχετικών ευρωπαϊκών οδηγιών στο εθνικό δίκαιο. Η συμμετοχή της Ελλάδας στην Ευρωπαϊκή Ένωση οδήγησε στη σταδιακή προσαρμογή του θεσμικού πλαισίου στις απαιτήσεις της ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής πολιτικής, με στόχο την προστασία των υδατικών πόρων, τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας και τη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος (European Union, 1991; European Union, 2000).

Βασικό σημείο αναφοράς αποτελεί η ενσωμάτωση της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων μέσω της Κοινής Υπουργικής Απόφασης (ΚΥΑ) 5673/400/1997, η οποία καθόρισε τις απαιτήσεις συλλογής, επεξεργασίας και διάθεσης των αστικών λυμάτων στην Ελλάδα. Στη συνέχεια, η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ ενσωματώθηκε μέσω του Ν. 3199/2003 και του Π.Δ. 51/2007, εισάγοντας την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής και καθορίζοντας τους περιβαλλοντικούς στόχους για την προστασία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων (Ν. 3199/2003· Π.Δ. 51/2007).

Ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα εργασία έχουν οι διατάξεις που αφορούν μικρούς οικισμούς και αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων, για οικισμούς μικρού μεγέθους είναι δυνατή η εφαρμογή εναλλακτικών και αποκεντρωμένων τεχνολογιών επεξεργασίας, εφόσον εξασφαλίζεται ισοδύναμο επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη χώρα, λόγω της ύπαρξης μεγάλου αριθμού μικρών οικισμών, νησιωτικών περιοχών και απομακρυσμένων κοινοτήτων με ιδιαίτερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι σημαντικότερες νομοθετικές πράξεις που διέπουν τη διαχείριση και επεξεργασία λυμάτων στην Ελλάδα, καθώς και οι ειδικές προβλέψεις που σχετίζονται με την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων εκροών και την εφαρμογή αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας.

2.2.1 ΚΥΑ 5673/400/1997 – Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων

Η Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) 5673/400/1997 (ΦΕΚ 192/Β/14-03-1997) αποτελεί το βασικό νομοθετικό κείμενο με το οποίο η Ελλάδα εναρμόνισε το εθνικό της δίκαιο με τις απαιτήσεις της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων. Η απόφαση καθορίζει τα μέτρα, τους όρους και τις διαδικασίες που πρέπει να εφαρμόζονται για τη συλλογή, επεξεργασία και διάθεση των αστικών λυμάτων, με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από τις επιπτώσεις της ανεξέλεγκτης διάθεσης λυμάτων (ΚΥΑ 5673/400/1997).

Η ΚΥΑ εισάγει την έννοια του ισοδύναμου πληθυσμού (Population Equivalent – p.e.), η οποία χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση των οικισμών και τον καθορισμό των απαιτούμενων επιπέδων επεξεργασίας. Παράλληλα, προβλέπει την υποχρέωση κατασκευής κατάλληλων συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων για συγκεκριμένες κατηγορίες οικισμών, καθώς και τη συμμόρφωση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας με συγκεκριμένα ποιοτικά κριτήρια εκροής (ΚΥΑ 5673/400/1997).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η διάκριση μεταξύ κανονικών και ευαίσθητων αποδεκτών. Για περιοχές που χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητες, λόγω αυξημένου κινδύνου ευτροφισμού ή άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων, απαιτείται προχωρημένη επεξεργασία με επιπλέον απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στη μείωση των θρεπτικών φορτίων που καταλήγουν σε λίμνες, ποτάμια και παράκτιες περιοχές, προστατεύοντας τα υδάτινα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα (ΥΠΕΝ, 2023).

Η απόφαση καθορίζει επίσης συγκεκριμένες απαιτήσεις παρακολούθησης της λειτουργίας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Οι βασικές παράμετροι ελέγχου περιλαμβάνουν το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD_5), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται και η παρακολούθηση θρεπτικών στοιχείων όπως το ολικό άζωτο και ο ολικός φώσφορος. Η συμμόρφωση με τα όρια αυτά αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΚΥΑ 5673/400/1997).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία παρουσιάζει το γεγονός ότι το ελληνικό θεσμικό πλαίσιο, ακολουθώντας τη φιλοσοφία της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ, δεν περιορίζεται αποκλειστικά σε μεγάλα κεντρικά συστήματα επεξεργασίας. Για μικρούς οικισμούς,

απομακρυσμένες περιοχές και νησιωτικά συμπλέγματα είναι δυνατή η εφαρμογή κατάλληλων λύσεων, εφόσον επιτυγχάνεται ισοδύναμο επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας. Η δυνατότητα αυτή αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη και εφαρμογή σύγχρονων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων στην Ελλάδα, όπως οι αντιδραστήρες με εναλλασσόμενες φάσεις λειτουργίας (SBR), οι τεχνητοί υγρότοποι και άλλες αποκεντρωμένες τεχνολογίες (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Συνολικά, η ΚΥΑ 5673/400/1997 αποτελεί το θεμελιώδες νομοθετικό εργαλείο για τη διαχείριση των αστικών λυμάτων στην Ελλάδα, καθώς μεταφέρει στο εθνικό δίκαιο τις βασικές απαιτήσεις της ευρωπαϊκής νομοθεσίας και καθορίζει το πλαίσιο σχεδιασμού, λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

2.2.2 Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019 και οι επιπτώσεις στα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Η Ευρωπαϊκή Ένωση προχώρησε στην αναδιατύπωση του θεσμικού πλαισίου για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων μέσω της Οδηγίας (ΕΕ) 2024/3019 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, η οποία αντικαθιστά την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ και αποτελεί το νέο βασικό νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των αστικών λυμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η νέα οδηγία δημοσιεύθηκε στην Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης τον Δεκέμβριο του 2024 και τέθηκε σε ισχύ το 2025.

Σε σχέση με το προηγούμενο νομοθετικό πλαίσιο, η νέα οδηγία εισάγει αυστηρότερες απαιτήσεις για τη συλλογή, την επεξεργασία και τη διάθεση των αστικών λυμάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στην προστασία των υδάτινων πόρων, στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στην ενεργειακή ουδετερότητα των εγκαταστάσεων επεξεργασίας, στην απομάκρυνση μικρορύπων, καθώς και στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας μέσω της επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού και της ανάκτησης πόρων.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά πλέον η εφαρμογή αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα σε μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις, απομακρυσμένες περιοχές και μεμονωμένες εγκαταστάσεις, όπου η ανάπτυξη εκτεταμένων δικτύων αποχέτευσης και μεγάλων κεντρικών εγκαταστάσεων δεν είναι πάντοτε τεχνικά ή οικονομικά εφικτή. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από μικρό απαιτούμενο χώρο εγκατάστασης, υψηλή ευελιξία, δυνατότητα σταδιακής επέκτασης, χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και

δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της εκροής, στοιχεία που τα καθιστούν ιδιαίτερα συμβατά με τις απαιτήσεις της νέας ευρωπαϊκής πολιτικής για τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτων.

Συνεπώς, η νέα ευρωπαϊκή νομοθεσία αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά την ανάπτυξη και την εφαρμογή αποκεντρωμένων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίες αποτελούν βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2.3 Νόμος 3199/2003 – Προστασία και διαχείριση των υδάτων

Ο Νόμος 3199/2003 αποτελεί το βασικό νομοθετικό πλαίσιο για την προστασία και διαχείριση των υδατικών πόρων στην Ελλάδα, καθώς ενσωμάτωσε στο εθνικό δίκαιο τις απαιτήσεις της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/EK (Ν. 3199/2003). Η θέσπισή του σηματοδότησε τη μετάβαση από αποσπασματικές πρακτικές διαχείρισης σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση προστασίας των επιφανειακών, υπόγειων και παράκτιων υδάτων, σύμφωνα με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της περιβαλλοντικής προστασίας (Οδηγία 2000/60/EK).

Βασικός στόχος του νόμου είναι η διατήρηση και βελτίωση της ποιότητας των υδάτων, η πρόληψη της περαιτέρω υποβάθμισής τους και η εξασφάλιση της βιώσιμης χρήσης τους για τις ανάγκες των σημερινών και μελλοντικών γενεών (Ν. 3199/2003). Για την επίτευξη των στόχων αυτών, υιοθετήθηκε η διαχείριση των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, μια προσέγγιση που θεωρείται πλέον θεμελιώδης στη σύγχρονη ευρωπαϊκή πολιτική υδάτων (Οδηγία 2000/60/EK).

Στο πλαίσιο εφαρμογής του νόμου, η ελληνική επικράτεια χωρίστηκε σε Υδατικά Διαμερίσματα, για τα οποία εκπονούνται Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΣΔΛΑΠ). Τα σχέδια αυτά περιλαμβάνουν την καταγραφή των υδατικών σωμάτων, την αξιολόγηση των πιέσεων που δέχονται, τον καθορισμό περιβαλλοντικών στόχων και τον σχεδιασμό μέτρων για την προστασία και αποκατάστασή τους (ΥΠΕΝ, 2024).

Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων συνδέεται άμεσα με τους στόχους του Ν. 3199/2003, καθώς η ανεξέλεγκτη διάθεση λυμάτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Η λειτουργία κατάλληλων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων συμβάλλει στη μείωση των οργανικών και

θρεπτικών φορτίων που καταλήγουν στους υδάτινους αποδέκτες, υποστηρίζοντας την επίτευξη της «καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης» των υδάτων που προβλέπει η ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία (Ν. 3199/2003· Οδηγία 2000/60/ΕΚ).

Ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα εργασία έχει το γεγονός ότι ο νόμος θέτει περιβαλλοντικούς στόχους χωρίς να επιβάλλει συγκεκριμένες τεχνολογίες επεξεργασίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εφαρμογή τόσο συμβατικών όσο και αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, εφόσον εξασφαλίζεται η προστασία των υδατικών αποδεκτών και η συμμόρφωση με τα προβλεπόμενα πρότυπα ποιότητας (ΥΠΕΝ, 2024). Η ευελιξία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για μικρούς οικισμούς, νησιωτικές περιοχές και απομακρυσμένες κοινότητες, όπου τα προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας μπορούν να αποτελέσουν τεχνικά και οικονομικά βιώσιμες λύσεις.

Συνολικά, ο Νόμος 3199/2003 αποτέλεσε το θεμέλιο της σύγχρονης πολιτικής διαχείρισης υδάτων στην Ελλάδα, εισάγοντας τις αρχές της ολοκληρωμένης διαχείρισης, της πρόληψης της ρύπανσης και της βιώσιμης χρήσης των υδατικών πόρων. Παράλληλα, δημιούργησε το απαραίτητο θεσμικό υπόβαθρο για την εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων που συμβάλλουν στην επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων της χώρας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

2.2.4 Προεδρικό Διάταγμα 51/2007 – Καθορισμός μέτρων και διαδικασιών για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων

Το Προεδρικό Διάταγμα 51/2007 εκδόθηκε με σκοπό την εξειδίκευση και εφαρμογή των διατάξεων του Ν. 3199/2003, μέσω του οποίου ενσωματώθηκε στο ελληνικό δίκαιο η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ (Π.Δ. 51/2007). Το διάταγμα καθορίζει τα μέτρα, τις διαδικασίες και τους μηχανισμούς που απαιτούνται για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτινων πόρων της χώρας, αποτελώντας βασικό εργαλείο εφαρμογής της εθνικής υδατικής πολιτικής.

Κεντρικός στόχος του Π.Δ. 51/2007 είναι η διατήρηση και επίτευξη της καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Για τον σκοπό αυτό καθορίζονται διαδικασίες παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων,

αξιολόγησης των ανθρωπογενών πιέσεων και λήψης μέτρων για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης (Π.Δ. 51/2007).

Το διάταγμα περιγράφει αναλυτικά τη διαδικασία κατάρτισης των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΣΔΛΑΠ), τα οποία αποτελούν το βασικό εργαλείο σχεδιασμού της υδατικής πολιτικής σε κάθε Υδατικό Διαμέρισμα της χώρας. Μέσω των σχεδίων αυτών αξιολογείται η κατάσταση των υδατικών σωμάτων, προσδιορίζονται οι κύριες πιέσεις και καθορίζονται τα απαραίτητα μέτρα για την προστασία και αποκατάστασή τους (ΥΠΕΝ, 2024).

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην παρακολούθηση των σημειακών πηγών ρύπανσης, στις οποίες περιλαμβάνονται και οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Η ορθή λειτουργία των εγκαταστάσεων αυτών θεωρείται κρίσιμη για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που θέτει το διάταγμα, καθώς συμβάλλει στη μείωση των οργανικών φορτίων, των θρεπτικών στοιχείων και άλλων ρύπων που καταλήγουν στους υδάτινους αποδέκτες (Π.Δ. 51/2007).

Παράλληλα, το Π.Δ. 51/2007 υιοθετεί την αρχή της πρόληψης της ρύπανσης και της βιώσιμης χρήσης των υδατικών πόρων. Σύμφωνα με τη φιλοσοφία αυτή, η προστασία των υδάτων δεν περιορίζεται μόνο στον έλεγχο των απορρίψεων, αλλά περιλαμβάνει και τον σχεδιασμό κατάλληλων υποδομών διαχείρισης λυμάτων, τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων και την εφαρμογή τεχνολογιών που μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Οδηγία 2000/60/EK).

Για τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, το Π.Δ. 51/2007 έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς θέτει τους περιβαλλοντικούς στόχους που πρέπει να επιτυγχάνονται ανεξάρτητα από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Επομένως, η επιλογή μιας αποκεντρωμένης λύσης είναι αποδεκτή εφόσον εξασφαλίζεται η προστασία των υδατικών αποδεκτών και η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις ποιότητας που προβλέπει η εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Συνολικά, το Π.Δ. 51/2007 αποτελεί τον βασικό εφαρμοστικό μηχανισμό της ελληνικής πολιτικής διαχείρισης υδάτων και συμπληρώνει τον Ν. 3199/2003, καθορίζοντας τις διαδικασίες μέσω των οποίων επιδιώκεται η προστασία των υδατικών πόρων και η επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που θέτει η ευρωπαϊκή νομοθεσία.

2.2.5 ΚΥΑ 145116/2011 – Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων

Η Κοινή Υπουργική Απόφαση 145116/2011 (ΦΕΚ 354/Β/08.03.2011), όπως τροποποιήθηκε μεταγενέστερα από την ΚΥΑ 191002/2013, αποτελεί το βασικό θεσμικό πλαίσιο για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα. Η θέσπισή της σηματοδότησε ένα σημαντικό βήμα προς την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, καθώς για πρώτη φορά καθορίστηκαν συγκεκριμένες προϋποθέσεις, ποιοτικά κριτήρια και διαδικασίες αδειοδότησης για την αξιοποίηση επεξεργασμένων εκροών (ΚΥΑ 145116/2011).

Η ανάγκη για επαναχρησιμοποίηση νερού είναι ιδιαίτερα σημαντική για την Ελλάδα, λόγω των έντονων χωρικών και εποχικών ανισοτήτων στη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων. Σε πολλές περιοχές της χώρας, ιδιαίτερα στα νησιά και στις ξηροθερμικές περιοχές της νότιας Ελλάδας, η ζήτηση νερού υπερβαίνει συχνά τα διαθέσιμα αποθέματα, γεγονός που καθιστά αναγκαία την αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών νερού (ΥΠΕΝ, 2024).

Η ΚΥΑ καθορίζει διαφορετικές κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης ανάλογα με την τελική χρήση του ανακτημένου νερού. Οι κυριότερες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη γεωργική άρδευση, την άρδευση αστικού και περιαστικού πρασίνου, τις βιομηχανικές χρήσεις, τον εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων και άλλες περιβαλλοντικές εφαρμογές. Για κάθε κατηγορία προβλέπονται συγκεκριμένα ποιοτικά όρια, τα οποία αφορούν φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους, ώστε να διασφαλίζεται η προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος (ΚΥΑ 145116/2011).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μικροβιολογική ποιότητα της εκροής, καθώς η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους κατά την επαναχρησιμοποίηση νερού. Για τον λόγο αυτό προβλέπονται αυστηρά όρια για δείκτες όπως τα κολοβακτηριοειδή και το *Escherichia coli*, καθώς και απαιτήσεις απολύμανσης όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο (ΚΥΑ 145116/2011).

Η εφαρμογή της συγκεκριμένης νομοθεσίας συνδέεται άμεσα με τις σύγχρονες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων. Συστήματα όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), τα υβριδικά συστήματα SBR-MBR, τα A2O-MBR και άλλες προηγμένες τεχνολογίες μπορούν να παράγουν εκροή υψηλής ποιότητας, η οποία σε πολλές περιπτώσεις πληροί τις απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης μετά από κατάλληλη

απολύμανση. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τις τεχνολογίες αυτές ιδιαίτερα ελκυστικές για εφαρμογές αποκεντρωμένης διαχείρισης λυμάτων, όπου η ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση νερού μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη (Angelakis & Gikas, 2014).

Παράλληλα, η ΚΥΑ 145116/2011 προωθεί έμμεσα τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, καθώς αντιμετωπίζει το επεξεργασμένο νερό ως αξιοποιήσιμο πόρο και όχι ως απόβλητο προς διάθεση. Η προσέγγιση αυτή είναι απολύτως εναρμονισμένη με τις σύγχρονες ευρωπαϊκές πολιτικές διαχείρισης υδάτων και με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741 για την επαναχρησιμοποίηση του νερού, ο οποίος τέθηκε σε εφαρμογή αρκετά χρόνια αργότερα (Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741).

Συνολικά, η ΚΥΑ 145116/2011 αποτελεί το βασικό ελληνικό νομοθέτημα για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και δημιουργεί το απαραίτητο θεσμικό πλαίσιο για την αξιοποίηση των εκροών από σύγχρονες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Η σημασία της είναι ιδιαίτερα αυξημένη για τις προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες τεχνολογίες και επεξεργασίας, οι οποίες μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στην εξοικονόμηση υδατικών πόρων και στη βιώσιμη διαχείριση του νερού.

2.2.6 Κατευθυντήριες οδηγίες για μικρούς οικισμούς και αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Η διαχείριση των λυμάτων σε μικρούς οικισμούς αποτελεί διαχρονικά μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της περιβαλλοντικής πολιτικής στην Ελλάδα. Η γεωμορφολογία της χώρας, η ύπαρξη μεγάλου αριθμού μικρών οικισμών, οι έντονες υψομετρικές διαφορές και η παρουσία πολυάριθμων νησιωτικών περιοχών καθιστούν συχνά τεχνικά δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη την κατασκευή εκτεταμένων αποχετευτικών δικτύων και κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, οι οικισμοί κάτω των 2.000 ισοδύναμων κατοίκων δεν υποχρεούνται απαραίτητα να εξυπηρετούνται από συμβατικά αποχετευτικά δίκτυα, εφόσον μπορούν να εφαρμοστούν άλλα κατάλληλα συστήματα που εξασφαλίζουν ισοδύναμο επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ). Η πρόβλεψη αυτή ενσωματώθηκε και στο ελληνικό θεσμικό πλαίσιο, δημιουργώντας τη δυνατότητα εφαρμογής αποκεντρωμένων λύσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Με στόχο την υποστήριξη των φορέων τοπικής αυτοδιοίκησης και των αρμόδιων υπηρεσιών, η Ειδική Γραμματεία Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής εξέδωσε το 2012 τις **Κατευθυντήριες Γραμμές για τη Διαχείριση Λυμάτων Μικρών Οικισμών**. Το έγγραφο αυτό συγκεντρώνει τη διεθνή εμπειρία και παρουσιάζει εναλλακτικές τεχνολογικές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε μικρές κοινότητες, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες της Ελλάδας (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Στις κατευθυντήριες οδηγίες επισημαίνεται ότι η επιλογή του κατάλληλου συστήματος επεξεργασίας δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στην απόδοση απομάκρυνσης ρύπων, αλλά να λαμβάνει υπόψη και παράγοντες όπως το κόστος κατασκευής, οι απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης, η ενεργειακή κατανάλωση, η διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού, οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες και οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης της εκροής (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Οι οδηγίες παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών αποκεντρωμένης επεξεργασίας, όπως οι αντιδραστήρες ακολουθιακής λειτουργίας (SBR), οι τεχνητοί υγρότοποι (Constructed Wetlands), τα βιολογικά φίλτρα, οι αναερόβιες διεργασίες, καθώς και διάφορες προκατασκευασμένες μονάδες βιολογικής επεξεργασίας. Κοινό χαρακτηριστικό των τεχνολογιών αυτών είναι η δυνατότητα εγκατάστασης σε περιορισμένο χώρο, η ευελιξία λειτουργίας και η προσαρμογή τους στις ανάγκες μικρών ή απομακρυσμένων οικισμών (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στην ανάγκη προστασίας των υδατικών αποδεκτών και στη συμμόρφωση με τα όρια εκροής που προβλέπονται από την εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία. Οι αποκεντρωμένες λύσεις δεν αντιμετωπίζονται ως υποδεέστερες των συμβατικών κεντρικών συστημάτων, αλλά ως εναλλακτικές τεχνολογίες που μπορούν να επιτύχουν ισοδύναμο επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας όταν σχεδιάζονται και λειτουργούν σωστά (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Η σημασία των κατευθυντήριων αυτών οδηγιών είναι ιδιαίτερα μεγάλη για την παρούσα εργασία, καθώς αποτελούν το βασικό ελληνικό κείμενο αναφοράς για την εφαρμογή αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Παράλληλα, τεκμηριώνουν τη δυνατότητα αξιοποίησης σύγχρονων προκατασκευασμένων τεχνολογιών σε μικρούς οικισμούς, νησιωτικές περιοχές και τουριστικές εγκαταστάσεις, όπου οι συμβατικές κεντρικές υποδομές δεν αποτελούν πάντοτε τη βέλτιστη λύση.

Συνολικά, οι Κατευθυντήριες Γραμμές της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση λυμάτων μικρών οικισμών, προωθώντας λύσεις που συνδυάζουν περιβαλλοντική προστασία, οικονομική βιωσιμότητα και τεχνική αξιοπιστία (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Η διαχείριση των λυμάτων σε μικρούς οικισμούς αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση για την Ελλάδα, λόγω των γεωγραφικών, δημογραφικών και αναπτυξιακών χαρακτηριστικών της χώρας. Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού μικρών και διάσπαρτων οικισμών, η έντονη νησιωτικότητα, οι ορεινές περιοχές και οι σημαντικές εποχικές διακυμάνσεις του πληθυσμού σε τουριστικές περιοχές καθιστούν συχνά δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη την εφαρμογή συμβατικών κεντρικών συστημάτων αποχέτευσης και επεξεργασίας λυμάτων (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Η ευρωπαϊκή και ελληνική νομοθεσία αναγνωρίζει τις ιδιαιτερότητες αυτές. Σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ και την ΚΥΑ 5673/400/1997, οι οικισμοί με ισοδύναμο πληθυσμό άνω των 2.000 κατοίκων οφείλουν να διαθέτουν κατάλληλα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων. Αντίθετα, για μικρότερους οικισμούς δεν απαιτείται υποχρεωτικά η ανάπτυξη κεντρικού αποχετευτικού δικτύου, εφόσον μπορούν να εφαρμοστούν άλλα κατάλληλα συστήματα που εξασφαλίζουν ισοδύναμο επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ· ΚΥΑ 5673/400/1997).

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι η κατασκευή εκτεταμένων δικτύων αποχέτευσης δεν αποτελεί πάντοτε τη βέλτιστη λύση. Σε πολλές περιπτώσεις το κόστος κατασκευής και λειτουργίας μπορεί να είναι δυσανάλογα υψηλό σε σχέση με τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό, ενώ παράλληλα οι τοπικές γεωμορφολογικές συνθήκες ενδέχεται να δυσχεραίνουν σημαντικά την ανάπτυξη κεντρικών υποδομών. Για τον λόγο αυτό, το θεσμικό πλαίσιο επιτρέπει την εφαρμογή αποκεντρωμένων ή μεμονωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, υπό την προϋπόθεση ότι επιτυγχάνονται οι απαιτούμενοι περιβαλλοντικοί στόχοι και τα προβλεπόμενα όρια εκροής (ΚΥΑ 5673/400/1997· ΥΠΕΚΑ, 2012).

Οι Κατευθυντήριες Γραμμές της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων τονίζουν ότι η επιλογή του κατάλληλου συστήματος επεξεργασίας δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στην αποδοτικότητα απομάκρυνσης των ρύπων, αλλά σε μια συνολική αξιολόγηση τεχνικών,

περιβαλλοντικών και οικονομικών παραμέτρων. Μεταξύ των σημαντικότερων κριτηρίων περιλαμβάνονται ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός, η διακύμανση των παροχών, τα χαρακτηριστικά του αποδέκτη, οι απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης, η ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος επένδυσης και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της επεξεργασμένης εκροής (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Παράλληλα, τα συστήματα που προορίζονται για μικρούς οικισμούς οφείλουν να διατηρούν υψηλή απόδοση ακόμη και υπό συνθήκες έντονων ημερήσιων ή εποχικών μεταβολών του φορτίου, φαινόμενο που παρατηρείται συχνά σε τουριστικές περιοχές και νησιωτικούς οικισμούς. Η απαίτηση αυτή έχει συμβάλει στην ανάπτυξη και διάδοση σύγχρονων προκατασκευασμένων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίες συνδυάζουν υψηλή αποδοτικότητα, περιορισμένες απαιτήσεις χώρου, ευελιξία λειτουργίας και δυνατότητα παραγωγής εκροής κατάλληλης για επαναχρησιμοποίηση.

Από την ανάλυση του ευρωπαϊκού και ελληνικού θεσμικού πλαισίου προκύπτει ότι η νομοθεσία δεν επιβάλλει αποκλειστικά την εφαρμογή μεγάλων κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Αντίθετα, παρέχει τη δυνατότητα υιοθέτησης εναλλακτικών αποκεντρωμένων λύσεων, εφόσον αυτές εξασφαλίζουν ισοδύναμο επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας. Η διαπίστωση αυτή αποτελεί βασικό σημείο αναφοράς της παρούσας εργασίας, καθώς τεκμηριώνει θεσμικά την εφαρμογή των προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων που εξετάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

2.3 Όρια εκροής και περιβαλλοντικές απαιτήσεις

Η αποτελεσματικότητα μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων αξιολογείται κυρίως μέσω της ποιότητας της τελικής εκροής και της συμμόρφωσής της με τα όρια που καθορίζονται από την ευρωπαϊκή και εθνική νομοθεσία. Τα όρια αυτά έχουν ως στόχο την προστασία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας των υδάτινων οικοσυστημάτων και την προστασία της δημόσιας υγείας (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ· ΚΥΑ 5673/400/1997).

Η θέσπιση συγκεκριμένων ορίων εκροής επιτρέπει την αντικειμενική αξιολόγηση της απόδοσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και εξασφαλίζει ότι η διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων πραγματοποιείται χωρίς να προκαλούνται αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Παράλληλα, τα όρια αυτά αποτελούν

βασικό κριτήριο επιλογής και σχεδιασμού των τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων, καθώς κάθε σύστημα πρέπει να είναι ικανό να επιτυγχάνει τις απαιτούμενες συγκεντρώσεις ρύπων στην τελική εκροή (Metcalf & Eddy, 2014).

2.3.1 Βασικές παράμετροι ελέγχου της ποιότητας εκροής

Η αξιολόγηση της ποιότητας των επεξεργασμένων λυμάτων βασίζεται σε συγκεκριμένες φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους, οι οποίες χρησιμοποιούνται διεθνώς για τον έλεγχο της απόδοσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας.

Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους είναι το Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο πέντε ημερών (BOD_5), το οποίο εκφράζει την ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη βιολογική αποικοδόμηση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς. Υψηλές συγκεντρώσεις BOD_5 στην εκροή υποδηλώνουν ανεπαρκή επεξεργασία και ενδέχεται να προκαλέσουν μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στους υδάτινους αποδέκτες (Metcalf & Eddy, 2014).

Εξίσου σημαντικό είναι το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD), το οποίο εκφράζει το συνολικό οργανικό φορτίο που μπορεί να οξειδωθεί χημικά. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της συνολικής οργανικής ρύπανσης και συμπληρώνει την πληροφορία που παρέχει το BOD_5 (Tchobanoglous et al., 2014).

Τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (Total Suspended Solids – TSS) αποτελούν επίσης βασικό δείκτη ποιότητας, καθώς αντιπροσωπεύουν τα στερεά σωματίδια που παραμένουν σε αιώρηση στο νερό. Υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών μπορούν να προκαλέσουν θολότητα, υποβάθμιση των οικοσυστημάτων και μεταφορά παθογόνων μικροοργανισμών (Metcalf & Eddy, 2014).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν επίσης οι παράμετροι που σχετίζονται με τα θρεπτικά στοιχεία, κυρίως το ολικό άζωτο (TN) και τον ολικό φώσφορο (TP). Η ανεξέλεγκτη διάθεση αζώτου και φωσφόρου σε υδάτινους αποδέκτες μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα ευτροφισμού, τα οποία προκαλούν ανάπτυξη φυκών, μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων (UNEP, 2016).

Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις παρακολουθούνται μικροβιολογικές παράμετροι, όπως τα ολικά κολοβακτηριοειδή και το *Escherichia coli*, ιδιαίτερα όταν η εκροή προορίζεται για επαναχρησιμοποίηση ή όταν η διάθεση πραγματοποιείται σε περιοχές αυξημένης περιβαλλοντικής ή υγειονομικής ευαισθησίας (KYA 145116/2011).

Πίνακας 1 Βασικές παράμετροι αξιολόγησης της ποιότητας των αστικών λυμάτων

Παράμετρος	Περιγραφή
BOD ₅	Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο
COD	Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο
TSS	Ολικά αιωρούμενα στερεά
TN	Ολικό άζωτο
TP	Ολικός φώσφορος
E. coli	Μικροβιολογικός δείκτης

2.3.2 Νομοθετικά όρια εκροής σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ και την ΚΥΑ 5673/400/1997

Η προστασία των υδάτινων αποδεκτών από τις επιπτώσεις των αστικών λυμάτων βασίζεται στον καθορισμό συγκεκριμένων ορίων ποιότητας για την τελική εκροή των εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Τα όρια αυτά θεσπίστηκαν σε ευρωπαϊκό επίπεδο μέσω της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ και ενσωματώθηκαν στην ελληνική νομοθεσία με την ΚΥΑ 5673/400/1997 (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ· ΚΥΑ 5673/400/1997).

Οι απαιτήσεις της νομοθεσίας διαφοροποιούνται ανάλογα με το μέγεθος του οικισμού και τα χαρακτηριστικά του τελικού αποδέκτη. Για τους συνήθεις αποδέκτες προβλέπονται συγκεκριμένα ανώτατα όρια συγκέντρωσης για το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο πέντε ημερών (BOD₅), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS ή SS). Παράλληλα, εκτός από τη μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση, η νομοθεσία καθορίζει και το ελάχιστο ποσοστό απομάκρυνσης των ρύπων σε σχέση με το εισερχόμενο φορτίο, εξασφαλίζοντας ότι οι εγκαταστάσεις επιτυγχάνουν ουσιαστική επεξεργασία των λυμάτων (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ).

Για τις περισσότερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων, το όριο εκροής για το BOD₅ καθορίζεται στα 25 mg/L, ενώ για το COD στα 125 mg/L. Αντίστοιχα, τα αιωρούμενα στερεά δεν πρέπει να υπερβαίνουν συνήθως τα 35 mg/L, ενώ παράλληλα απαιτείται σημαντική ποσοστιαία μείωση των συγκεντρώσεων σε σχέση με τα

ανεπεξέργαστα λύματα. Οι απαιτήσεις αυτές αντανakλούν το ελάχιστο επίπεδο δευτεροβάθμιας επεξεργασίας που απαιτείται από τη νομοθεσία για την προστασία των υδάτινων αποδεκτών (ΚΥΑ 5673/400/1997).

Σε περιοχές που χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητοι αποδέκτες, οι απαιτήσεις γίνονται αυστηρότερες. Εκτός από τα όρια για το οργανικό φορτίο και τα αιωρούμενα στερεά, προβλέπεται και η απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων, κυρίως αζώτου και φωσφόρου. Η απαίτηση αυτή σχετίζεται με την ανάγκη πρόληψης του ευτροφισμού, δηλαδή της υπερβολικής ανάπτυξης φυκών και υδρόβιας βλάστησης λόγω αυξημένων συγκεντρώσεων θρεπτικών ουσιών στα υδάτινα οικοσυστήματα (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ).

Η συμμόρφωση με τα νομοθετικά όρια εκροής αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη νόμιμη λειτουργία μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων και παράλληλα βασικό κριτήριο αξιολόγησης της απόδοσης των τεχνολογιών επεξεργασίας. Για τον λόγο αυτό, τα όρια που καθορίζονται από την ευρωπαϊκή και ελληνική νομοθεσία χρησιμοποιούνται ευρέως ως σημείο αναφοράς κατά τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων και ιδιαίτερα κατά την αξιολόγηση σύγχρονων αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων.

Πίνακας 2 Απαιτούμενα όρια εκροής σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για κανονικούς και ευαίσθητους αποδέκτες.

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΟΡΙΑ ΕΚΡΟΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 91/271/ΕΕ		
ΚΑΝΟΝΙΚΟΙ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ		
Παράμετρος Ρύπανσης	Μέγιστο Επιτρεπόμενο Όριο	Ελάχιστο ποσοστιαία μείωση εισερχόμενου φορτίου (εναλλακτικά*)
BOD 5 στους 20οC (χωρίς νιτροποίηση)	25 mg/l	70-90%
COD	125 mg/l	75%
SS	35 mg/l	90%
	για ΟΙΚΙΣΜΟΥΣ ΜΕ Μ.Ι.Π. > 10.000	
	60 mg/l	70%
	για ΟΙΚΙΣΜΟΥΣ ΜΕ Μ.Ι.Π. 2.000 - 10.000	
ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΙ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ		
(ισχύουν τα ανωτέρω όρια κι επιπλέον τα ακόλουθα)		
P _{total}	2 mg/l	80%
	για ΟΙΚΙΣΜΟΥΣ ΜΕ Μ.Ι.Π. 10.000 - 100.000	
	1 mg/l	
	για ΟΙΚΙΣΜΟΥΣ ΜΕ Μ.Ι.Π. > 100.000	
N _{total} (**)	15 mg/l	70-80%
	για ΟΙΚΙΣΜΟΥΣ ΜΕ Μ.Ι.Π. 10.000 - 100.000	
	10 mg/l	
	για ΟΙΚΙΣΜΟΥΣ ΜΕ Μ.Ι.Π. > 100.000	

* εναλλακτικά εφαρμόζεται η τιμή συγκέντρωσης ή και το ελάχιστο επιβαλλόμενο όριο μείωσης ρύπανσης επεξεργασμένων αστικών λυμάτων

** Ως ολικό άζωτο ορίζεται το άθροισμα του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (οργανικό και NH₄), του αζώτου των νιτρικών (NO₃)

και του αζώτου των νιτρωδών ιόντων (NO₂)

***Η απαίτηση είναι προαιρετική

2.3.3 Πρόσθετες απαιτήσεις για ευαίσθητες περιοχές

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία αναγνωρίζει ότι ορισμένοι υδάτινοι αποδέκτες παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία στη ρύπανση και συνεπώς απαιτούν αυστηρότερα μέτρα προστασίας. Για τον λόγο αυτό, η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ εισάγει την έννοια των «ευαίσθητων περιοχών», δηλαδή υδάτινων σωμάτων στα οποία η απόρριψη ανεπαρκώς επεξεργασμένων λυμάτων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ).

Ως ευαίσθητες περιοχές χαρακτηρίζονται κυρίως λίμνες, ταμιευτήρες, εκβολές ποταμών, κλειστοί κόλποι και παράκτιες περιοχές που παρουσιάζουν ή ενδέχεται να παρουσιάσουν φαινόμενα ευτροφισμού. Ο ευτροφισμός αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μορφές υποβάθμισης των υδάτινων οικοσυστημάτων και προκαλείται από

την υπερβολική εισροή θρεπτικών στοιχείων, κυρίως ενώσεων αζώτου και φωσφόρου. Η αυξημένη συγκέντρωση των στοιχείων αυτών οδηγεί σε υπερβολική ανάπτυξη φυκιών και υδρόβιας βλάστησης, με αποτέλεσμα τη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου, την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων και τη διατάραξη της οικολογικής ισορροπίας των υδάτινων οικοσυστημάτων (UNEP, 2016· UNESCO, 2020).

Για την προστασία των ευαίσθητων αποδεκτών, η Οδηγία 91/271/ΕΟΚ και η ΚΥΑ 5673/400/1997 προβλέπουν πρόσθετες απαιτήσεις επεξεργασίας πέραν της συμβατικής απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών. Συγκεκριμένα, απαιτείται η αποτελεσματική απομάκρυνση του ολικού αζώτου (TN) και του ολικού φωσφόρου (TP), ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν μεγάλους πληθυσμούς και απορρίπτουν την εκροή τους σε ευαίσθητους αποδέκτες (ΚΥΑ 5673/400/1997).

Σύμφωνα με τη νομοθεσία, για οικισμούς που εξυπηρετούν πληθυσμό μεταξύ 10.000 και 100.000 ισοδύναμων κατοίκων, το ολικό άζωτο στην εκροή δεν θα πρέπει να υπερβαίνει συνήθως τα 15 mg/L, ενώ για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις το όριο μειώνεται στα 10 mg/L. Αντίστοιχα, για τον ολικό φώσφορο προβλέπονται όρια της τάξης των 2 mg/L και 1 mg/L αντίστοιχα, ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ).

Οι απαιτήσεις αυτές έχουν σημαντική επίδραση στον σχεδιασμό των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, καθώς η επίτευξή τους απαιτεί την εφαρμογή προηγμένων βιολογικών ή φυσικοχημικών διεργασιών απομάκρυνσης θρεπτικών στοιχείων. Τεχνολογίες όπως τα συστήματα ενεργού ιλύος με απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου, οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), τα υβριδικά συστήματα A2O-MBR και άλλες προηγμένες διεργασίες έχουν αναπτυχθεί ακριβώς για να ανταποκρίνονται στις αυξημένες αυτές απαιτήσεις (Metcalf & Eddy, 2014).

Η σημασία των ευαίσθητων περιοχών είναι ιδιαίτερα μεγάλη για χώρες όπως η Ελλάδα, όπου πολλές λίμνες, παράκτιες ζώνες και κλειστοί κόλποι παρουσιάζουν αυξημένη περιβαλλοντική ευαισθησία. Ως αποτέλεσμα, η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις απομάκρυνσης αζώτου και φωσφόρου αποτελεί κρίσιμο παράγοντα κατά την επιλογή και αξιολόγηση των τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου εξετάζεται η εφαρμογή αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων.

2.3.4 Απαιτήσεις για επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες σύγχρονες πρακτικές βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η πρακτική αυτή συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών υδατικών αποθεμάτων, στην αντιμετώπιση προβλημάτων λειψυδρίας και στην προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Ιδιαίτερα σε χώρες με περιορισμένους υδατικούς πόρους, όπως η Ελλάδα, η αξιοποίηση της επεξεργασμένης εκροής μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο εξοικονόμησης νερού και προστασίας του περιβάλλοντος (ΚΥΑ 145116/2011· Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741).

Το ελληνικό θεσμικό πλαίσιο για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων καθορίζεται κυρίως από την ΚΥΑ 145116/2011, η οποία θεσπίζει συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση της εκροής. Οι απαιτήσεις αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με τον βαθμό έκθεσης του ανθρώπου στο επεξεργασμένο νερό και τον δυνητικό περιβαλλοντικό κίνδυνο που μπορεί να προκύψει από τη χρήση του (ΚΥΑ 145116/2011).

Οι κυριότερες κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης περιλαμβάνουν την περιορισμένη και απερίοριστη άρδευση γεωργικών καλλιεργειών, την άρδευση αστικού και περιαστικού πρασίνου, τη βιομηχανική χρήση, καθώς και τον εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων. Για κάθε κατηγορία καθορίζονται διαφορετικά ποιοτικά κριτήρια ως προς τις φυσικοχημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους της εκροής, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις απαιτείται απολύμανση ή και προχωρημένη επεξεργασία πριν από την τελική διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση (ΚΥΑ 145116/2011).

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στις μικροβιολογικές παραμέτρους, καθώς η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών μπορεί να δημιουργήσει κινδύνους για τη δημόσια υγεία. Για τον λόγο αυτό προβλέπονται αυστηρά όρια για δείκτες όπως το *Escherichia coli* και απαιτούνται κατάλληλες διεργασίες απολύμανσης, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η ανθρώπινη έκθεση στο ανακτημένο νερό είναι πιθανή (ΚΥΑ 145116/2011).

Η ποιότητα της εκροής που απαιτείται για επαναχρησιμοποίηση είναι συνήθως υψηλότερη από εκείνη που απαιτείται για απλή διάθεση σε υδάτινους αποδέκτες. Ως αποτέλεσμα, οι εγκαταστάσεις που προορίζονται για παραγωγή ανακτημένου νερού συχνά ενσωματώνουν προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας, όπως βιοαντιδραστήρες

μεμβρανών (MBR), προηγμένα συστήματα απολύμανσης και διεργασίες απομάκρυνσης θρεπτικών στοιχείων, προκειμένου να επιτυγχάνουν τις απαιτούμενες προδιαγραφές ποιότητας (Metcalf & Eddy, 2014).

Η αυξανόμενη έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση νερού αντανακλάται και στο ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο μέσω του Κανονισμού (ΕΕ) 2020/741, ο οποίος εισάγει ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας και διαχείρισης κινδύνου για την επαναχρησιμοποίηση νερού στη γεωργία. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη μετάβαση από τη συμβατική διάθεση λυμάτων προς μια ολοκληρωμένη διαχείριση πόρων, όπου το επεξεργασμένο νερό αντιμετωπίζεται ως πολύτιμος και αξιοποιήσιμος πόρος (Κανονισμ

Ποιότητα εκροής και απαιτούμενος βαθμός επεξεργασίας λυμάτων ανάλογα με τον αποδέκτη και τη χρήση της εκροής.

Πηγή: Ροϊκός (2012), Τελική Έκθεση ΥΠΕΚΑ.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, οι απαιτήσεις ποιότητας της εκροής διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με τον τελικό αποδέκτη και τη χρήση του επεξεργασμένου νερού. Οι αυστηρότερες απαιτήσεις εφαρμόζονται στις περιπτώσεις απεριόριστης άρδευσης, αστικής χρήσης και εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων, όπου απαιτείται υψηλός βαθμός επεξεργασίας και απολύμανσης. Αντίθετα, σε ορισμένες περιπτώσεις διάθεσης σε μη ευαίσθητους αποδέκτες είναι δυνατόν να εφαρμοστούν λιγότερο απαιτητικά επίπεδα επεξεργασίας, εφόσον διασφαλίζεται η προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας (ΚΥΑ 145116/2011· Ροϊκός, 2012).

2.3.5 Σύνδεση των νομοθετικών απαιτήσεων με τα αποκεντρωμένα προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Η ευρωπαϊκή και ελληνική νομοθεσία θέτουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ως προς την ποιότητα της εκροής των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, ανεξάρτητα από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν κυρίως την απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών, θρεπτικών συστατικών και παθογόνων

μικροοργανισμών, με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας και των υδατικών αποδεκτών (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ· ΚΥΑ 5673/400/1997).

Παράλληλα, το ισχύον θεσμικό πλαίσιο δεν επιβάλλει αποκλειστικά την εφαρμογή μεγάλων κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, αλλά επιτρέπει τη χρήση εναλλακτικών τεχνολογικών λύσεων, εφόσον επιτυγχάνεται ισοδύναμο επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για μικρούς οικισμούς, νησιωτικές περιοχές και απομακρυσμένες κοινότητες, όπου τα συμβατικά συστήματα συχνά συνοδεύονται από υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Η αυστηροποίηση των απαιτήσεων σχετικά με την απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου, καθώς και η αυξανόμενη έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων. Στο πλαίσιο αυτό, τα αποκεντρωμένα προκατασκευασμένα συστήματα αποτελούν μια ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή, καθώς μπορούν να επιτύχουν υψηλή ποιότητα εκροής με σχετικά μικρές απαιτήσεις χώρου και αυξημένη λειτουργική ευελιξία (Metcalf & Eddy, 2014).

Επιπλέον, πολλές από τις σύγχρονες τεχνολογίες προκατασκευασμένων συστημάτων έχουν τη δυνατότητα παραγωγής εκροής κατάλληλης για επαναχρησιμοποίηση, συμβάλλοντας στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων (ΚΥΑ 145116/2011· Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741). Η δυνατότητα αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους, όπως αρκετές νησιωτικές και τουριστικές περιοχές της Ελλάδας.

Με βάση τα παραπάνω, η αξιολόγηση των αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνική τους απόδοση, αλλά επεκτείνεται και στην ικανότητά τους να συμμορφώνονται με τις σύγχρονες νομοθετικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Για τον λόγο αυτό, στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται και αξιολογούνται οι κυριότερες τεχνολογίες αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων, με έμφαση στην απόδοσή τους, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και τη δυνατότητα εφαρμογής τους στις ελληνικές συνθήκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. Βασικές έννοιες και κατηγοριοποίηση συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

Η αποτελεσματική διαχείριση και επεξεργασία των αστικών λυμάτων προϋποθέτει την κατανόηση τόσο των χαρακτηριστικών των λυμάτων όσο και των βασικών αρχών λειτουργίας των συστημάτων επεξεργασίας. Η σύσταση των λυμάτων, η παρουσία οργανικών και ανόργανων ρύπων, τα θρεπτικά στοιχεία και οι μικροοργανισμοί επηρεάζουν άμεσα την επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών και τη συνολική απόδοση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Παράλληλα, η αξιολόγηση και η σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών απαιτεί την κατανόηση βασικών παραμέτρων σχεδιασμού και λειτουργίας, όπως το οργανικό φορτίο, ο χρόνος παραμονής, η παραγωγή ιλύος και η ενεργειακή κατανάλωση. Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται διεθνώς για την εκτίμηση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων (Tchobanoglous et al., 2014).

Τα αστικά λύματα αποτελούν ένα σύνθετο μίγμα νερού, οργανικών και ανόργανων ουσιών, αιωρούμενων στερεών, θρεπτικών συστατικών και μικροοργανισμών που προέρχονται από οικιακές, εμπορικές και άλλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η σύνθεση και τα χαρακτηριστικά τους μεταβάλλονται ανάλογα με τον πληθυσμό που εξυπηρετείται, τις καταναλώσεις νερού, τις τοπικές συνθήκες και τις πιθανές εισροές βιομηχανικών αποβλήτων στο αποχετευτικό δίκτυο (Metcalf & Eddy, 2014).

Ο όρος **ρυπαντικό φορτίο** αναφέρεται στη συνολική ποσότητα ρύπων που περιέχεται στα λύματα και εισέρχεται σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το ρυπαντικό φορτίο αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, καθώς καθορίζει τις απαιτήσεις των επιμέρους διεργασιών και επηρεάζει άμεσα την απόδοση του συστήματος. Η αξιολόγηση του ρυπαντικού φορτίου πραγματοποιείται μέσω φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων, όπως τα αιωρούμενα στερεά (TSS), το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), το άζωτο, ο φώσφορος και η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών (Tchobanoglous et al., 2014).

Η κατανόηση των χαρακτηριστικών των αστικών λυμάτων είναι απαραίτητη για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας επεξεργασίας, τον καθορισμό των λειτουργικών παραμέτρων και την επίτευξη των απαιτήσεων που θέτει η περιβαλλοντική νομοθεσία. Για τον λόγο αυτό, στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα βασικά φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων, τα οποία αποτελούν τη βάση για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των συστημάτων επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά τα βασικά χαρακτηριστικά και η σύσταση των αστικών λυμάτων, καθώς και οι σημαντικότερες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ποιότητάς τους και της απόδοσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων με βάση τον τρόπο λειτουργίας, την κλίμακα εφαρμογής και τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά τους, ώστε να δημιουργηθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάλυση των αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια.

3.1.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων αποτελούν βασικούς δείκτες για την αξιολόγηση της ποιότητάς τους και επηρεάζουν σημαντικά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Οι φυσικές παράμετροι παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την παρουσία στερεών, τη θερμοκρασία, το χρώμα, την οσμή και τη θολότητα των λυμάτων, ενώ συχνά αποτελούν τις πρώτες ενδείξεις για την ύπαρξη ρύπανσης ή μεταβολών στη σύστασή τους (Metcalf & Eddy, 2014).

Η θερμοκρασία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες φυσικές παραμέτρους, καθώς επηρεάζει άμεσα τη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών που συμμετέχουν στις διεργασίες επεξεργασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει γενικά τους ρυθμούς των βιολογικών αντιδράσεων, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό. Για τα αστικά λύματα, η θερμοκρασία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10 και 25°C, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του αποχετευτικού δικτύου (Tchobanoglous et al., 2014).

Το χρώμα των λυμάτων αποτελεί επίσης σημαντικό δείκτη της κατάστασής τους. Τα νωπά αστικά λύματα εμφανίζουν συνήθως γκριζωπό χρώμα, ενώ η παραμονή τους για

μεγάλο χρονικό διάστημα σε αναερόβιες συνθήκες οδηγεί στην ανάπτυξη σκούρου γκρι ή μαύρου χρωματισμού λόγω σχηματισμού θειούχων ενώσεων και άλλων προϊόντων αποσύνθεσης (Hammer & Hammer, 2012).

Η οσμή των λυμάτων σχετίζεται κυρίως με τα προϊόντα της βιολογικής αποδόμησης της οργανικής ύλης. Τα φρέσκα λύματα εμφανίζουν σχετικά ήπια οσμή, ενώ σε συνθήκες αναερόβιας αποσύνθεσης παράγονται δύσοσμα αέρια, όπως το υδρόθειο (H_2S), η αμμωνία και διάφορες πτητικές οργανικές ενώσεις. Η παρουσία έντονης οσμής αποτελεί συνήθως ένδειξη ανεπαρκούς αερισμού ή παρατεταμένης παραμονής των λυμάτων στο δίκτυο συλλογής (Metcalf & Eddy, 2014).

Η θολότητα εκφράζει την παρουσία αιωρούμενων και κολλοειδών σωματιδίων στο νερό και χρησιμοποιείται ως δείκτης της συγκέντρωσης στερεών ουσιών. Υψηλή θολότητα συνδέεται συνήθως με αυξημένο οργανικό φορτίο και μεγάλη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα ορισμένων διεργασιών επεξεργασίας και απολύμανσης (Spellman, 2013).

Ιδιαίτερη σημασία έχουν τα στερεά που περιέχονται στα λύματα. Τα στερεά διακρίνονται σε ολικά στερεά (Total Solids – TS), διαλυμένα στερεά (Total Dissolved Solids – TDS) και αιωρούμενα στερεά (Total Suspended Solids – TSS). Τα αιωρούμενα στερεά αποτελούν μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους παρακολούθησης της ποιότητας των λυμάτων, καθώς σχετίζονται άμεσα με την απόδοση των διεργασιών καθίζησης και βιολογικής επεξεργασίας. Η απομάκρυνσή τους αποτελεί βασική απαίτηση της ευρωπαϊκής και ελληνικής νομοθεσίας για τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ· ΚΥΑ 5673/400/1997).

Η κατανόηση των φυσικών χαρακτηριστικών των αστικών λυμάτων είναι απαραίτητη για την επιλογή των κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας και τον αποτελεσματικό έλεγχο της λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Παράλληλα, οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση της ποιότητας τόσο των εισερχόμενων λυμάτων όσο και της τελικής εκροής μετά την επεξεργασία.

Πίνακας 3 Βασικά φυσικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων

Παράμετρος	Σημασία
Θερμοκρασία	Επηρεάζει τη βιολογική δραστηριότητα
Χρώμα	Ένδειξη βαθμού αποσύνθεσης
Οσμή	Δείκτης αναερόβιων συνθηκών
Θολότητα	Ένδειξη συγκέντρωσης στερεών
TS	Ολικά στερεά
TDS	Διαλυμένα στερεά
TSS	Αιωρούμενα στερεά

3.1.2 Χημικά χαρακτηριστικά

Τα χημικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων αποτελούν βασικό παράγοντα για την αξιολόγηση της ποιότητάς τους και τον σχεδιασμό των κατάλληλων διεργασιών επεξεργασίας. Οι χημικές παράμετροι παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη συγκέντρωση οργανικών και ανόργανων ουσιών, την παρουσία θρεπτικών στοιχείων και τη συνολική ρυπαντική επιβάρυνση των λυμάτων (Metcalf & Eddy, 2014).

Η σημαντικότερη κατηγορία χημικών συστατικών είναι η οργανική ύλη, η οποία προέρχεται κυρίως από ανθρώπινα απόβλητα, υπολείμματα τροφών, απορρυπαντικά και άλλες οικιακές δραστηριότητες. Η οργανική ύλη αποτελεί το κύριο ρυπαντικό φορτίο των αστικών λυμάτων και η απομάκρυνσή της αποτελεί βασικό στόχο κάθε συστήματος επεξεργασίας (Tchobanoglous et al., 2014).

Η παρουσία οργανικών ουσιών εκτιμάται συνήθως μέσω παραμέτρων όπως το Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο πέντε ημερών (BOD_5) και το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD). Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως για την ποσοτικοποίηση του οργανικού φορτίου και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των διεργασιών επεξεργασίας. Το BOD_5 εκφράζει την ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη βιολογική αποδόμηση της οργανικής ύλης, ενώ το COD αντιπροσωπεύει τη συνολική ποσότητα οργανικών ουσιών που μπορούν να οξειδωθούν χημικά (Metcalf & Eddy, 2014).

Εκτός από την οργανική ύλη, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν τα θρεπτικά στοιχεία, κυρίως οι ενώσεις του αζώτου και του φωσφόρου. Το άζωτο στα αστικά λύματα απαντάται σε διάφορες μορφές, όπως οργανικό άζωτο, αμμωνιακό άζωτο (NH_4^+), νιτρώδη (NO_2^-) και

νιτρικά ιόντα (NO_3^-). Ο φώσφορος προέρχεται κυρίως από ανθρώπινα απόβλητα και απορρυπαντικά και συναντάται σε οργανικές και ανόργανες μορφές. Η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων αζώτου και φωσφόρου μπορεί να συμβάλει στην εμφάνιση φαινομένων ευτροφισμού όταν τα λύματα διατίθενται σε υδάτινους αποδέκτες χωρίς επαρκή επεξεργασία (Hammer & Hammer, 2012).

Σημαντική χημική παράμετρο αποτελεί επίσης το pH, το οποίο εκφράζει την οξύτητα ή αλκαλικότητα των λυμάτων. Τα αστικά λύματα παρουσιάζουν συνήθως τιμές pH μεταξύ 6,5 και 8,5, εύρος το οποίο θεωρείται κατάλληλο για τη λειτουργία των βιολογικών διεργασιών επεξεργασίας. Μεγάλες αποκλίσεις από τις τιμές αυτές μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών και την απόδοση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Παράλληλα, στα αστικά λύματα περιέχονται διάφορα ανόργανα συστατικά, όπως χλωριόντα, θειικά, ανθρακικά και διττανθρακικά άλατα, καθώς και ιχνοστοιχεία και μέταλλα σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Αν και τα συστατικά αυτά συνήθως δεν αποτελούν το κύριο ρυπαντικό φορτίο, η παρουσία τους μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία ορισμένων διεργασιών επεξεργασίας και την ποιότητα της τελικής εκροής (Tchobanoglous et al., 2014).

Η γνώση των χημικών χαρακτηριστικών των αστικών λυμάτων είναι απαραίτητη για την επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας και για την αποτελεσματική παρακολούθηση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Παράλληλα, πολλές από τις παραμέτρους αυτές χρησιμοποιούνται ως βασικοί δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης των συστημάτων επεξεργασίας και αναλύονται εκτενέστερα στην επόμενη ενότητα.

Πίνακας 4 Βασικά χημικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων

Παράμετρος	Σημασία
BOD ₅	Εκτίμηση βιοαποδομήσιμου οργανικού φορτίου
COD	Εκτίμηση συνολικού οργανικού φορτίου

Παράμετρος	Σημασία
pH	Οξύτητα ή αλκαλικότητα
Ολικό Άζωτο (TN)	Θρεπτικό στοιχείο – ευτροφισμός
Ολικός Φώσφορος (TP)	Θρεπτικό στοιχείο – ευτροφισμός
Αλκαλικότητα	Ρυθμιστική ικανότητα του συστήματος
Ανόργανα άλατα	Επηρεάζουν διεργασίες και ποιότητα εκροής

3.1.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά

Τα αστικά λύματα περιέχουν μεγάλο αριθμό μικροοργανισμών, οι οποίοι προέρχονται κυρίως από τα ανθρώπινα απόβλητα, το περιβάλλον και τα συστήματα συλλογής λυμάτων. Οι μικροοργανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν βακτήρια, ιούς, πρωτόζωα, μύκητες και μικροσκοπικούς πολυκύτταρους οργανισμούς. Η παρουσία τους επηρεάζει τόσο την ποιότητα των λυμάτων όσο και τη λειτουργία των συστημάτων επεξεργασίας, καθώς οι βιολογικές διεργασίες βασίζονται στη δράση εξειδικευμένων μικροοργανισμών για την αποδόμηση των οργανικών ρύπων (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα βακτήρια αποτελούν τη σημαντικότερη ομάδα μικροοργανισμών στα αστικά λύματα. Πολλά από αυτά είναι ωφέλιμα, καθώς συμμετέχουν στη βιολογική αποδόμηση της οργανικής ύλης και στην απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων όπως το άζωτο και ο φώσφορος. Παράλληλα όμως, ορισμένα βακτήρια είναι παθογόνα και μπορούν να προκαλέσουν ασθένειες στον άνθρωπο, όπως γαστρεντερίτιδες, τυφοειδή πυρετό και χολέρα (Tchobanoglous et al., 2014).

Εκτός από τα βακτήρια, σημαντική παρουσία στα λύματα έχουν και οι ιοί, οι οποίοι συνήθως προέρχονται από ανθρώπινα περιττώματα. Οι εντεροϊοί, οι αδενοϊοί και οι νοροϊοί αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα μικροοργανισμών που μπορούν να μεταδοθούν μέσω μολυσμένου νερού και να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα δημόσιας υγείας. Λόγω του μικρού μεγέθους τους, η απομάκρυνσή τους απαιτεί συνήθως αποτελεσματικές διεργασίες απολύμανσης, όπως χλωρίωση ή υπεριώδη ακτινοβολία (UV) (Spellman, 2013).

Στα αστικά λύματα συναντώνται επίσης πρωτόζωα και παράσιτα, όπως τα γένη *Giardia* και *Cryptosporidium*, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες και ενδέχεται να επιβιώσουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα στο υδάτινο περιβάλλον. Η παρουσία τους αποτελεί σημαντικό δείκτη υγειονομικού

κινδύνου, ιδιαίτερα όταν η εκροή προορίζεται για επαναχρησιμοποίηση ή απορρίπτεται σε περιοχές με έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα (Metcalf & Eddy, 2014).

Για την εκτίμηση της μικροβιολογικής ποιότητας των λυμάτων χρησιμοποιούνται συνήθως δείκτες κοπρανώδους ρύπανσης, όπως τα ολικά κολοβακτηριοειδή, τα κοπρανώδη κολοβακτηριοειδή και το βακτήριο *Escherichia coli* (*E. coli*). Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των διεργασιών επεξεργασίας και απολύμανσης, καθώς και για τον έλεγχο της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων (ΚΥΑ 145116/2011).

Η κατανόηση των βιολογικών χαρακτηριστικών των αστικών λυμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για την προστασία της δημόσιας υγείας όσο και για τον σχεδιασμό των βιολογικών συστημάτων επεξεργασίας. Οι μικροοργανισμοί αποτελούν ταυτόχρονα παράγοντες κινδύνου και βασικούς μηχανισμούς επεξεργασίας, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη συστηματική παρακολούθηση και διαχείρισή τους κατά τη λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Πίνακας 5 Βασικοί μικροοργανισμοί που απαντώνται στα αστικά λύματα

Κατηγορία	Παραδείγματα	Σημασία
Βακτήρια	<i>E. coli</i> , <i>Salmonella</i>	Δείκτες και παθογόνοι οργανισμοί
Ιοί	Enteroviruses, Noroviruses	Υγειονομικός κίνδυνος
Πρωτόζωα	<i>Giardia</i> , <i>Cryptosporidium</i>	Ανθεκτικά παθογόνα
Μύκητες	Διάφορα γένη	Συμμετοχή σε βιολογικές διεργασίες
Μικροπανίδα	Ροτιφέρες, νηματώδεις	Δείκτες βιολογικής σταθερότητας

3.2 Βασικές παράμετροι επεξεργασίας λυμάτων

Η αξιολόγηση της ποιότητας των λυμάτων και της απόδοσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας βασίζεται σε συγκεκριμένες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται διεθνώς στον σχεδιασμό, τη λειτουργία και την παρακολούθηση των συστημάτων επεξεργασίας. Οι παράμετροι αυτές επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση του οργανικού φορτίου, της

συγκέντρωσης στερεών, των θρεπτικών συστατικών και των λειτουργικών χαρακτηριστικών των διεργασιών επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Η παρακολούθηση των παραμέτρων αυτών είναι απαραίτητη τόσο για τη συμμόρφωση με τις νομοθετικές απαιτήσεις όσο και για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Επιπλέον, οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως για τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων και αποτελούν βασικά κριτήρια αξιολόγησης των αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία (Tchobanoglous et al., 2014).

3.2.1 Χαρακτηριστικά λυμάτων

Οι σημαντικότερες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ποιότητας των αστικών λυμάτων είναι το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), το ολικό άζωτο (TN) και ο ολικός φώσφορος (TP). Οι παράμετροι αυτές αποτελούν βασικούς δείκτες της ρυπαντικής επιβάρυνσης των λυμάτων και χρησιμοποιούνται τόσο στον σχεδιασμό όσο και στον έλεγχο των εγκαταστάσεων επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Το Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο πέντε ημερών (BOD_5) εκφράζει την ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη βιολογική αποδόμηση της βιοαποδομήσιμης οργανικής ύλης από τους μικροοργανισμούς. Αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες οργανικής ρύπανσης και χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των βιολογικών διεργασιών επεξεργασίας. Υψηλές τιμές BOD_5 υποδηλώνουν αυξημένο οργανικό φορτίο και μεγαλύτερες απαιτήσεις επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) αντιπροσωπεύει τη συνολική ποσότητα οργανικών ουσιών που μπορούν να οξειδωθούν χημικά. Σε αντίθεση με το BOD_5 , το οποίο μετρά μόνο το βιοαποδομήσιμο κλάσμα της οργανικής ύλης, το COD παρέχει μια πιο συνολική εικόνα της οργανικής ρύπανσης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται συχνά συμπληρωματικά με το BOD_5 για την εκτίμηση της ποιότητας των λυμάτων (Tchobanoglous et al., 2014).

Τα Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS) εκφράζουν τη συγκέντρωση των στερεών σωματιδίων που παραμένουν σε αιώρηση στο νερό. Η παράμετρος αυτή σχετίζεται άμεσα

με τη θολότητα των λυμάτων και αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας των διεργασιών καθίζησης και διήθησης. Η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών είναι σημαντική τόσο για την προστασία των αποδεκτών όσο και για τη βελτίωση της ποιότητας της τελικής εκροής (Hammer & Hammer, 2012).

Το Ολικό Άζωτο (TN) περιλαμβάνει όλες τις μορφές αζώτου που υπάρχουν στα λύματα, όπως το οργανικό άζωτο, το αμμωνιακό άζωτο, τα νιτρώδη και τα νιτρικά. Η απομάκρυνσή του είναι ιδιαίτερα σημαντική για την προστασία ευαίσθητων υδάτινων αποδεκτών, καθώς η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων αζώτου μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη φαινομένων ευτροφισμού (Metcalf & Eddy, 2014).

Αντίστοιχα, ο Ολικός Φώσφορος (TP) περιλαμβάνει το σύνολο των οργανικών και ανόργανων ενώσεων φωσφόρου που περιέχονται στα λύματα. Ο φώσφορος αποτελεί βασικό θρεπτικό στοιχείο για τους υδρόβιους οργανισμούς και η ανεξέλεγκτη διάθεσή του μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στην ποιότητα των υδάτων. Για τον λόγο αυτό η απομάκρυνσή του αποτελεί σημαντικό στόχο των σύγχρονων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (UNEP, 2016).

Οι παραπάνω παράμετροι χρησιμοποιούνται τόσο για την αξιολόγηση της ποιότητας των εισερχόμενων λυμάτων όσο και για τον έλεγχο της συμμόρφωσης της εκροής με τις απαιτήσεις της ευρωπαϊκής και ελληνικής νομοθεσίας. Επιπλέον, αποτελούν βασικούς δείκτες σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών επεξεργασίας και χρησιμοποιούνται εκτενώς στην αξιολόγηση των αποκεντρωμένων συστημάτων που εξετάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

Πίνακας 6 Βασικές παράμετροι αξιολόγησης λυμάτων

Παράμετρος	Περιγραφή	Κύρια χρήση
BOD ₅	Βιοαποδομήσιμο οργανικό φορτίο	Αξιολόγηση βιολογικής επεξεργασίας
COD	Συνολικό οργανικό φορτίο	Εκτίμηση συνολικής ρύπανσης
TSS	Αιωρούμενα στερεά	Έλεγχος καθίζησης και διήθησης
TN	Ολικό άζωτο	Έλεγχος ευτροφισμού
TP	Ολικός φώσφορος	Έλεγχος ευτροφισμού

3.2. Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Η απόδοση ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων δεν εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων, αλλά και από ορισμένες βασικές λειτουργικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Μεταξύ των σημαντικότερων παραμέτρων περιλαμβάνονται ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time – HRT), ο χρόνος παραμονής στερεών ή ηλικία ιλύος (Solids Retention Time – SRT) και ο οργανικός φορτισμός (Organic Loading Rate – OLR). Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν άμεσα την αποδοτικότητα των διεργασιών επεξεργασίας, την ποιότητα της εκροής και τις απαιτήσεις λειτουργίας του συστήματος (Metcalf & Eddy, 2014).

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) εκφράζει τον μέσο χρόνο που παραμένει το υγρό απόβλητο μέσα σε μια δεξαμενή ή μονάδα επεξεργασίας. Αποτελεί βασικό κριτήριο σχεδιασμού, καθώς καθορίζει τον διαθέσιμο χρόνο για την πραγματοποίηση των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Μεγαλύτερος HRT συνήθως οδηγεί σε αυξημένη απόδοση επεξεργασίας, απαιτεί όμως μεγαλύτερο όγκο δεξαμενών και αυξημένο κόστος κατασκευής (Tchobanoglous et al., 2014).

Ο HRT υπολογίζεται από τη σχέση:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

όπου:

- **V** = ενεργός όγκος της δεξαμενής (m³)
 - **Q** = παροχή λυμάτων (m³/d)
-

Η μονάδα μέτρησης του HRT εκφράζεται συνήθως σε ώρες ή ημέρες.

Μία εξίσου σημαντική παράμετρος είναι ο χρόνος παραμονής στερεών (SRT), γνωστός και ως ηλικία ιλύος. Ο SRT εκφράζει τον μέσο χρόνο παραμονής της βιομάζας μέσα στο σύστημα επεξεργασίας και επηρεάζει άμεσα τη συγκέντρωση μικροοργανισμών και τη βιολογική σταθερότητα της διεργασίας. Υψηλές τιμές SRT ευνοούν την ανάπτυξη βραδέως αναπτυσσόμενων μικροοργανισμών, όπως οι νιτροποιητές, και επιτρέπουν αποτελεσματικότερη απομάκρυνση αζώτου (Metcalf & Eddy, 2014).

Ο SRT υπολογίζεται γενικά ως ο λόγος της συνολικής μάζας στερεών που βρίσκεται στο σύστημα προς τη μάζα στερεών που απομακρύνεται ημερησίως:

$$SRT = \frac{\text{Μάζα στερεών στο σύστημα}}{\text{Ημερήσια απομάκρυνση στερεών}}$$

Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στον σχεδιασμό συστημάτων ενεργού ιλύος και βιοαντιδραστήρων μεμβρανών (MBR).

Ο οργανικός φορτισμός (Organic Loading Rate – OLR) εκφράζει την ποσότητα οργανικού φορτίου που εισέρχεται σε μια μονάδα επεξεργασίας ανά μονάδα όγκου και χρόνου. Αποτελεί βασικό δείκτη φόρτισης του συστήματος και χρησιμοποιείται για τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών επεξεργασίας (Hammer & Hammer, 2012).

Ο OLR υπολογίζεται από τη σχέση:

$$OLR = \frac{Q \cdot S_0}{V}$$

όπου:

Q = παροχή λυμάτων (m³/d)

S₀ = συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην είσοδο (kg BOD₅/m³ ή kg COD/m³)

V = όγκος αντιδραστήρα (m³)

Η σωστή επιλογή των τιμών HRT, SRT και OLR είναι καθοριστική για τη λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν την απόδοση απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών, την παραγωγή ιλύος, την ενεργειακή κατανάλωση και το συνολικό κόστος λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται εκτενώς τόσο στον σχεδιασμό συμβατικών εγκαταστάσεων όσο και στην αξιολόγηση σύγχρονων αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.

Πίνακας 7 Βασικές λειτουργικές παράμετροι επεξεργασίας λυμάτων

Παράμετρος	Περιγραφή	Συνήθης μονάδα
HRT	Υδραυλικός χρόνος παραμονής	h ή d
SRT	Χρόνος παραμονής στερεών	d
OLR	Οργανικός φορτισμός	kg BOD ₅ /m ³ ·d

Παράμετρος	Περιγραφή	Συνήθης μονάδα
Q	Παροχή λυμάτων	m ³ /d
V	Όγκος δεξαμενής	m ³

3.2.3 Ενεργειακή κατανάλωση και λειτουργική αποδοτικότητα

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αξιολόγησης των σύγχρονων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Εκτός από την ικανότητα απομάκρυνσης των ρύπων, οι εγκαταστάσεις καλούνται πλέον να λειτουργούν με υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, χαμηλό λειτουργικό κόστος και περιορισμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Για τον λόγο αυτό, η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί βασικό κριτήριο κατά την επιλογή και αξιολόγηση τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων (Metcalf & Eddy, 2014).

Στις περισσότερες εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας, το μεγαλύτερο ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας σχετίζεται με τον αερισμό. Η παροχή οξυγόνου είναι απαραίτητη για τη λειτουργία των αερόβιων μικροοργανισμών που αποδομούν την οργανική ύλη και πραγματοποιούν διεργασίες όπως η νιτροποίηση. Σε πολλές περιπτώσεις, ο αερισμός μπορεί να αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 50% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων (Tchobanoglous et al., 2014).

Εκτός από τον αερισμό, σημαντική κατανάλωση ενέργειας προκύπτει από τη λειτουργία αντλιών, αναδευτήρων, συστημάτων ανακυκλοφορίας ιλύος, μονάδων αφυδάτωσης και συστημάτων απολύμανσης. Το συνολικό ενεργειακό αποτύπωμα μιας εγκατάστασης εξαρτάται από τον τύπο της τεχνολογίας, το μέγεθος της μονάδας, τα χαρακτηριστικά των λυμάτων και τις απαιτήσεις ποιότητας της τελικής εκροής (Hammer & Hammer, 2012).

Η λειτουργική αποδοτικότητα ενός συστήματος επεξεργασίας δεν αξιολογείται μόνο από την ποιότητα της εκροής αλλά και από την ικανότητά του να επιτυγχάνει σταθερή απόδοση με το μικρότερο δυνατό κόστος λειτουργίας. Παράγοντες όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι απαιτήσεις συντήρησης, η παραγωγή πλεονάζουσας ιλύος, η αξιοπιστία

λειτουργίας και η ευκολία διαχείρισης επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική αποδοτικότητα ενός συστήματος (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη τάση ανάπτυξης τεχνολογιών που συνδυάζουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας με χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση. Συστήματα όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), οι αντιδραστήρες αερισμού με μεμβράνες (MABR), οι αναερόβιες διεργασίες και διάφορες υβριδικές τεχνολογίες έχουν σχεδιαστεί με στόχο τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση του λειτουργικού κόστους. Παράλληλα, αυξάνεται το ενδιαφέρον για τεχνολογίες που επιτρέπουν την ανάκτηση ενέργειας και πόρων από τα λύματα, συμβάλλοντας στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας (UNESCO, 2020).

Στην περίπτωση των αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, η ενεργειακή αποδοτικότητα αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία, καθώς οι εγκαταστάσεις αυτές προορίζονται συχνά για μικρούς οικισμούς ή απομακρυσμένες περιοχές όπου το λειτουργικό κόστος και οι απαιτήσεις συντήρησης πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Για τον λόγο αυτό, η ενεργειακή κατανάλωση και η λειτουργική αποδοτικότητα αποτελούν βασικά κριτήρια αξιολόγησης των τεχνολογιών που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 8 Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργική αποδοτικότητα

Παράγοντας	Επίδραση
Κατανάλωση ενέργειας	Λειτουργικό κόστος
Απαιτήσεις αερισμού	Απόδοση βιολογικών διεργασιών
Παραγωγή ιλύος	Κόστος διαχείρισης
Ανάγκες συντήρησης	Αξιοπιστία λειτουργίας
Ποιότητα εκροής	Συμμόρφωση με νομοθεσία
Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης	Περιβαλλοντικό όφελος

3.2.4 Στάδια επεξεργασίας λυμάτων

Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών σταδίων, τα οποία αποσκοπούν στη σταδιακή απομάκρυνση των ρύπων και στη βελτίωση της ποιότητας της εκροής. Κάθε στάδιο επιτελεί συγκεκριμένο ρόλο και συμβάλλει στην επίτευξη των απαιτήσεων που θέτει η νομοθεσία για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των λυμάτων και την επιθυμητή ποιότητα εκροής, εφαρμόζονται φυσικές, βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες σε διαφορετικούς συνδυασμούς (Metcalf & Eddy, 2014).

Το πρώτο στάδιο αποτελεί η προκαταρκτική επεξεργασία (προεπεξεργασία), η οποία περιλαμβάνει διεργασίες όπως η εσχάρωση, η εξάμμωση και η λιποσυλλογή. Σκοπός της είναι η απομάκρυνση χονδρόκοκκων στερεών, άμμου και λιπών, ώστε να προστατεύονται οι μονάδες που ακολουθούν και να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία της εγκατάστασης (Tchobanoglous et al., 2014).

Ακολουθεί η πρωτοβάθμια επεξεργασία, η οποία βασίζεται κυρίως σε φυσικές διεργασίες καθίζησης ή επίπλευσης και αποσκοπεί στην απομάκρυνση μέρους των αιωρούμενων στερεών και του οργανικού φορτίου. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η δευτεροβάθμια επεξεργασία, η οποία αποτελεί το βασικό στάδιο βιολογικής επεξεργασίας και πραγματοποιείται με τη δράση μικροοργανισμών που αποδομούν την οργανική ύλη και, σε ορισμένες περιπτώσεις, συμβάλλουν στην απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου (Metcalf & Eddy, 2014, Κούκνα, Γ. (2016)).

Όταν απαιτείται υψηλότερη ποιότητα εκροής, εφαρμόζεται τριτοβάθμια ή προχωρημένη επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει διεργασίες όπως η απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών, η διήθηση, η προσρόφηση και άλλες εξειδικευμένες τεχνολογίες. Το στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού ή διάθεσης σε ευαίσθητους αποδέκτες (ΚΥΑ 145116/2011, Κούκνα, Γ. (2016)).

Τέλος, πριν από τη διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση της εκροής, εφαρμόζεται συνήθως απολύμανση με χρήση χλωρίου, υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) ή όζοντος, με σκοπό τη μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών και την προστασία της δημόσιας υγείας. Η τελική εκροή μπορεί να διατεθεί σε επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, στο έδαφος ή να

επαναχρησιμοποιηθεί για αρδευτικούς, αστικούς ή άλλους σκοπούς, σύμφωνα με τις ισχύουσες νομοθετικές απαιτήσεις (ΚΥΑ 145116/2011· Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741).

3.3 Κατηγοριοποίηση συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

Τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων έχουν εξελιχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σήμερα πολλές διαφορετικές τεχνολογικές επιλογές που μπορούν να εφαρμοστούν ανάλογα με τις απαιτήσεις επεξεργασίας, τα χαρακτηριστικά των λυμάτων και τις τοπικές συνθήκες εγκατάστασης. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται από παράγοντες όπως ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός, η απαιτούμενη ποιότητα εκροής, το διαθέσιμο εμβαδόν εγκατάστασης, το κόστος κατασκευής και λειτουργίας, καθώς και οι απαιτήσεις συντήρησης και διαχείρισης (Metcalf & Eddy, 2014).

Για τη διευκόλυνση της αξιολόγησης και της σύγκρισης των διαθέσιμων τεχνολογιών, τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορα κριτήρια. Οι συνηθέστερες κατηγοριοποιήσεις αφορούν την κλίμακα εφαρμογής τους (κεντρικά ή αποκεντρωμένα), τον βαθμό ολοκλήρωσης και συμπύκνωσης των διεργασιών (συμβατικά ή προκατασκευασμένα), το βιολογικό περιβάλλον λειτουργίας (αερόβια ή αναερόβια), τον τρόπο ανάπτυξης της βιομάζας (αιωρούμενη ή προσκολλημένη ανάπτυξη) και το είδος των διεργασιών που χρησιμοποιούνται (βιολογικές, φυσικοχημικές ή υβριδικές) (Tchobanoglous et al., 2014).

Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατανόηση των πλεονεκτημάτων και περιορισμών κάθε τεχνολογικής προσέγγισης. Παράλληλα, συμβάλλει στην ορθολογική επιλογή συστημάτων επεξεργασίας, ιδιαίτερα σε εφαρμογές μικρής κλίμακας όπου τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα αποτελούν συχνά τη βέλτιστη τεχνική και οικονομική λύση (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων και τα κύρια χαρακτηριστικά τους, δημιουργώντας το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την αναλυτική παρουσίαση των σύγχρονων αποκεντρωμένων τεχνολογιών που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια.

3.3.1 Κεντρικά και αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων διακρίνονται συνήθως σε κεντρικά και αποκεντρωμένα, ανάλογα με τον τρόπο συλλογής, μεταφοράς και επεξεργασίας των λυμάτων. Η συγκεκριμένη διάκριση αποτελεί βασικό στοιχείο του σχεδιασμού υποδομών διαχείρισης υγρών αποβλήτων, καθώς επηρεάζει τόσο το τεχνικό και οικονομικό κόστος όσο και τη συνολική περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα **κεντρικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων** βασίζονται στη συλλογή των λυμάτων μέσω εκτεταμένων αποχετευτικών δικτύων και στη μεταφορά τους σε μία κεντρική εγκατάσταση επεξεργασίας. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε μεγάλες αστικές περιοχές, όπου η συγκέντρωση πληθυσμού επιτρέπει την εκμετάλλευση οικονομιών κλίμακας και τη λειτουργία μεγάλων μονάδων επεξεργασίας. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν υψηλό επίπεδο ελέγχου και δυνατότητα εφαρμογής σύνθετων τεχνολογιών επεξεργασίας, απαιτούν όμως σημαντικές επενδύσεις για την κατασκευή και συντήρηση των δικτύων συλλογής και μεταφοράς λυμάτων (Tchobanoglous et al., 2014).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα κεντρικά συστήματα δεν αποτελούν πάντοτε την πλέον κατάλληλη λύση. Σε περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, έντονο ανάγλυφο, διάσπαρτη δόμηση ή μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των οικισμών, το κόστος ανάπτυξης εκτεταμένων αποχετευτικών δικτύων μπορεί να καταστεί ιδιαίτερα υψηλό. Επιπλέον, η μεταφορά των λυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις συνεπάγεται αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και υψηλότερο λειτουργικό κόστος (Massoud et al., 2009).

Ως εναλλακτική προσέγγιση αναπτύχθηκαν τα **αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων**, τα οποία επεξεργάζονται τα λύματα κοντά στο σημείο παραγωγής τους ή σε τοπικό επίπεδο. Τα συστήματα αυτά μπορούν να εξυπηρετούν μία κατοικία, ένα συγκρότημα κτιρίων, έναν μικρό οικισμό ή μια τουριστική εγκατάσταση. Βασικό τους πλεονέκτημα αποτελεί η μείωση των απαιτήσεων για μεγάλα δίκτυα αποχέτευσης, γεγονός που οδηγεί συχνά σε χαμηλότερο συνολικό κόστος υποδομών και μεγαλύτερη ευελιξία εφαρμογής (Libralato et al., 2012).

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι τα αποκεντρωμένα συστήματα μπορούν να προσφέρουν αξιόπιστη επεξεργασία λυμάτων και ταυτόχρονα να διευκολύνουν την τοπική επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού για άρδευση ή άλλες χρήσεις. Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στην εξοικονόμηση υδατικών πόρων και στην εφαρμογή των

αρχών της κυκλικής οικονομίας, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού (Capodagliocapo, 2017).

Στην Ελλάδα, η σημασία των αποκεντρωμένων συστημάτων είναι ιδιαίτερα αυξημένη λόγω των γεωγραφικών και δημογραφικών χαρακτηριστικών της χώρας. Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού μικρών οικισμών, νησιωτικών περιοχών και τουριστικών προορισμών με έντονες εποχικές διακυμάνσεις πληθυσμού καθιστά συχνά δύσκολη ή οικονομικά ασύμφορη την εφαρμογή συμβατικών κεντρικών συστημάτων. Για τον λόγο αυτό, οι Κατευθυντήριες Γραμμές της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων αναγνωρίζουν τα αποκεντρωμένα συστήματα ως σημαντική εναλλακτική λύση για τη διαχείριση λυμάτων μικρών οικισμών (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Η επιλογή μεταξύ κεντρικού και αποκεντρωμένου συστήματος δεν μπορεί να βασίζεται σε ένα μόνο κριτήριο. Αντίθετα, απαιτείται η συνεκτίμηση τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων, όπως ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός, η μορφολογία της περιοχής, οι απαιτήσεις ποιότητας εκροής, οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης και το συνολικό κόστος κύκλου ζωής της εγκατάστασης. Στο πλαίσιο αυτό, τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, ιδιαίτερα σε εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας (Massoud et al., 2009· ΥΠΕΚΑ, 2012).

Πίνακας 9 Σύγκριση κεντρικών και αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

Χαρακτηριστικό	Κεντρικά συστήματα	Αποκεντρωμένα συστήματα
Εξυπηρετούμενος πληθυσμός	Μεγάλος	Μικρός έως μεσαίος
Αποχετευτικό δίκτυο	Εκτεταμένο	Περιορισμένο
Αρχικό κόστος υποδομών	Υψηλό	Συνήθως χαμηλότερο
Ευελιξία επέκτασης	Περιορισμένη	Υψηλή
Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης	Περιορισμένη	Αυξημένη
Καταλληλότητα για μικρούς οικισμούς	Χαμηλή	Υψηλή

Χαρακτηριστικό	Κεντρικά συστήματα	Αποκεντρωμένα συστήματα
Καταλληλότητα για νησιά	Μέτρια	Υψηλή

3.3.2 Συμβατικά και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τρόπο σχεδιασμού και τον βαθμό ενσωμάτωσης των επιμέρους διεργασιών τους σε συμβατικά και προκατασκευασμένα συστήματα. Η διάκριση αυτή έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία τα τελευταία χρόνια, καθώς οι αυξανόμενες απαιτήσεις για περιορισμό του απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης, μείωση του κόστους κατασκευής και βελτίωση της λειτουργικής αποδοτικότητας έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογικών λύσεων μικρότερης κλίμακας (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα **συμβατικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων** βασίζονται συνήθως στη διαδοχική διάταξη ανεξάρτητων μονάδων επεξεργασίας, όπως δεξαμενές καθίζησης, βιολογικοί αντιδραστήρες, δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης και μονάδες απολύμανσης. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται ευρέως στις μεγάλες δημοτικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και χαρακτηρίζεται από υψηλή αξιοπιστία και δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων παροχών. Ωστόσο, απαιτεί σημαντικές εκτάσεις γης, αυξημένες επενδύσεις σε υποδομές και συχνά υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Tchobanoglous et al., 2014).

Αντίθετα, τα προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων σχεδιάζονται με στόχο την ενσωμάτωση πολλαπλών σταδίων επεξεργασίας σε περιορισμένο χώρο. Στις εγκαταστάσεις αυτές πολλές διεργασίες πραγματοποιούνται μέσα στην ίδια μονάδα ή σε πλήρως προκατασκευασμένα συστήματα, μειώνοντας σημαντικά το απαιτούμενο αποτύπωμα εγκατάστασης. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα ελκυστική για μικρούς οικισμούς, ξενοδοχειακές μονάδες, τουριστικές εγκαταστάσεις, βιομηχανικές εφαρμογές και περιοχές όπου η διαθεσιμότητα χώρου είναι περιορισμένη (Libralato et al., 2012).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των προκατασκευασμένων συστημάτων είναι η δυνατότητα ταχείας εγκατάστασης και επέκτασης. Πολλά από τα σύγχρονα συστήματα κατασκευάζονται σε μορφή προκατασκευασμένων ή αρθρωτών (modular) μονάδων, οι οποίες μπορούν να μεταφερθούν και να εγκατασταθούν εύκολα στο πεδίο. Παράλληλα, παρέχουν τη δυνατότητα σταδιακής αύξησης της δυναμικότητας ανάλογα με τις μελλοντικές ανάγκες του εξυπηρετούμενου πληθυσμού (Carodaglio, 2017).

Επιπλέον, οι σύγχρονες τεχνολογίες επιτυγχάνουν συχνά υψηλή ποιότητα εκροής μέσω της ενσωμάτωσης προηγμένων διεργασιών, όπως βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR),

αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (SBR), συστήματα βιοφίλμ και υβριδικές τεχνολογίες. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει σε πολλές περιπτώσεις την παραγωγή εκροής κατάλληλης για επαναχρησιμοποίηση, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας (ΚΥΑ 145116/2011· Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα προκατασκευασμένα συστήματα ενδέχεται να παρουσιάζουν αυξημένες απαιτήσεις αυτοματισμού και ελέγχου, ενώ ορισμένες τεχνολογίες συνοδεύονται από υψηλότερο αρχικό κόστος εξοπλισμού. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή μεταξύ συμβατικών και προκατασκευασμένων συστημάτων θα πρέπει να βασίζεται σε τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε εφαρμογής (Metcalf & Eddy, 2014).

Η συνεχής ανάπτυξη νέων προκατασκευασμένων τεχνολογιών και η ανάγκη για βιώσιμες λύσεις διαχείρισης λυμάτων έχουν καταστήσει τα συστήματα αυτά βασικό αντικείμενο έρευνας και εφαρμογής διεθνώς. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται αναλυτικά οι σημαντικότερες τεχνολογίες προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων και αξιολογούνται ως προς την απόδοση, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους.

Πίνακας 10 Σύγκριση συμβατικών και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

Χαρακτηριστικό	Συμβατικά συστήματα	Προκατασκευασμένα συστήματα
Απαιτούμενος χώρος	Μεγάλος	Μικρός
Κατασκευαστική πολυπλοκότητα	Υψηλή	Μέτρια
Δυνατότητα επέκτασης	Περιορισμένη	Υψηλή
Χρόνος εγκατάστασης	Μεγάλος	Μικρός
Αυτοματισμός	Μέτριος	Συνήθως υψηλός
Καταλληλότητα για μικρούς οικισμούς	Περιορισμένη	Πολύ υψηλή

Χαρακτηριστικό	Συμβατικά συστήματα	Προκατασκευασμένα συστήματα
Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης	Εξαρτάται από τον σχεδιασμό	Συνήθως αυξημένη

3.3.3 Αερόβια και αναερόβια συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Μία ακόμη βασική κατηγοριοποίηση των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων βασίζεται στις συνθήκες υπό τις οποίες αναπτύσσονται και λειτουργούν οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στις βιολογικές διεργασίες. Με βάση την παρουσία ή την απουσία διαλυμένου οξυγόνου, τα βιολογικά συστήματα διακρίνονται σε αερόβια και αναερόβια. Η επιλογή μεταξύ των δύο προσεγγίσεων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των λυμάτων, το οργανικό φορτίο, τις απαιτήσεις ποιότητας εκροής και τις ενεργειακές απαιτήσεις της εγκατάστασης (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα **αερόβια συστήματα επεξεργασίας** λειτουργούν παρουσία διαλυμένου οξυγόνου, το οποίο είναι απαραίτητο για τη δραστηριότητα των αερόβιων μικροοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί αυτοί χρησιμοποιούν την οργανική ύλη ως πηγή ενέργειας και άνθρακα, μετατρέποντάς την σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και νέα βιομάζα. Η ενεργός ιλύς, τα συστήματα βιοφίλμ και οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR) αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αερόβιων τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων (Tchobanoglous et al., 2014).

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των αερόβιων συστημάτων είναι η υψηλή απόδοση απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και η δυνατότητα αποτελεσματικής νιτροποίησης του αζώτου. Παράλληλα, προσφέρουν σταθερή λειτουργία και μπορούν να επιτύχουν υψηλή ποιότητα εκροής ακόμη και σε αυστηρές απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης νερού. Ωστόσο, η συνεχής παροχή αέρα μέσω συστημάτων αερισμού συνεπάγεται σημαντική κατανάλωση ενέργειας, η οποία αποτελεί συνήθως το μεγαλύτερο μέρος του λειτουργικού κόστους μιας εγκατάστασης (Metcalf & Eddy, 2014).

Αντίθετα, τα **αναερόβια συστήματα επεξεργασίας** λειτουργούν απουσία διαλυμένου οξυγόνου. Στα συστήματα αυτά, η αποδόμηση της οργανικής ύλης πραγματοποιείται μέσω διαδοχικών βιολογικών σταδίων από εξειδικευμένες ομάδες μικροοργανισμών,

καταλήγοντας στην παραγωγή βιοαερίου, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Η παραγωγή βιοαερίου αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των αναερόβιων διεργασιών, καθώς δημιουργεί δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης των αποβλήτων (Lettinga & Hulshoff Pol, 1991).

Τα αναερόβια συστήματα παρουσιάζουν χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με τα αερόβια, καθώς δεν απαιτείται μηχανικός αερισμός. Επιπλέον, παράγουν μικρότερες ποσότητες πλεονάζουσας λύσης, γεγονός που μειώνει το κόστος διαχείρισης των παραγόμενων στερεών αποβλήτων. Ωστόσο, η εφαρμογή τους είναι συνήθως πιο αποτελεσματική σε λύματα υψηλού οργανικού φορτίου ή σε βιομηχανικά απόβλητα, ενώ συχνά απαιτείται συμπληρωματική επεξεργασία για την επίτευξη των απαιτούμενων ποιοτικών χαρακτηριστικών εκροής (Speece, 2008).

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για τον συνδυασμό αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών σε υβριδικά συστήματα επεξεργασίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων και των δύο τεχνολογιών, συνδυάζοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα των αναερόβιων διεργασιών με την υψηλή ποιότητα εκροής που επιτυγχάνεται μέσω αερόβιας επεξεργασίας (Capodaglio, 2017).

Στο πλαίσιο των αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, οι αερόβιες διεργασίες εφαρμόζονται συχνότερα λόγω της ικανότητάς τους να επιτυγχάνουν υψηλή ποιότητα εκροής σε περιορισμένο χώρο. Παράλληλα, οι αναερόβιες τεχνολογίες αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον, ιδιαίτερα σε εφαρμογές ανάκτησης ενέργειας και βιώσιμης διαχείρισης πόρων.

Πίνακας 11 Σύγκριση αερόβιων και αναερόβιων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

Χαρακτηριστικό	Αερόβια συστήματα	Αναερόβια συστήματα
Παρουσία οξυγόνου	Απαραίτητη	Δεν απαιτείται
Κατανάλωση ενέργειας	Υψηλή	Χαμηλή
Παραγωγή ιλύος	Μεγαλύτερη	Μικρότερη
Παραγωγή βιοαερίου	Όχι	Ναι
Ποιότητα εκροής	Πολύ υψηλή	Συνήθως απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία
Χρόνος εκκίνησης	Μικρότερος	Μεγαλύτερος
Καταλληλότητα για προκατασκευασμένες εφαρμογές	Υψηλή	Μέτρια έως υψηλή

3.3.4 Συστήματα αιωρούμενης και προσκολλημένης βιομάζας (Suspended Growth and Attached Growth Systems)

Μία από τις σημαντικότερες κατηγοριοποιήσεις των βιολογικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων βασίζεται στον τρόπο ανάπτυξης των μικροοργανισμών που πραγματοποιούν την αποδόμηση των ρύπων. Με βάση αυτό το κριτήριο, τα συστήματα διακρίνονται σε συστήματα αιωρούμενης ανάπτυξης βιομάζας (suspended growth systems) και συστήματα προσκολλημένης ανάπτυξης βιομάζας (attached growth systems). Η διάκριση αυτή επηρεάζει σημαντικά τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και την απόδοση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (Metcalf & Eddy, 2014).

Στα **συστήματα αιωρούμενης ανάπτυξης βιομάζας**, οι μικροοργανισμοί παραμένουν διασκορπισμένοι μέσα στο υγρό περιβάλλον του αντιδραστήρα, σχηματίζοντας συσσωματώματα γνωστά ως βιοκροκίδες (flocs). Η βιομάζα διατηρείται σε αιώρηση μέσω μηχανικής ανάδευσης ή αερισμού, ενώ μετά την ολοκλήρωση της βιολογικής επεξεργασίας διαχωρίζεται από το επεξεργασμένο νερό με καθίζηση ή διήθηση. Το πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι η διεργασία ενεργού ιλύος, η

οποία αποτελεί τη συνηθέστερη βιολογική μέθοδο επεξεργασίας αστικών λυμάτων παγκοσμίως (Tchobanoglous et al., 2014).

Τα συστήματα αιωρούμενης βιομάζας παρουσιάζουν υψηλή απόδοση απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και ευελιξία λειτουργίας. Ωστόσο, η απόδοσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματική καθίζηση της βιομάζας και τη σωστή διαχείριση της ανακυκλοφορίας ιλύος. Προβλήματα όπως η διόγκωση της ιλύος (bulking) ή η ανεπαρκής καθίζηση μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη λειτουργία της εγκατάστασης (Metcalf & Eddy, 2014).

Αντίθετα, στα **συστήματα προσκολλημένης ανάπτυξης βιομάζας**, οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται πάνω σε στερεές επιφάνειες σχηματίζοντας βιοφίλμ. Οι επιφάνειες αυτές μπορεί να είναι φυσικά ή τεχνητά υλικά, όπως λίθοι, πλαστικά μέσα πλήρωσης ή ειδικοί φορείς βιομάζας. Καθώς τα λύματα διέρχονται από το σύστημα, οι μικροοργανισμοί του βιοφίλμ αποδοθούν την οργανική ύλη και απομακρύνουν θρεπτικά συστατικά από το νερό (Ødegaard, 2006).

Στην κατηγορία των συστημάτων προσκολλημένης βιομάζας ανήκουν τεχνολογίες όπως τα βιολογικά φίλτρα, οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι (RBC), τα συστήματα MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) και οι αντιδραστήρες MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor). Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα σε μεταβολές του οργανικού φορτίου και συχνά απαιτούν μικρότερες ποσότητες ανακυκλοφορούμενης ιλύος σε σχέση με τα συστήματα ενεργού ιλύος (Rusten et al., 2006).

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και **υβριδικά συστήματα**, στα οποία συνυπάρχουν αιωρούμενη και προσκολλημένη βιομάζα στον ίδιο αντιδραστήρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα συστήματα IFAS (Integrated Fixed-film Activated Sludge), τα οποία συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της ενεργού ιλύος και των βιοφίλμ, επιτυγχάνοντας αυξημένη βιολογική δυναμικότητα και βελτιωμένη απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών (Ødegaard, 2006).

Η επιλογή μεταξύ συστημάτων αιωρούμενης και προσκολλημένης ανάπτυξης εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής, τη διαθέσιμη έκταση, τα χαρακτηριστικά των λυμάτων και την επιθυμητή ποιότητα εκροής. Στο πλαίσιο των αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων εγκαταστάσεων, τα συστήματα βιοφίλμ έχουν αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της υψηλής απόδοσης που μπορούν να επιτύχουν σε περιορισμένο χώρο,

γεγονός που εξηγεί τη συνεχώς αυξανόμενη εφαρμογή τους στις σύγχρονες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων

Πίνακας 12 Σύγκριση συστημάτων αιωρούμενης και προσκολλημένης βιομάζας

Χαρακτηριστικό	Suspended Growth	Attached Growth
Ανάπτυξη μικροοργανισμών	Σε αιώρηση	Πάνω σε επιφάνειες
Κύριο παράδειγμα	Ενεργός ιλύς	Βιοφίλμ, MBBR
Ανάγκη καθίζησης	Υψηλή	Μικρότερη
Ανθεκτικότητα σε φορτίσεις	Μέτρια	Υψηλή
Απαιτούμενος χώρος	Μεγαλύτερος	Μικρότερος
Καταλληλότητα για προκατασκευασμένες εφαρμογές	Καλή	Πολύ υψηλή
Παραδείγματα τεχνολογιών	CAS, SBR, MBR	MBBR, RBC, MABR

3.3.5 Βιολογικά, φυσικοχημικά και υβριδικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Τα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν με βάση το είδος των διεργασιών που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση των ρύπων. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, διακρίνονται σε βιολογικά, φυσικοχημικά και υβριδικά συστήματα. Η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς επιτρέπει την κατανόηση των βασικών μηχανισμών επεξεργασίας και διευκολύνει την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των λυμάτων και τις απαιτήσεις της εκροής (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα **βιολογικά συστήματα επεξεργασίας** βασίζονται στη δράση μικροοργανισμών οι οποίοι αποδομούν την οργανική ύλη και μετατρέπουν τους ρύπους σε σταθερότερα προϊόντα. Οι διεργασίες αυτές αποτελούν τη συνθηθέστερη μέθοδο επεξεργασίας αστικών λυμάτων λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς τους στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των θρεπτικών συστατικών. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται η ενεργός

ιλύς, τα συστήματα βιοφίλμ, οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), οι αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (SBR) και άλλες σύγχρονες τεχνολογίες βιολογικής επεξεργασίας (Tchobanoglous et al., 2014).

Τα **φυσικοχημικά συστήματα επεξεργασίας** βασίζονται σε φυσικές ή χημικές διεργασίες για την απομάκρυνση των ρύπων. Στις διεργασίες αυτές περιλαμβάνονται η κροκίδωση, η καθίζηση, η επίπλευση, η διήθηση, η προσρόφηση, η απολύμανση και διάφορες προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες. Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται είτε ως κύρια μέθοδος επεξεργασίας σε ειδικές περιπτώσεις είτε ως συμπληρωματικό στάδιο μετά τη βιολογική επεξεργασία, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της τελικής εκροής (Spellman, 2013).

Η χρήση φυσικοχημικών διεργασιών είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν απαιτείται απομάκρυνση συγκεκριμένων ρύπων που δεν αποδομούνται εύκολα βιολογικά ή όταν επιδιώκεται η παραγωγή εκροής υψηλής ποιότητας για επαναχρησιμοποίηση. Ωστόσο, οι διεργασίες αυτές συνοδεύονται συχνά από αυξημένο λειτουργικό κόστος λόγω της κατανάλωσης χημικών αντιδραστηρίων και ενέργειας (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται ολοένα και περισσότερο τα **υβριδικά συστήματα επεξεργασίας**, τα οποία συνδυάζουν βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες στην ίδια εγκατάσταση. Στόχος των υβριδικών συστημάτων είναι η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων κάθε τεχνολογίας, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση επεξεργασίας, μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και βελτιωμένη λειτουργική ευελιξία (Carodaglio, 2017).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα υβριδικών συστημάτων αποτελούν οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), οι οποίοι συνδυάζουν βιολογική επεξεργασία και διήθηση μέσω μεμβρανών, καθώς και τα συστήματα IFAS και MABR που συνδυάζουν διαφορετικούς μηχανισμούς βιολογικής επεξεργασίας για τη βελτίωση της αποδοτικότητας. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία στις αποκεντρωμένες και προκατασκευασμένες εφαρμογές, όπου απαιτείται υψηλή απόδοση σε περιορισμένο χώρο εγκατάστασης (Judd, 2011).

Η συνεχής αυστηροποίηση των περιβαλλοντικών απαιτήσεων και η ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων οδηγούν σε αυξανόμενη εφαρμογή υβριδικών τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες αυτές θεωρούνται σήμερα από τις πλέον υποσχόμενες λύσεις

για την επεξεργασία λυμάτων μικρής και μεσαίας κλίμακας, καθώς συνδυάζουν υψηλή ποιότητα εκροής, δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης νερού και αποτελεσματική αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου (Libralato et al., 2012).

Πίνακας 13 Κατηγορίες συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων βάσει των διεργασιών που χρησιμοποιούνται.

Κατηγορία	Βασικός μηχανισμός	Ενδεικτικές τεχνολογίες
Βιολογικά	Δράση μικροοργανισμών	SBR, MBBR, MBR
Φυσικοχημικά	Φυσικές και χημικές διεργασίες	Κροκίδωση, διήθηση, προσρόφηση
Υβριδικά	Συνδυασμός διεργασιών	MBR, IFAS, MABR, A2/O-MBR

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά των αστικών λυμάτων, καθώς και οι σημαντικότερες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ποιότητάς τους και της απόδοσης των συστημάτων επεξεργασίας. Η ανάλυση των φυσικών, χημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών ανέδειξε τη σύνθετη φύση των αστικών λυμάτων και την ανάγκη εφαρμογής κατάλληλων διεργασιών για την απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών, θρεπτικών συστατικών και παθογόνων μικροοργανισμών (Metcalf & Eddy, 2014· Tchobanoglous et al., 2014).

Παράλληλα, εξετάστηκαν οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας, όπως το BOD₅, το COD, τα αιωρούμενα στερεά, το άζωτο και ο φώσφορος, καθώς και λειτουργικοί δείκτες όπως ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT), ο χρόνος παραμονής στερεών (SRT) και ο οργανικός φορτισμός (OLR). Οι παράμετροι αυτές αποτελούν βασικά εργαλεία για τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων (Metcalf & Eddy, 2014).

Επιπλέον, παρουσιάστηκαν οι κυριότερες κατηγορίες συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, συμπεριλαμβανομένων των κεντρικών και αποκεντρωμένων συστημάτων, των συμβατικών και προκατασκευασμένων εγκαταστάσεων, καθώς και των αερόβιων,

αναερόβιων, βιολογικών, φυσικοχημικών και υβριδικών τεχνολογιών. Η ανάλυση ανέδειξε ότι δεν υπάρχει μία μοναδική λύση κατάλληλη για όλες τις περιπτώσεις, αλλά ότι η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των λυμάτων, τις απαιτήσεις ποιότητας εκροής, τις τοπικές συνθήκες και τους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους (Libralato et al., 2012· ΥΠΕΚΑ, 2012).

Η συνεχής αυστηροποίηση των περιβαλλοντικών απαιτήσεων, η ανάγκη εξοικονόμησης υδατικών πόρων και η ανάπτυξη των αρχών της κυκλικής οικονομίας έχουν οδηγήσει στην αυξανόμενη εφαρμογή σύγχρονων αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Για τον λόγο αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων και οι μηχανισμοί λειτουργίας τους, οι οποίοι αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη και αξιολόγηση των σύγχρονων αποκεντρωμένων συστημάτων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Τεχνολογίες Αποκεντρωμένων Συστημάτων Επεξεργασίας Λυμάτων

Η αποτελεσματική διαχείριση των αστικών λυμάτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις για την προστασία του περιβάλλοντος και των υδατικών πόρων. Η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων για υψηλή ποιότητα εκροής, η ανάγκη συμμόρφωσης με το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο, καθώς και η επιδίωξη βιώσιμης διαχείρισης των διαθέσιμων φυσικών πόρων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή πληθώρας τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων (Metcalf & Eddy, 2014).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία εφαρμόζονται σε μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις, απομακρυσμένες περιοχές και άλλες περιπτώσεις όπου η κατασκευή εκτεταμένων κεντρικών δικτύων αποχέτευσης δεν είναι τεχνικά ή οικονομικά εφικτή. Η ανάπτυξη των συστημάτων αυτών συνδέεται άμεσα με την ανάγκη για ευέλικτες, αξιόπιστες και οικονομικά βιώσιμες λύσεις που μπορούν να προσαρμοστούν στις τοπικές συνθήκες και στις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής (ΥΠΕΚΑ, 2012).

Οι σύγχρονες τεχνολογίες αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων βασίζονται σε διαφορετικούς μηχανισμούς απομάκρυνσης των ρύπων, οι οποίοι περιλαμβάνουν βιολογικές, φυσικοχημικές και υβριδικές διεργασίες. Οι τεχνολογίες αυτές επιδιώκουν την αποτελεσματική απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών, θρεπτικών συστατικών και παθογόνων μικροοργανισμών, ενώ παράλληλα στοχεύουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, του απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης και του συνολικού λειτουργικού κόστους (Tchobanoglous et al., 2014).

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών, όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών, τα συστήματα βιοφίλμ, οι αναερόβιοι αντιδραστήρες, τα συστήματα μικροφυκών και οι υβριδικές προκατασκευασμένες μονάδες, έχει διευρύνει σημαντικά τις διαθέσιμες επιλογές για την αποκεντρωμένη επεξεργασία λυμάτων. Παράλληλα, η αυξανόμενη έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού και στις αρχές της κυκλικής οικονομίας ενισχύει τη σημασία των τεχνολογιών αυτών στο σύγχρονο περιβαλλοντικό σχεδιασμό (Capodaglio, 2017).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες που εφαρμόζονται στα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Αρχικά αναλύονται οι κυριότερες

βιολογικές διεργασίες, ακολουθεί η παρουσίαση των φυσικοχημικών μεθόδων επεξεργασίας, ενώ στη συνέχεια εξετάζονται τα συστήματα μικροφυκών και οι σύγχρονες υβριδικές τεχνολογίες που συνδυάζουν διαφορετικούς μηχανισμούς επεξεργασίας με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της βιωσιμότητας των εγκαταστάσεων.

4.1 Βιολογικές διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων

Οι βιολογικές διεργασίες αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο τρόπο επεξεργασίας αστικών λυμάτων παγκοσμίως, καθώς αξιοποιούν τη δράση μικροοργανισμών για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των θρεπτικών συστατικών από τα υγρά απόβλητα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ικανότητα διαφόρων ομάδων βακτηρίων, μυκήτων και άλλων μικροοργανισμών να μεταβολίζουν τις οργανικές ενώσεις που περιέχονται στα λύματα, μετατρέποντάς τες σε σταθερότερα και λιγότερο επιβλαβή προϊόντα (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι βιολογικές διεργασίες εφαρμόζονται κυρίως στο στάδιο της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας και στοχεύουν στην απομάκρυνση του βιοαποδομήσιμου οργανικού φορτίου που εκφράζεται συνήθως μέσω των παραμέτρων BOD₅ και COD. Παράλληλα, μέσω κατάλληλου σχεδιασμού μπορούν να συμβάλουν στην απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου, επιτυγχάνοντας υψηλότερη ποιότητα εκροής και συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της περιβαλλοντικής νομοθεσίας (Henze et al., 2008).

Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και τον τρόπο ανάπτυξης της βιομάζας, οι βιολογικές διεργασίες διακρίνονται σε αερόβιες, αναερόβιες και υβριδικές. Στις αερόβιες διεργασίες οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν διαλυμένο οξυγόνο για την οξείδωση της οργανικής ύλης, ενώ στις αναερόβιες διεργασίες η αποδόμηση πραγματοποιείται απουσία οξυγόνου και συνοδεύεται από παραγωγή βιοαερίου. Επιπλέον, η βιομάζα μπορεί να αναπτύσσεται είτε σε αιώρηση είτε ως προσκολλημένο βιοφίλμ πάνω σε ειδικές επιφάνειες ή φορείς ανάπτυξης (Grady et al., 2011).

4.1.1. Διεργασία ενεργού ιλύος

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πληθώρας βιολογικών συστημάτων επεξεργασίας, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά, απαιτήσεις χώρου και επίπεδα απόδοσης. Μεταξύ των σημαντικότερων

τεχνολογιών συγκαταλέγονται η διεργασία ενεργού ιλύος, τα συστήματα βιοφίλμ, οι αναερόβιοι αντιδραστήρες και οι διεργασίες απομάκρυνσης αζώτου μέσω νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Οι τεχνολογίες αυτές αποτελούν τη βάση πολλών σύγχρονων αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων (ΥΠΕΚΑ, 2012· Καραπαπά, 2018).

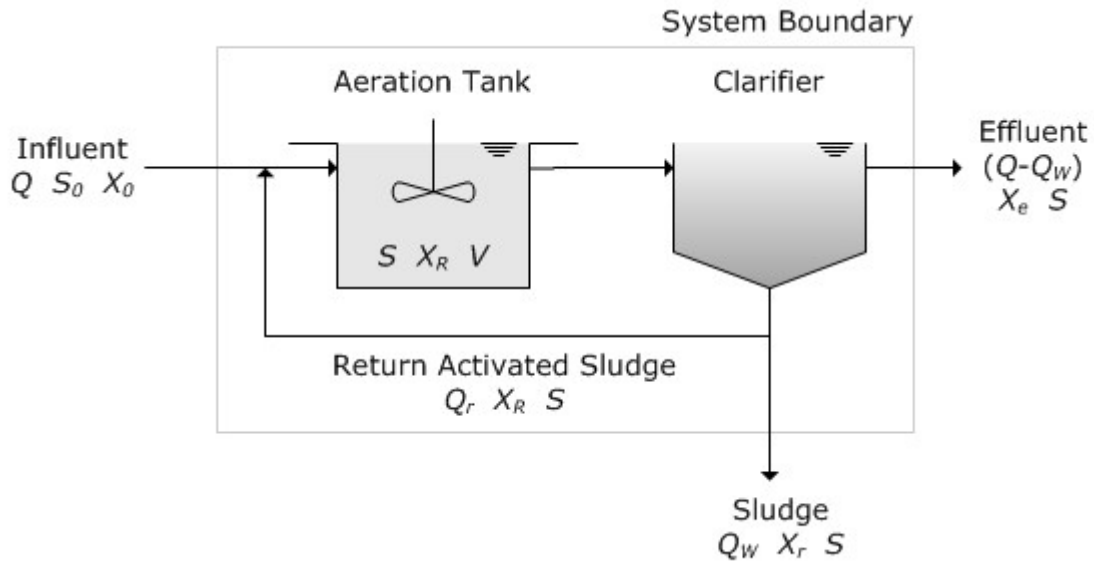
Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των σημαντικότερων βιολογικών διεργασιών, καθώς και ο ρόλος τους στα σύγχρονα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Η διεργασία ενεργού ιλύος (Activated Sludge Process) αποτελεί τη διαδεδομένη βιολογική μέθοδο επεξεργασίας αστικών λυμάτων παγκοσμίως και χρησιμοποιείται ευρέως τόσο σε κεντρικές όσο και σε αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Αναπτύχθηκε στις αρχές του 20ού αιώνα και μέχρι σήμερα αποτελεί τη βάση για πολλές σύγχρονες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων SBR, MBR και IFAS (Metcalf & Eddy, 2014).

Η λειτουργία της διεργασίας βασίζεται στην ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών υπό συνθήκες συνεχούς αερισμού. Οι μικροοργανισμοί αυτοί χρησιμοποιούν την οργανική ύλη που περιέχεται στα λύματα ως πηγή ενέργειας και θρεπτικών συστατικών, μετατρέποντάς την σε νέα βιομάζα, διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η βιομάζα σχηματίζει συσσωματώματα γνωστά ως βιοκροκίδες (flocs), τα οποία παραμένουν σε αιώρηση μέσα στη δεξαμενή αερισμού (Tchobanoglous et al., 2014).

Το σύστημα ενεργού ιλύος αποτελείται συνήθως από δύο βασικές μονάδες: τη δεξαμενή αερισμού και τη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Στη δεξαμενή αερισμού πραγματοποιείται η βιολογική αποδόμηση του οργανικού φορτίου, ενώ στη δεξαμενή καθίζησης διαχωρίζεται η βιομάζα από το επεξεργασμένο νερό. Ένα μέρος της καθιζάνουσας ιλύος ανακυκλοφορεί πίσω στη δεξαμενή αερισμού για τη διατήρηση της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών, ενώ η πλεονάζουσα ιλύς απομακρύνεται για περαιτέρω επεξεργασία και διάθεση (Henze et al., 2008).

Εισροή λυμάτων → Δεξαμενή αερισμού → Δευτεροβάθμια καθίζηση → Εκροή
↷ Ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος



Εικόνα 1 Lenntech. Βασική διάταξη συστήματος ενεργού ιλύος ,
<https://www.lenntech.com/wwtp/wwtp-activated-sludge-process.htm>

Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας επηρεάζεται από διάφορες λειτουργικές παραμέτρους, όπως η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT), ο χρόνος παραμονής στερεών (SRT), η θερμοκρασία και ο λόγος τροφής προς μικροοργανισμούς (F/M ratio). Η σωστή ρύθμιση των παραμέτρων αυτών είναι απαραίτητη για τη διατήρηση σταθερής λειτουργίας και υψηλής απόδοσης επεξεργασίας (Grady et al., 2011).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ενεργού ιλύος είναι η υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών. Υπό κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας μπορούν να επιτευχθούν αποδόσεις απομάκρυνσης BOD_5 και TSS που υπερβαίνουν το 90%, ενώ με κατάλληλες διαμορφώσεις είναι δυνατή και η απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου (Metcalf & Eddy, 2014).

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η διεργασία ενεργού ιλύος παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η ανάγκη συνεχούς αερισμού συνεπάγεται υψηλή ενεργειακή κατανάλωση, ενώ η παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων πλεονάζουσας ιλύος αυξάνει τις απαιτήσεις διαχείρισης και το λειτουργικό κόστος. Επιπλέον, η απόδοση του συστήματος μπορεί να επηρεαστεί από απότομες μεταβολές του οργανικού φορτίου ή της παροχής των λυμάτων (von Sperling, 2007).

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η ενεργός ιλύς εξακολουθεί να αποτελεί σημείο αναφοράς για τη βιολογική επεξεργασία λυμάτων και τη βάση ανάπτυξης πολλών σύγχρονων προκατασκευασμένων και αποκεντρωμένων τεχνολογιών. Η κατανόηση της λειτουργίας της είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση των πιο εξελιγμένων συστημάτων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας (ΥΠΕΚΑ, 2012 , Καραπαπά, ΕΑΠ).

Πίνακας 14 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διεργασίας ενεργού ιλύος

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υψηλή απομάκρυνση BOD ₅ και TSS	Υψηλή κατανάλωση ενέργειας
Ευρεία εφαρμογή και τεχνογνωσία	Παραγωγή πλεονάζουσας ιλύος
Δυνατότητα απομάκρυνσης αζώτου και φωσφόρου	Ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης
Ευελιξία σχεδιασμού	Ευαισθησία σε απότομες μεταβολές φορτίου

Μηχανισμός λειτουργίας της ενεργού ιλύος

Η διεργασία ενεργού ιλύος βασίζεται στην ανάπτυξη μικροοργανισμών σε αιώρηση μέσα στη δεξαμενή αερισμού. Οι μικροοργανισμοί αυτοί σχηματίζουν συσσωματώματα γνωστά ως βιοκροκίδες (flocs), τα οποία αποτελούνται από βακτήρια, πρωτόζωα, μύκητες και εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS). Οι βιοκροκίδες προσροφούν και αποδομούν το οργανικό φορτίο των λυμάτων, μετατρέποντάς το σε νέα βιομάζα, διοξείδιο του άνθρακα και νερό (Henze et al., 2008).

Η παροχή οξυγόνου μέσω συστημάτων αερισμού είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της μικροβιακής δραστηριότητας και την αποτελεσματική οξείδωση των οργανικών ενώσεων. Παράλληλα, ο αερισμός εξασφαλίζει την ανάμιξη του περιεχομένου της δεξαμενής και τη διατήρηση της βιομάζας σε αιώρηση. Μετά την ολοκλήρωση της βιολογικής επεξεργασίας, το μίγμα υγρού και βιομάζας οδηγείται στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, όπου πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της ιλύος από το επεξεργασμένο νερό (Grady et al., 2011).

Η ανακυκλοφορία μέρους της καθιζάνουσας ιλύος προς τη δεξαμενή αερισμού επιτρέπει τη διατήρηση επαρκούς συγκέντρωσης μικροοργανισμών στο σύστημα, ενώ η πλεονάζουσα ιλύς απομακρύνεται για περαιτέρω επεξεργασία. Η ισορροπία μεταξύ ανάπτυξης και απομάκρυνσης της βιομάζας αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη σταθερή λειτουργία της διεργασίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Βασικές λειτουργικές παράμετροι

Η απόδοση της ενεργού ιλύος εξαρτάται από μία σειρά λειτουργικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών και τη σταθερότητα της εγκατάστασης.

Συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών (MLSS)

Η παράμετρος MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids) εκφράζει τη συνολική συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στο μίγμα της δεξαμενής αερισμού και χρησιμοποιείται ως δείκτης της ποσότητας βιομάζας που συμμετέχει στη διεργασία. Η τιμή της επηρεάζει άμεσα την αποδοτικότητα απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου (Henze et al., 2008).

Λόγος τροφής προς μικροοργανισμούς (F/M)

Ο λόγος F/M (Food to Microorganisms Ratio) εκφράζει τη σχέση μεταξύ του εισερχόμενου οργανικού φορτίου και της διαθέσιμης βιομάζας. Υψηλές τιμές οδηγούν σε ταχεία ανάπτυξη μικροοργανισμών, ενώ χαμηλές τιμές ευνοούν τη σταθερότητα και την παραγωγή καλά καθιζάνουσας ιλύος (Grady et al., 2011).

Χρόνος παραμονής στερεών (SRT)

Ο χρόνος παραμονής στερεών ή ηλικία ιλύος (Sludge Retention Time – SRT) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους σχεδιασμού. Ορίζει το χρονικό διάστημα κατά το

οποίο η βιομάζα παραμένει στο σύστημα και επηρεάζει σημαντικά τη νιτροποίηση, την παραγωγή ιλύος και τη συνολική απόδοση της εγκατάστασης (Metcalf & Eddy, 2014).

Διαλυμένο οξυγόνο (DO)

Η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου επηρεάζει άμεσα τον ρυθμό βιολογικής οξείδωσης. Συνήθως διατηρείται σε επίπεδα 1,5–3,0 mg/L ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία των αερόβιων μικροοργανισμών και η αποφυγή αναερόβιων συνθηκών μέσα στη δεξαμενή αερισμού (Henze et al., 2008).

Παραλλαγές της διεργασίας ενεργού ιλύος

Με την πάροδο των ετών αναπτύχθηκαν διάφορες παραλλαγές της διεργασίας ενεργού ιλύος, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης και την προσαρμογή σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Η **συμβατική ενεργός ιλύς (Conventional Activated Sludge – CAS)** αποτελεί τη βασική μορφή της διεργασίας και εφαρμόζεται ευρέως σε δημοτικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

Η **παρατεταμένη αερόβια επεξεργασία (Extended Aeration)** λειτουργεί με μεγαλύτερους χρόνους αερισμού και ηλικίας ιλύος, παρουσιάζοντας μειωμένη παραγωγή πλεονάζουσας ιλύος και αυξημένη λειτουργική σταθερότητα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται συχνά σε μικρές και αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις (von Sperling, 2007).

Η **τάφρος οξείδωσης (Oxidation Ditch)** αποτελεί ειδική παραλλαγή παρατεταμένου αερισμού με κυκλική διάταξη της δεξαμενής, επιτρέποντας υψηλή απόδοση απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και αζώτου (Metcalf & Eddy, 2014).

Τέλος, οι **αντιδραστήρες διαλείποντος έργου (Sequencing Batch Reactors – SBR)** πραγματοποιούν διαδοχικά όλα τα στάδια επεξεργασίας μέσα στην ίδια δεξαμενή. Λόγω της ευελιξίας και του μικρού απαιτούμενου χώρου, οι SBR χρησιμοποιούνται ευρέως σε σύγχρονα προκατασκευασμένα και αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων (EPA, 1999· ΥΠΕΚΑ, 2012).

4.1.2 Διεργασίες βιοφίλμ

Οι διεργασίες βιοφίλμ (biofilm processes) αποτελούν μία από τις βασικές κατηγορίες βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων και βασίζονται στην ανάπτυξη μικροοργανισμών πάνω

σε στερεές επιφάνειες. Σε αντίθεση με τη διεργασία ενεργού ιλύος, όπου η βιομάζα παραμένει σε αιώρηση μέσα στο υγρό περιβάλλον, στα συστήματα βιοφίλμ οι μικροοργανισμοί προσκολλώνται σε κατάλληλα υποστρώματα σχηματίζοντας μία λεπτή βιολογική μεμβράνη. Η βιολογική αυτή στοιβάδα αποτελείται από βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα και εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS), οι οποίες συμβάλλουν στη συνοχή και σταθερότητα του βιοφίλμ (Metcalf & Eddy, 2014).

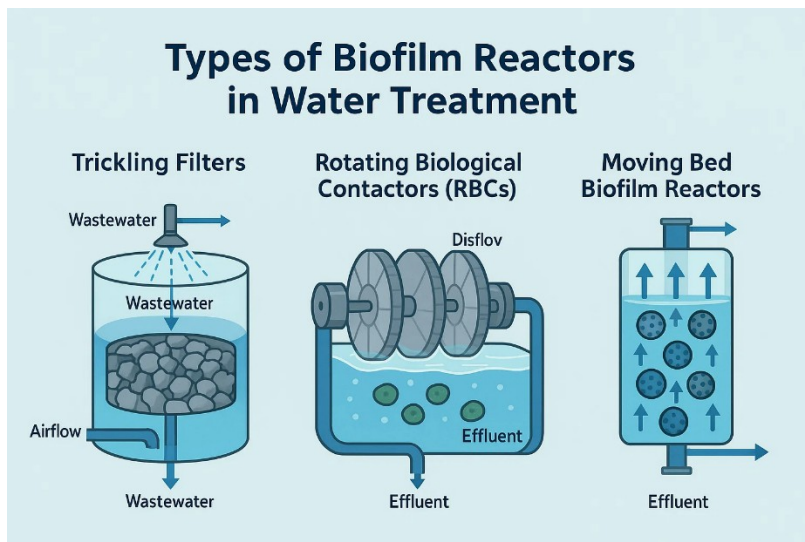
Η λειτουργία των συστημάτων βιοφίλμ βασίζεται στη μεταφορά οργανικών ουσιών και οξυγόνου από το υγρό περιβάλλον προς τη βιολογική μεμβράνη. Οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται στις εξωτερικές στοιβάδες του βιοφίλμ καταναλώνουν το διαθέσιμο οργανικό φορτίο και το οξυγόνο, ενώ στα εσωτερικά στρώματα δημιουργούνται διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες που επιτρέπουν την ανάπτυξη εξειδικευμένων μικροβιακών πληθυσμών. Η δομή αυτή καθιστά τα συστήματα βιοφίλμ ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών (Henze et al., 2008).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των διεργασιών βιοφίλμ είναι η υψηλή συγκέντρωση βιομάζας που μπορεί να αναπτυχθεί ανά μονάδα όγκου αντιδραστήρα. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την επίτευξη υψηλών ρυθμών επεξεργασίας και μειωμένων απαιτήσεων χώρου σε σύγκριση με ορισμένα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος. Επιπλέον, τα συστήματα βιοφίλμ παρουσιάζουν αυξημένη ανθεκτικότητα σε απότομες μεταβολές παροχής και οργανικού φορτίου, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για αποκεντρωμένες εφαρμογές και εγκαταστάσεις με εποχιακές διακυμάνσεις φορτίου (Ødegaard, 2006).

Στην κατηγορία των διεργασιών βιοφίλμ περιλαμβάνονται διάφορες τεχνολογίες όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, όπως τα βιολογικά φίλτρα (trickling filters), οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι (Rotating Biological Contactors – RBC), οι αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης βιοφίλμ (Moving Bed Biofilm Reactors – MBBR) και οι αντιδραστήρες αεριζόμενης μεμβράνης βιοφίλμ (Membrane Aerated Biofilm Reactors – MABR). Οι τεχνολογίες αυτές παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού, αλλά όλες βασίζονται στην ανάπτυξη προσκολλημένης βιομάζας ως κύριου μηχανισμού επεξεργασίας (Rusten et al., 2006).

Τα τελευταία χρόνια, οι διεργασίες βιοφίλμ έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία στον σχεδιασμό προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Η δυνατότητα επίτευξης υψηλής απόδοσης σε περιορισμένο χώρο, σε συνδυασμό με τη σχετικά χαμηλή παραγωγή πλεονάζουσας ιλύος και τη βελτιωμένη λειτουργική σταθερότητα, έχει οδηγήσει στην ευρεία εφαρμογή τους σε μικρούς οικισμούς, ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις και αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας (ΥΠΕΚΑ, 2012· Καραπαπά, ΕΑΠ).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η λειτουργία των συστημάτων βιοφίλμ επηρεάζεται από παράγοντες όπως η παροχή οξυγόνου, η θερμοκρασία, η ποιότητα του υποστρώματος ανάπτυξης και το πάχος της βιολογικής μεμβράνης. Η κατανόηση των παραμέτρων αυτών είναι απαραίτητη για τον σωστό σχεδιασμό και τη βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων, ιδιαίτερα στις σύγχρονες εφαρμογές υψηλής απόδοσης.



Εικόνα 2 Σχηματική απεικόνιση της ανάπτυξης βιοφίλμ πάνω σε στερεό υπόστρωμα και των ζωνών μεταφοράς οξυγόνου και υποστρώματος (Nihao Water, 2025). <https://www.nihaowater.com/news/a-comprehensive-guide-to-biofilm-processes-in-water-treatment.html>

Πίνακας 15 Βασικά χαρακτηριστικά διεργασιών βιοφίλμ

Χαρακτηριστικό	Διεργασίες βιοφίλμ
Ανάπτυξη βιομάζας	Προσκολλημένη
Ανάγκη καθίζησης	Περιορισμένη
Αντοχή σε μεταβολές φορτίου	Υψηλή

Χαρακτηριστικό	Διεργασίες βιοφίλμ
Παραγωγή ιλύος	Μικρότερη από ενεργό ιλύ
Απαιτούμενος χώρος	Μικρός έως μέτριος
Καταλληλότητα για προκατασκευασμένες εφαρμογές	Πολύ υψηλή

Δομή και ανάπτυξη του βιοφίλμ

Η δημιουργία του βιοφίλμ αποτελεί μια δυναμική διαδικασία που ξεκινά με την προσκόλληση μικροοργανισμών σε μία στερεή επιφάνεια. Αρχικά, βακτήρια που μεταφέρονται μέσω της υγρής φάσης προσκολλώνται αναστρέψιμα στο υπόστρωμα. Στη συνέχεια, μέσω της παραγωγής εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών (Extracellular Polymeric Substances – EPS), η προσκόλληση γίνεται μόνιμη και αρχίζει η ανάπτυξη της μικροβιακής κοινότητας (Flemming & Wingender, 2010).

Καθώς το βιοφίλμ αναπτύσσεται, δημιουργείται μία σύνθετη τρισδιάστατη δομή που αποτελείται από μικροοργανισμούς, νερό, οργανικά υλικά και εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες. Οι ουσίες EPS λειτουργούν ως προστατευτικό πλέγμα που προσδίδει μηχανική σταθερότητα στο βιοφίλμ και προστατεύει τους μικροοργανισμούς από μεταβολές του περιβάλλοντος και πιθανές τοξικές ουσίες (Henze et al., 2008).

Η ανάπτυξη του βιοφίλμ περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια:

1. Αρχική προσκόλληση μικροοργανισμών.
2. Μόνιμη προσκόλληση και παραγωγή EPS.
3. Ωρίμανση και ανάπτυξη της βιολογικής μεμβράνης.
4. Αποκόλληση τμημάτων βιομάζας και ανανέωση του βιοφίλμ.

Η αποκόλληση αποτελεί φυσικό στάδιο της διεργασίας και επιτρέπει τη διατήρηση ισορροπίας μεταξύ ανάπτυξης και απομάκρυνσης της βιομάζας (Flemming et al., 2016).

Μεταφορά μάζας και λειτουργικές ζώνες στο βιοφίλμ

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των διεργασιών βιοφίλμ είναι η ανάπτυξη διαφορετικών μικροπεριβαλλόντων στο εσωτερικό της βιολογικής μεμβράνης. Καθώς το οξυγόνο και οι οργανικές ουσίες διαχέονται από το υγρό περιβάλλον προς το εσωτερικό του βιοφίλμ, δημιουργούνται βαθμίδες συγκέντρωσης που οδηγούν στην ανάπτυξη διαφορετικών βιολογικών ζωνών (Metcalf & Eddy, 2014).

Στο εξωτερικό τμήμα του βιοφίλμ επικρατούν συνήθως αερόβιες συνθήκες λόγω της άμεσης επαφής με το διαλυμένο οξυγόνο. Σε βαθύτερα στρώματα παρατηρούνται ανοξικές ή ακόμη και αναερόβιες συνθήκες, καθώς η συγκέντρωση οξυγόνου μειώνεται σημαντικά λόγω κατανάλωσης από τους μικροοργανισμούς των εξωτερικών στρωμάτων (Ødegaard, 2006).

Η συνύπαρξη διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών μέσα στο ίδιο βιοφίλμ επιτρέπει την ταυτόχρονη πραγματοποίηση πολλαπλών διεργασιών, όπως:

- Απομάκρυνση οργανικού φορτίου.
- Νιτροποίηση.
- Απονιτροποίηση.
- Βιολογική απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών.

Η ιδιότητα αυτή αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων βιοφίλμ και εξηγεί τη μεγάλη αποδοτικότητά τους σε περιορισμένο όγκο αντιδραστήρα (Rittmann & McCarty, 2001).

Βασικές τεχνολογίες βιοφίλμ

Οι διεργασίες βιοφίλμ εφαρμόζονται σε διάφορες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίες διαφέρουν ως προς τον τρόπο ανάπτυξης και υποστήριξης της βιομάζας.

Τα **βιολογικά φίλτρα (Trickling Filters)** αποτελούν μία από τις παλαιότερες εφαρμογές βιοφίλμ και βασίζονται στη διήθηση των λυμάτων μέσω πληρωτικών υλικών πάνω στα οποία αναπτύσσεται η βιολογική μεμβράνη (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι **περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι (Rotating Biological Contactors – RBC)** χρησιμοποιούν δίσκους μερικώς βυθισμένους στα λύματα, οι οποίοι περιστρέφονται επιτρέποντας την εναλλασσόμενη επαφή της βιομάζας με το οργανικό φορτίο και το οξυγόνο (Tchobanoglous et al., 2014).

Οι **αντιδραστήρες κινούμενης κλίνης βιοφίλμ (Moving Bed Biofilm Reactors – MBBR)** χρησιμοποιούν ειδικούς πλαστικούς φορείς που κινούνται ελεύθερα μέσα στον αντιδραστήρα και παρέχουν μεγάλη επιφάνεια ανάπτυξης μικροοργανισμών. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε προκατασκευασμένες εγκαταστάσεις λόγω της υψηλής απόδοσης και του μικρού απαιτούμενου χώρου (Ødegaard, 2006).

Παράλληλα, τα συστήματα **IFAS (Integrated Fixed-film Activated Sludge)** συνδυάζουν ενεργό ιλύ και βιοφίλμ στον ίδιο αντιδραστήρα, ενώ οι **MABR (Membrane**

Aerated Biofilm Reactors) αξιοποιούν μεμβράνες για την παροχή οξυγόνου απευθείας στο βιοφίλμ, επιτυγχάνοντας υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα και αυξημένη απομάκρυνση αζώτου (Martin & Nerenberg, 2012).

Οι τεχνολογίες αυτές αποτελούν σήμερα τη βάση πολλών σύγχρονων αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

4.1.3 Αναερόβιες διεργασίες

Οι αναερόβιες διεργασίες αποτελούν μία από τις σημαντικότερες βιολογικές μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων και οργανικών αποβλήτων. Η βασική τους αρχή στηρίζεται στην αποδόμηση της οργανικής ύλης από εξειδικευμένους μικροοργανισμούς υπό συνθήκες απουσίας ελεύθερου διαλυμένου οξυγόνου. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι οργανικές ενώσεις μετατρέπονται σταδιακά σε απλούστερα προϊόντα, με τελικό αποτέλεσμα την παραγωγή βιοαερίου, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) (Henze et al., 2008· Speece, 2008).

Η αναερόβια επεξεργασία χρησιμοποιείται ευρέως για τη διαχείριση λυμάτων υψηλού οργανικού φορτίου, ιλύος βιολογικών καθαρισμών και βιομηχανικών αποβλήτων, ενώ τα τελευταία χρόνια αυξάνεται το ενδιαφέρον για την εφαρμογή της και σε αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της είναι ότι, σε αντίθεση με τις αερόβιες διεργασίες, δεν απαιτείται συνεχής παροχή αέρα, γεγονός που μειώνει σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις της εγκατάστασης (Lettinga & Hulshoff Pol, 1991).

Μηχανισμός της αναερόβιας αποδόμησης

Η αναερόβια αποδόμηση αποτελεί μια πολύπλοκη μικροβιακή διεργασία η οποία πραγματοποιείται μέσω συνεργασίας διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών. Η διαδικασία διακρίνεται σε τέσσερα διαδοχικά στάδια: υδρόλυση, οξεογένεση, ακετογένεση και μεθανογένεση (Henze et al., 2008).

Υδρόλυση (Hydrolysis)

Κατά το πρώτο στάδιο, οι σύνθετες οργανικές ενώσεις των λυμάτων, όπως πρωτεΐνες, λίπη και υδατάνθρακες, διασπώνται σε απλούστερα και διαλυτά μόρια μέσω της δράσης εξωκυτταρικών ενζύμων που παράγονται από υδρολυτικά βακτήρια.

Ενδεικτικά:

- Πρωτεΐνες → αμινοξέα
- Υδατάνθρακες → απλά σάκχαρα
- Λίπη → λιπαρά οξέα και γλυκερόλη

Η υδρόλυση θεωρείται συχνά το βραδύτερο στάδιο της συνολικής διεργασίας και μπορεί να περιορίζει τη συνολική απόδοση της αναερόβιας επεξεργασίας, ιδιαίτερα όταν τα απόβλητα περιέχουν μεγάλες ποσότητες στερεών οργανικών υλικών (Spreese, 2008).

Οξεογένεση (Acidogenesis)

Τα προϊόντα της υδρόλυσης μεταβολίζονται από οξεογόνα βακτήρια, τα οποία παράγουν πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs), αλκοόλες, υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία.

Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται από έντονη παραγωγή οργανικών οξέων και συνεπώς μπορεί να προκαλέσει μείωση του pH εάν δεν υπάρχει επαρκής ρυθμιστική ικανότητα στο σύστημα (Henze et al., 2008).

Ακετογένεση (Acetogenesis)

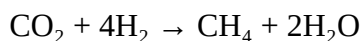
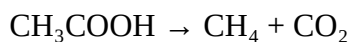
Κατά την ακετογένεση, τα προϊόντα της οξεογένεσης μετατρέπονται σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα από εξειδικευμένα ακετογόνα βακτήρια.

Το στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς τα προϊόντα του αποτελούν το βασικό υπόστρωμα για τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς που συμμετέχουν στο τελικό στάδιο της διεργασίας (Lettinga et al., 2001).

Μεθανογένεση (Methanogenesis)

Η μεθανογένεση αποτελεί το τελικό και κρίσιμότερο στάδιο της αναερόβιας επεξεργασίας. Κατά το στάδιο αυτό, οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί μετατρέπουν το οξικό οξύ και το υδρογόνο σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Οι κύριες αντιδράσεις είναι:



Η σταθερότητα της μεθανογένεσης είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή λειτουργία του συστήματος, καθώς οι μεθανογόνοι οργανισμοί είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε μεταβολές του pH, της θερμοκρασίας και των τοξικών ουσιών (Spreese, 2008).

4.1.4 Νιτροποίηση και απονιτροποίηση

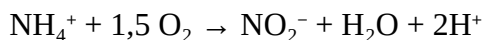
Η απομάκρυνση του αζώτου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες των σύγχρονων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, καθώς η ανεξέλεγκτη διάθεση αζωτούχων ενώσεων σε φυσικούς αποδέκτες μπορεί να προκαλέσει ευτροφισμό, μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και υποβάθμιση της οικολογικής κατάστασης των υδάτινων οικοσυστημάτων. Για τον λόγο αυτό, η ευρωπαϊκή και ελληνική νομοθεσία προβλέπουν αυστηρές απαιτήσεις σχετικά με την απομάκρυνση αζώτου από τα αστικά λύματα, ιδιαίτερα στις ευαίσθητες περιοχές (Οδηγία 91/271/ΕΟΚ· ΚΥΑ 5673/400/1997).

Η βιολογική απομάκρυνση του αζώτου πραγματοποιείται κυρίως μέσω δύο διαδοχικών διεργασιών, της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης. Οι διεργασίες αυτές αξιοποιούν εξειδικευμένους μικροοργανισμούς και αποτελούν βασικό στοιχείο σχεδιασμού των περισσότερων σύγχρονων βιολογικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (Henze et al., 2008).

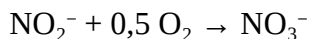
Νιτροποίηση

Η νιτροποίηση είναι μία αερόβια βιολογική διεργασία κατά την οποία η αμμωνία (NH_4^+) μετατρέπεται σταδιακά σε νιτρικά ιόντα (NO_3^-). Η διαδικασία πραγματοποιείται από εξειδικευμένα αυτότροφα βακτήρια και περιλαμβάνει δύο διαδοχικά στάδια (Metcalf & Eddy, 2014).

Στο πρώτο στάδιο, βακτήρια του γένους **Nitrosomonas** οξειδώνουν την αμμωνία προς νιτρώδη ιόντα:



Στο δεύτερο στάδιο, βακτήρια του γένους **Nitrobacter** μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά ιόντα:



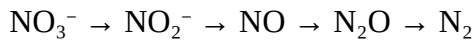
Η νιτροποίηση απαιτεί επαρκή παροχή οξυγόνου, κατάλληλο χρόνο παραμονής της βιομάζας και σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και pH. Οι νιτροποιητικοί μικροοργανισμοί αναπτύσσονται σχετικά αργά, γεγονός που καθιστά τη διεργασία ευαίσθητη σε μεταβολές των λειτουργικών συνθηκών (Rittmann & McCarty, 2001).

Απονιτροποίηση

Η απονιτροποίηση αποτελεί τη δεύτερη φάση της βιολογικής απομάκρυνσης αζώτου και πραγματοποιείται υπό ανοξικές συνθήκες, δηλαδή παρουσία νιτρικών αλλά απουσία διαλυμένου οξυγόνου.

Κατά τη διεργασία αυτή, ετερότροφοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τα νιτρικά ιόντα ως τελικό δέκτη ηλεκτρονίων αντί του οξυγόνου και τα μετατρέπουν σταδιακά σε αέριο άζωτο (N_2), το οποίο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα (Henze et al., 2008).

Η γενική ακολουθία μετατροπών είναι:



Η απονιτροποίηση απαιτεί διαθέσιμο οργανικό υπόστρωμα ως πηγή άνθρακα και κατάλληλες ανοξικές συνθήκες. Εάν δεν υπάρχει επαρκής οργανική ύλη στα λύματα, είναι δυνατόν να προστεθεί εξωτερική πηγή άνθρακα, όπως μεθανόλη ή οξικό οξύ (Metcalf & Eddy, 2014).

Παράγοντες που επηρεάζουν τη νιτροποίηση και απονιτροποίηση

Η αποτελεσματικότητα των διεργασιών επηρεάζεται από διάφορους λειτουργικούς παράγοντες.

Θερμοκρασία

Η αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει τη μικροβιακή δραστηριότητα και βελτιώνει τους ρυθμούς νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Βέλτιστες συνθήκες παρατηρούνται συνήθως μεταξύ 20 και 35°C (Henze et al., 2008).

Διαλυμένο οξυγόνο

Η νιτροποίηση απαιτεί αερόβιες συνθήκες, ενώ η απονιτροποίηση πραγματοποιείται σε ανοξικές συνθήκες. Επομένως, ο έλεγχος της συγκέντρωσης οξυγόνου αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων βιολογικής απομάκρυνσης αζώτου (Rittmann & McCarty, 2001).

pH

Οι νιτροποιητικοί οργανισμοί παρουσιάζουν βέλτιστη ανάπτυξη σε pH 7,0–8,5. Η μείωση του pH μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη δραστηριότητά τους και να περιορίσει την απόδοση της διεργασίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Χρόνος παραμονής στερεών (SRT)

Η νιτροποίηση απαιτεί σχετικά μεγάλους χρόνους παραμονής της βιομάζας, καθώς οι νιτροποιητικοί μικροοργανισμοί έχουν αργούς ρυθμούς ανάπτυξης. Για τον λόγο αυτό, η ηλικία ιλύος αποτελεί κρίσιμη παράμετρο σχεδιασμού (Henze et al., 2008).

Εφαρμογή σε σύγχρονα αποκεντρωμένα συστήματα

Η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση ενσωματώνονται σήμερα σε πολλές τεχνολογίες αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων, όπως τα συστήματα ενεργού ιλύος, οι αντιδραστήρες SBR, τα συστήματα MBBR, οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR) και τα υβριδικά συστήματα IFAS. Η δυνατότητα επίτευξης αποτελεσματικής απομάκρυνσης αζώτου αποτελεί βασικό κριτήριο επιλογής των τεχνολογιών αυτών, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου ισχύουν αυστηρές περιβαλλοντικές απαιτήσεις (Ødegaard, 2006· ΥΠΕΚΑ, 2012).

Η συνεχής ανάπτυξη νέων τεχνολογιών βιοφίλμ και υβριδικών συστημάτων έχει συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της αποδοτικότητας των διεργασιών νιτροποίησης και απονιτροποίησης, επιτρέποντας την επίτευξη υψηλών ποσοστών απομάκρυνσης αζώτου ακόμη και σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας.

4.2 Φυσικοχημικές διεργασίες

Οι φυσικοχημικές διεργασίες αποτελούν σημαντικό τμήμα των σύγχρονων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων και χρησιμοποιούνται είτε ως αυτόνομες μέθοδοι είτε συμπληρωματικά προς τις βιολογικές διεργασίες. Η λειτουργία τους βασίζεται σε φυσικούς και χημικούς μηχανισμούς απομάκρυνσης ρύπων, όπως η καθίζηση, η κροκίδωση, η διήθηση, η προσρόφηση και η απολύμανση, χωρίς να απαιτείται απαραίτητα η δράση μικροοργανισμών (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι διεργασίες αυτές εφαρμόζονται σε διάφορα στάδια της επεξεργασίας λυμάτων, από την πρωτοβάθμια επεξεργασία έως και την τριτοβάθμια επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των εκροών. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, φωσφόρου, παθογόνων μικροοργανισμών, μικρορύπων και άλλων ουσιών που δεν μπορούν να απομακρυνθούν αποτελεσματικά μόνο με βιολογικές διεργασίες (Spellman, 2013).

Η σημασία των φυσικοχημικών διεργασιών έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια λόγω των αυστηρότερων περιβαλλοντικών απαιτήσεων, της ανάγκης επαναχρησιμοποίησης του

επεξεργασμένου νερού και της ανάπτυξης προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας. Παράλληλα, πολλές σύγχρονες προκατασκευασμένες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων ενσωματώνουν φυσικοχημικά στάδια ως μέρος ολοκληρωμένων υβριδικών συστημάτων, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας εκροής και την επίτευξη υψηλότερων ποσοστών απομάκρυνσης ρύπων (Capodaglio, 2017).

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι βασικότερες φυσικοχημικές διεργασίες που εφαρμόζονται στα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, με έμφαση στις αρχές λειτουργίας τους, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους, καθώς και τον ρόλο τους στα σύγχρονα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας.

4.2.1 Κροκίδωση – Καθίζηση

Η κροκίδωση και η καθίζηση αποτελούν βασικές φυσικοχημικές διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων και χρησιμοποιούνται ευρέως για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, κολλοειδών σωματιδίων, οργανικών ενώσεων και θρεπτικών συστατικών. Οι διεργασίες αυτές εφαρμόζονται τόσο στην επεξεργασία αστικών λυμάτων όσο και στη διαχείριση βιομηχανικών αποβλήτων, είτε ως στάδιο προ επεξεργασίας είτε ως συμπληρωματική διεργασία μετά τη βιολογική επεξεργασία (Metcalf & Eddy, 2014).

Πολλά από τα σωματίδια που περιέχονται στα λύματα βρίσκονται σε κολλοειδή μορφή και χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό μέγεθος και ηλεκτρικό φορτίο, γεγονός που εμποδίζει τη φυσική καθίζησή τους. Για την απομάκρυνσή τους απαιτείται αρχικά η αποσταθεροποίηση των κολλοειδών μέσω της διαδικασίας της πήξης (coagulation), ακολουθούμενη από την κροκίδωση (flocculation), κατά την οποία σχηματίζονται μεγαλύτερα και βαρύτερα συσσωματώματα που μπορούν να απομακρυνθούν με καθίζηση (Bratby, 2016).

Πήξη και κροκίδωση

Η πήξη αποτελεί τη διαδικασία κατά την οποία προστίθενται χημικά αντιδραστήρια με σκοπό την εξουδετέρωση των ηλεκτρικών φορτίων των κολλοειδών σωματιδίων. Τα συνηθέστερα κροκιδωτικά μέσα είναι τα άλατα αργιλίου και σιδήρου, όπως το θειικό αργίλιο ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), το χλωριούχο σίδηρο (FeCl_3) και το πολυχλωριούχο αργίλιο (PAC). Τα αντιδραστήρια αυτά υδρολύονται στο νερό σχηματίζοντας θετικά φορτισμένα

σύμπλοκα, τα οποία εξουδετερώνουν τα αρνητικά φορτία των κολλοειδών και διευκολύνουν τη συσσωμάτωσή τους (Bratby, 2016).

Μετά την πήξη ακολουθεί η κροκίδωση, κατά την οποία εφαρμόζεται ήπια ανάδευση ώστε τα αποσταθεροποιημένα σωματίδια να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους και να σχηματίσουν μεγαλύτερες κροκίδες. Κατά τη διαδικασία αυτή συχνά χρησιμοποιούνται πολυηλεκτρολύτες, οι οποίοι λειτουργούν ως «γέφυρες» μεταξύ των σωματιδίων και ενισχύουν τον σχηματισμό σταθερών συσσωματωμάτων (Bolto & Gregory, 2007).

Η αποτελεσματικότητα της κροκίδωσης επηρεάζεται σημαντικά από το pH, τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών, τη δόση των χημικών αντιδραστηρίων και τις συνθήκες ανάδευσης. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη υψηλής απόδοσης και τη μείωση της κατανάλωσης χημικών (Gregory & Barany, 2011).

Καθίζηση

Μετά τον σχηματισμό των κροκίδων, τα λύματα οδηγούνται σε δεξαμενές καθίζησης όπου πραγματοποιείται ο διαχωρισμός στερεών και υγρής φάσης μέσω της βαρύτητας. Οι σχηματισμένες κροκίδες κατακάθονται στον πυθμένα της δεξαμενής, σχηματίζοντας ιλύ, ενώ το διαυγασμένο νερό απομακρύνεται από το ανώτερο τμήμα της εγκατάστασης (Metcalf & Eddy, 2014).

Η καθίζηση αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες φυσικές διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων και η απόδοσή της εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος και η πυκνότητα των σωματιδίων, η θερμοκρασία, ο χρόνος παραμονής και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής. Σύμφωνα με τη θεωρία της καθίζησης, διακρίνονται τέσσερις βασικοί τύποι: η καθίζηση διακριτών σωματιδίων, η καθίζηση κροκιδωμένων σωματιδίων, η παρεμποδιζόμενη καθίζηση και η καθίζηση συμπίεσης (Vesilind & Morgan, 2011).

Εφαρμογές στην επεξεργασία λυμάτων

Οι διεργασίες πήξης–κροκίδωσης–καθίζησης εφαρμόζονται για:

- απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών (TSS),
- μείωση θολότητας,
- απομάκρυνση οργανικού φορτίου,
- απομάκρυνση βαρέων μετάλλων,
- χημική απομάκρυνση φωσφόρου,

- βελτίωση της απόδοσης των επόμενων σταδίων επεξεργασίας.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η εφαρμογή τους στην απομάκρυνση φωσφόρου. Η προσθήκη αλάτων αργιλίου ή σιδήρου οδηγεί στον σχηματισμό αδιάλυτων φωσφορικών ενώσεων, οι οποίες απομακρύνονται μέσω καθίζησης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ευρέως σε εγκαταστάσεις όπου απαιτείται συμμόρφωση με αυστηρά όρια εκροής για τον ολικό φώσφορο και συμβάλλει αποτελεσματικά στον περιορισμό του ευτροφισμού των επιφανειακών υδάτων (Morse et al., 1998).

Στα σύγχρονα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, οι φυσικοχημικές διεργασίες χρησιμοποιούνται συχνά ως συμπληρωματικό στάδιο για την επίτευξη υψηλότερης ποιότητας εκροής, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού (Capodaglio, 2017).

Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Τα βασικά πλεονεκτήματα των διεργασιών κροκίδωσης–καθίζησης είναι η υψηλή αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών, η δυνατότητα χημικής απομάκρυνσης φωσφόρου, η σχετικά απλή λειτουργία και η εύκολη ενσωμάτωσή τους σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

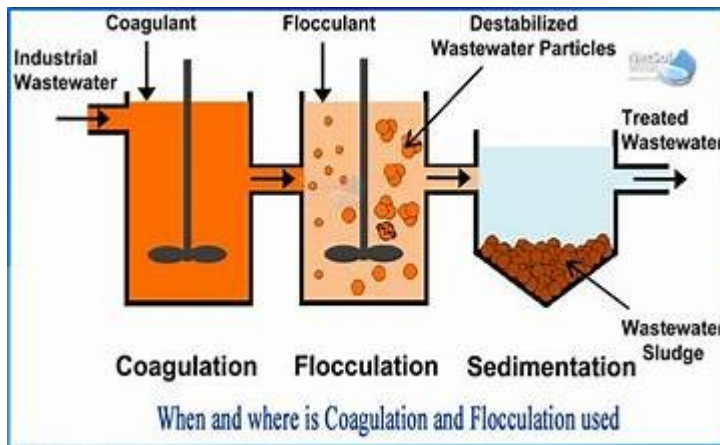
Ωστόσο, οι διεργασίες αυτές παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς, όπως η ανάγκη χρήσης χημικών αντιδραστηρίων, η παραγωγή επιπλέον ποσοτήτων χημικής ιλύος και η αύξηση του λειτουργικού κόστους. Επιπλέον, η απόδοσή τους επηρεάζεται από τη μεταβλητότητα της ποιότητας των εισερχόμενων λυμάτων και απαιτεί συστηματικό έλεγχο των λειτουργικών παραμέτρων (Bratby, 2016).

Παράγοντες σχεδιασμού και λειτουργίας

Ο σχεδιασμός των μονάδων κροκίδωσης–καθίζησης βασίζεται σε παραμέτρους όπως ο χρόνος παραμονής, η ταχύτητα ανάδευσης, η δόση των κροκιδωτικών μέσων και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών. Η σωστή επιλογή των παραμέτρων αυτών επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των παραγόμενων κροκίδων, την απόδοση καθίζησης και τη συνολική αποτελεσματικότητα της διεργασίας. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης χημικών συμβάλλει στη μείωση του λειτουργικού κόστους και της παραγόμενης ιλύος (Bratby, 2016· Metcalf & Eddy, 2014).

Ρόλος στα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα

Στα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων οι διεργασίες κροκίδωσης-καθίζησης χρησιμοποιούνται κυρίως ως στάδιο τριτοβάθμιας επεξεργασίας ή ως συμπληρωματική διεργασία απομάκρυνσης του φωσφόρου και των αιωρούμενων στερεών. Η εφαρμογή τους επιτρέπει τη βελτίωση της ποιότητας της εκροής και τη συμμόρφωση με αυστηρότερα περιβαλλοντικά πρότυπα, ιδιαίτερα όταν το επεξεργασμένο νερό προορίζεται για επαναχρησιμοποίηση στην άρδευση ή σε άλλες χρήσεις (Capodaglio, 2017· ΥΠΕΚΑ, 2012).



Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων πήξης, κροκίδωσης και καθίζησης κατά την επεξεργασία λυμάτων (Netsol Water, 2026) <https://www.netsolwater.com/when-and-where-is-coagulation-and-flocculation-used.php?blog=2906>

Η αλληλουχία των σταδίων πήξης, κροκίδωσης και καθίζησης παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3. Αρχικά πραγματοποιείται η αποσταθεροποίηση των κολλοειδών σωματιδίων με την προσθήκη κροκιδωτικών μέσων, ακολουθεί ο σχηματισμός κροκίδων μέσω ήπιας ανάδευσης και τέλος οι παραγόμενες κροκίδες απομακρύνονται με καθίζηση.

4.2.2 Διήθηση και απολύμανση

Η διήθηση και η απολύμανση αποτελούν βασικά στάδια της προχωρημένης και τριτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας της εκροής και τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας. Οι διεργασίες αυτές εφαρμόζονται συνήθως μετά την

πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία, απομακρύνοντας υπολειπόμενα αιωρούμενα στερεά, παθογόνους μικροοργανισμούς και άλλους ρύπους που ενδέχεται να παραμένουν στο επεξεργασμένο νερό (Metcalf & Eddy, 2014).

Η σημασία των διεργασιών αυτών έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξανόμενης ανάγκης επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων και των αυστηρότερων απαιτήσεων που θέτουν η ευρωπαϊκή και η ελληνική νομοθεσία σχετικά με την ποιότητα της εκροής (Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741· ΚΥΑ 145116/2011).

Διήθηση

Η διήθηση αποτελεί φυσική διεργασία διαχωρισμού κατά την οποία το επεξεργασμένο νερό διέρχεται μέσω πορώδους μέσου ή ειδικών μεμβρανών, με αποτέλεσμα την κατακράτηση αιωρούμενων στερεών, μικροοργανισμών και άλλων σωματιδίων. Σκοπός της διεργασίας είναι η περαιτέρω μείωση της θολότητας και η βελτίωση της ποιότητας της εκροής πριν από την απολύμανση ή την επαναχρησιμοποίηση (Spellman, 2013).

Τα συνηθέστερα συστήματα διήθησης που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία λυμάτων είναι:

- Φίλτρα άμμου (sand filters),
- Πολυστρωματικά φίλτρα,
- Φίλτρα ενεργού άνθρακα,
- Μεμβρανικά συστήματα μικροδιήθησης (MF),
- Υπερδιήθησης (UF),
- Νανοδιήθησης (NF),
- Αντίστροφης ώσμωσης (RO).
- Τα φίλτρα άμμου αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες λόγω

της απλής λειτουργίας και του χαμηλού κόστους τους. Αντίθετα, οι τεχνολογίες μεμβρανών προσφέρουν σημαντικά υψηλότερη απόδοση απομάκρυνσης μικροσωματιδίων και παθογόνων μικροοργανισμών, αλλά συνοδεύονται από αυξημένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας (Judd, 2011).

Απολύμανση

Η απολύμανση αποτελεί το τελικό στάδιο επεξεργασίας πριν από τη διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων και αποσκοπεί στην εξουδετέρωση ή σημαντική μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών. Η διεργασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική

όταν το επεξεργασμένο νερό πρόκειται να επαναχρησιμοποιηθεί σε αρδευτικές ή αστικές εφαρμογές (WHO, 2017).

Οι κυριότερες μέθοδοι απολύμανσης είναι:

Χλωρίωση

Η χλωρίωση αποτελεί τη συνηθέστερη μέθοδο απολύμανσης παγκοσμίως λόγω της αποτελεσματικότητας και του σχετικά χαμηλού κόστους της. Η δράση του χλωρίου βασίζεται στην οξείδωση των κυτταρικών δομών των μικροοργανισμών, οδηγώντας στην καταστροφή τους. Ωστόσο, η μέθοδος μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό παραπροϊόντων απολύμανσης, όπως τα τριαλογονομεθάνια (THMs), τα οποία ενδέχεται να παρουσιάζουν περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις (Metcalf & Eddy, 2014).

Υπεριώδης ακτινοβολία (UV)

Η απολύμανση με υπεριώδη ακτινοβολία βασίζεται στην καταστροφή του γενετικού υλικού των μικροοργανισμών, εμποδίζοντας την αναπαραγωγή τους. Η μέθοδος θεωρείται ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον, καθώς δεν απαιτεί προσθήκη χημικών και δεν παράγει επικίνδυνα παραπροϊόντα. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται σημαντικά από τη θολότητα και την ποιότητα της εκροής (EPA, 2006).

Όζον (O₃)

Το όζον αποτελεί ισχυρό οξειδωτικό μέσο με υψηλή απολυμαντική ικανότητα. Παρουσιάζει αποτελεσματική δράση έναντι βακτηρίων, ιών και πρωτοζώων, ενώ παράλληλα συμβάλλει στην απομάκρυνση οσμών και χρωμάτων. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι το αυξημένο ενεργειακό κόστος παραγωγής του όζοντος (Tchobanoglous et al., 2014).

Ρόλος στη επαναχρησιμοποίηση λυμάτων

Η διήθηση και η απολύμανση αποτελούν κρίσιμα στάδια για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού. Σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741 και την ελληνική ΚΥΑ 145116/2011, η ποιότητα της εκροής πρέπει να πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις ως προς τα αιωρούμενα στερεά, τη θολότητα και τη μικροβιολογική ποιότητα, ώστε να επιτρέπεται η χρήση της στην άρδευση ή σε άλλες εφαρμογές (Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741· ΚΥΑ 145116/2011).

Για τον λόγο αυτό, πολλές σύγχρονες αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις και προκατασκευασμένα συστήματα συνδυάζουν βιολογική επεξεργασία, διήθηση και

απολύμανση σε ενιαίες μονάδες, επιτυγχάνοντας υψηλή ποιότητα εκροής και αυξημένη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του νερού (Capodaglio, 2017).

Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Η εφαρμογή της διήθησης και της απολύμανσης προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η βελτίωση της ποιότητας εκροής, η απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων. Παράλληλα, συμβάλλει στην προστασία των υδάτινων αποδεκτών και της δημόσιας υγείας.

Ωστόσο, ορισμένες τεχνολογίες παρουσιάζουν αυξημένο ενεργειακό ή λειτουργικό κόστος, ενώ η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την ποιότητα της εισερχόμενης εκροής. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου πρέπει να βασίζεται σε τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια (Judd, 2011).

4.2.3 Προσρόφηση και προηγμένες διεργασίες

Η συνεχής αυστηροποίηση των περιβαλλοντικών απαιτήσεων και η αυξανόμενη ανάγκη επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας, οι οποίες συμπληρώνουν τις συμβατικές βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες. Μεταξύ αυτών, η προσρόφηση αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους για την απομάκρυνση οργανικών μικρορύπων, φαρμακευτικών ουσιών, χρωστικών, βαρέων μετάλλων και άλλων ενώσεων που δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά με τις συμβατικές τεχνολογίες επεξεργασίας (Crini & Lichtfouse, 2019).

Παράλληλα, προηγμένες διεργασίες όπως οι προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες (Advanced Oxidation Processes – AOPs), οι τεχνολογίες μεμβρανών και οι διεργασίες συνδυασμένης επεξεργασίας εφαρμόζονται ολοένα και συχνότερα για την παραγωγή εκροών υψηλής ποιότητας, κατάλληλων για επαναχρησιμοποίηση ή διάθεση σε ευαίσθητους αποδέκτες (Shannon et al., 2008).

Προσρόφηση

Η προσρόφηση είναι φυσικοχημική διεργασία κατά την οποία διαλυμένες ουσίες συγκρατούνται στην επιφάνεια ενός στερεού υλικού, γνωστού ως προσροφητικό μέσο. Η

αποτελεσματικότητα της διεργασίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τόσο του προσροφητικού υλικού όσο και των προς απομάκρυνση ρύπων, όπως το μοριακό βάρος, η πολικότητα και η διαλυτότητα (Foo & Hameed, 2010).

Το συνηθέστερο προσροφητικό μέσο στην επεξεργασία λυμάτων είναι ο ενεργός άνθρακας, ο οποίος διαθέτει εξαιρετικά μεγάλη ειδική επιφάνεια και υψηλή ικανότητα συγκράτησης οργανικών ενώσεων. Ο ενεργός άνθρακας χρησιμοποιείται είτε σε μορφή κόκκων (Granular Activated Carbon – GAC) είτε σε μορφή σκόνης (Powdered Activated Carbon – PAC), ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής (Crini & Lichtfouse, 2019).

Η προσρόφηση εφαρμόζεται κυρίως για:

- απομάκρυνση φαρμακευτικών ουσιών,
- απομάκρυνση μικρορύπων και ενδοκρινικών διαταρακτών,
- μείωση χρώματος και οσμών,
- απομάκρυνση οργανικών τοξικών ενώσεων,
- απομάκρυνση βαρέων μετάλλων.

Η διεργασία παρουσιάζει υψηλή αποδοτικότητα ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη ως στάδιο τριτοβάθμιας επεξεργασίας (Foo & Hameed, 2010).

Προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες

Οι προηγμένες οξειδωτικές—διεργασίες οξείδωσης (AOPs) βασίζονται στην παραγωγή ισχυρών οξειδωτικών ριζών υδροξυλίου ($\bullet\text{OH}$), οι οποίες μπορούν να οξειδώσουν και να αποδομήσουν πολύπλοκες οργανικές ενώσεις που είναι δύσκολο να απομακρυνθούν με συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας (Oturán & Aaron, 2014).

Οι σημαντικότερες τεχνολογίες της κατηγορίας αυτής είναι:

- O_3 (όζον),
- O_3/UV ,
- $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$,
- Fenton και Photo-Fenton,
- φωτοκαταλυτικές διεργασίες με TiO_2 .

Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την απομάκρυνση ανθεκτικών οργανικών ενώσεων, φαρμακευτικών καταλοίπων, φυτοφαρμάκων και άλλων

αναδυόμενων ρύπων που παρουσιάζουν αυξανόμενο περιβαλλοντικό ενδιαφέρον (Oturán & Aaron, 2014).

Τεχνολογίες μεμβρανών

Οι τεχνολογίες μεμβρανών αποτελούν μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες προηγμένης επεξεργασίας λυμάτων. Η λειτουργία τους βασίζεται στη διέλευση του νερού μέσω ημιπερατών μεμβρανών, οι οποίες συγκρατούν σωματίδια, μικροοργανισμούς και διαλυμένες ουσίες ανάλογα με το μέγεθος των πόρων τους (Shannon et al., 2008).

Οι κυριότερες κατηγορίες είναι:

- Μικροδιήθηση (MF),
- Υπερδιήθηση (UF),
- Νανοδιήθηση (NF),
- Αντίστροφη ώσμωση (RO).

Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης νερού, καθώς μπορούν να επιτύχουν εξαιρετικά υψηλή ποιότητα εκροής. Ωστόσο, το υψηλό ενεργειακό κόστος και το φαινόμενο της έμφραξης των μεμβρανών (fouling) αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για την ευρύτερη εφαρμογή τους (Judd, 2011).

Εφαρμογές σε αποκεντρωμένα συστήματα

Οι προηγμένες διεργασίες αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στα σύγχρονα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Η συνδυασμένη εφαρμογή βιολογικής επεξεργασίας, προσρόφησης, μεμβρανών και απολύμανσης επιτρέπει την παραγωγή εκροών υψηλής ποιότητας, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άρδευση, αστικές χρήσεις ή εμπλουτισμό υδροφορέων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας (Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741· ΚΥΑ 145116/2011).

Παρά το αυξημένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, οι τεχνολογίες αυτές θεωρούνται κρίσιμες για τη μετάβαση προς συστήματα διαχείρισης λυμάτων που βασίζονται στις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της επαναχρησιμοποίησης των υδατικών πόρων (Capodaglio, 2017).

Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Οι διεργασίες προσρόφησης και οι προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως:

- υψηλή ποιότητα εκροής,
- αποτελεσματική απομάκρυνση μικρορύπων,
- δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης νερού,
- συμμόρφωση με αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα.

Ωστόσο, παρουσιάζουν και περιορισμούς, όπως:

- αυξημένο ενεργειακό κόστος,
- ανάγκη εξειδικευμένης λειτουργίας,
- κόστος αντικατάστασης προσροφητικών υλικών και μεμβρανών,
- παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων σε ορισμένες περιπτώσεις.

Για τον λόγο αυτό, η εφαρμογή τους αξιολογείται συνήθως σε συνδυασμό με τις συμβατικές τεχνολογίες επεξεργασίας, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ απόδοσης και κόστους (Shannon et al., 2008).

4.3 Συστήματα μικροφυκών

Τα συστήματα μικροφυκών αποτελούν μία σύγχρονη και περιβαλλοντικά φιλική προσέγγιση στην επεξεργασία λυμάτων, η οποία συνδυάζει την απομάκρυνση ρύπων με την παραγωγή αξιοποιήσιμης βιομάζας. Τα μικροφύκη είναι φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την ανάπτυξή τους, καταναλώνοντας διοξείδιο του άνθρακα και θρεπτικά συστατικά, όπως άζωτο και φώσφορο, τα οποία περιέχονται στα λύματα (Rawat et al., 2011).

Τα τελευταία χρόνια τα συστήματα μικροφυκών έχουν προσελκύσει αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς μπορούν να συμβάλουν ταυτόχρονα στην επεξεργασία λυμάτων, στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην ανάκτηση πόρων μέσω της παραγωγής βιομάζας. Η βιομάζα αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή βιοκαυσίμων, λιπασμάτων, ζωοτροφών ή άλλων προϊόντων προστιθέμενης αξίας, ενισχύοντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας (Pittman et al., 2011).

Σε αντίθεση με τις συμβατικές βιολογικές διεργασίες, όπου απαιτείται σημαντική παροχή οξυγόνου μέσω μηχανικού αερισμού, τα μικροφύκη παράγουν οξυγόνο μέσω της

φωτοσύνθεσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ετερότροφους μικροοργανισμούς για την αποδόμηση του οργανικού φορτίου. Η αλληλεπίδραση αυτή δημιουργεί ένα συνεργιστικό σύστημα επεξεργασίας με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις σε σύγκριση με πολλές συμβατικές τεχνολογίες (Craggs et al., 2012).

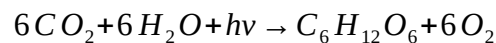
Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους, τα συστήματα μικροφυκών παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς, όπως η εξάρτηση από τις κλιματικές συνθήκες, η ανάγκη επαρκούς ηλιακής ακτινοβολίας και οι δυσκολίες συλλογής της παραγόμενης βιομάζας. Ωστόσο, η συνεχής ανάπτυξη νέων τεχνολογιών καλλιέργειας και συγκομιδής μικροφυκών βελτιώνει σταδιακά τη βιωσιμότητα και την εφαρμοσιμότητα των συστημάτων αυτών σε αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Posadas et al., 2017).

Η αξιοποίηση μικροφυκών θεωρείται σήμερα μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες για τη βιώσιμη διαχείριση υγρών αποβλήτων, ιδιαίτερα σε μικρής κλίμακας και αποκεντρωμένες εφαρμογές, όπου η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και η δυνατότητα ανάκτησης πόρων αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα (Rawat et al., 2011).

4.3.1 Αρχές λειτουργίας

Η λειτουργία των συστημάτων μικροφυκών βασίζεται στην ικανότητα των φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών να αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την ανάπτυξή τους, δεσμεύοντας διοξείδιο του άνθρακα και απορροφώντας θρεπτικά συστατικά από τα λύματα. Μέσω της φωτοσύνθεσης, τα μικροφύκη μετατρέπουν ανόργανες ενώσεις σε βιομάζα και παράγουν οξυγόνο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αερόβιους μικροοργανισμούς για την αποδόμηση του οργανικού φορτίου των λυμάτων (Rawat et al., 2011).

Η βασική φωτοσυνθετική αντίδραση μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά ως:



Μέσω της διαδικασίας αυτής, τα μικροφύκη καταναλώνουν διοξείδιο του άνθρακα, αμμωνιακό άζωτο, νιτρικά και φωσφορικά ιόντα, συμβάλλοντας στην απομάκρυνση των βασικών συστατικών που προκαλούν ευτροφισμό στα υδάτινα οικοσυστήματα (Pittman et al., 2011).

Συνεργασία μικροφυκών και βακτηρίων

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των συστημάτων μικροφυκών είναι η ανάπτυξη συμβιωτικής σχέσης μεταξύ μικροφυκών και βακτηρίων. Τα μικροφύκη παράγουν οξυγόνο μέσω της φωτοσύνθεσης, το οποίο χρησιμοποιείται από τα βακτήρια για τη βιολογική αποδόμηση της οργανικής ύλης. Αντίστοιχα, τα βακτήρια παράγουν διοξείδιο του άνθρακα κατά την αναπνοή τους, το οποίο χρησιμοποιείται από τα μικροφύκη για φωτοσύνθεση (Craggs et al., 2012).

Η αλληλεπίδραση αυτή δημιουργεί ένα φυσικό σύστημα ανακύκλωσης άνθρακα και οξυγόνου, μειώνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις μηχανικού αερισμού που χαρακτηρίζουν τις συμβατικές διεργασίες ενεργού ιλύος. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα μικροφυκών παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων (Posadas et al., 2017).

Τύποι συστημάτων μικροφυκών

Οι τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων με μικροφύκη μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: ανοικτά και κλειστά συστήματα.

Λίμνες υψηλού ρυθμού (High Rate Algal Ponds – HRAP)

Οι λίμνες υψηλού ρυθμού αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή εφαρμογής μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων. Πρόκειται για ρηχές δεξαμενές στις οποίες το μίγμα νερού και μικροφυκών κυκλοφορεί συνεχώς με τη βοήθεια περιστροφικών πτερυγίων (paddle wheels). Η μεγάλη επιφάνεια έκθεσης στο ηλιακό φως ευνοεί τη φωτοσύνθεση και την ανάπτυξη της βιομάζας, ενώ το χαμηλό κόστος κατασκευής τις καθιστά ελκυστική επιλογή για μικρούς οικισμούς και αποκεντρωμένες εφαρμογές (Craggs et al., 2012).

Φωτοβιοαντιδραστήρες (Photobioreactors – PBR)

Οι φωτοβιοαντιδραστήρες είναι κλειστά συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών, στα οποία οι συνθήκες λειτουργίας μπορούν να ελεγχθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρέχουν υψηλότερη παραγωγικότητα βιομάζας και καλύτερο έλεγχο της μόλυνσης από ανεπιθύμητους μικροοργανισμούς, όμως συνοδεύονται από σημαντικά υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας (Uggetti et al., 2014).

Οι φωτοβιοαντιδραστήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε ερευνητικές εφαρμογές ή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ποιότητα βιομάζας και αυξημένος έλεγχος της διεργασίας.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία

Η απόδοση των συστημάτων μικροφυκών επηρεάζεται από διάφορες περιβαλλοντικές και λειτουργικές παραμέτρους.

Ηλιακή ακτινοβολία

Η ένταση και η διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζουν άμεσα τον ρυθμό φωτοσύνθεσης και συνεπώς την ανάπτυξη των μικροφυκών. Η ανεπαρκής φωτεινότητα μπορεί να περιορίσει σημαντικά την αποδοτικότητα της διεργασίας (Rawat et al., 2011).

Θερμοκρασία

Τα περισσότερα είδη μικροφυκών αναπτύσσονται αποτελεσματικά σε θερμοκρασίες μεταξύ 20 και 30°C. Ακραίες θερμοκρασίες μπορούν να μειώσουν τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών (Pittman et al., 2011).

Διοξείδιο του άνθρακα

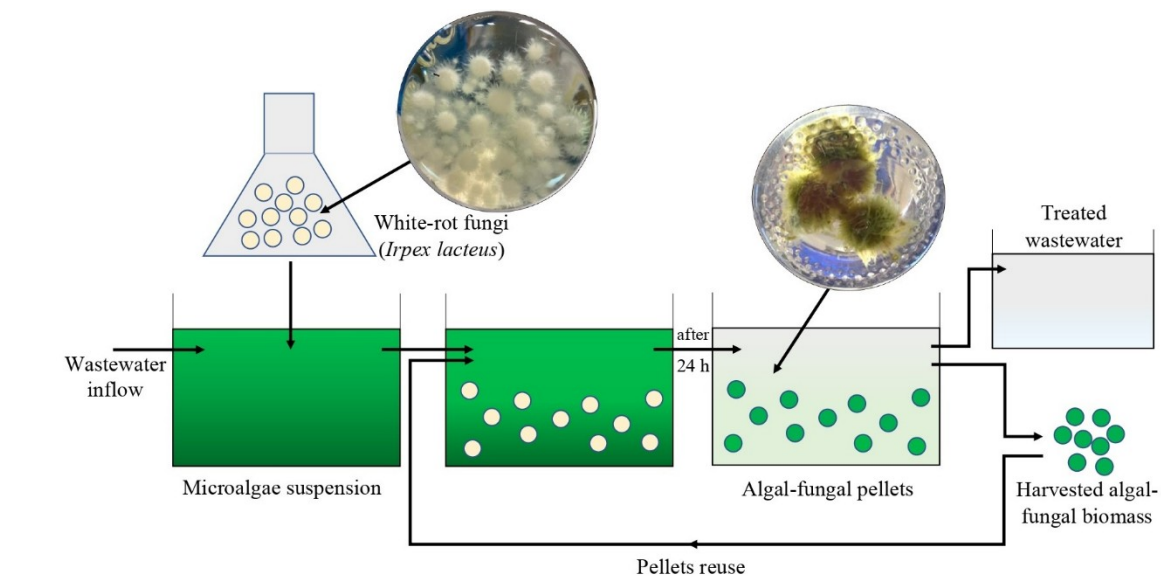
Η διαθεσιμότητα CO₂ αποτελεί σημαντικό παράγοντα ανάπτυξης, καθώς χρησιμοποιείται ως βασική πηγή άνθρακα κατά τη φωτοσύνθεση. Σε ορισμένες εγκαταστάσεις εφαρμόζεται τεχνητή παροχή CO₂ για την αύξηση της παραγωγικότητας της βιομάζας (Posadas et al., 2017).

pH και θρεπτικά συστατικά

Η συγκέντρωση αζώτου και φωσφόρου στα λύματα επηρεάζει άμεσα την ανάπτυξη των μικροφυκών. Παράλληλα, οι μεταβολές του pH μπορούν να επηρεάσουν τόσο τη βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών όσο και τη μικροβιακή δραστηριότητα του συστήματος (Uggetti et al., 2014).

Σημασία για τα αποκεντρωμένα συστήματα

Τα συστήματα μικροφυκών παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, καθώς συνδυάζουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και δυνατότητα παραγωγής αξιοποιήσιμης βιομάζας. Επιπλέον, μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα μικρών οικισμών ή αγροτικών περιοχών, όπου η διαθεσιμότητα χώρου είναι μεγαλύτερη και οι απαιτήσεις λειτουργίας σχετικά περιορισμένες (Craggs et al., 2012· Posadas et al., 2017)



Εικόνα 4 Σχηματική απεικόνιση της συνεργασίας μικροφυκών και βακτηρίων κατά την επεξεργασία λυμάτων και την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών Sático et al.(2022) <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/12/5799>

4.3.2 Απομάκρυνση θρεπτικών και παραγωγή βιομάζας

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των συστημάτων μικροφυκών είναι η δυνατότητά τους να συνδυάζουν την επεξεργασία λυμάτων με την ανάκτηση πόρων. Κατά την ανάπτυξή τους, τα μικροφύκη προσλαμβάνουν άζωτο, φώσφορο και διοξείδιο του άνθρακα από τα λύματα, χρησιμοποιώντας τα ως θρεπτικά συστατικά για τη σύνθεση νέας βιομάζας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ταυτόχρονα η απομάκρυνση ρύπων και η παραγωγή ενός προϊόντος με δυνατότητες περαιτέρω αξιοποίησης (Rawat et al., 2011).

Η απομάκρυνση του αζώτου πραγματοποιείται κυρίως μέσω της πρόσληψης αμμωνιακού αζώτου (NH_4^+), νιτρικών (NO_3^-) και νιτρωδών (NO_2^-) από τα μικροφύκη για τη σύνθεση πρωτεϊνών και άλλων κυτταρικών συστατικών. Παράλληλα, η έντονη φωτοσυνθετική δραστηριότητα αυξάνει το pH του συστήματος, γεγονός που μπορεί να ενισχύσει την απομάκρυνση αμμωνίας μέσω πτητικοποίησης υπό συγκεκριμένες συνθήκες (Pittman et al., 2011).

Ο φώσφορος απομακρύνεται κυρίως μέσω βιολογικής αφομοίωσης και ενσωμάτωσης στη βιομάζα των μικροφυκών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αύξηση του pH μπορεί επίσης

να οδηγήσει σε χημική κατακρήμνιση φωσφορικών ενώσεων, συμβάλλοντας περαιτέρω στη μείωση των συγκεντρώσεων φωσφόρου στην εκροή (Posadas et al., 2017).

Πέρα από τα θρεπτικά συστατικά, τα συστήματα μικροφυκών μπορούν να συμβάλουν και στη μείωση του οργανικού φορτίου των λυμάτων. Η συνεργασία μεταξύ μικροφυκών και βακτηρίων δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα στο οποίο τα βακτήρια αποδομούν την οργανική ύλη χρησιμοποιώντας το οξυγόνο που παράγεται από τα μικροφύκη μέσω της φωτοσύνθεσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των τιμών BOD₅ και COD χωρίς την ανάγκη εντατικού μηχανικού αερισμού (Craggs et al., 2012).

Παραγόμενη βιομάζα και δυνατότητες αξιοποίησης

Η βιομάζα που παράγεται κατά τη λειτουργία των συστημάτων μικροφυκών αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις περισσότερες συμβατικές τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων. Ανάλογα με το είδος των μικροφυκών και τις συνθήκες λειτουργίας, η βιομάζα μπορεί να περιέχει σημαντικές ποσότητες πρωτεϊνών, λιπιδίων και υδατανθράκων, καθιστώντας δυνατή την αξιοποίησή της σε διάφορες εφαρμογές (Chisti, 2007).

Οι κυριότερες δυνατότητες αξιοποίησης περιλαμβάνουν:

- παραγωγή βιοντίζελ μέσω μετατροπής των λιπιδίων,
 - παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης,
 - παραγωγή βιολιπασμάτων,
 - χρήση ως ζωοτροφή,
 - παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως χρωστικές και βιοδραστικές ενώσεις.
- Η δυνατότητα ανάκτησης πόρων καθιστά τα συστήματα μικροφυκών ιδιαίτερα ελκυστικά στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης υγρών αποβλήτων (Posadas et al., 2017).
-

Αποδόσεις απομάκρυνσης θρεπτικών

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τα συστήματα μικροφυκών μπορούν να επιτύχουν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών. Σε κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας έχουν αναφερθεί αποδόσεις απομάκρυνσης:

- αζώτου μεγαλύτερες από 70–90%,
-

- φωσφόρου μεγαλύτερες από 60–90%,
 - οργανικού φορτίου (BOD_5 και COD) άνω του 70–85%.
-

Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από το είδος των μικροφυκών, τον χρόνο παραμονής, τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και τη σύσταση των λυμάτων (Rawat et al., 2011· Posadas et al., 2017).

Η υψηλή ικανότητα απομάκρυνσης θρεπτικών καθιστά τα συστήματα μικροφυκών ιδιαίτερα ενδιαφέροντα για εφαρμογές όπου απαιτείται περιορισμός του ευτροφισμού ή επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων

4.3.3 Περιβαλλοντικά οφέλη και περιορισμοί

Η εφαρμογή συστημάτων μικροφυκών στην επεξεργασία λυμάτων παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, γεγονός που έχει οδηγήσει σε αυξανόμενο ερευνητικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Σε αντίθεση με πολλές συμβατικές τεχνολογίες επεξεργασίας, τα συστήματα αυτά δεν περιορίζονται μόνο στην απομάκρυνση ρύπων αλλά συμβάλλουν παράλληλα στην ανάκτηση πόρων και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (Posadas et al., 2017).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μικροφυκών είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αζώτου και φωσφόρου μέσω φυσικών βιολογικών διεργασιών. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο κίνδυνος ευτροφισμού των επιφανειακών υδάτων και βελτιώνεται η ποιότητα των τελικών εκροών. Παράλληλα, η φωτοσυνθετική δραστηριότητα των μικροφυκών συμβάλλει στη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα ή από αέρια ρεύματα, προσφέροντας πρόσθετα περιβαλλοντικά οφέλη ως προς τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Pittman et al., 2011).

Επιπλέον, η παραγωγή οξυγόνου μέσω της φωτοσύνθεσης μπορεί να υποκαταστήσει μέρος των αναγκών αερισμού που απαιτούνται στις συμβατικές βιολογικές διεργασίες. Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, δεδομένου ότι ο αερισμός αντιπροσωπεύει συνήθως το μεγαλύτερο

ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Craggs et al., 2012).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει επίσης η δυνατότητα αξιοποίησης της παραγόμενης βιομάζας. Η βιομάζα των μικροφυκών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή βιοκαυσίμων, βιοαερίου, λιπασμάτων ή άλλων προϊόντων προστιθέμενης αξίας, ενισχύοντας την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης πόρων (Chisti, 2007).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή των συστημάτων μικροφυκών συνοδεύεται και από ορισμένους περιορισμούς. Η απόδοσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες, τη διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, η λειτουργία τους μπορεί να παρουσιάζει εποχικές διακυμάνσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένη ηλιοφάνεια ή χαμηλές θερμοκρασίες (Rawat et al., 2011).

Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός αφορά τη συλλογή και τον διαχωρισμό της παραγόμενης βιομάζας από το επεξεργασμένο νερό. Η μικρή διάσταση των κυττάρων των μικροφυκών καθιστά συχνά απαραίτητη την εφαρμογή πρόσθετων διεργασιών, όπως κροκίδωση, επίπλευση ή διήθηση, οι οποίες αυξάνουν το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης (Uggetti et al., 2014).

Επιπλέον, τα συστήματα μικροφυκών απαιτούν συνήθως μεγαλύτερες επιφάνειες εγκατάστασης σε σύγκριση με ορισμένες συμβατικές τεχνολογίες προκατασκευασμένων συστημάτων, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται ανοικτές λίμνες υψηλού ρυθμού. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να δυσχεράνει την εφαρμογή τους σε αστικές περιοχές όπου η διαθεσιμότητα γης είναι περιορισμένη (Craggs et al., 2012).

Συνολικά, τα συστήματα μικροφυκών αποτελούν μία ιδιαίτερα ελκυστική τεχνολογία για βιώσιμη και αποκεντρωμένη επεξεργασία λυμάτων, συνδυάζοντας απομάκρυνση ρύπων, ανάκτηση πόρων και χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Ωστόσο, η ευρύτερη εφαρμογή τους εξαρτάται από τη βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας, τη μείωση του κόστους συλλογής της βιομάζας και την περαιτέρω τεχνολογική εξέλιξη των συστημάτων αυτών (Posadas et al., 2017).

4.4 Υβριδικές τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για υψηλή ποιότητα εκροής, μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη υβριδικών τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων. Οι τεχνολογίες αυτές συνδυάζουν δύο ή περισσότερες επιμέρους διεργασίες επεξεργασίας, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα κάθε μεθόδου και περιορίζοντας τις αντίστοιχες αδυναμίες τους (Hai et al., 2014).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα υβριδικά συστήματα προκύπτουν από τον συνδυασμό βιολογικών, φυσικοχημικών και μεμβρανικών διεργασιών, με στόχο την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών, θρεπτικών συστατικών και παθογόνων μικροοργανισμών. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την παραγωγή εκροών υψηλής ποιότητας, οι οποίες μπορούν να διατεθούν με ασφάλεια στο περιβάλλον ή να επαναχρησιμοποιηθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας (Metcalf & Eddy, 2014).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα υβριδικά συστήματα σε εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων, όπου οι περιορισμοί χώρου, η ανάγκη λειτουργικής ευελιξίας και οι αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας εκροής καθιστούν αναγκαία την αξιοποίηση προηγμένων τεχνολογιών. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες υβριδικές διατάξεις, όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), τα συστήματα ολοκληρωμένης ενεργού ιλύος και βιοφίλμ (IFAS), οι συνδυασμοί αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών, καθώς και τα σύγχρονα αρθρωτά προκατασκευασμένα συστήματα (Ødegaard, 2006· Judd, 2011).

Η αυξανόμενη εφαρμογή των υβριδικών τεχνολογιών συνδέεται άμεσα με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας, καθώς επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη διαχείριση των υδατικών πόρων, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη δυνατότητα ανάκτησης χρήσιμων προϊόντων από τα λύματα. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα αυτά θεωρούνται σήμερα μία από τις πλέον υποσχόμενες κατευθύνσεις στον τομέα της επεξεργασίας λυμάτων (Capodaglio, 2017).

4.4.1 Συνδυασμός βιολογικών και μεμβρανικών διεργασιών

Ο συνδυασμός βιολογικών και μεμβρανικών διεργασιών αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα της επεξεργασίας λυμάτων κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Η βασική αρχή των συστημάτων αυτών συνίσταται στην ενσωμάτωση βιολογικής επεξεργασίας με τεχνολογίες μεμβρανικού διαχωρισμού, επιτρέποντας την ταυτόχρονη αποδόμηση των οργανικών ρύπων και τον αποτελεσματικό διαχωρισμό της βιομάζας από την επεξεργασμένη εκροή (Meng et al., 2017).

Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται σε διάφορες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τους βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), οι οποίοι συνδυάζουν βιολογική επεξεργασία και μεμβρανικό διαχωρισμοί οποίοι συνδυάζουν τη διεργασία ενεργού ιλύος με συστήματα μικροδιήθησης ή υπερδιήθησης. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος, όπου ο διαχωρισμός στερεών πραγματοποιείται σε δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, στα συστήματα MBR η συγκράτηση της βιομάζας επιτυγχάνεται μέσω μεμβρανών, επιτρέποντας την παραγωγή εκροής ιδιαίτερα υψηλής ποιότητας (Judd, 2011).

Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία ενός συστήματος MBR βασίζεται στη βιολογική αποδόμηση των οργανικών ρύπων από μικροοργανισμούς και στη συνέχεια στον διαχωρισμό του επεξεργασμένου νερού μέσω μεμβρανών. Οι μεμβράνες λειτουργούν ως φυσικό φράγμα, συγκρατώντας αιωρούμενα στερεά, βακτήρια και μεγάλο ποσοστό παθογόνων μικροοργανισμών, ενώ επιτρέπουν τη διέλευση του καθαρισμένου νερού (Le-Clech et al., 2006).

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως μικροδιήθησης (MF) ή υπερδιήθησης (UF), με μέγεθος πόρων αρκετά μικρό ώστε να εξασφαλίζεται σχεδόν πλήρης απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και πολύ χαμηλή θολότητα εκροής. Ως αποτέλεσμα, η ποιότητα της εκροής είναι συχνά κατάλληλη για περαιτέρω επαναχρησιμοποίηση μετά από κατάλληλη απολύμανση (Meng et al., 2017).

Πλεονεκτήματα των συστημάτων MBR

Η ενσωμάτωση των μεμβρανών στη βιολογική επεξεργασία προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος.

Αρχικά, επιτυγχάνεται εξαιρετικά υψηλή ποιότητα εκροής με πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών και οργανικού φορτίου. Επιπλέον, η απουσία δευτεροβάθμιας καθίζησης επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλότερες συγκεντρώσεις βιομάζας, οδηγώντας σε μικρότερο απαιτούμενο όγκο αντιδραστήρα και μειωμένες απαιτήσεις χώρου (Judd, 2011).

Παράλληλα, η αυξημένη ηλικία ιλύος που μπορεί να επιτευχθεί στα συστήματα MBR ευνοεί τη νιτροποίηση και τη βιολογική απομάκρυνση αζώτου, ενώ συμβάλλει και στη σταθερότερη λειτουργία της εγκατάστασης έναντι διακυμάνσεων του οργανικού φορτίου (Hai et al., 2014).

Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τα συστήματα MBR ιδιαίτερα ελκυστικά για αποκεντρωμένες και προκατασκευασμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, όπου η διαθεσιμότητα χώρου είναι περιορισμένη και απαιτείται υψηλή ποιότητα εκροής.

Περιορισμοί και τεχνικές προκλήσεις

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή των συστημάτων MBR συνοδεύεται από ορισμένες τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις.

Το σημαντικότερο πρόβλημα είναι η έμφραξη των μεμβρανών (membrane fouling), η οποία προκαλείται από τη συσσώρευση βιομάζας, κολλοειδών και οργανικών ενώσεων στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό των πόρων της μεμβράνης. Η έμφραξη οδηγεί σε μείωση της διαπερατότητας, αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και ανάγκη συχνών καθαρισμών (Le-Clech et al., 2006).

Επιπλέον, το κόστος προμήθειας και αντικατάστασης των μεμβρανών παραμένει υψηλότερο σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας, γεγονός που επηρεάζει τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα της τεχνολογίας, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας (Meng et al., 2017).

Ωστόσο, η συνεχής βελτίωση των υλικών κατασκευής και των στρατηγικών λειτουργίας έχει συμβάλει σημαντικά στη μείωση των προβλημάτων αυτών, οδηγώντας σε ευρύτερη εφαρμογή των συστημάτων MBR διεθνώς.

Ρόλος στα αποκεντρωμένα συστήματα

Τα συστήματα MBR θεωρούνται σήμερα μία από τις πιο ώριμες τεχνολογίες για αποκεντρωμένη επεξεργασία λυμάτων. Ο μικρός απαιτούμενος χώρος εγκατάστασης,

η υψηλή ποιότητα εκροής και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του νερού τα καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλα για ξενοδοχειακές μονάδες, τουριστικές εγκαταστάσεις, μικρούς οικισμούς και απομακρυσμένες περιοχές (Hai et al., 2014).

Η τεχνολογία αυτή έχει αποτελέσει τη βάση ανάπτυξης πολλών σύγχρονων προκατασκευασμένων μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας

4.4.2 Συνδυασμός αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών

Ο συνδυασμός αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών αποτελεί μία από τις σημαντικότερες κατευθύνσεις ανάπτυξης των σύγχρονων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Η προσέγγιση αυτή αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα και των δύο βιολογικών διεργασιών, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών, καθώς και την ανάκτηση ενέργειας μέσω της παραγωγής βιοαερίου (Chan et al., 2009).

Οι αναερόβιες διεργασίες χαρακτηρίζονται από χαμηλή παραγωγή ιλύος και δυνατότητα μετατροπής της οργανικής ύλης σε βιοαέριο, το οποίο αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ωστόσο, συχνά δεν επαρκούν από μόνες τους για την επίτευξη των απαιτούμενων ορίων εκροής, ιδιαίτερα όσον αφορά το άζωτο, τον φώσφορο και τα αιωρούμενα στερεά. Για τον λόγο αυτό, συνδυάζονται συχνά με αερόβια στάδια επεξεργασίας, τα οποία βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα της τελικής εκροής (Tchobanoglous et al., 2014).

Η συνδυασμένη λειτουργία επιτρέπει την αρχική απομάκρυνση σημαντικού μέρους του οργανικού φορτίου μέσω αναερόβιας επεξεργασίας και στη συνέχεια την περαιτέρω οξείδωση των υπολειπόμενων ρύπων σε αερόβιες συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με αποκλειστικά αερόβια συστήματα, καθώς μειώνονται οι απαιτήσεις αερισμού και αυξάνεται η δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης των λυμάτων (Lettinga & Hulshoff Pol, 1991).

Πλεονεκτήματα της συνδυασμένης προσέγγισης

Η συνδυασμένη εφαρμογή αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Αρχικά, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη συνολική

απομάκρυνση οργανικού φορτίου σε σχέση με τη χρήση μίας μόνο διεργασίας. Παράλληλα, η παραγωγή βιοαερίου κατά το αναερόβιο στάδιο δημιουργεί δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας και μείωσης του λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης (Mao et al., 2015).

Επιπλέον, η παραγωγή πλεονάζουσας ιλύος είναι συνήθως μικρότερη συγκριτικά με τα συμβατικά αερόβια συστήματα, γεγονός που μειώνει τις απαιτήσεις διαχείρισης και διάθεσης ιλύος. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα συμβατή με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας, καθώς προωθεί την ανάκτηση πόρων από τα λύματα και περιορίζει την κατανάλωση ενέργειας (Mao et al., 2015).

Περιορισμοί και προκλήσεις

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή συνδυασμένων συστημάτων συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις. Η σταθερή λειτουργία απαιτεί κατάλληλο σχεδιασμό και έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας, καθώς οι αερόβιοι και αναερόβιοι μικροοργανισμοί παρουσιάζουν διαφορετικές απαιτήσεις ως προς τη θερμοκρασία, το pH και τη διαθεσιμότητα οξυγόνου (Chan et al., 2009).

Επιπλέον, η αποτελεσματική αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλου εξοπλισμού συλλογής και ενεργειακής αξιοποίησης, γεγονός που μπορεί να αυξήσει το αρχικό κόστος εγκατάστασης. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις τα μακροπρόθεσμα οφέλη αντισταθμίζουν το αυξημένο αρχικό κόστος επένδυσης (Mao et al., 2015).

Ρόλος στις σύγχρονες αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις

Η αυξανόμενη ανάγκη για ενεργειακά αποδοτικά και περιβαλλοντικά βιώσιμα συστήματα έχει οδηγήσει στη διεύρυνση της εφαρμογής συνδυασμένων αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών σε αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Η δυνατότητα μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης, ανάκτησης ενέργειας και βελτίωσης της ποιότητας εκροής καθιστά την προσέγγιση αυτή ιδιαίτερα ελκυστική για μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις και απομακρυσμένες περιοχές (Capodaglio, 2017).

Η φιλοσοφία αυτή έχει αποτελέσει τη βάση ανάπτυξης πολλών σύγχρονων υβριδικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

4.4.3 προκατασκευασμένα και αρθρωτά υβριδικά συστήματα

Η αυξανόμενη ανάγκη για ευέλικτες, αποδοτικές και οικονομικά βιώσιμες λύσεις επεξεργασίας λυμάτων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη compact και modular συστημάτων, τα οποία αποτελούν σήμερα μία από τις σημαντικότερες τάσεις στον τομέα της αποκεντρωμένης διαχείρισης υγρών αποβλήτων. Τα συστήματα αυτά σχεδιάζονται με στόχο τη μείωση του απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης, τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την ευκολότερη προσαρμογή σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (Massoud et al., 2009).

Ο όρος **compact συστήματα** αναφέρεται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας που επιτυγχάνουν υψηλές αποδόσεις σε περιορισμένο όγκο και επιφάνεια εγκατάστασης. Η ανάπτυξή τους βασίζεται συνήθως στον συνδυασμό πολλαπλών διεργασιών μέσα στην ίδια μονάδα, όπως βιολογική επεξεργασία, διαχωρισμός στερεών, απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και απολύμανση. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι απαιτήσεις χώρου και διευκολύνεται η εγκατάσταση σε περιοχές όπου η διαθέσιμη έκταση είναι περιορισμένη (Singhirunnusorn & Stenstrom, 2009).

Παράλληλα, τα αρθρωτά (**modular**) **συστήματα** αποτελούνται από προκατασκευασμένες μονάδες, οι οποίες μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα ή να συνδυάζονται μεταξύ τους ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Η φιλοσοφία αυτή προσφέρει σημαντική ευελιξία, καθώς επιτρέπει την εύκολη επέκταση ή αναβάθμιση της εγκατάστασης χωρίς εκτεταμένες κατασκευαστικές παρεμβάσεις (Capodaglio, 2017).

Βασικά χαρακτηριστικά

Τα προκατασκευασμένα και αρθρωτά συστήματα χαρακτηρίζονται από:

- μικρό απαιτούμενο χώρο εγκατάστασης,
 - προκατασκευασμένο ή ημιπροκατασκευασμένο σχεδιασμό,
 - δυνατότητα ταχείας εγκατάστασης,
 - χαμηλές απαιτήσεις πολιτικού μηχανικού,
 - δυνατότητα κλιμακωτής επέκτασης,
 - υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης και τηλεπαρακολούθησης.
-

Τα χαρακτηριστικά αυτά τα καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλα για μικρούς οικισμούς, ξενοδοχειακές μονάδες, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, νησιωτικές περιοχές και απομακρυσμένες κοινότητες όπου η κατασκευή συμβατικών κεντρικών εγκαταστάσεων συχνά δεν είναι τεχνικά ή οικονομικά εφικτή (Massoud et al., 2009).

Πλεονεκτήματα στις αποκεντρωμένες εφαρμογές

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των προκατασκευασμένων και αρθρωτών συστημάτων είναι η δυνατότητα προσαρμογής τους σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε τουριστικές ή εποχικά κατοικούμενες περιοχές, οι παροχές λυμάτων παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους. Τα modular συστήματα μπορούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικότερα στις μεταβολές αυτές μέσω της προσθήκης ή απενεργοποίησης επιμέρους μονάδων (Tchobanoglous et al., 2014).

Επιπλέον, η προκατασκευασμένη μορφή τους μειώνει σημαντικά τον χρόνο κατασκευής και εγκατάστασης, ενώ διευκολύνει τη μεταφορά και την εφαρμογή τους σε περιοχές με περιορισμένες υποδομές. Παράλληλα, η ενσωμάτωση συστημάτων αυτοματισμού επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση και τον αποτελεσματικότερο έλεγχο της λειτουργίας τους (Capodaglio, 2017).

Προκλήσεις και μελλοντικές προοπτικές

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή προκατασκευασμένων και αρθρωτών συστημάτων συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις. Η ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού, η εξάρτηση από συστήματα αυτοματισμού και η απαίτηση τακτικής συντήρησης μπορούν να αυξήσουν το λειτουργικό κόστος σε ορισμένες περιπτώσεις. Επιπλέον, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας πρέπει να βασίζεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε εφαρμογής, όπως η παροχή, το οργανικό φορτίο, οι απαιτήσεις εκροής και οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Massoud et al., 2009).

Ωστόσο, η συνεχής πρόοδος στους τομείς των βιολογικών διεργασιών, των μεμβρανών, των αυτοματισμών και των συστημάτων παρακολούθησης αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω τη χρήση των προκατασκευασμένων και αρθρωτών συστημάτων τα επόμενα χρόνια. Η τάση αυτή συνδέεται άμεσα με τη μετάβαση προς πιο αποκεντρωμένα, ανθεκτικά και βιώσιμα μοντέλα διαχείρισης υγρών αποβλήτων (Capodaglio, 2017).

Συνολικά, τα προκατασκευασμένα και αρθρωτά υβριδικά συστήματα αποτελούν σήμερα μία από τις πιο υποσχόμενες λύσεις για αποκεντρωμένη επεξεργασία λυμάτων, συνδυάζοντας υψηλή αποδοτικότητα, ευελιξία και δυνατότητα προσαρμογής στις σύγχρονες περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Οι βασικές τεχνολογίες που εφαρμόζουν την προσέγγιση αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Κεφάλαιο 5

5.1 Ατομικά προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Η αυξανόμενη ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση των αστικών λυμάτων σε μικρούς οικισμούς, νησιωτικές περιοχές, τουριστικές εγκαταστάσεις και απομακρυσμένες κοινότητες έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη σύγχρονων προκατασκευασμένων και αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Τα συστήματα αυτά σχεδιάζονται με στόχο την επίτευξη υψηλής απόδοσης επεξεργασίας, περιορισμένων απαιτήσεων χώρου, ευκολίας εγκατάστασης και λειτουργικής ευελιξίας, ώστε να μπορούν να ανταποκρίνονται στις ιδιαίτερες απαιτήσεις αποκεντρωμένων εφαρμογών.

Σε αντίθεση με τις συμβατικές κεντρικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, οι αποκεντρωμένες τεχνολογίες επιτρέπουν την επεξεργασία των λυμάτων κοντά στο σημείο παραγωγής τους, μειώνοντας συχνά τις ανάγκες κατασκευής εκτεταμένων δικτύων αποχέτευσης και προσφέροντας μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στις τοπικές συνθήκες. Παράλληλα, η τεχνολογική πρόοδος των τελευταίων δεκαετιών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη συστημάτων με αυξημένη αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών συστατικών, καθώς και στη δυνατότητα παραγωγής εκροών κατάλληλων για επαναχρησιμοποίηση.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται οι κυριότερες τεχνολογίες προκατασκευασμένης και αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων που εφαρμόζονται διεθνώς. Ειδικότερα, εξετάζονται συστήματα που βασίζονται σε αερόβιες, αναερόβιες και υβριδικές βιολογικές διεργασίες, καθώς και σύγχρονες τεχνολογίες που αξιοποιούν βιοφίλμ, μεμβράνες ή συνδυασμό διαφορετικών μηχανισμών επεξεργασίας. Για κάθε τεχνολογία παρουσιάζονται η αρχή λειτουργίας, τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της, καθώς και η καταλληλότητά της για εφαρμογές αποκεντρωμένης διαχείρισης λυμάτων.

Η ανάλυση των τεχνολογιών αυτών αποτελεί τη βάση για τη συγκριτική αξιολόγηση που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας, με στόχο την

ανάδειξη των καταλληλότερων λύσεων για μικρούς οικισμούς και αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων.

Πίνακας 16 Ταξινόμηση των εξεταζόμενων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων με βάση τη βιολογική διεργασία και τον τρόπο λειτουργίας τους.

A/A	Σύστημα	Βιολογική διεργασία	Τρόπος λειτουργίας
1	SBR	Αερόβια	Συνεχής / κυκλική
2	MBBR	Αερόβια	Συνεχής / κυκλική
3	MBR	Αερόβια + μεμβράνες	Συνεχής / κυκλική
4	Oxidation Ditch (compact)	Αερόβια	Συνεχής
5	FBBR	Αερόβια	Συνεχής
6	SAF	Αερόβια	Συνεχής
7	RBC	Αερόβια	Συνεχής
8	ABR	Αναερόβια	Συνεχής
9	MABR	Αερόβια (μεμβρανικός αερισμός)	Συνεχής
10	SAFF	Αερόβια	Συνεχής
11	PABR	Αερόβια (παθητικός αερισμός)	Συνεχής

5.1.1 Αντιδραστήρας Διαλείπουσας Λειτουργίας , Σύστημα SBR

Το σύστημα **SBR (Sequencing Batch Reactor)** αποτελεί τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων βασισμένη στη μέθοδο της ενεργού ιλύος και χαρακτηρίζεται από διακοπτόμενη ή κυκλική λειτουργία. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα συνεχούς ροής, όλες οι διεργασίες επεξεργασίας πραγματοποιούνται διαδοχικά μέσα στην ίδια δεξαμενή, μέσω προκαθορισμένων χρονικών φάσεων λειτουργίας (EPA, 2022; Askari et al., 2025). Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε προκατασκευασμένα και αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων λόγω της λειτουργικής ευελιξίας, του περιορισμένου απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης και της δυνατότητας επίτευξης υψηλής ποιότητας εκροής.

Η βασική αρχή λειτουργίας του SBR στηρίζεται στην ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών, οι οποίοι χρησιμοποιούν τις οργανικές ενώσεις των λυμάτων ως πηγή τροφής και ενέργειας. Μέσω της βιολογικής αποδόμησης επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του οργανικού φορτίου, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται σταθεροποίηση της ιλύος και απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων (Al-Rekabi et al., 2007). Η λειτουργία του οργανώνεται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους, οι οποίοι περιλαμβάνουν τα στάδια πλήρωσης (*fill*), βιολογικής αντίδρασης (*react*), καθίζησης (*settle*), εκκένωσης (*draw*) και αδράνειας (*idle*).

Κατά τη φάση της πλήρωσης, τα λύματα εισέρχονται στη δεξαμενή και αναμιγνύονται με την ενεργό ιλύ. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση της βιολογικής αντίδρασης, όπου μέσω αερισμού πραγματοποιούνται οι κύριες διεργασίες απομάκρυνσης οργανικού άνθρακα και νιτροποίησης. Με κατάλληλη εναλλαγή αερόβιων, ανοξικών και αναερόβιων συνθηκών είναι δυνατή και η απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου μέσω απονιτροποίησης και βιολογικής αποφωσφόρωσης (EPA, 2022; Khumalo et al., 2022).

Κατά τη φάση της καθίζησης, ο αερισμός και η ανάδευση διακόπτονται, ώστε τα αιωρούμενα στερεά να κατακαθίσουν υπό συνθήκες ηρεμίας. Στη συνέχεια, το διαυγασμένο επεξεργασμένο νερό απομακρύνεται από την επιφάνεια της δεξαμενής μέσω μηχανισμού εκκένωσης, χωρίς να προκαλείται επαναιώρηση της ιλύος. Η δυνατότητα ολοκλήρωσης της βιολογικής επεξεργασίας και της καθίζησης στην ίδια

δεξαμενή μειώνει τις απαιτήσεις σε ξεχωριστές μονάδες καθίζησης και καθιστά το SBR κατάλληλο για προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εφαρμογές (EPA, 2022).

Τα συστήματα SBR παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση οργανικών ρύπων και αιωρούμενων στερεών. Οι αποδόσεις απομάκρυνσης BOD_5 μπορούν να υπερβαίνουν το 90–95%, ενώ για COD και TSS αναφέρονται συνήθως αποδόσεις μεγαλύτερες του 85–95% και 90% αντίστοιχα (Khumalo et al., 2022). Παράλληλα, μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης των κύκλων αερισμού και μη αερισμού, είναι δυνατή η απομάκρυνση αζώτου σε ποσοστά που μπορούν να φτάσουν έως και 90–94%, γεγονός που καθιστά τα SBR κατάλληλα για εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας εκροής (Askari et al., 2025).

Σε επίπεδο λειτουργικών παραμέτρων, τα συστήματα SBR λειτουργούν συνήθως με υδραυλικό χρόνο παραμονής (**HRT**) μεταξύ 6–24 ωρών, ανάλογα με το οργανικό φορτίο και τις απαιτήσεις επεξεργασίας. Ο χρόνος παραμονής στερεών (**SRT**) κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10–30 ημερών, ενώ οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου κατά τη φάση αερισμού διατηρούνται συνήθως μεταξύ 1,5–3 mg/L. Η συγκέντρωση μικτής αιωρούμενης στερεής ιλύος (**MLSS**) κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 3.000–6.000 mg/L (Xu et al., 2014; Khumalo et al., 2022). Η μεταβολή του HRT επηρεάζει σημαντικά τόσο την απομάκρυνση οργανικού φορτίου όσο και τη σταθερότητα της βιομάζας και των διεργασιών νιτροποίησης/απονιτροποίησης.

Η κύρια ενεργειακή απαίτηση των SBR σχετίζεται με τον αερισμό, ο οποίος αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος. Ωστόσο, λόγω της δυνατότητας πραγματοποίησης πολλαπλών διεργασιών στην ίδια δεξαμενή, τα SBR θεωρούνται τεχνολογίες εντατικοποίησης διεργασιών (*process intensification technologies*), καθώς επιτυγχάνουν μειωμένο αποτύπωμα εγκατάστασης και αυξημένη λειτουργική ευελιξία σε σχέση με συμβατικές εγκαταστάσεις συνεχούς ροής (Askari et al., 2025). Σύγχρονες μελέτες αναφέρουν ότι προηγμένες διαμορφώσεις SBR και εφαρμογές αερόβιας κοκκώδους ιλύος (*aerobic granular sludge*) μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη σταθερότητα λειτουργίας του συστήματος.

Τα συστήματα SBR εφαρμόζονται ευρέως σε μικρούς και μεσαίους οικισμούς, ξενοδοχειακές και τουριστικές εγκαταστάσεις, βιομηχανικές εφαρμογές με

μεταβαλλόμενα φορτία, καθώς και σε προκατασκευασμένες αποκεντρωμένες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (EPA, 2022). Η ευελιξία λειτουργίας, οι σχετικά μικρές απαιτήσεις χώρου και η δυνατότητα επίτευξης υψηλής ποιότητας εκροής καθιστούν την τεχνολογία ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές όπου απαιτείται αυξημένη προσαρμοστικότητα και περιορισμένο αποτύπωμα εγκατάστασης.

Συνολικά, το SBR αποτελεί ευέλικτο και αξιόπιστο σύστημα βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, με δυνατότητα συνδυασμένης απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών στοιχείων σε μία ενιαία δεξαμενή. Παράλληλα, η υψηλή λειτουργική ευελιξία και η προσαρμογή σε μεταβαλλόμενα φορτία το καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική λύση για προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εφαρμογές, αν και η αποδοτική λειτουργία του εξαρτάται σημαντικά από τον σωστό σχεδιασμό, τον αυτοματισμό και τον έλεγχο των κύκλων λειτουργίας (EPA, 2022; Askari et al., 2025).

Τα συστήματα SBR παρουσιάζουν μειωμένες απαιτήσεις σε χώρο εγκατάστασης και σχετικά χαμηλότερο κατασκευαστικό κόστος σε σχέση με πιο σύνθετες τεχνολογίες μεμβρανών. Παράλληλα, η δυνατότητα λειτουργίας σε μία δεξαμενή περιορίζει τις απαιτήσεις σε επιπλέον μονάδες καθίζησης και σωληνώσεις. Ωστόσο, η ενεργειακή κατανάλωση που σχετίζεται με τον αερισμό και τον αυτοματισμό μπορεί να επηρεάσει το συνολικό λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης. Από περιβαλλοντικής πλευράς, τα SBR μπορούν να επιτύχουν υψηλή ποιότητα εκροής και σημαντική απομάκρυνση θρεπτικών, συμβάλλοντας στη μείωση της ρύπανσης υδάτινων αποδεκτών και στη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού (Askari et al., 2025; EPA, 2022).

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρύπων και αιωρούμενων στερεών.
 - Δυνατότητα νιτροποίησης, απονιτροποίησης και βιολογικής αποφωσφόρωσης στην ίδια δεξαμενή.
 - Μικρές απαιτήσεις σε χώρο εγκατάστασης.
 - Ευελιξία λειτουργίας και προσαρμογή σε μεταβαλλόμενα υδραυλικά και οργανικά φορτία.
-

- Απλή διάταξη χωρίς ανάγκη ξεχωριστών δεξαμενών καθίζησης.
- Κατάλληλο για προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εφαρμογές.

Μειονεκτήματα

- Απαιτεί αξιόπιστο αυτοματισμό και ακριβή χρονικό προγραμματισμό των φάσεων λειτουργίας.
 - Η ενεργειακή κατανάλωση εξαρτάται κυρίως από τον αερισμό.
 - Σε περιπτώσεις έντονων αιχμών παροχής μπορεί να απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός ή χρήση πολλαπλών δεξαμενών.
 - Η απόδοση επηρεάζεται σημαντικά από τη σωστή λειτουργία του συστήματος αερισμού και της διαχείρισης ιλύος.
-



Εικόνα 5.1. Σχηματική απεικόνιση προκατασκευασμένου συστήματος επεξεργασίας λυμάτων τύπου SBR (Sequencing Batch Reactor). Carrera et al. (2025).

5.1.2 — Βιοαντιδραστήρας Κινούμενης Κλίνης Βιοφίλμ MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor)

Το σύστημα **MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor)** αποτελεί προηγμένη τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, η οποία βασίζεται στην ανάπτυξη βιοφίλμ (*biofilm*) πάνω σε ειδικούς πλαστικούς φορείς που κινούνται ελεύθερα μέσα στον αντιδραστήρα. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε με στόχο να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των διεργασιών ενεργού ιλύος και των συστημάτων προσκολλημένης ανάπτυξης, επιτρέποντας υψηλή

συγκέντρωση μικροβιακής βιομάζας και αυξημένη σταθερότητα λειτουργίας ακόμη και σε συνθήκες μεταβαλλόμενου οργανικού φορτίου (Ødegaard et al., 2012).

Σε αντίθεση με τα κυκλικά συστήματα, όπως τα SBR, τα MBBR λειτουργούν με συνεχή ροή. Τα λύματα εισέρχονται συνεχώς στον αντιδραστήρα, μέσα στον οποίο βρίσκονται οι φορείς βιοφίλμ. Οι φορείς αυτοί κατασκευάζονται συνήθως από πλαστικό υλικό υψηλής αντοχής και διαθέτουν μεγάλη ειδική επιφάνεια ώστε να επιτρέπουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών στην επιφάνειά τους. Η συνεχής κίνηση των φορέων προκαλείται είτε μέσω αερισμού είτε μέσω μηχανικής ανάδευσης, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη επαφή μεταξύ λυμάτων, οξυγόνου και βιομάζας (Rusten et al., 2006).

Η λειτουργία του MBBR βασίζεται κυρίως στη δημιουργία και ανάπτυξη βιοφίλμ πάνω στους φορείς. Κατά την εισροή των λυμάτων στον αντιδραστήρα, οι οργανικές ενώσεις και τα θρεπτικά συστατικά προσροφώνται στο βιοφίλμ και μεταβολίζονται από τους μικροοργανισμούς. Στα εξωτερικά στρώματα του βιοφίλμ, όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, κυριαρχούν αερόβιες διεργασίες αποδόμησης οργανικού φορτίου και νιτροποίησης. Αντίθετα, στα εσωτερικά στρώματα του βιοφίλμ, όπου η συγκέντρωση οξυγόνου μειώνεται, μπορούν να αναπτυχθούν ανοξικές ή ακόμη και αναερόβιες συνθήκες, επιτρέποντας διεργασίες απονιτροποίησης. Με αυτόν τον τρόπο, το MBBR μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα πολλαπλές βιολογικές διεργασίες μέσα στον ίδιο αντιδραστήρα (Ødegaard et al., 2012).

Σε ένα τυπικό σύστημα MBBR, η επεξεργασία περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια λειτουργίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Αρχικά πραγματοποιείται η είσοδος και ανάμιξη των λυμάτων με τους φορείς βιοφίλμ μέσα στον αντιδραστήρα. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η βιολογική αντίδραση, κατά την οποία οι μικροοργανισμοί αποδομούν οργανικές ενώσεις και θρεπτικά στοιχεία. Ο αερισμός παρέχει το απαραίτητο οξυγόνο για τη διατήρηση των αερόβιων διεργασιών και παράλληλα εξασφαλίζει τη συνεχή κίνηση των φορέων μέσα στη δεξαμενή. Μετά την ολοκλήρωση της βιολογικής επεξεργασίας, το επεξεργασμένο νερό οδηγείται σε μονάδα διαχωρισμού στερεών, συνήθως δευτεροβάθμια καθίζηση ή φίλτρωση, όπου απομακρύνονται τα αιωρούμενα στερεά και η περίσσεια βιομάζας πριν από την τελική εκροή (Rusten et al., 2006).

Η ύπαρξη βιοφίλμ πάνω στους φορείς επιτρέπει τη διατήρηση πολύ υψηλής συγκέντρωσης ενεργής βιομάζας μέσα στον αντιδραστήρα χωρίς να απαιτείται

ανακυκλοφορία ιλύος, όπως στα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει σημαντικά την αποδοτικότητα της βιολογικής επεξεργασίας και επιτρέπει τη λειτουργία του συστήματος σε μικρότερο όγκο δεξαμενής, γεγονός που ευνοεί την κατασκευή του ως συμπαγούς και προκατασκευασμένης μονάδας. (Ødegaard et al., 2012).

Σε επίπεδο λειτουργικών παραμέτρων, τα συστήματα MBBR λειτουργούν συνήθως με ποσοστό πλήρωσης φορέων μεταξύ 30–70% του όγκου του αντιδραστήρα, ανάλογα με τις απαιτήσεις επεξεργασίας. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (**HRT**) κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 2–12 ωρών, ενώ οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου διατηρούνται συνήθως πάνω από 2 mg/L ώστε να υποστηρίζεται η αερόβια βιολογική δραστηριότητα. Η μεγάλη ειδική επιφάνεια των φορέων επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλής συγκέντρωσης μικροοργανισμών, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες αποδόσεις επεξεργασίας ακόμη και σε υψηλά οργανικά φορτία (Rusten et al., 2006).

Τα συστήματα MBBR παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση οργανικών ρύπων και αιωρούμενων στερεών. Οι αποδόσεις απομάκρυνσης BOD₅ και COD μπορούν να υπερβούν το 85–95%, ενώ με κατάλληλο σχεδιασμό ανοξικών ή αναερόβιων ζωνών μπορεί να επιτευχθεί σημαντική απομάκρυνση αζώτου μέσω νιτροποίησης και απονιτροποίησης (Ødegaard et al., 2012). Επιπλέον, η σταθερότητα του βιοφίλμ καθιστά το σύστημα ιδιαίτερα ανθεκτικό σε απότομες μεταβολές παροχής ή οργανικού φορτίου.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MBBR είναι η δυνατότητα εφαρμογής της σε συμπαγείς και προκατασκευασμένες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Η υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και η αυξημένη επιφάνεια ανάπτυξης μικροοργανισμών επιτρέπουν μικρότερο όγκο αντιδραστήρα σε σχέση με συμβατικές διεργασίες ενεργού ιλύος. Παράλληλα, η απουσία ανάγκης για ανακυκλοφορία ιλύος μειώνει τη λειτουργική πολυπλοκότητα και απλοποιεί τη συντήρηση του συστήματος (Askari et al., 2025).

Η ενεργειακή απαίτηση των MBBR σχετίζεται κυρίως με τον αερισμό και τη συνεχή ανάδευση των φορέων μέσα στον αντιδραστήρα. Παρότι η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να είναι αυξημένη σε έντονα αεριζόμενα συστήματα, η υψηλή αποδοτικότητα επεξεργασίας, η μειωμένη απαίτηση σε χώρο εγκατάστασης και η σταθερότητα λειτουργίας καθιστούν τα MBBR ιδιαίτερα κατάλληλα για προκατασκευασμένες αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται

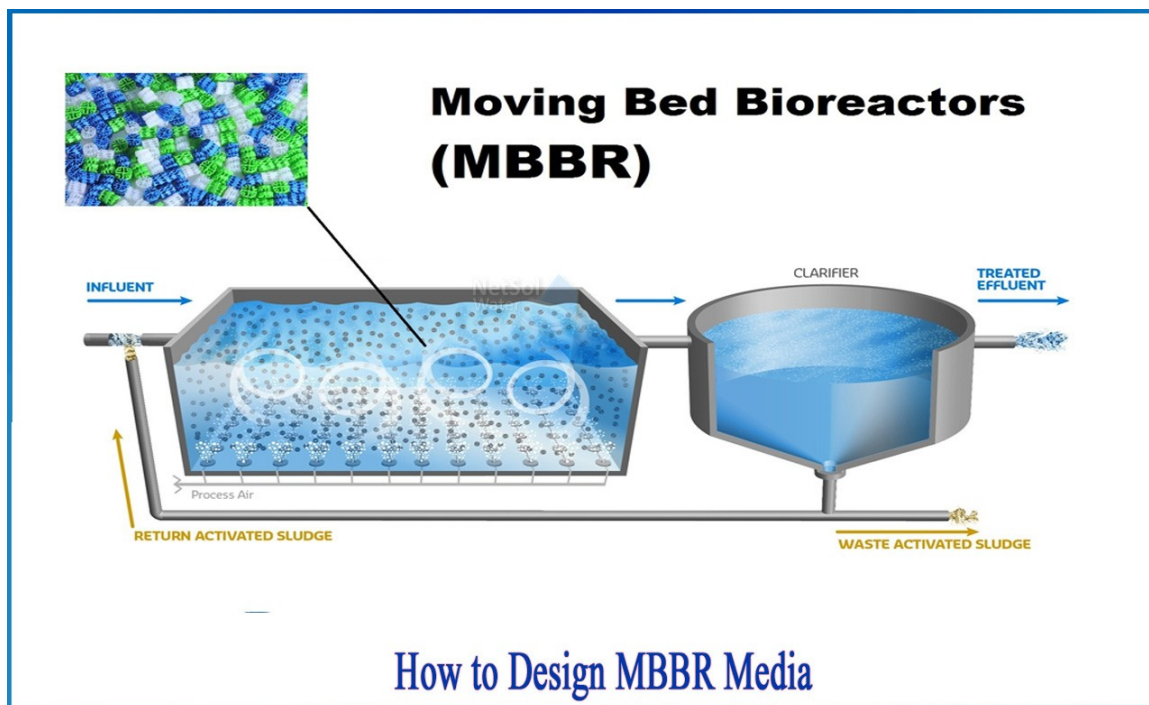
ευρέως σε μικρούς και μεσαίους οικισμούς, ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις, βιομηχανικές μονάδες και υβριδικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων (Askari et al., 2025).

Πλεονεκτήματα

- Συνεχής λειτουργία χωρίς ανάγκη κυκλικών φάσεων.
- Υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης BOD₅ και COD.
- Μικρές απαιτήσεις σε χώρο εγκατάστασης λόγω υψηλής συγκέντρωσης βιομάζας.
- Ανθεκτικότητα σε μεταβολές οργανικού και υδραυλικού φορτίου.
- Δεν απαιτείται ανακυκλοφορία ιλύος όπως στα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος.
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης σε υβριδικά συστήματα επεξεργασίας.

Μειονεκτήματα

- Η απόδοση εξαρτάται από τη σωστή επιλογή και ποσότητα φορέων βιοφίλμ.
- Υπάρχει πιθανότητα συσσώρευσης φορέων σε εξόδους ή εξαρτήματα του συστήματος.
- Για υψηλή απομάκρυνση αζώτου απαιτείται συνήθως ενσωμάτωση ανοξικών ή αναερόβιων σταδίων.
- Η ενεργειακή κατανάλωση σχετίζεται κυρίως με τον αερισμό και τη συνεχή ανάδευση των φορέων.



Εικόνα 5 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) , Netsol Water (2024). <https://www.netsolwater.com/what-is-mbbr-media-filtration.php?blog=1187>

5.1.3 Αντιδραστήρας με μεμβράνες (MBR)

Οι αντιδραστήρες **με μεμβράνες** αποτελεί μία σύγχρονη και τεχνολογικά εξελιγμένη μέθοδο βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, η οποία συνδυάζει τη διεργασία ενεργού ιλύος με διαχωρισμό στερεών-υγρού μέσω μεμβρανών μικροδιήθησης ή υπερδιήθησης. Στα συστήματα αυτά, η συμβατική δεξαμενή τελικής καθίζησης αντικαθίσταται από μεμβράνες, οι οποίες συγκρατούν τη βιομάζα και τα αιωρούμενα στερεά μέσα στον βιολογικό αντιδραστήρα, επιτρέποντας τη διέλευση μόνο του επεξεργασμένου νερού υψηλής ποιότητας (Judd, 2006; Cinar et al., 2021).

Τα συστήματα MBR λειτουργούν με συνεχή ροή. Τα λύματα εισέρχονται αρχικά στον βιολογικό αντιδραστήρα, όπου πραγματοποιείται η αερόβια βιολογική επεξεργασία μέσω μικροοργανισμών ενεργού ιλύος. Οι μικροοργανισμοί αποδοθούν τις οργανικές ενώσεις και μεταβολίζουν το οργανικό φορτίο των λυμάτων, μειώνοντας σημαντικά τις συγκεντρώσεις BOD₅ και COD. Ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος, μπορούν να

ενσωματωθούν και ανοξικές ή αναερόβιες ζώνες για την απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου μέσω διεργασιών νιτροποίησης, απονιτροποίησης και βιολογικής αποφωσφόρωσης (Judd, 2006).

Μετά τη βιολογική επεξεργασία, το μικτό υγρό οδηγείται προς τη μονάδα μεμβρανών, όπου πραγματοποιείται ο φυσικός διαχωρισμός στερεών και υγρού. Οι μεμβράνες λειτουργούν ως φυσικό φράγμα συγκρατώντας τη βιομάζα, τα αιωρούμενα στερεά και σημαντικό μέρος των μικροοργανισμών μέσα στον αντιδραστήρα. Η διήθηση πραγματοποιείται συνήθως μέσω υποπίεσης ή πίεσης και παράγεται εκροή πολύ υψηλής ποιότητας, με εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών και παθογόνων μικροοργανισμών (Cinar et al., 2021).

Ανάλογα με τη διάταξη του συστήματος, οι μεμβράνες μπορεί να είναι βυθισμένες μέσα στον βιολογικό αντιδραστήρα (*submerged MBR*) ή εγκατεστημένες εξωτερικά (*side-stream MBR*). Στα βυθισμένα MBR, ο αερισμός χρησιμοποιείται τόσο για τη βιολογική επεξεργασία όσο και για τον καθαρισμό της επιφάνειας των μεμβρανών μέσω δημιουργίας διατμητικών δυνάμεων που μειώνουν την επικάλυψη στερεών. Στα συστήματα εξωτερικής ροής, το μικτό υγρό αντλείται προς εξωτερικές μονάδες μεμβρανών και επανεισάγεται στον αντιδραστήρα μετά τη διήθηση (Judd, 2006).

Η λειτουργία του MBR περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια επεξεργασίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Αρχικά πραγματοποιείται η εισροή και η βιολογική επεξεργασία των λυμάτων στον αντιδραστήρα ενεργού ιλύος. Στη συνέχεια το μικτό υγρό έρχεται σε επαφή με τις μεμβράνες, όπου λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός στερεών–υγρού. Το καθαρό διήθημα (*permeate*) συλλέγεται ως τελική εκροή, ενώ η βιομάζα παραμένει στον αντιδραστήρα, επιτρέποντας τη λειτουργία με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις MLSS σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος. Παράλληλα πραγματοποιούνται περιοδικές διαδικασίες καθαρισμού των μεμβρανών, όπως backwashing, αερισμός και χημικός καθαρισμός, για τον περιορισμό του fouling (Meng et al., 2017).

Σε επίπεδο λειτουργικών παραμέτρων, τα MBR λειτουργούν συνήθως με συγκεντρώσεις μικτής αιωρούμενης στερεής ιλύος (**MLSS**) που κυμαίνονται μεταξύ 8.000–15.000 mg/L, σημαντικά υψηλότερες από αυτές των συμβατικών συστημάτων ενεργού ιλύος. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (**HRT**) κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 4–12 ωρών, ενώ ο χρόνος παραμονής στερεών (**SRT**) μπορεί να υπερβαίνει τις 20–40 ημέρες

λόγω της πλήρους συγκράτησης της βιομάζας από τις μεμβράνες. Οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου διατηρούνται συνήθως μεταξύ 1,5–3 mg/L ώστε να υποστηρίζεται η αερόβια βιολογική δραστηριότητα και να περιορίζεται η επικάλυψη στερεών στις μεμβράνες (Judd, 2006; Meng et al., 2017).

Τα συστήματα MBR παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή αποδοτικότητα επεξεργασίας. Οι αποδόσεις απομάκρυνσης BOD₅ και COD μπορούν να υπερβαίνουν το 95%, ενώ οι συγκεντρώσεις TSS στην εκροή είναι συνήθως σχεδόν μηδενικές λόγω της φυσικής συγκράτησης στερεών από τις μεμβράνες. Παράλληλα, τα MBR μπορούν να επιτύχουν σημαντική απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου όταν ενσωματώνονται κατάλληλες ανοξικές και αναερόβιες διεργασίες. Η πολύ υψηλή ποιότητα εκροής επιτρέπει σε πολλές περιπτώσεις την επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού για άρδευση ή άλλες μη πόσιμες χρήσεις (Cinar et al., 2021).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MBR είναι η δυνατότητα εφαρμογής της σε συμπαγείς και προκατασκευασμένες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Η δυνατότητα λειτουργίας με υψηλές συγκεντρώσεις βιομάζας και η αντικατάσταση της δεξαμενής καθίζησης από τις μεμβράνες επιτρέπουν σημαντική μείωση του συνολικού αποτυπώματος εγκατάστασης σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες ενεργού ιλύος. Για τον λόγο αυτό, τα προκατασκευασμένα MBR εφαρμόζονται ευρέως σε αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις, ξενοδοχειακές μονάδες, μικρούς οικισμούς, τουριστικές περιοχές και εγκαταστάσεις με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο (Judd, 2006).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, το βασικότερο λειτουργικό πρόβλημα των MBR είναι η απόφραξη των μεμβρανών (*membrane fouling*), η οποία προκαλείται από τη συσσώρευση στερεών, οργανικών ενώσεων και μικροβιακών προϊόντων στην επιφάνεια ή στους πόρους των μεμβρανών. Το fouling οδηγεί σε μείωση της διαπερατότητας και αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, καθιστώντας απαραίτητες διαδικασίες καθαρισμού και λειτουργικές στρατηγικές ελέγχου (Meng et al., 2017). Επιπλέον, η ενεργειακή κατανάλωση των MBR είναι συνήθως υψηλότερη σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος λόγω των απαιτήσεων αερισμού και λειτουργίας των μεμβρανών.

Συνολικά, τα MBR αποτελούν ιδιαίτερα αποδοτικά και τεχνολογικά προηγμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, με δυνατότητα παραγωγής εκροής πολύ υψηλής ποιότητας και σημαντική εξοικονόμηση χώρου εγκατάστασης. Η δυνατότητα

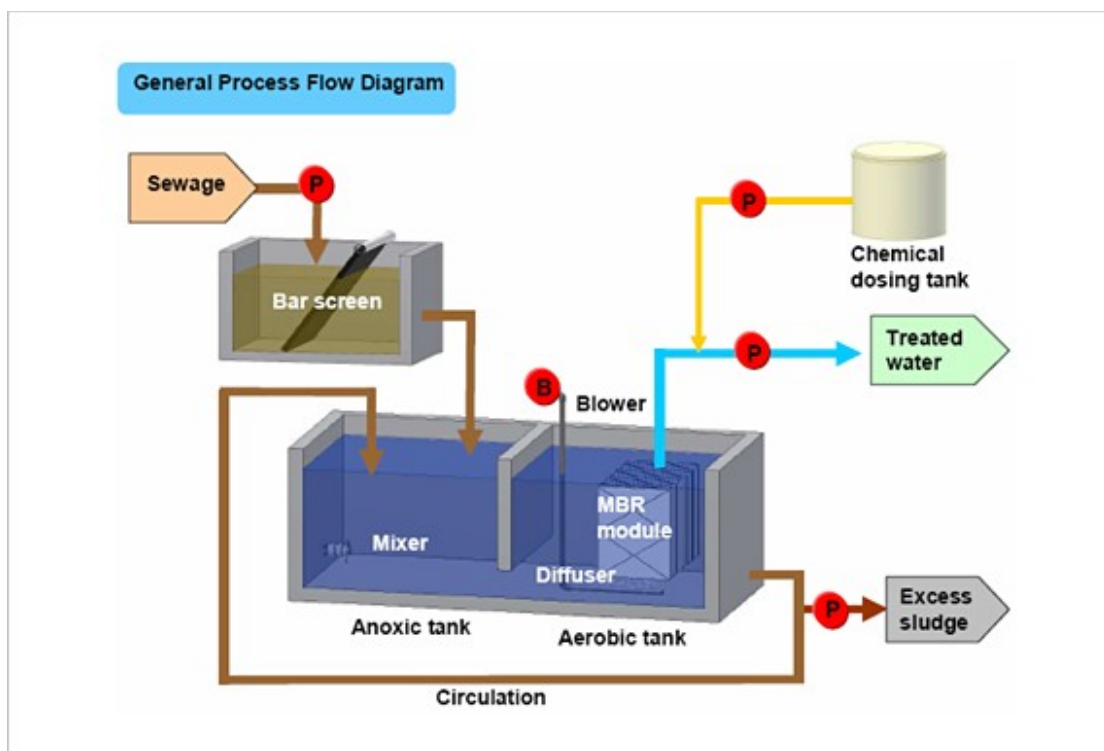
επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού, η λειτουργική σταθερότητα και η ενσωμάτωση σε προκατασκευασμένες αποκεντρωμένες εφαρμογές καθιστούν τα MBR μία από τις σημαντικότερες σύγχρονες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων (Cinar et al., 2021; Judd, 2006).

Πλεονεκτήματα

- Πολύ υψηλή ποιότητα εκροής με σχεδόν μηδενικά TSS.
- Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού.
- Προκατασκευασμένος σχεδιασμός με μειωμένες απαιτήσεις χώρου.
- Υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρύπων και θρεπτικών στοιχείων.
- Μεγάλη λειτουργική σταθερότητα σε μεταβαλλόμενα φορτία.
- Δυνατότητα λειτουργίας με υψηλές συγκεντρώσεις βιομάζας.

Μειονεκτήματα

- Προβλήματα απόφραξης μεμβρανών (*fouling*).
- Αυξημένες απαιτήσεις καθαρισμού και συντήρησης μεμβρανών.
- Υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση λόγω αερισμού και λειτουργίας αντλιών.
- Μεγαλύτερο αρχικό κόστος εγκατάστασης σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος.



Εικόνα 6 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MBR (Membrane Bioreactor), (Hitachi Aqua-Tech, 2026) <https://www.hitachi-aqt.com/solutions/mbr.html>

5.1.4 Οξειδωτική τάφος (OD)

Το σύστημα **Oxidation Ditch (OD)** αποτελεί μία παραλλαγή της διεργασίας ενεργού ιλύος παρατεταμένου αερισμού (*extended aeration activated sludge*), η οποία χαρακτηρίζεται από συνεχή ροή, μεγάλο χρόνο παραμονής ιλύος και υψηλή λειτουργική σταθερότητα. Παραδοσιακά εφαρμόζεται σε μεσαίες και μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει προσαρμοστεί και σε προκατασκευασμένες ή αποκεντρωμένες εφαρμογές μέσω προκατασκευασμένων ή πακετοποιημένων μονάδων μικρότερης κλίμακας (Li et al., 2025).

Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος στηρίζεται σε έναν κυκλικό ή ελλειπτικό αερόβιο αντιδραστήρα, μέσα στον οποίο το μικτό υγρό κυκλοφορεί συνεχώς με τη βοήθεια επιφανειακών ή υποβρύχιων αεριστήρων. Η συνεχής κυκλοφορία εξασφαλίζει ομοιόμορφη ανάμιξη της βιομάζας, σταθερή κατανομή

οξυγόνου και επαρκή επαφή μεταξύ μικροοργανισμών και οργανικών ρύπων. Παράλληλα, οι αεριστήρες παρέχουν το απαραίτητο διαλυμένο οξυγόνο για τη βιολογική οξείδωση του οργανικού φορτίου (Metcalf & Eddy, 2014).

Κατά τη λειτουργία του συστήματος, τα λύματα εισέρχονται συνεχώς στον αντιδραστήρα και αναμιγνύονται με την ενεργό ιλύ. Οι αερόβιοι μικροοργανισμοί αποδομούν τις οργανικές ενώσεις των λυμάτων, οδηγώντας σε σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων BOD_5 και COD. Λόγω του μεγάλου χρόνου παραμονής της ιλύος (**SRT**) και της συνεχούς αερόβιας λειτουργίας, ευνοείται ιδιαίτερα η ανάπτυξη νιτροποιητικών βακτηρίων, επιτρέποντας την αποτελεσματική μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικά (νιτροποίηση). Παράλληλα, μέσω κατάλληλου ελέγχου του αερισμού και της κυκλοφορίας, μπορούν να δημιουργηθούν τοπικές ανοξικές περιοχές μέσα στον αντιδραστήρα, επιτρέποντας και διεργασίες απονιτροποίησης (Li et al., 2025).

Η λειτουργία του Oxidation Ditch περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια συνεχούς επεξεργασίας. Αρχικά πραγματοποιείται η είσοδος και ανάμιξη των λυμάτων με την ενεργό ιλύ στον κυκλικό αντιδραστήρα. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η βιολογική οξείδωση του οργανικού φορτίου μέσω αερόβιων διεργασιών, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιούνται διεργασίες νιτροποίησης και, σε ορισμένες περιπτώσεις, απονιτροποίησης. Μετά τη βιολογική επεξεργασία, το μικτό υγρό οδηγείται σε δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, όπου διαχωρίζεται η βιομάζα από το επεξεργασμένο νερό. Μέρος της καθιζάνουσας ιλύος ανακυκλοφορεί στον αντιδραστήρα ώστε να διατηρείται σταθερή συγκέντρωση μικροοργανισμών, ενώ η περίσσεια ιλύος απομακρύνεται από το σύστημα (Metcalf & Eddy, 2014).

Στα σύγχρονα προκατασκευασμένα συστήματα OD, η δεξαμενή αερισμού, η καθίζηση και η ανακυκλοφορία ιλύος μπορούν να ενσωματωθούν σε προκατασκευασμένες μονάδες, μειώνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις χώρου και απλοποιώντας τη λειτουργία και τη συντήρηση. Η προσέγγιση αυτή έχει αυξήσει τη χρήση των oxidation ditch σε αποκεντρωμένες εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου απαιτείται σταθερή λειτουργία με περιορισμένη τεχνική υποστήριξη (Li et al., 2025).

Σε επίπεδο λειτουργικών παραμέτρων, τα συστήματα Oxidation Ditch λειτουργούν συνήθως με υδραυλικό χρόνο παραμονής (**HRT**) μεταξύ 12–36 ωρών και χρόνο παραμονής στερεών (**SRT**) που μπορεί να υπερβαίνει τις 15–30 ημέρες, λόγω της λειτουργίας παρατεταμένου αερισμού. Οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου διατηρούνται συνήθως μεταξύ 1–3 mg/L ώστε να εξασφαλίζεται αποτελεσματική αερόβια επεξεργασία και νιτροποίηση. Η μεγάλη διάρκεια παραμονής της βιομάζας συμβάλλει στη σταθερότητα λειτουργίας και στην αυξημένη ανθεκτικότητα του συστήματος σε μεταβολές οργανικού και υδραυλικού φορτίου (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα συστήματα OD παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρύπων και αζώτου. Οι αποδόσεις απομάκρυνσης BOD₅ και COD μπορούν να υπερβούν το 90%, ενώ μέσω του μεγάλου χρόνου αερισμού και της αυξημένης ηλικίας ιλύος επιτυγχάνεται αποτελεσματική νιτροποίηση. Παράλληλα, μέσω ελεγχόμενων ανοξικών περιοχών μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά ποσοστά απομάκρυνσης αζώτου μέσω απονιτροποίησης (Li et al., 2025).

Η ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων Oxidation Ditch σχετίζεται κυρίως με τη συνεχή λειτουργία των αεριστήρων και τη διατήρηση της κυκλοφορίας μέσα στον αντιδραστήρα. Παρότι τα συστήματα αυτά εμφανίζουν μεγαλύτερες απαιτήσεις αερισμού σε σχέση με ορισμένες νεότερες τεχνολογίες, η υψηλή λειτουργική σταθερότητα, η απλή λειτουργία και η αντοχή σε μεταβολές φορτίου τα καθιστούν ιδιαίτερα αξιόπιστα για αποκεντρωμένες εφαρμογές και μικρές κοινότητες (Li et al., 2025).

Συνολικά, το Oxidation Ditch αποτελεί αξιόπιστη και λειτουργικά σταθερή τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, με δυνατότητα αποτελεσματικής απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και αζώτου. Η μεγάλη λειτουργική ευελιξία, η αντοχή σε διακυμάνσεις φορτίου και η δυνατότητα εφαρμογής σε προκατασκευασμένες μονάδες καθιστούν το σύστημα κατάλληλο για σύγχρονες αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Li et al., 2025).

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή λειτουργική σταθερότητα και αντοχή σε μεταβολές φορτίου.
- Αποτελεσματική απομάκρυνση BOD₅, COD και αζώτου.

- Μεγάλος χρόνος παραμονής ιλύος που ευνοεί τη νιτροποίηση.
- Απλή λειτουργία και συντήρηση.
- Δυνατότητα εφαρμογής σε προκατασκευασμένες μονάδες.
- Κατάλληλο για μικρές κοινότητες και αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις.

Μειονεκτήματα

- Συνεχής λειτουργία χωρίς τη χρονική ευελιξία συστημάτων όπως τα SBR.
- Αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση λόγω συνεχούς αερισμού και κυκλοφορίας.
- Μεγαλύτερες απαιτήσεις χώρου σε σχέση με πιο προηγμένες προκατασκευασμένες τεχνολογίες όπως τα MBR.
- Απαιτείται δευτεροβάθμια καθίζηση και ανακυκλοφορία ιλύος.

5.1.5 Αντιδραστήρες σταθερής κλίνης (FBBR)

Οι αντιδραστήρες σταθερής κλίνης αποτελούν προηγμένη τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, η οποία βασίζεται στην ανάπτυξη προσκολλημένης βιομάζας (*biofilm*) πάνω σε σταθερά υλικά πλήρωσης μεγάλης ειδικής επιφάνειας. Οι αντιδραστήρες σταθερής κλίνης έχουν σχεδιαστεί ώστε να επιτυγχάνουν υψηλή συγκέντρωση μικροβιακής βιομάζας σε περιορισμένο όγκο αντιδραστήρα, γεγονός που επιτρέπει την ανάπτυξη μονάδων μικρού αποτυπώματος, με υψηλή απόδοση στην επεξεργασία λυμάτων με μεσαία έως πολύ υψηλή οργανική φόρτιση. (Alfadil et al., 2023).

Η λειτουργία των αντιδραστήρων σταθερής κλίνης βασίζεται στη διέλευση των λυμάτων μέσα από σταθερή κλίνη πορώδους υλικού, πάνω στο οποίο αναπτύσσεται το βιοφίλμ. Τα υλικά πλήρωσης μπορεί να είναι κεραμικά, πλαστικά, συνθετικά ή αφρώδη μέσα με πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια, ώστε να ευνοείται η ανάπτυξη μικροοργανισμών. Σε αντίθεση με τα συστήματα κινούμενης κλίνης, όπως τα MBBR, τα μέσα πλήρωσης στους FBBR παραμένουν ακίνητα, εξασφαλίζοντας σταθερές υδραυλικές και βιολογικές συνθήκες μέσα στον αντιδραστήρα (Khalaf et al., 2024).

Τα λύματα εισέρχονται συνεχώς στον αντιδραστήρα και διέρχονται μέσα από τη σταθερή κλίνη, όπου πραγματοποιείται η βιολογική επεξεργασία. Οι οργανικές ενώσεις και τα θρεπτικά συστατικά προσροφώνται στο βιοφίλμ και μεταβολίζονται από τους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των μέσων πλήρωσης. Στα εξωτερικά στρώματα του βιοφίλμ, όπου υπάρχει επαρκές διαλυμένο οξυγόνο, κυριαρχούν αερόβιες διεργασίες αποδόμησης οργανικού φορτίου και νιτροποίησης. Αντίθετα, στα βαθύτερα στρώματα του βιοφίλμ, όπου η συγκέντρωση οξυγόνου μειώνεται, μπορούν να αναπτυχθούν ανοξικές συνθήκες που επιτρέπουν διεργασίες απονιτροποίησης. Έτσι, τα FBBR μπορούν να επιτυγχάνουν ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αζώτου μέσα στον ίδιο αντιδραστήρα ή μέσω διαδοχικών θαλάμων διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας (Alfadil et al., 2023).

Η λειτουργία των **FBBR** είναι συνεχούς ροής. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, πραγματοποιείται η εισροή των λυμάτων και η κατανομή τους στη σταθερή κλίνη μέσω κατάλληλου συστήματος διανομής. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η βιολογική αποδόμηση των οργανικών ρύπων κατά τη διέλευση του υγρού μέσα από το βιοφίλμ. Σε πολυθαλαμικά συστήματα, μπορεί να υπάρχουν ξεχωριστές αερόβιες και ανοξικές ζώνες, ώστε να πραγματοποιούνται διαδοχικά νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Μετά τη βιολογική επεξεργασία, το επεξεργασμένο νερό οδηγείται σε στάδιο καθίζησης ή φίλτρανσης για την απομάκρυνση τυχόν αποκολλημένης βιομάζας πριν από την τελική εκροή (Khalaf et al., 2024).

Η σταθερή ανάπτυξη του βιοφίλμ επιτρέπει τη διατήρηση πολύ υψηλής συγκέντρωσης ενεργής βιομάζας μέσα στον αντιδραστήρα χωρίς ανάγκη έντονης ανάδευσης ή ανακυκλοφορίας ιλύος. Το χαρακτηριστικό αυτό οδηγεί σε υψηλή αποδοτικότητα επεξεργασίας ακόμη και σε λύματα με υψηλό οργανικό φορτίο, ενώ παράλληλα μειώνεται σημαντικά η παραγωγή περίσσειας ιλύος σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος (Alfadil et al., 2023).

Σε επίπεδο λειτουργικών παραμέτρων, τα FBBR λειτουργούν συνήθως με υδραυλικό χρόνο παραμονής (**HRT**) μεταξύ 2–10 ωρών, ανάλογα με το οργανικό φορτίο και τη διαμόρφωση του συστήματος. Η υψηλή ειδική επιφάνεια των μέσων πλήρωσης επιτρέπει αυξημένα οργανικά φορτία λειτουργίας, ενώ οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου στις

αερόβιες ζώνες διατηρούνται συνήθως μεταξύ 2–4 mg/L ώστε να υποστηρίζεται η βιολογική δραστηριότητα και η νιτροποίηση (Khalaf et al., 2024).

Τα συστήματα FBBR παρουσιάζουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση οργανικών ρύπων. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται αποδόσεις απομάκρυνσης BOD₅ και COD που μπορούν να υπερβούν το 90–95%, ακόμη και σε απόβλητα με υψηλό οργανικό φορτίο. Παράλληλα, μέσω κατάλληλης διάταξης αερόβιων και ανοξικών ζωνών μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά ποσοστά απομάκρυνσης αζώτου μέσω διεργασιών νιτροποίησης και απονιτροποίησης (Alfadil et al., 2023).

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των FBBR είναι η δυνατότητα επίτευξης υψηλής απόδοσης σε μικρό όγκο αντιδραστήρα, γεγονός που τα καθιστά συστήματα μικρού αποτυπώματος. Η πολύ υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και η σταθερή ανάπτυξη βιοφίλμ επιτρέπουν μικρό όγκο αντιδραστήρα σε σχέση με συμβατικές τεχνολογίες ενεργού ιλύος. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα FBBR χρησιμοποιούνται συχνά σε αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις, βιομηχανικές εφαρμογές, μονάδες με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται επεξεργασία λυμάτων υψηλού οργανικού φορτίου (Khalaf et al., 2024).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, τα FBBR παρουσιάζουν και ορισμένες λειτουργικές προκλήσεις. Η ανάπτυξη βιοφίλμ και η σταθερή κλίνη μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα απόφραξης (*clogging*) ή επικαθίσεων (*fouling/scaling*) όταν τα λύματα περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών ή λιπαρών ουσιών. Για τον λόγο αυτό απαιτείται κατάλληλη προεπεξεργασία των λυμάτων και σωστός σχεδιασμός της υδραυλικής κατανομής μέσα στον αντιδραστήρα (Alfadil et al., 2023).

Συνολικά, τα FBBR αποτελούν ιδιαίτερα αποδοτικά και προκατασκευασμένα συστήματα βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, με υψηλή αντοχή σε οργανικά φορτία και χαμηλή παραγωγή περίσσειας ιλύος. Η δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας, η ενεργειακή αποδοτικότητα και η υψηλή συγκέντρωση βιομάζας τα καθιστούν κατάλληλα για σύγχρονες αποκεντρωμένες και βιομηχανικές εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων (Khalaf et al., 2024; Alfadil et al., 2023).

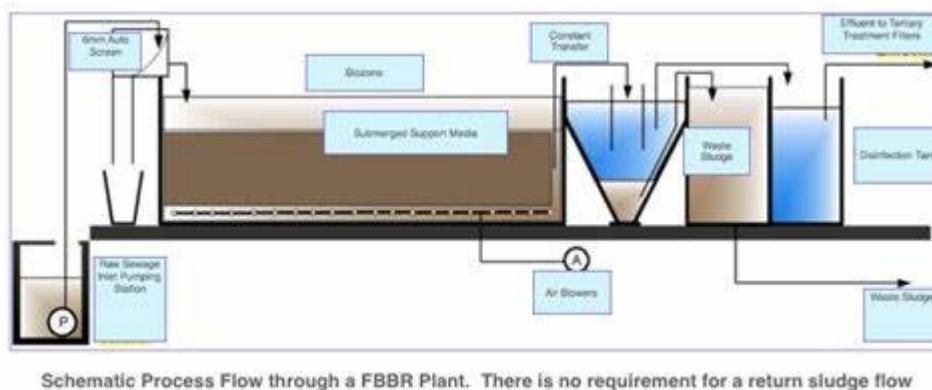
Πλεονεκτήματα

- Εξαιρετικά μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης λόγω υψηλής συγκέντρωσης βιομάζας.

- Υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης BOD₅ και COD ακόμη και σε υψηλά φορτία.
- Χαμηλή παραγωγή περίσσειας ιλύος.
- Μεγάλη λειτουργική σταθερότητα και αντοχή σε διακυμάνσεις φορτίου.
- Συνεχής λειτουργία και δυνατότητα εφαρμογής σε προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις.
- Δυνατότητα συνδυασμένης νιτροποίησης–απονιτροποίησης.

Μειονεκτήματα

- Κίνδυνος απόφραξης (*clogging*) ή επικαθίσεων (*fouling/scaling*).
- Απαιτείται καλή προεπεξεργασία λυμάτων με υψηλά αιωρούμενα στερεά.
- Αυξημένες απαιτήσεις σωστού υδραυλικού σχεδιασμού και κατανομής ροής.
- Πιθανή ευαισθησία της βιομάζας σε τοξικά ή έντονα μεταβαλλόμενα φορτία.



Εικόνα 7 Σχηματική απεικόνιση συστήματος FBBR (Fixed-Bed Biofilm Reactor) (Dynameau Ltd, 2024) <https://www.dynameau.co.uk/fbbr-biological-treatment.html>

5.1.6 SAF Βυθισμένο Αεριζόμενο Φίλτρο (SAF)

Το **Βυθισμένο Αεριζόμενο Φίλτρο** αποτελεί προκατασκευασμένη τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων συνεχούς ροής, η οποία βασίζεται στην ανάπτυξη προσκολλημένης βιομάζας (*biofilm*) πάνω σε σταθερά ή ημι-σταθερά μέσα πλήρωσης που βρίσκονται πλήρως βυθισμένα μέσα στη δεξαμενή επεξεργασίας. Η τεχνολογία SAF συνδυάζει βιολογική αποδόμηση οργανικών ρύπων και φυσική φίλτρανση μέσα στην ίδια

μονάδα, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων (Rusten et al., 1995).

Η βασική αρχή λειτουργίας του SAF στηρίζεται στη διέλευση των λυμάτων μέσω πορώδους φίλτρου πλήρωσης, στην επιφάνεια του οποίου αναπτύσσεται βιοφίλμ μικροοργανισμών. Τα υλικά πλήρωσης μπορεί να είναι πλαστικά, κεραμικά ή συνθετικά μέσα μεγάλης ειδικής επιφάνειας, τα οποία επιτρέπουν την ανάπτυξη υψηλής συγκέντρωσης μικροβιακής βιομάζας μέσα σε μικρό όγκο αντιδραστήρα. Ο αερισμός παρέχεται συνήθως από τον πυθμένα της δεξαμενής μέσω διαχυτών αέρα, εξασφαλίζοντας τόσο την παροχή οξυγόνου για τη βιολογική επεξεργασία όσο και τη διατήρηση καθαρής επιφάνειας στο φίλτρο ώστε να αποφεύγονται φραγές και υπερβολικές επικαθίσεις (Rusten et al., 1995).

Η λειτουργία του SAF είναι συνεχούς ροής. Τα λύματα εισέρχονται στη δεξαμενή και διέρχονται είτε κατακόρυφα είτε οριζόντια μέσα από το υλικό πλήρωσης. Κατά τη διέλευση, οι οργανικές ενώσεις και τα θρεπτικά συστατικά προσροφώνται στο βιοφίλμ και μεταβολίζονται από τους μικροοργανισμούς. Στα εξωτερικά στρώματα του βιοφίλμ, όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, πραγματοποιούνται κυρίως αερόβιες διεργασίες αποδόμησης οργανικού φορτίου και νιτροποίησης. Σε βαθύτερα στρώματα του βιοφίλμ, όπου η συγκέντρωση οξυγόνου μειώνεται, μπορούν να δημιουργηθούν ανοξικές συνθήκες που επιτρέπουν περιορισμένες διεργασίες απονιτροποίησης (Metcalf & Eddy, 2014).

Η λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια επεξεργασίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 8. Αρχικά πραγματοποιείται η εισροή και κατανομή των λυμάτων μέσα στη δεξαμενή SAF. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η βιολογική αποδόμηση οργανικών ενώσεων μέσω του βιοφίλμ που αναπτύσσεται στο φίλτρο πλήρωσης. Ο συνεχής αερισμός παρέχει το απαιτούμενο οξυγόνο για τη διατήρηση των αερόβιων διεργασιών και ταυτόχρονα συμβάλλει στη διατήρηση της υδραυλικής λειτουργίας του φίλτρου. Με την πάροδο του χρόνου, μέρος της περίσσειας βιομάζας αποκολλάται από το φίλτρο και απομακρύνεται σε επόμενο στάδιο καθίζησης ή διαχωρισμού στερεών πριν από την τελική εκροή (Rusten et al., 1995).

Σε πολυβάθμιες διατάξεις SAF μπορούν να ενσωματωθούν διαδοχικές αερόβιες και ανοξικές ζώνες ώστε να επιτυγχάνεται τόσο νιτροποίηση όσο και απονιτροποίηση,

βελτιώνοντας σημαντικά την απομάκρυνση αζώτου. Παρόλα αυτά, η απομάκρυνση φωσφόρου παραμένει περιορισμένη εάν δεν εφαρμοστεί πρόσθετη χημική καθίζηση ή άλλη εξειδικευμένη διεργασία (Metcalf & Eddy, 2014).

Σε επίπεδο λειτουργικών παραμέτρων, τα SAF λειτουργούν συνήθως με υδραυλικό χρόνο παραμονής (**HRT**) μεταξύ 2–8 ωρών, ανάλογα με το οργανικό φορτίο και τον επιθυμητό βαθμό επεξεργασίας. Οι συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου στις αερόβιες ζώνες διατηρούνται συνήθως μεταξύ 2–4 mg/L ώστε να υποστηρίζεται αποτελεσματική οξείδωση οργανικών ρύπων και νιτροποίηση. Η υψηλή ειδική επιφάνεια των μέσων πλήρωσης επιτρέπει μεγάλη συγκέντρωση βιομάζας και αυξημένες αποδόσεις επεξεργασίας ακόμη και σε σχετικά μικρό όγκο δεξαμενής (Rusten et al., 1995).

Τα SAF παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση οργανικών ρύπων. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται αποδόσεις απομάκρυνσης BOD₅ και COD που συνήθως υπερβαίνουν το 85–95%, ενώ η νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική λόγω της σταθερής ανάπτυξης του βιοφίλμ και της συνεχούς παροχής οξυγόνου (Rusten et al., 1995). Παράλληλα, τα SAF παράγουν μικρότερες ποσότητες περίσσειας ιλύος σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των SAF είναι το μικρό απαιτούμενο αποτύπωμά τους. Η υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και η συνδυασμένη λειτουργία βιολογικής επεξεργασίας και φίλτρανσης επιτρέπουν μικρές απαιτήσεις σε χώρο εγκατάστασης. Για τον λόγο αυτό, τα SAF χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικρούς οικισμούς, ξενοδοχειακές και τουριστικές εγκαταστάσεις, αποκεντρωμένα cluster systems και βιομηχανικές εφαρμογές μέσης οργανικής φόρτισης (Metcalf & Eddy, 2014).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, τα SAF παρουσιάζουν και ορισμένες λειτουργικές προκλήσεις. Η σταθερή κλίνη μπορεί να εμφανίσει προβλήματα φραγής (*clogging*) ή υπερβολικής ανάπτυξης βιοφίλμ όταν δεν προηγείται σωστή προεπεξεργασία των λυμάτων. Επιπλέον, η ανάγκη συνεχούς αερισμού συνεπάγεται ενεργειακή κατανάλωση, ενώ η περιορισμένη απομάκρυνση φωσφόρου απαιτεί συχνά συμπληρωματικές διεργασίες επεξεργασίας (Rusten et al., 1995).

Συνολικά, το SAF αποτελεί αξιόπιστη και λειτουργικά σταθερή τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, με υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρύπων και αζώτου, μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης και σχετικά απλή λειτουργία. Τα χαρακτηριστικά

αυτά το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων (Rusten et al., 1995).

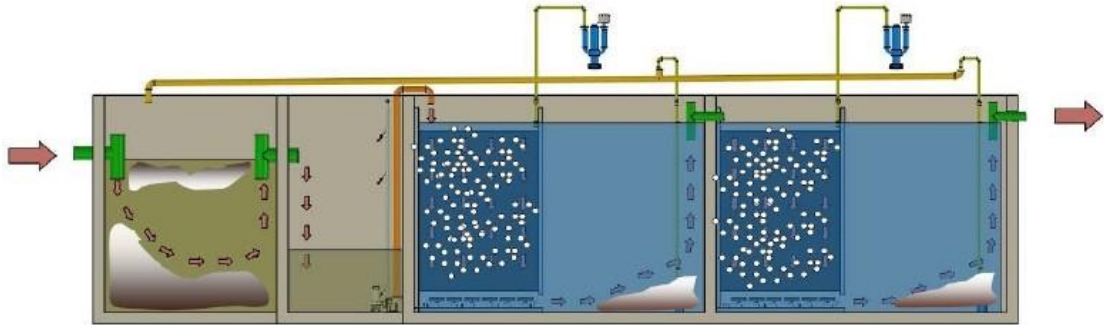
Πλεονεκτήματα

- Μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης.
 - Υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης BOD₅ και COD.
 - Υψηλή λειτουργική σταθερότητα και αντοχή σε διακυμάνσεις φορτίου.
 - Μειωμένη παραγωγή περίσσειας ιλύος.
 - Απλούστερη λειτουργία σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος.
 - Κατάλληλο για προκατασκευασμένες μονάδες.
-

Μειονεκτήματα

- Κίνδυνος φραγής του φίλτρου χωρίς κατάλληλη προεπεξεργασία.
 - Περιορισμένη απομάκρυνση φωσφόρου χωρίς πρόσθετη διεργασία.
 - Απαιτεί συνεχή παροχή αέρα και ενεργειακή κατανάλωση.
-

Απαιτείται σωστός σχεδιασμός της υδραυλικής κατανομής στο φίλτρο



Εικόνα 8 Σχηματική απεικόνιση συστήματος BioKube. (). SAF – Submerged Aerated Filters. <https://www.biokube.com/saf-submerged-aerated-filters/>

5.1.7 Περιστρεφόμενοι Βιολογικοί Δίσκοι (RBC)

Το σύστημα **RBC (Rotating Biological Contactor)** ή **Περιστρεφόμενος Βιολογικός Δίσκος** αποτελεί τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων σταθερού βιοφίλμ (*fixed-film biofilm process*), η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για δευτεροβάθμια επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών λυμάτων. Η λειτουργία του βασίζεται στην ανάπτυξη μικροβιακής βιομάζας πάνω στην επιφάνεια περιστρεφόμενων δίσκων, οι οποίοι βυθίζονται μερικώς στα λύματα και περιστρέφονται αργά, εναλλάσσοντας συνεχώς επαφή με το υγρό και τον αέρα. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει αποτελεσματική αερόβια βιολογική αποδόμηση οργανικών ρύπων με χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας και απλή λειτουργία (Tawfik et al., 2007).

Το RBC αποτελείται από σειρά πλαστικών ή συνθετικών δίσκων τοποθετημένων πάνω σε οριζόντιο άξονα, ο οποίος περιστρέφεται αργά, συνήθως με ταχύτητα περίπου 2–5 rpm. Περίπου το 35–45% της επιφάνειας των δίσκων παραμένει βυθισμένο στα λύματα, ενώ το υπόλοιπο εκτίθεται στον αέρα. Η συνεχής περιστροφή επιτρέπει στο βιοφίλμ να έρχεται διαδοχικά σε επαφή με οργανικό υπόστρωμα και οξυγόνο, δημιουργώντας κατάλληλες συνθήκες για βιολογική επεξεργασία (Mannina et al., 2023).

Η λειτουργία του συστήματος ξεκινά με την προσκόλληση μικροοργανισμών στην επιφάνεια των δίσκων, όπου σχηματίζεται βιοφίλμ όπως φαίνεται στην Εικόνα 9. Κατά την περιστροφή, οι μικροοργανισμοί βυθίζονται στα λύματα και απορροφούν οργανικές ενώσεις και θρεπτικά συστατικά. Στη συνέχεια, όταν το βιοφίλμ εκτίθεται στον αέρα, προσλαμβάνει το απαραίτητο οξυγόνο για τις αερόβιες μεταβολικές διεργασίες. Η συνεχής αυτή εναλλαγή μεταξύ υγρής και αέριας φάσης επιτρέπει την αποδοτική οξείδωση οργανικού φορτίου χωρίς την ανάγκη έντονου μηχανικού αερισμού (Tawfik et al., 2007).

Στα εξωτερικά στρώματα του βιοφίλμ, όπου υπάρχει υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου, πραγματοποιείται κυρίως αποδόμηση οργανικών ρύπων και νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου. Σε βαθύτερα στρώματα του βιοφίλμ, όπου η συγκέντρωση οξυγόνου είναι μικρότερη, μπορούν να δημιουργηθούν ανοξικές συνθήκες που επιτρέπουν περιορισμένες διεργασίες απονιτροποίησης. Με κατάλληλο σχεδιασμό πολλαπλών βαθμίδων και διαφοροποίηση της φόρτισης, τα RBC μπορούν να επιτύχουν σημαντική απομάκρυνση αζώτου (Mannina et al., 2023).

Η λειτουργία του RBC είναι συνεχούς ροής. Τα λύματα διέρχονται διαδοχικά από σειρά θαλάμων με περιστρεφόμενους δίσκους, όπου μειώνεται σταδιακά το οργανικό φορτίο. Κατά την ανάπτυξη του βιοφίλμ, μέρος της βιομάζας αποκολλάται φυσικά όταν αποκτήσει μεγάλο πάχος. Η αποκολλημένη βιομάζα απομακρύνεται στη συνέχεια σε δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, όπου διαχωρίζεται από την τελική εκροή. Η παραγωγή περίσσειας ιλύος είναι σχετικά χαμηλή σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος, γεγονός που μειώνει τις ανάγκες διαχείρισης στερεών (Tawfik et al., 2007).

Σε επίπεδο λειτουργικών παραμέτρων, τα RBC λειτουργούν συνήθως με υδραυλικό χρόνο παραμονής (**HRT**) μεταξύ 4–12 ωρών, ανάλογα με το οργανικό φορτίο και τον αριθμό βαθμίδων του συστήματος. Η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής επιτρέπει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, ενώ η μεγάλη διαθέσιμη επιφάνεια ανάπτυξης βιοφίλμ εξασφαλίζει υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και σταθερή λειτουργία (Mannina et al., 2023).

Τα RBC παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση οργανικών ρύπων. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται αποδόσεις απομάκρυνσης BOD₅ και COD που συχνά υπερβαίνουν το 85–95%, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται αποδοτική νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου. Η απομάκρυνση φωσφόρου είναι περιορισμένη και συνήθως απαιτεί πρόσθετη χημική ή βιολογική διεργασία (Mannina et al., 2023).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των RBC είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Ο αερισμός πραγματοποιείται φυσικά μέσω της περιστροφής των δίσκων και της επαφής τους με τον αέρα, μειώνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις μηχανικού αερισμού. Παράλληλα, η απλή λειτουργία και η μικρή ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού καθιστούν τα RBC ιδιαίτερα κατάλληλα για μικρές και αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Tawfik et al., 2007).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, τα RBC παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς. Η λειτουργία τους μπορεί να επηρεαστεί από πολύ υψηλά οργανικά φορτία ή από έντονες διακυμάνσεις θερμοκρασίας, ενώ σε ψυχρά ή ακραία κλίματα συχνά απαιτείται προστατευτική κάλυψη του συστήματος. Επιπλέον, πιθανές επικαθίσεις ή υπερβολική ανάπτυξη βιοφίλμ μπορεί να απαιτήσουν περιοδικό καθαρισμό ή συντήρηση των δίσκων (Mannina et al., 2023).

Συνολικά, τα RBC αποτελούν αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, με απλή λειτουργία, χαμηλή παραγωγή ιλύος και μικρό

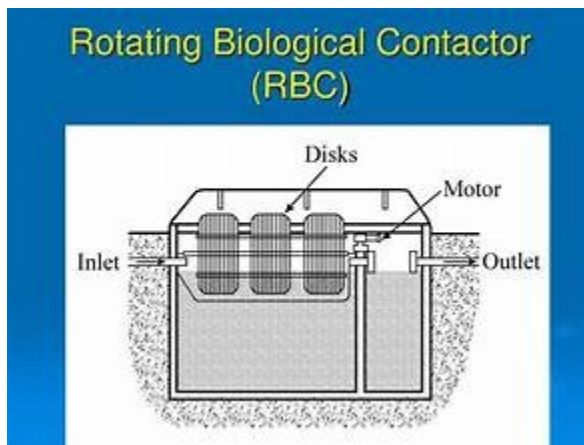
αποτύπωμα εγκατάστασης. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τα συστήματα RBC ιδιαίτερα κατάλληλα για μικρές κοινότητες, αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις και εφαρμογές όπου απαιτείται σταθερή λειτουργία με περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης (Tawfik et al., 2007).

Πλεονεκτήματα

- Απλή λειτουργία και εύκολη συντήρηση.
- Χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση λόγω φυσικού αερισμού μέσω περιστροφής.
- Μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης.
- Χαμηλή παραγωγή περίσσειας ιλύος.
- Υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης BOD₅ και νιτροποίησης.
- Κατάλληλο για αποκεντρωμένες και μικρής κλίμακας εφαρμογές.

Μειονεκτήματα

- Περιορισμένη ικανότητα διαχείρισης πολύ υψηλών οργανικών φορτίων.
- Ενδεχόμενη ανάγκη περιοδικού καθαρισμού των δίσκων.
- Ευαισθησία σε ακραίες θερμοκρασίες και καιρικές συνθήκες.
- Περιορισμένη απομάκρυνση φωσφόρου χωρίς πρόσθετες διεργασίες.



Εικόνα 9 Σχηματική απεικόνιση συστήματος RBC (Rotating Biological Contactor), SlideServe (2019) <https://www.slideserve.com/riva/rotating-biological-contactor-rbc-process-powerpoint-ppt-presentation>

5.1.8 Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Χωρίσματα (ABR)

Το σύστημα **ABR (Anaerobic Baffled Reactor)** ή **Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Διαφράγματα** αποτελεί μία εξελιγμένη μορφή αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, η οποία βασίζεται στη διαδοχική διέλευση των λυμάτων μέσα από σειρά εσωτερικών θαλάμων που διαχωρίζονται με κατακόρυφα διαφράγματα (*baffles*). Ο σχεδιασμός αυτός επιτρέπει τη σταδιακή επαφή του λύματος με ενεργή αναερόβια βιομάζα, αυξάνοντας σημαντικά την αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρύπων σε σχέση με μια συμβατική σπητική δεξαμενή (Bachmann et al., 1985).

Ο ABR θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλος για αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων, καθώς λειτουργεί χωρίς ανάγκη μηχανικού αερισμού και με πολύ χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε μικρές κοινότητες, αγροτικές περιοχές και συστήματα DEWATS (*Decentralized Wastewater Treatment Systems*), συχνά σε συνδυασμό με επόμενα στάδια polishing, όπως τεχνητούς υγροτόπους ή αερόβιες διεργασίες (Barber & Stuckey, 1999).

Η λειτουργία του ABR βασίζεται στη συνεχή ροή των λυμάτων μέσα από διαδοχικούς θαλάμους. Τα λύματα εισέρχονται αρχικά στον πρώτο θάλαμο, όπου πραγματοποιείται πρωτογενής καθίζηση και συγκράτηση μεγάλου μέρους των αιωρούμενων στερεών. Στη συνέχεια, η ροή κατευθύνεται εναλλάξ κάτω και πάνω από τα εσωτερικά διαφράγματα, αναγκάζοντας το λύμα να διέρχεται μέσα από στρώματα ενεργής αναερόβιας βιομάζας που έχουν αναπτυχθεί σε κάθε διαμέρισμα του αντιδραστήρα (Bachmann et al., 1985).

Η διαδοχική αυτή ροή αυξάνει σημαντικά τον χρόνο επαφής μεταξύ οργανικών ρύπων και μικροοργανισμών, ενώ παράλληλα επιτρέπει υψηλό χρόνο παραμονής στερεών (*SRT*) χωρίς ανάγκη μηχανικής ανάδευσης ή ανακυκλοφορίας ιλύος. Σε κάθε θάλαμο πραγματοποιούνται διαφορετικά στάδια της αναερόβιας βιολογικής αποδόμησης, όπως:

- υδρόλυση,
- οξεογένεση,
- ακετογένεση,
- και μεθανογένεση.

Κατά τις διεργασίες αυτές, οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί διασπούν τις οργανικές ενώσεις (BOD_5 , COD), παράγοντας κυρίως μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) ως τελικά προϊόντα της βιοαποδόμησης (Barber & Stuckey, 1999).

Η λειτουργία του ABR μπορεί να περιγραφεί σε διαδοχικά στάδια όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Αρχικά πραγματοποιείται η είσοδος και πρωτογενής καθίζηση των λυμάτων στον πρώτο θάλαμο. Στη συνέχεια, τα λύματα διέρχονται μέσω των διαφραγμάτων στους επόμενους θαλάμους, όπου αναπτύσσεται ενεργή αναερόβια βιομάζα. Καθώς το οργανικό φορτίο μειώνεται προοδευτικά από θάλαμο σε θάλαμο, ευνοείται η ανάπτυξη διαφορετικών μικροβιακών πληθυσμών ανάλογα με το στάδιο της αναερόβιας αποδόμησης. Τέλος, το επεξεργασμένο υγρό εξέρχεται από τον τελευταίο θάλαμο με σημαντικά μειωμένο οργανικό φορτίο, αλλά συνήθως απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία πριν από την τελική διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση (Bachmann et al., 1985).

Σε επίπεδο λειτουργικών παραμέτρων, οι ABR λειτουργούν συνήθως με υδραυλικό χρόνο παραμονής (**HRT**) μεταξύ 12–48 ωρών, ανάλογα με το οργανικό φορτίο και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Ο χρόνος παραμονής στερεών είναι σημαντικά μεγαλύτερος λόγω της συγκράτησης βιομάζας μέσα στους θαλάμους, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένη παραγωγή περίσσειας ιλύος. Η αναερόβια λειτουργία πραγματοποιείται χωρίς παροχή οξυγόνου, γεγονός που μειώνει δραστικά την ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με αερόβιες τεχνολογίες (Barber & Stuckey, 1999).

Τα ABR παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση οργανικών ρύπων. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται αποδόσεις απομάκρυνσης BOD₅ και COD που μπορούν να φθάσουν ή και να υπερβούν το 70–90%, ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος και το είδος των λυμάτων. Παράλληλα, λόγω της αναερόβιας βιολογικής δραστηριότητας παράγεται βιοαέριο, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις (Barber & Stuckey, 1999).

Ωστόσο, οι αναερόβιες διεργασίες δεν επιτυγχάνουν πλήρη απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων, όπως άζωτο και φώσφορο. Για τον λόγο αυτό, το εκροής νερό συχνά οδηγείται σε επόμενα στάδια επεξεργασίας, όπως αερόβια βιολογικά συστήματα, τεχνητούς υγροτόπους ή polishing filters, ώστε να επιτευχθούν τα απαιτούμενα περιβαλλοντικά όρια εκροής (Feng et al., 2014).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ABR είναι η υψηλή λειτουργική σταθερότητα και η αντοχή σε υδραυλικές και οργανικές διακυμάνσεις. Η διαδοχική διάταξη των θαλάμων προστατεύει το σύστημα από απότομες μεταβολές φορτίου, ενώ η υψηλή συγκράτηση βιομάζας επιτρέπει συνεχή και αξιόπιστη λειτουργία ακόμη και σε

αποκεντρωμένες περιοχές με περιορισμένες δυνατότητες τεχνικής υποστήριξης (Barber & Stuckey, 1999).

Παρόλα αυτά, τα ABR παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς. Η αναερόβια αποδόμηση είναι γενικά πιο αργή σε σχέση με τις αερόβιες διεργασίες, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις χρόνου παραμονής και όγκου αντιδραστήρα. Επιπλέον, η απόδοση επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία λειτουργίας, καθώς οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί είναι πιο ευαίσθητοι σε χαμηλές θερμοκρασίες (Feng et al., 2014).

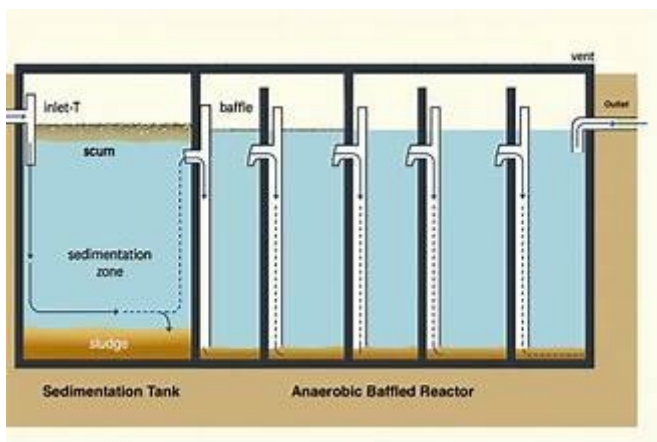
Συνολικά, το ABR αποτελεί μια ιδιαίτερα αποδοτική και ενεργειακά βιώσιμη τεχνολογία αναερόβιας επεξεργασίας λυμάτων, με χαμηλό λειτουργικό κόστος, μικρή παραγωγή ιλύος και υψηλή λειτουργική σταθερότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά το καθιστούν κατάλληλο για αποκεντρωμένες εφαρμογές, μικρές κοινότητες και περιοχές όπου απαιτούνται απλές και χαμηλής ενεργειακής απαίτησης λύσεις επεξεργασίας λυμάτων (Barber & Stuckey, 1999).

Πλεονεκτήματα

- Πολύ χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση λόγω απουσίας αερισμού.
- Χαμηλή παραγωγή περίσσειας ιλύος.
- Υψηλή λειτουργική σταθερότητα και ανθεκτικότητα σε διακυμάνσεις φορτίου.
- Παραγωγή βιοαερίου με δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης.
- Απλή λειτουργία και κατάλληλο για αποκεντρωμένες εφαρμογές.

Μειονεκτήματα

- Περιορισμένη απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου χωρίς πρόσθετη επεξεργασία.
- Μεγαλύτερες απαιτήσεις χρόνου παραμονής και όγκου αντιδραστήρα.
- Ευαισθησία της αναερόβιας βιολογικής δραστηριότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Συχνά απαιτεί στάδιο polishing πριν από την τελική διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση.



Εικόνα 10 Σχηματική απεικόνιση συστήματος ABR (Anaerobic Baffled Reactor)... (Akvopedia, 2020). https://akvopedia.org/wiki/Anaerobic_Baffled_Reactor_%28ABR%29_1

5.1.9 Μεμβρανικός Αεριζόμενος Βιοαντιδραστήρας Βιοφίλμ MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor)

Το σύστημα **MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor)** ή **Μεμβρανικός Αεριζόμενος Βιοαντιδραστήρας Βιοφίλμ** αποτελεί μία από τις πλέον σύγχρονες και ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων. Η λειτουργία του βασίζεται στην παροχή οξυγόνου μέσω ειδικών διαπερατών μεμβρανών απευθείας στη βιομάζα (*biofilm*) που αναπτύσσεται στην εξωτερική επιφάνειά τους. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει σημαντικά πιο αποδοτική μεταφορά οξυγόνου σε σχέση με τις συμβατικές διεργασίες αερισμού με φυσαλίδες, οδηγώντας σε χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών και άζωτούχων ρύπων (Casey et al., 2023).

Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος, στα οποία ο αερισμός πραγματοποιείται μέσω διάχυσης φυσαλίδων στον όγκο του αντιδραστήρα, στο MABR το οξυγόνο μεταφέρεται διάχυτα μέσω της μεμβράνης κατευθείαν προς το βιοφίλμ. Οι μεμβράνες λειτουργούν ταυτόχρονα ως φορείς ανάπτυξης βιομάζας και ως μέσο αερισμού (*bubble-less aeration*), επιτρέποντας εξαιρετικά αποδοτική αξιοποίηση του οξυγόνου και μειωμένες απώλειες ενέργειας (Nerenberg, 2023).

Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος περιλαμβάνει την παροχή αέρα ή καθαρού οξυγόνου στο εσωτερικό των μεμβρανών όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. Το οξυγόνο

διαχέεται διαμέσου της ημιπερατής μεμβράνης προς το εξωτερικό της επιφάνειας, όπου έχει αναπτυχθεί βιοφίλμ μικροοργανισμών. Ταυτόχρονα, τα οργανικά και αζωτούχα συστατικά των λυμάτων διαχέονται από το υγρό προς το βιοφίλμ από την αντίθετη κατεύθυνση. Η αντίθετη αυτή διάχυση δημιουργεί διαστρωματωμένες μικροπεριβαλλοντικές ζώνες μέσα στο biofilm, επιτρέποντας την ταυτόχρονη πραγματοποίηση αερόβιων και ανοξικών διεργασιών (Syron & Casey, 2008).

Στα εσωτερικά στρώματα του βιοφίλμ, κοντά στη μεμβράνη όπου η συγκέντρωση οξυγόνου είναι υψηλή, κυριαρχούν αερόβιες διεργασίες, όπως:

- αποδόμηση οργανικού φορτίου (BOD_5 , COD),
- και νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου.

Αντίθετα, στα εξωτερικά στρώματα του βιοφίλμ, όπου το διαθέσιμο οξυγόνο είναι περιορισμένο, δημιουργούνται ανοξικές συνθήκες που επιτρέπουν διεργασίες απονιτροποίησης. Έτσι, το MABR μπορεί να επιτυγχάνει **ταυτόχρονη νιτροποίηση–απονιτροποίηση (Simultaneous Nitrification–Denitrification, SND)** μέσα στην ίδια δεξαμενή, χωρίς ανάγκη διαχωρισμένων αερόβιων και ανοξικών ζωνών (Nerenberg, 2023).

Η λειτουργία του MABR είναι συνεχούς ροής. Τα λύματα διέρχονται μέσα από τον αντιδραστήρα και έρχονται σε επαφή με τις μεμβράνες που φέρουν το βιοφίλμ. Η επεξεργασία πραγματοποιείται συνεχώς, ενώ η εκροή παρουσιάζει σημαντικά μειωμένες συγκεντρώσεις οργανικών ρύπων και αζώτου. Σε ορισμένες εφαρμογές, το MABR λειτουργεί ως αυτόνομη μονάδα, ενώ σε άλλες ενσωματώνεται ως στάδιο αναβάθμισης υφιστάμενων εγκαταστάσεων ενεργού ιλύος για ενίσχυση της απομάκρυνσης αζώτου και μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης (Casey et al., 2023).

Σε επίπεδο λειτουργικών παραμέτρων, τα MABR λειτουργούν συνήθως με υδραυλικό χρόνο παραμονής (**HRT**) μεταξύ 4–12 ωρών, ανάλογα με τη φόρτιση και τον σχεδιασμό του αντιδραστήρα. Η λειτουργία τους εξαρτάται σημαντικά από:

- τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO),
- το pH,
- τη θερμοκρασία,
- το πάχος του βιοφίλμ,
- και τον ρυθμό παροχής αέρα μέσω της μεμβράνης.

Η βέλτιστη ανάπτυξη του βιοφίλμ είναι κρίσιμη για τη διατήρηση υψηλής απόδοσης νιτροποίησης–απονιτροποίησης και σταθερής λειτουργίας (Syron & Casey, 2008).

Τα MABR παρουσιάζουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση οργανικών και αζωτούχων ρύπων. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται αποδόσεις απομάκρυνσης BOD₅ και COD που συχνά υπερβαίνουν το 90%, ενώ η απομάκρυνση αζώτου μπορεί να είναι ιδιαίτερα υψηλή λόγω της ταυτόχρονης νιτροποίησης–απονιτροποίησης μέσα στο biofilm (Casey et al., 2023). Επιπλέον, η χρήση μεμβρανικού αερισμού μπορεί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση αερισμού έως και πάνω από 70% σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος με διάχυση φυσαλίδων (Nerenberg, 2023).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των MABR είναι η δυνατότητα επίτευξης υψηλής απόδοσης επεξεργασίας σε περιορισμένο όγκο εγκατάστασης. Η υψηλή συγκέντρωση βιομάζας πάνω στις μεμβράνες και η αυξημένη απόδοση μεταφοράς οξυγόνου επιτρέπουν μικρό όγκο αντιδραστήρα και περιορισμένες απαιτήσεις χώρου εγκατάστασης. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα MABR θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλα για αποκεντρωμένες εφαρμογές, μικρές κοινότητες, ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις και περιοχές με αυστηρές απαιτήσεις απομάκρυνσης αζώτου (Casey et al., 2023).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, τα MABR παρουσιάζουν και ορισμένες λειτουργικές προκλήσεις. Η ανάπτυξη βιοφίλμ και η παρουσία στερεών μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα επικάλυψης (*biofouling*), απαιτώντας περιοδικό καθαρισμό και συντήρηση των μεμβρανών. Επιπλέον, το αρχικό κόστος εγκατάστασης μπορεί να είναι υψηλότερο λόγω της χρήσης εξειδικευμένων μεμβρανών και εξοπλισμού αερισμού. Η απόδοση επηρεάζεται επίσης από τις συνθήκες λειτουργίας και απαιτεί σωστό έλεγχο παραμέτρων όπως DO, pH και θερμοκρασία (Revankar et al., 2022).

Συνολικά, το MABR αποτελεί μία ιδιαίτερα καινοτόμο και ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, η οποία συνδυάζει υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αζώτου με μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τα MABR-based συστήματα εξαιρετικά ελκυστικά για σύγχρονες προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων (Casey et al., 2023).

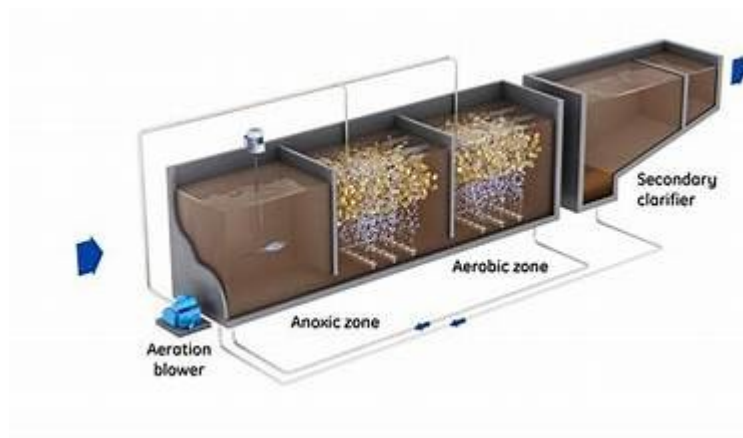
Πλεονεκτήματα

- Πολύ υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα λόγω bubble-less aeration.

- Ταυτόχρονη νιτροποίηση–απονιτροποίηση (SND) μέσα στην ίδια μονάδα.
- Υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης BOD₅, COD και αζώτου.
- Μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης και προκατασκευασμένος σχεδιασμός.
- Υψηλή λειτουργική σταθερότητα και αντοχή σε μεταβολές φορτίου.
- Κατάλληλο για αποκεντρωμένες και μικρής κλίμακας εφαρμογές.

Μειονεκτήματα

- Υψηλότερο αρχικό κόστος λόγω εξειδικευμένων μεμβρανών.
- Πιθανότητα biofouling και ανάγκη περιοδικού καθαρισμού.
- Η απόδοση επηρεάζεται από pH, DO, θερμοκρασία και πάχος biofilm.
- Απαιτεί εξειδικευμένο σχεδιασμό και λειτουργικό έλεγχο.



Εικόνα 11 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor, SUEZ Water Technologies & Solutions (2026) <https://www.watertechnologies.com/products/biological/zeelung-membrane-aerated-biofilm-reactor>

5.1.10 Βυθισμένος Αερόβιος Αντιδραστήρας Σταθερού Βιοφίλμ SAFF

Το SAFF (Submerged Aerobic Fixed Film Reactor) ή **Βυθισμένος Αερόβιος Αντιδραστήρας Σταθερού Βιοφίλμ** αποτελεί μία προκατασκευασμένη τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων συνεχούς ροής, η οποία βασίζεται στην ανάπτυξη προσκολλημένης βιομάζας (*biofilm*) πάνω σε σταθερά μέσα πλήρωσης που βρίσκονται πλήρως βυθισμένα μέσα στον αντιδραστήρα. Το σύστημα χρησιμοποιεί αερισμό για την παροχή οξυγόνου στους μικροοργανισμούς, επιτρέποντας την αερόβια αποδόμηση

οργανικών ρύπων και τη σταθερή λειτουργία ακόμη και υπό μεταβαλλόμενα φορτία (SSWM, 2023).

Η βασική αρχή λειτουργίας του SAFF στηρίζεται στον συνδυασμό δύο μηχανισμών βιολογικής επεξεργασίας:

- της προσκολλημένης ανάπτυξης βιομάζας (*fixed-film biofilm process*),
- και σε μικρότερο βαθμό αιωρούμενης βιομάζας (*suspended growth*),

γεγονός που το καθιστά υβριδικό βιολογικό σύστημα σε σχέση με τις κλασικές διεργασίες ενεργού ιλύος ή τα παραδοσιακά φίλτρα βιοφίλμ (AESA Arabia, 2023).

Η τυπική διάταξη ενός συστήματος SAFF περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια επεξεργασίας. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται πρωτοβάθμια καθίζηση, όπου απομακρύνονται τα μεγαλύτερα στερεά και μέρος των αιωρούμενων υλικών. Στη συνέχεια, τα προεπεξεργασμένα λύματα οδηγούνται στον κύριο αεριζόμενο αντιδραστήρα, όπου βρίσκονται τα σταθερά μέσα πλήρωσης πάνω στα οποία έχει αναπτυχθεί το βιοφίλμ μικροοργανισμών. Το βιοφίλμ αυτό πραγματοποιεί την αερόβια βιολογική αποδόμηση της οργανικής ύλης, μειώνοντας σημαντικά το οργανικό φορτίο (BOD_5 , COD) και μέρος των αιωρούμενων στερεών (SS). Στο τελικό στάδιο ακολουθεί δευτεροβάθμια καθίζηση ή διαύγαση, κατά την οποία απομακρύνονται τα βιολογικά στερεά και η περίσσεια βιομάζας πριν από την έξοδο της εκροής (SSWM, 2023).

Ο αερισμός του συστήματος πραγματοποιείται μέσω διαχυτών τοποθετημένων στον πυθμένα της δεξαμενής. Η παροχή αέρα εξασφαλίζει:

- τη μεταφορά οξυγόνου στους μικροοργανισμούς,
- την ανάδευση του υγρού,
- και την αποφυγή απόφραξης των μέσων πλήρωσης.

Η παρουσία συνεχούς αερισμού υποστηρίζει αερόβιες διεργασίες όπως:

- οξείδωση οργανικού φορτίου,
- υδρόλυση οργανικών ενώσεων,
- και νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου όταν οι χρόνοι παραμονής είναι επαρκείς (AESA Arabia, 2023).

Η λειτουργία του SAFF είναι συνεχούς ροής και χαρακτηρίζεται από υψηλή λειτουργική σταθερότητα. Τα λύματα διέρχονται μέσα από τα μέσα πλήρωσης όπου πραγματοποιείται η επεξεργασία, ενώ η βιομάζα παραμένει προσκολλημένη στις

επιφάνειες του υλικού. Η διατήρηση υψηλής συγκέντρωσης μικροοργανισμών μέσα στον αντιδραστήρα επιτρέπει υψηλή αποδοτικότητα ακόμη και σε σχετικά μικρό όγκο εγκατάστασης. Για τον λόγο αυτό, τα SAFF θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλα για προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εφαρμογές, όπως:

- μικροί οικισμοί,
- ξενοδοχειακές μονάδες,
- τουριστικές εγκαταστάσεις,
- κατοικίες ή συγκροτήματα κατοικιών,
- και μικρές βιομηχανικές εφαρμογές (SSWM, 2023).

Σε επίπεδο απόδοσης, τα συστήματα SAFF επιτυγχάνουν υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρύπων, με αποδόσεις BOD₅ και COD που συχνά υπερβαίνουν το 85–95%, ενώ παρουσιάζουν μειωμένη παραγωγή περίσσειας ιλύος σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος. Η σταθερή ανάπτυξη βιοφίλμ συμβάλλει επίσης στη συγκράτηση αιωρούμενων στερεών και στη σταθερότητα λειτουργίας υπό μεταβαλλόμενα οργανικά ή υδραυλικά φορτία (AESA Arabia, 2023).

Σχεδιαστικά, τα SAFF λειτουργούν συνήθως με υδραυλικό χρόνο παραμονής (**HRT**) περίπου 4–12 ώρες, ανάλογα με την οργανική φόρτιση και την απαιτούμενη ποιότητα εκροής. Η λειτουργία τους επηρεάζεται από παραμέτρους όπως:

- η παροχή αέρα,
- το διαλυμένο οξυγόνο (DO),
- η θερμοκρασία,
- το pH,
- και η ειδική επιφάνεια των μέσων πλήρωσης.

Η σωστή προεπεξεργασία θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα απόφραξης του φίλτρου από αιωρούμενα στερεά ή λίπη (SSWM, 2023).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του SAFF είναι το μικρό απαιτούμενο αποτύπωμα εγκατάστασης. Η υψηλή συγκέντρωση βιομάζας πάνω στα μέσα πλήρωσης επιτρέπει αυξημένη βιολογική δραστηριότητα σε περιορισμένο χώρο. Επιπλέον, το σύστημα χαρακτηρίζεται από σχετικά απλή λειτουργία, χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης και ανθεκτικότητα σε μεταβολές φορτίου. Η χαμηλή παραγωγή ιλύος συμβάλλει στη

μείωση του λειτουργικού κόστους και των απαιτήσεων διαχείρισης στερεών υπολειμμάτων (AESA Arabia, 2023).

Ωστόσο, τα SAFF παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς. Η συνεχής ανάγκη παροχής αέρα συνεπάγεται ενεργειακή κατανάλωση, ενώ σε περιπτώσεις ανεπαρκούς προεπεξεργασίας υπάρχει κίνδυνος φραγής των μέσων πλήρωσης. Επιπλέον, η απομάκρυνση φωσφόρου είναι συνήθως περιορισμένη και συχνά απαιτεί πρόσθετη χημική ή βιολογική διεργασία όταν υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις εκροής (SSWM, 2023).

Συνολικά, το SAFF αποτελεί μία αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, κατάλληλη για προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εφαρμογές, προσφέροντας υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρύπων, λειτουργική σταθερότητα και μικρές απαιτήσεις χώρου εγκατάστασης.

Πλεονεκτήματα

- Μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης (προκατασκευασμένος σχεδιασμός).
- Υψηλή απομάκρυνση BOD₅ και COD.
- Χαμηλή παραγωγή περίσσειας ιλύος.
- Σταθερή λειτουργία και ανθεκτικότητα σε μεταβολές φορτίου.
- Απλούστερη λειτουργία και συντήρηση σε σχέση με συστήματα ενεργού ιλύος.
- Κατάλληλο για προκατασκευασμένες αποκεντρωμένες μονάδες.

Μειονεκτήματα

- Κίνδυνος απόφραξης των μέσων πλήρωσης χωρίς σωστή προεπεξεργασία.
- Περιορισμένη απομάκρυνση φωσφόρου χωρίς επιπλέον στάδιο επεξεργασίας.
- Ανάγκη συνεχούς αερισμού και κατανάλωσης ενέργειας.
- Η απόδοση εξαρτάται από την ομοιόμορφη κατανομή αέρα και τη σωστή ανάπτυξη biofilm

5.2 Υβριδικά προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων

Πίνακας 17 Κατηγοριοποίηση των εξεταζόμενων υβριδικών προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων με βάση τον συνδυασμό των επιμέρους τεχνολογιών.

A/A	Υβριδικό σύστημα	Συνδυασμός βασικών τεχνολογιών
1	IFAS (Integrated Fixed-Film Activated Sludge)	Ενεργός ιλύς + biofilm στον ίδιο αντιδραστήρα
2	Hybrid SBR–IFAS	SBR + φορείς προσκολλημένης ανάπτυξης
3	AnMBR (Anaerobic MBR)	Αναερόβια επεξεργασία + μεμβράνη
4	Hybrid SBR–MBR	Κυκλική βιολογική επεξεργασία + μεμβράνη
5	ABR + aerobic post-treatment	ABR + SBR
6	ABR + biofilm reactor	ABR + MBBR ή SAF
7	AVFCW (Aerated Vertical Flow Constructed Wetland)	Κατασκευασμένος υγρότοπος + εξαναγκασμένος αερισμός
8	MABR-based hybrid systems	MABR + συμβατική βιολογική ή polishing μονάδα
9	A ₂ O – MBR	

5.2.1

Συνδυασμένο Σύστημα Ενεργού Ιλύος και Βιοφίλμ (IFAS) –Integrated Fixed-Film Activated Sludge

Το **IFAS (Integrated Fixed-Film Activated Sludge)** αποτελεί μία προηγμένη υβριδική τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, η οποία συνδυάζει σε έναν ενιαίο αντιδραστήρα δύο διαφορετικούς τύπους βιολογικής ανάπτυξης:

- την αιωρούμενη βιομάζα (*activated sludge*),
- και την προσκολλημένη βιομάζα (*fixed-film biofilm*) πάνω σε ειδικά μέσα υποστήριξης (*media*).

Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε ως εξέλιξη των συμβατικών συστημάτων ενεργού ιλύος με σκοπό την αύξηση της συνολικής συγκέντρωσης μικροοργανισμών μέσα στον αντιδραστήρα, χωρίς ανάγκη σημαντικής αύξησης του όγκου των δεξαμενών. Μέσω της

ταυτόχρονης λειτουργίας suspended growth και attached growth διεργασιών, το IFAS επιτυγχάνει υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρύπων και θρεπτικών στοιχείων, ενώ παράλληλα διατηρεί μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης και υψηλή λειτουργική σταθερότητα (Rusten et al., 2016).

Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος στηρίζεται στην προσθήκη ειδικών πλαστικών μέσων (*carriers/media*) μέσα στον αερόβιο αντιδραστήρα ενεργού ιλύος. Τα μέσα αυτά παρέχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια για την ανάπτυξη βιοφίλμ μικροοργανισμών. Έτσι, στο ίδιο σύστημα συνυπάρχουν:

- αιωρούμενοι μικροοργανισμοί μέσα στη μικτή ιλύ,
- και προσκολλημένοι μικροοργανισμοί πάνω στα media.

Η αιωρούμενη βιομάζα συμβάλλει κυρίως στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου (BOD_5/COD), ενώ το βιοφίλμ λειτουργεί ως σταθερός πληθυσμός μικροοργανισμών με αυξημένη ικανότητα νιτροποίησης και βελτιωμένη ανθεκτικότητα σε μεταβολές φορτίου ή υδραυλικών συνθηκών (Membranes, 2023).

Η λειτουργία του IFAS πραγματοποιείται συνήθως σε συνεχή ροή και περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια βιολογικής επεξεργασίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 12. Αρχικά, τα λύματα εισέρχονται στον αερόβιο αντιδραστήρα όπου αναμιγνύονται με την ενεργό ιλύ και έρχονται σε επαφή με τα μέσα ανάπτυξης βιοφίλμ. Οι μικροοργανισμοί της αιωρούμενης βιομάζας αποδομούν γρήγορα τις διαλυμένες οργανικές ενώσεις, ενώ ταυτόχρονα οι προσκολλημένοι μικροοργανισμοί του biofilm πραγματοποιούν βραδύτερες αλλά σταθερότερες διεργασίες, όπως:

- νιτροποίηση,
- απονιτροποίηση,
- και σε ορισμένες περιπτώσεις simultaneous nitrification–denitrification (SND).

Η παρουσία των media αυξάνει σημαντικά τον συνολικό χρόνο παραμονής στερεών (SRT) χωρίς να απαιτείται αύξηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής (HRT), επιτρέποντας τη διατήρηση αργά αναπτυσσόμενων μικροοργανισμών, όπως οι νιτροποιητές (Rusten et al., 2016).

Ο αερισμός του συστήματος πραγματοποιείται μέσω διαχυτών ή μηχανικών αεριστήρων και εξυπηρετεί διπλό σκοπό:

- την παροχή διαλυμένου οξυγόνου στους μικροοργανισμούς,
- και τη διατήρηση των media σε συνεχή κίνηση ή ανάδευση, ώστε να αποφεύγονται επικαθίσεις και ανομοιόμορφη ανάπτυξη βιοφίλμ.

Ανάλογα με τον σχεδιασμό του συστήματος, μπορούν να δημιουργηθούν:

- αερόβιες ζώνες για νιτροποίηση,
- ανοξικές ζώνες για απονιτροποίηση,
- ακόμη και αναερόβιες περιοχές για βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου.

Έτσι, το IFAS μπορεί να επιτύχει ολοκληρωμένη απομάκρυνση οργανικών και θρεπτικών ρύπων μέσα σε περιορισμένο όγκο εγκατάστασης (Membranes, 2023).

Η εκροή του συστήματος οδηγείται συνήθως σε δευτεροβάθμια καθίζηση, όπου διαχωρίζεται η ενεργός ιλύς από το επεξεργασμένο νερό. Μέρος της ιλύος ανακυκλοφορεί στον αντιδραστήρα, ενώ η περίσσεια απομακρύνεται. Η παρουσία του biofilm μειώνει τη συνολική παραγωγή περίσσειας ιλύος σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος, καθώς σημαντικό μέρος της βιομάζας παραμένει προσκολλημένο στα media και σταθεροποιείται βιολογικά (Rusten et al., 2016).

Σε επίπεδο απόδοσης, τα συστήματα IFAS παρουσιάζουν:

- υψηλή απομάκρυνση BOD₅ και COD (>90%),
- ιδιαίτερα αποδοτική νιτροποίηση,
- βελτιωμένη απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου (NH₄⁺-N),
- και σημαντική σταθερότητα λειτουργίας σε μεταβαλλόμενα οργανικά και υδραυλικά φορτία.

Η τεχνολογία θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική για:

- αναβάθμιση υφιστάμενων εγκαταστάσεων ενεργού ιλύος,
- προκατασκευασμένες αποκεντρωμένες μονάδες,
- μικρές και μεσαίες εγκαταστάσεις,
- τουριστικές περιοχές,
- και εφαρμογές όπου απαιτείται αυξημένη απομάκρυνση αζώτου χωρίς επέκταση δεξαμενών.

Η δυνατότητα υψηλής συγκέντρωσης βιομάζας σε μικρό χώρο καθιστά το IFAS ιδιαίτερα κατάλληλο για προκατασκευασμένα και αρθρωτά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων (Membranes, 2023).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, το IFAS παρουσιάζει και ορισμένες τεχνικές προκλήσεις. Η σωστή λειτουργία του εξαρτάται από:

- τον έλεγχο του αερισμού,
- τη σωστή αναλογία media,
- τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO),
- τη διατήρηση κατάλληλης υδραυλικής ροής,
- και την αποφυγή υπερβολικής ανάπτυξης biofilm.

Επιπλέον, η παρουσία των μέσων αυξάνει την πολυπλοκότητα λειτουργίας και συντήρησης σε σχέση με έναν συμβατικό αντιδραστήρα ενεργού ιλύος, ενώ σε περιπτώσεις κακού σχεδιασμού μπορεί να εμφανιστούν προβλήματα απόφραξης, ανομοιόμορφης ανάδευσης ή αποκόλλησης βιοφίλμ (Rusten et al., 2016).

Συνολικά, το IFAS αποτελεί μία ιδιαίτερα αποδοτική υβριδική τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων, η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της ενεργού ιλύος και των συστημάτων βιοφίλμ σε μία προκατασκευασμένη μονάδα υψηλής απόδοσης. Η δυνατότητα αυξημένης συγκράτησης βιομάζας, η βελτιωμένη απομάκρυνση αζώτου και η λειτουργική σταθερότητα καθιστούν το σύστημα κατάλληλο για σύγχρονες αποκεντρωμένες και ενεργειακά αποδοτικές εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων.

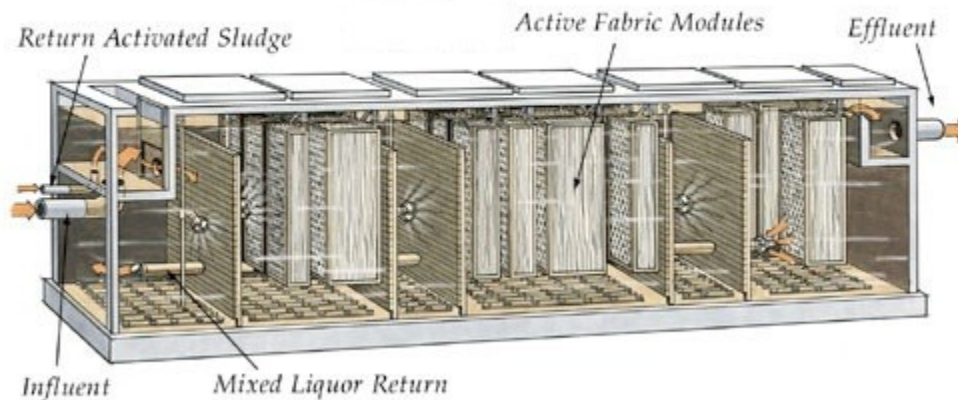
Πλεονεκτήματα

- Υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρύπων και αζώτου.
- Συνδυασμός suspended growth και attached growth διεργασιών.
- Υψηλή συγκέντρωση βιομάζας σε μικρό όγκο αντιδραστήρα.
- Βελτιωμένη νιτροποίηση και απονιτροποίηση.
- Μεγάλη ανθεκτικότητα σε υδραυλικές και οργανικές διακυμάνσεις.
- Προκατασκευασμένος σχεδιασμός και δυνατότητα αναβάθμισης υφιστάμενων εγκαταστάσεων.

Μειονεκτήματα

- Αυξημένη πολυπλοκότητα λειτουργίας και ελέγχου.
- Ανάγκη σωστού ελέγχου αερισμού και ανάδευσης.
- Πιθανότητα απόφραξης ή αποκόλλησης βιοφίλμ.
- Υψηλότερο αρχικό κόστος σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος.

Integrated Fixed Film/Activated Sludge Systems (IFAS)



Εικόνα 12 Σχηματική απεικόνιση συστήματος IFAS (Integrated Fixed-Film Activated Sludge), iGreen Ion (2014). <http://igreenion.com/sewage-treatment-plant.html>

5.2.2 Αναερόβιος Μεμβρανικός Βιοαντιδραστήρας **AnMBR Anaerobic Membrane Bioreactor**

Το **Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR)** αποτελεί μία προηγμένη και ιδιαίτερα καινοτόμο τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων, η οποία συνδυάζει την αναερόβια βιολογική επεξεργασία με τεχνολογία μεμβρανών για τον διαχωρισμό στερεών-υγρού. Η τεχνολογία αυτή θεωρείται μία από τις σημαντικότερες σύγχρονες προσεγγίσεις βιώσιμης επεξεργασίας λυμάτων, καθώς επιτρέπει ταυτόχρονα:

- απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών,
- ανάκτηση ενέργειας μέσω παραγωγής βιοαερίου,
- χαμηλή παραγωγή ιλύος,
- και παραγωγή υψηλής ποιότητας εκροής.

Σε αντίθεση με τα συμβατικά αερόβια συστήματα, το AnMBR λειτουργεί χωρίς παροχή οξυγόνου. Η αποδόμηση της οργανικής ύλης πραγματοποιείται από αναερόβιους μικροοργανισμούς, οι οποίοι μετατρέπουν μεγάλο μέρος του οργανικού φορτίου σε βιοαέριο, κυρίως μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά το σύστημα ιδιαίτερα ελκυστικό από ενεργειακής άποψης, καθώς μειώνει

σημαντικά την απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας για αερισμό και επιτρέπει ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων (Smith et al., 2023).

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στον συνδυασμό δύο βασικών μονάδων:

1. του αναερόβιου βιολογικού αντιδραστήρα,
2. και της μονάδας μεμβρανών μικροδιήθησης (MF) ή υπερδιήθησης (UF).

Στον αναερόβιο αντιδραστήρα πραγματοποιείται η βιολογική διάσπαση της οργανικής ύλης μέσω διαδοχικών σταδίων:

- υδρόλυσης,
- οξεογένεσης,
- ακετογένεσης,
- και μεθανογένεσης.

Κατά την υδρόλυση, σύνθετες οργανικές ενώσεις διασπώνται σε απλούστερα μόρια. Στη συνέχεια, μέσω οξεογένεσης και ακετογένεσης παράγονται οργανικά οξέα και οξικό οξύ, τα οποία τελικά μετατρέπονται από τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Η διεργασία αυτή επιτρέπει υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου και ταυτόχρονη παραγωγή βιοαερίου (Ding et al., 2025).

Μετά τη βιολογική επεξεργασία, το μικτό υγρό οδηγείται στη μονάδα μεμβρανών, όπου πραγματοποιείται φυσικός διαχωρισμός στερεών-υγρού. Οι μεμβράνες συγκρατούν:

- τη βιομάζα,
 - τα αιωρούμενα στερεά,
 - και σημαντικό μέρος των μικροοργανισμών,
- ενώ επιτρέπουν τη διέλευση επεξεργασμένου νερού υψηλής ποιότητας.

Η χρήση μεμβρανών επιτρέπει τον πλήρη διαχωρισμό του χρόνου παραμονής στερεών (SRT) από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT), διατηρώντας μεγάλες συγκεντρώσεις αργά αναπτυσσόμενων αναερόβιων μικροοργανισμών μέσα στον αντιδραστήρα. Έτσι, επιτυγχάνεται υψηλή σταθερότητα λειτουργίας ακόμη και σε υψηλά οργανικά φορτία ή μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας (DWT, 2020).

Υπάρχουν δύο βασικές διατάξεις AnMBR:

- **Submerged AnMBR**, όπου οι μεμβράνες είναι εμβαπτισμένες μέσα στον αντιδραστήρα,

- και **side-stream AnMBR**, όπου το μικτό υγρό αντλείται εξωτερικά μέσω ανεξάρτητης μονάδας μεμβρανών.

Τα submerged συστήματα παρουσιάζουν μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, ενώ τα side-stream συστήματα προσφέρουν καλύτερο έλεγχο καθαρισμού και συντήρησης των μεμβρανών (Ding et al., 2025).

Σε επίπεδο απόδοσης, τα συστήματα AnMBR επιτυγχάνουν:

- απομάκρυνση COD και BOD συχνά μεγαλύτερη από 90–98%,
- πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στην εκροή,
- μειωμένη παραγωγή ιλύος,
- και σημαντική ανάκτηση ενέργειας μέσω παραγωγής βιομεθανίου.

Η παραγωγή βιοαερίου αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας, καθώς μετατρέπει το οργανικό φορτίο των λυμάτων σε αξιοποιήσιμη ενέργεια, μειώνοντας το συνολικό ενεργειακό αποτύπωμα της εγκατάστασης. Για τον λόγο αυτό, τα AnMBR θεωρούνται τεχνολογίες «energy-positive» ή «energy-neutral» σε ορισμένες εφαρμογές (Coche, 2023).

Παράλληλα, η απουσία αερισμού οδηγεί σε σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά αερόβια MBR, όπου ο αερισμός αποτελεί τη μεγαλύτερη ενεργειακή απαίτηση της εγκατάστασης. Επιπλέον, η χαμηλή παραγωγή περίσσειας ιλύος μειώνει σημαντικά το κόστος διαχείρισης στερεών υπολειμμάτων (Environmental Challenges, 2025).

Ωστόσο, η αναερόβια διεργασία παρουσιάζει περιορισμένη ικανότητα απομάκρυνσης θρεπτικών στοιχείων, ιδιαίτερα αζώτου και φωσφόρου. Σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται αυστηρά όρια εκροής για N και P, το AnMBR συνδυάζεται συνήθως με πρόσθετες βαθμίδες μετα-επεξεργασίας, όπως:

- αερόβιες διεργασίες,
- MBBR,
- constructed wetlands,
- ή χημική αποφωσφόρωση.

Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός της τεχνολογίας είναι το fouling των μεμβρανών. Η συσσώρευση οργανικών, βιολογικών και ανόργανων επικαθίσεων μειώνει τη

διαπερατότητα των μεμβρανών και αυξάνει τις απαιτήσεις καθαρισμού και συντήρησης. Για τον λόγο αυτό απαιτείται:

- σωστός υδραυλικός σχεδιασμός,
- έλεγχος ροής,
- περιοδικός καθαρισμός,
- και σωστή προεπεξεργασία των λυμάτων (DWT, 2020).

Επιπλέον, η απόδοση των αναερόβιων μικροοργανισμών επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί παρουσιάζουν βέλτιστη λειτουργία συνήθως σε θερμοκρασίες άνω των 20°C, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την απόδοση σε ψυχρότερα κλίματα χωρίς θερμική υποστήριξη (Environmental Challenges, 2025).

Παρά τις προκλήσεις αυτές, το AnMBR θεωρείται μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες για:

- αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις,
- προκατασκευασμένες μονάδες επεξεργασίας,
- επαναχρησιμοποίηση νερού,
- και ανάκτηση πόρων και ενέργειας.

Η δυνατότητα ταυτόχρονης επεξεργασίας λυμάτων και παραγωγής ενέργειας ευθυγραμμίζεται με τις σύγχρονες αρχές κυκλικής οικονομίας και βιώσιμης διαχείρισης υδάτινων πόρων (Smith et al., 2023).

Πλεονεκτήματα

- Χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση λόγω απουσίας αερισμού.
- Παραγωγή βιοαερίου και δυνατότητα ενεργειακής ανάκτησης.
- Πολύ υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου (COD/BOD).
- Μειωμένη παραγωγή περίσσειας ιλύος.
- Υψηλή ποιότητα εκροής μέσω μεμβρανικής διήθησης.
- Προκατασκευασμένος σχεδιασμός και μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης.
- Κατάλληλο για αποκεντρωμένες και modular εφαρμογές.

Μειονεκτήματα

- Fouling των μεμβρανών και ανάγκη συχνού καθαρισμού.
- Περιορισμένη απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου χωρίς πρόσθετη επεξεργασία.

- Αυξημένο αρχικό κόστος επένδυσης.
- Ευαισθησία των αναερόβιων μικροοργανισμών στη θερμοκρασία.
- Απαιτήσεις εξειδικευμένης λειτουργίας και συντήρησης.

5.2.3 Υβριδικά Συστήματα SBR–MBR (Sequencing Batch Reactor – Membrane Bioreactor)

Τα υβριδικά συστήματα **SBR–MBR** αποτελούν μία προηγμένη τεχνολογία προκατασκευασμένης και αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων, η οποία συνδυάζει τη βιολογική επεξεργασία τύπου **Sequencing Batch Reactor (SBR)** με τεχνολογία **Membrane Bioreactor (MBR)** για φυσικό διαχωρισμό στερεών–υγρού μέσω μεμβρανών. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρύπων και αιωρούμενων στερεών, εξαιρετική ποιότητα εκροής και μεγάλη λειτουργική ευελιξία, καθιστώντας το σύστημα ιδιαίτερα κατάλληλο για προκατασκευασμένες εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 13 η τεχνολογία SBR–MBR ενσωματώνει δύο διαφορετικούς μηχανισμούς επεξεργασίας:

- χρονικά ελεγχόμενη βιολογική διεργασία σε κύκλους (SBR),
- και φυσική μεμβρανική διήθηση (MBR).

Η ενσωμάτωση αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων και των δύο τεχνολογιών σε μία ενιαία μονάδα επεξεργασίας υψηλής απόδοσης (Bioresource Engineering Journal, 2025).

Το τμήμα SBR λειτουργεί με διαδοχικές χρονικές φάσεις μέσα στην ίδια δεξαμενή:

1. πλήρωση (*fill*),
2. βιολογική αντίδραση (*react*),
3. καθίζηση (*settle*),
4. εκκένωση (*draw*),
5. και αδράνεια (*idle*).

Κατά τη φάση πλήρωσης, τα λύματα εισέρχονται στον αντιδραστήρα και αναμιγνύονται με την ενεργό ιλύ. Στη συνέχεια, στη φάση αντίδρασης πραγματοποιείται αερόβια βιολογική επεξεργασία μέσω αερισμού, κατά την οποία οι μικροοργανισμοί

αποδομούν το οργανικό φορτίο (BOD_5/COD). Ανάλογα με τον σχεδιασμό και τη διαχείριση των φάσεων αερισμού και μη αερισμού, μπορούν επίσης να πραγματοποιηθούν:

- νιτροποίηση,
- απονιτροποίηση,
- και βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου.

Μετά την ολοκλήρωση της βιολογικής επεξεργασίας, το επεξεργασμένο μικτό υγρό οδηγείται στη μονάδα μεμβρανών. Εκεί πραγματοποιείται φυσικός διαχωρισμός στερεών–υγρού μέσω μεμβρανών μικροδιήθησης (MF) ή υπερδιήθησης (UF). Οι μεμβράνες συγκρατούν:

- τη βιομάζα,
 - τα αιωρούμενα στερεά,
 - και μεγάλο μέρος των μικροοργανισμών,
- ενώ επιτρέπουν τη διέλευση καθαρού επεξεργασμένου νερού υψηλής ποιότητας (Journal of Membrane Science, 2013).

Σε αντίθεση με τα συμβατικά SBR, όπου η ποιότητα εκροής εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα της καθίζησης, στα υβριδικά SBR–MBR η μεμβράνη εξασφαλίζει πλήρη συγκράτηση της βιομάζας και πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στην εκροή. Παράλληλα, η χρήση μεμβρανών επιτρέπει τη λειτουργία με υψηλότερες συγκεντρώσεις MLSS και μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στερεών (**SRT**), βελτιώνοντας τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα της βιολογικής διεργασίας.

Η λειτουργία του συστήματος χαρακτηρίζεται από υψηλή ευελιξία, καθώς οι κύκλοι λειτουργίας του SBR μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με:

- το οργανικό φορτίο,
- τις διακυμάνσεις παροχής,
- και τις απαιτήσεις εκροής.

Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά τα SBR–MBR ιδιαίτερα κατάλληλα για:

- τουριστικές περιοχές,
- μικρούς οικισμούς,
- ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις,
- νησιωτικές εφαρμογές,
- και αποκεντρωμένα συστήματα με μεταβαλλόμενα φορτία.

Σε επίπεδο απόδοσης, τα υβριδικά SBR–MBR παρουσιάζουν:

- πολύ υψηλή απομάκρυνση BOD₅ και COD (>95–99%),
- εξαιρετική συγκράτηση αιωρούμενων στερεών,
- αποδοτική απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου,
- και σημαντική μείωση παθογόνων μικροοργανισμών.

Η ποιότητα εκροής συχνά είναι κατάλληλη για επαναχρησιμοποίηση νερού μετά από κατάλληλη απολύμανση (Bioresource Engineering Journal, 2025).

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας είναι ο προκατασκευασμένος σχεδιασμός της. Η ενσωμάτωση της βιολογικής διεργασίας και της μεμβρανικής διαχωριστικής μονάδας σε περιορισμένο χώρο επιτρέπει μικρότερο αποτύπωμα εγκατάστασης σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος με δευτεροβάθμια καθίζηση και ξεχωριστές μονάδες φίλτρανσης.

Παράλληλα, η συγκράτηση της βιομάζας από τις μεμβράνες οδηγεί σε αυξημένη συγκέντρωση μικροοργανισμών μέσα στον αντιδραστήρα και βελτιωμένη βιολογική απόδοση, ακόμη και υπό μεταβαλλόμενα οργανικά και υδραυλικά φορτία.

Ωστόσο, η τεχνολογία παρουσιάζει και ορισμένες τεχνικές προκλήσεις. Η σημαντικότερη αφορά το fouling των μεμβρανών, δηλαδή τη συσσώρευση οργανικών, βιολογικών και ανόργανων επικαθίσεων στην επιφάνειά τους. Το φαινόμενο αυτό μειώνει τη διαπερατότητα και αυξάνει τις απαιτήσεις:

- καθαρισμού,
- backwashing,
- χημικής πλύσης,
- και λειτουργικού ελέγχου.

Επιπλέον, η ταυτόχρονη διαχείριση των κυκλικών φάσεων του SBR και της συνεχούς λειτουργίας των μεμβρανών απαιτεί αυξημένο επίπεδο αυτοματισμού και ακριβή έλεγχο λειτουργίας (Journal of Membrane Science, 2013).

Το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι επίσης υψηλότερο σε σχέση με ένα συμβατικό SBR, λόγω:

- του εξοπλισμού μεμβρανών,
- των συστημάτων αερισμού,
- και των απαιτούμενων αυτοματισμών.

Παρόλα αυτά, η υψηλή ποιότητα εκροής, η μικρή απαίτηση χώρου και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης νερού συχνά αντισταθμίζουν το αυξημένο αρχικό κόστος σε μακροχρόνια λειτουργία.

Συνολικά, τα υβριδικά SBR–MBR αποτελούν μία ιδιαίτερα αποδοτική και σύγχρονη τεχνολογία προκατασκευασμένης επεξεργασίας λυμάτων, συνδυάζοντας:

- τη λειτουργική ευελιξία των SBR,
- με την υψηλή ποιότητα εκροής των MBR.

Η δυνατότητα λειτουργίας σε περιορισμένο χώρο, η υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων και η προσαρμοστικότητα σε αποκεντρωμένες εφαρμογές καθιστούν τα συστήματα αυτά ιδιαίτερα σημαντικά για τις σύγχρονες απαιτήσεις βιώσιμης διαχείρισης υγρών αποβλήτων.

Πλεονεκτήματα

- Πολύ υψηλή ποιότητα εκροής.
- Υψηλή απομάκρυνση BOD₅, COD και αιωρούμενων στερεών.
- Προκατασκευασμένος σχεδιασμός και μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης.
- Ευελιξία λειτουργίας μέσω χρονικών κύκλων SBR.
- Μεγάλη σταθερότητα σε μεταβαλλόμενα φορτία.
- Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης νερού.
- Βελτιωμένη συγκράτηση βιομάζας μέσω μεμβρανών.

Μειονεκτήματα

- Fouling μεμβρανών και ανάγκη συχνού καθαρισμού.
- Αυξημένες απαιτήσεις αυτοματισμού και ελέγχου λειτουργίας.
- Υψηλότερο αρχικό κόστος εγκατάστασης.
- Αυξημένη πολυπλοκότητα λειτουργίας σε σχέση με συμβατικά SBR.
- Ανάγκη εξειδικευμένης συντήρησης μεμβρανών.

Αυτός ο συνδυασμός ενισχύει την απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων και μειώνει την εκροή ρυπαντών σε επιβλαβρά επίπεδα πριν από απόρριψη ή επαναχρησιμοποίηση.

Πλεονεκτήματα

- Αξιοποιεί την υψηλή ικανότητα του ABR στην αρχική αποδόμηση οργανικών ρυπαντών με μικρό κόστος ενέργειας.
- Συνδυάζει αναερόβια και αερόβια βιολογικά στάδια για πλήρη απομάκρυνση COD, BOD, και ως ένα βαθμό νιτρογόνου.
- Κατάλληλο για μικρά/μεσαία φορτία σε αποκεντρωμένο πλαίσιο.

Μειονεκτήματα

- Απαιτεί επιπλέον διάταξη (π.χ. SBR), με αποτέλεσμα μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στη λειτουργία.
- Η συνολική διάρκεια παραμονής μπορεί να είναι υψηλότερη σε σχέση με απλές μονάδες.

2. ABR + Biofilm Reactor (π.χ. ABR + MBBR ή ABR + SAF)

Σε αυτή την υβριδική διάταξη, η έξοδος από έναν ABR τροφοδοτείται σε έναν βιοαντιδραστήρα προσκολλημένης ανάπτυξης όπως MBBR ή SAF (Submerged Aerobic Fixed Film Reactor). Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ειδικά μέσα στήριξης (π.χ., πλαστικά μικρομέσα στο MBBR ή φίλτρο στο SAF) όπου αναπτύσσεται βιοφίλμ μικροοργανισμών που συνεχίζουν την αποδόμηση του οργανικού φορτίου και την απομάκρυνση θρεπτικών στοιχείων.

Κύρια λειτουργία

- Ο ABR παρέχει αναερόβια μερική αποδόμηση οργανικών, μειώνοντας σημαντικά το COD πριν από το δεύτερο στάδιο.
- Ο βιοαντιδραστήρας προσκολλημένης ανάπτυξης στη συνέχεια ενισχύει την απομάκρυνση BOD, TN, TSS και συνήθως υποστηρίζει επιπλέον νιτροποίηση/απονιτροποίηση με μειωμένες απαιτήσεις ενέργειας σε σχέση με πλήρη αερόβια συστήματα.

Πλεονεκτήματα

- Ο συνδυασμός αύξησης επιφάνειας βιοφίλμ και σταθερής βιολογικής διεργασίας επιτρέπει υψηλότερη απόδοση επεξεργασίας σε μικρότερο χώρο.
- Το ABR μειώνει μεγάλο μέρος του οργανικού φορτίου αναγκάζοντας το biofilm να λειτουργήσει με πιο σταθερό και χαμηλού κόστους τρόπο.
- Ενεργειακά αποδοτική λύση για απομακρυσμένες ή αποκεντρωμένες εφαρμογές.

Μειονεκτήματα

- Τα μέσα βιοφίλμ μπορούν να αποφράσσονται ή να φθείρονται χωρίς σωστή συντήρηση.
- Απαιτεί καλή ρύθμιση των υδραυλικών ροών για να αποφευχθεί η εκτεταμένη αποσύνθεση αερόβια/αναερόβια που μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα.

Συμπερασματικά

Τα υβριδικά ABR-based συστήματα αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα διαφορετικών βιολογικών διεργασιών (αναερόβια + αερόβια / βιοφίλμ) για να προσφέρουν υψηλή ποιότητα εκροής και αξιοπιστία σε προκατασκευασμένες αποκεντρωμένες εφαρμογές. Αν και μπορεί να είναι πιο σύνθετα στη λειτουργία από απλά συστήματα, προσφέρουν καλύτερη απόδοση απομάκρυνσης ρυπαντών και εξοικονόμηση ενέργειας, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές μικρών κοινοτήτων, αγροτικών περιοχών ή μεμονωμένων εγκαταστάσεων όπου η οικονομία και η περιβαλλοντική συμμόρφωση έχουν προτεραιότητα

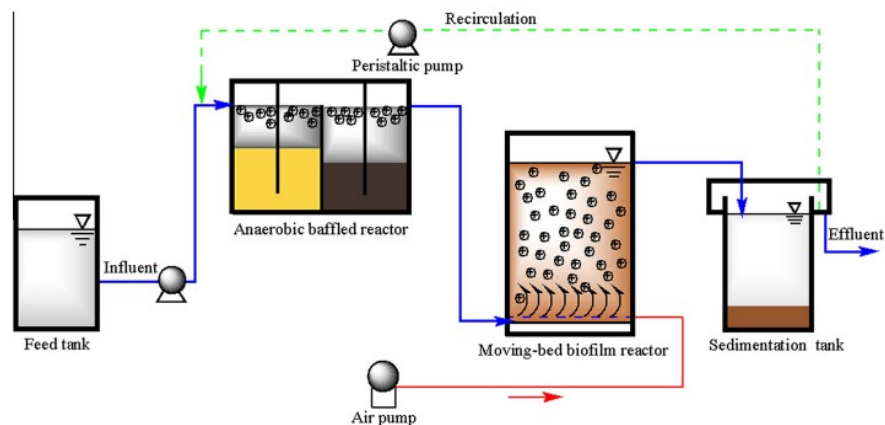


Fig. 1. Experiment installation.

Εικόνα 14 Σχηματική απεικόνιση υβριδικού συστήματος επεξεργασίας λυμάτων τύπου ABR–MBBR. Πηγή: **Chemical Engineering Journal (2015).**
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.109>

5.2.5 Αεριζόμενος Κατασκευασμένος Υγρότοπος Κάθετης Ροής (AVFSW) Aerated Vertical Flow Constructed Wetland

Το Aerated Vertical Flow Constructed Wetland (AVFCW) αποτελεί μία προηγμένη μορφή κατασκευασμένου υγροτόπου κάθετης ροής, η οποία συνδυάζει φυσικές, βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων με τεχνητή υποβοήθηση αερισμού (Wu et al., 2016). Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης των συμβατικών συστημάτων κατασκευασμένων υγροτόπων, ιδιαίτερα ως προς την απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών και αζώτου, διατηρώντας παράλληλα χαμηλές απαιτήσεις λειτουργίας και μικρότερο ενεργειακό αποτύπωμα σε σχέση με πλήρως μηχανικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας (Liu et al., 2023).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 15 το AVFCW βασίζεται στη διήθηση των λυμάτων μέσω ενός πορώδους υποστρώματος, συνήθως αποτελούμενου από στρώσεις άμμου, χαλικιού και άλλων αδρανών υλικών, το οποίο είναι φυτεμένο με υδροχαρή φυτά όπως *Phragmites australis* και *Typha spp.*. Τα λύματα τροφοδοτούνται στην επιφάνεια του συστήματος και

διέρχονται κατακόρυφα προς τα κάτω μέσα από το υπόστρωμα, όπου πραγματοποιούνται φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες επεξεργασίας (Wu et al., 2016).

Σε αντίθεση με τους συμβατικούς κατασκευασμένους υγροτόπους, στο AVFCW εφαρμόζεται τεχνητός αερισμός μέσω διαχυτών ή αεραντλιών, με σκοπό την ενίσχυση της μεταφοράς διαλυμένου οξυγόνου στο υπόστρωμα. Η παρουσία οξυγόνου δημιουργεί αερόβιες ζώνες μέσα στο φίλτρο, επιτρέποντας την ενίσχυση των διεργασιών οξειδωσης της οργανικής ύλης και της νιτροποίησης. Παράλληλα, σε βαθύτερες ή λιγότερο οξυγονωμένες περιοχές δημιουργούνται ανοξικές και αναερόβιες μικροζώνες, όπου πραγματοποιούνται διεργασίες απονιτροποίησης και περαιτέρω βιολογικής αποδόμησης (Zhang et al., 2015).

Η απομάκρυνση των ρύπων στο AVFCW πραγματοποιείται μέσω συνδυασμού μηχανισμών, όπως:

- μικροβιακή βιοαποδόμηση οργανικών ουσιών,
- φυσική διήθηση αιωρούμενων στερεών,
- προσρόφηση και κατακράτηση ρύπων στο υπόστρωμα,
- νιτροποίηση και απονιτροποίηση του αζώτου,
- καθώς και αφομοίωση θρεπτικών στοιχείων από τη φυτική βλάστηση (Wu et al., 2016).

Η τεχνητή ενίσχυση του αερισμού αυξάνει σημαντικά τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στο σύστημα, ενισχύοντας ιδιαίτερα την απομάκρυνση BOD₅ και COD, καθώς και τη νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου (NH₄⁺-N). Σύμφωνα με τους Liu et al. (2023), τα αεριζόμενα συστήματα κάθετης ροής μπορούν να επιτύχουν απομάκρυνση οργανικού φορτίου (COD/BOD) έως 95–96%, απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου άνω του 95% και συνολική απομάκρυνση αζώτου περίπου 80–85%, παρουσιάζοντας σαφώς καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με μη αεριζόμενα συστήματα constructed wetlands.

Η λειτουργία του AVFCW μπορεί να είναι συνεχούς ροής ή διακοπτόμενης τροφοδοσίας (*intermittent feeding*), ανάλογα με τον σχεδιασμό και τις απαιτήσεις της εγκατάστασης. Η διακοπτόμενη τροφοδοσία χρησιμοποιείται συχνά ώστε να ενισχύεται η είσοδος αέρα στο υπόστρωμα και να βελτιώνονται οι αερόβιες συνθήκες λειτουργίας (Zhang et al., 2015).

Τα AVFCW θεωρούνται προκατασκευασμένα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, καθώς προσφέρουν υψηλή αποδοτικότητα σε μικρότερη επιφάνεια συγκριτικά με συμβατικούς κατασκευασμένους υδροτόπους. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο σε αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις, ξενοδοχειακές μονάδες, αγροτικές περιοχές και εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένου νερού (Liu et al., 2023).

Πλεονεκτήματα

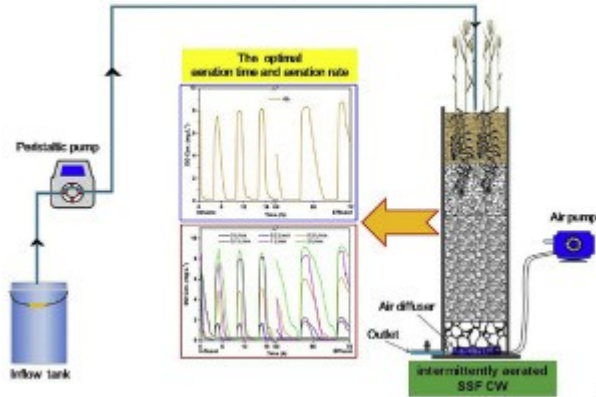
1. Υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρύπων και αζώτου.
2. Βελτιωμένη νιτροποίηση λόγω ενισχυμένου αερισμού.
3. Μικρό απαιτούμενο αποτύπωμα εγκατάστασης.
4. Χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με πλήρως μηχανικά βιολογικά συστήματα.
5. Μεγάλη λειτουργική σταθερότητα και ανθεκτικότητα σε διακυμάνσεις φορτίου.
6. Χαμηλή παραγωγή ιλύος και περιορισμένες ανάγκες συντήρησης.
7. Δυνατότητα ένταξης σε βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις επεξεργασίας λυμάτων.

Μειονεκτήματα

1. Απαιτεί πρόσθετη ενέργεια για τον αερισμό σε σχέση με παθητικούς υδροτόπους.
2. Αυξημένη πολυπλοκότητα σχεδιασμού και λειτουργίας.
3. Πιθανότητα φραγής του υποστρώματος εάν δεν υπάρχει κατάλληλη προεπεξεργασία.
4. Η απόδοση επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων.
5. Απαιτεί τακτικό έλεγχο του συστήματος αερισμού και της υδραυλικής κατανομής.

Συνολικά, το AVFCW αποτελεί μία αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων, η οποία συνδυάζει τις αρχές των φυσικών συστημάτων με στοχευμένη τεχνητή ενίσχυση αερισμού. Η δυνατότητα προκατασκευασμένου σχεδιασμού, η υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρυπαντών και αζώτου, καθώς και οι

σχετικά χαμηλές απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης, καθιστούν το σύστημα ιδιαίτερα κατάλληλο για σύγχρονες αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης λυμάτων.



Εικόνα 15. Σχηματική απεικόνιση συστήματος Aerated Vertical Flow Constructed Wetland (AVFCW). Πηγή: Wu et al. (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.031>

5.2.6 Υβριδικά Συστήματα Βασισμένα σε Τεχνολογία Μεμβρανικού Αεριζόμενου Βιοαντιδραστήρα Βιοφίλμ MABR (MABR-Based Hybrid Systems)

Τα υβριδικά συστήματα που βασίζονται στην τεχνολογία MABR (Membrane Aerated Biofilm Reactor) αποτελούν μία από τις πλέον σύγχρονες και ενεργειακά αποδοτικές προσεγγίσεις επεξεργασίας λυμάτων σε προκατασκευασμένες και αποκεντρωμένες εφαρμογές. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 16 η τεχνολογία αυτή συνδυάζει τις αρχές των διεργασιών προσκολλημένης βιομάζας (*biofilm processes*) με αερισμό μέσω μεμβρανών, επιτυγχάνοντας υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικών ρύπων και αζώτου με σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος (Downing et al., 2017).

Στα MABR-based hybrid systems, το MABR λειτουργεί συνήθως ως βασική μονάδα βιολογικής επεξεργασίας ή νιτροποίησης και συνδυάζεται με πρόσθετες συμβατικές ή polishing μονάδες, όπως:

- δεξαμενές ενεργού ιλύος,
- MBBR ή IFAS συστήματα,
- δευτεροβάθμιες δεξαμενές καθίζησης,

- φίλτρα polishing,
- ή μονάδες απολύμανσης και επαναχρησιμοποίησης νερού.

Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει την επίτευξη πολύ υψηλής ποιότητας εκροής, ενώ παράλληλα διατηρεί χαμηλό ενεργειακό και λειτουργικό κόστος, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα σημαντικό για αποκεντρωμένες εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας.

Η λειτουργία του MABR βασίζεται στη διάχυση οξυγόνου μέσω ειδικών διαπερατών μεμβρανών προς το biofilm που αναπτύσσεται στην εξωτερική επιφάνειά τους. Σε αντίθεση με τα συμβατικά αερόβια συστήματα, όπου ο αέρας διοχετεύεται στο νερό μέσω φυσαλίδων, στο MABR το οξυγόνο μεταφέρεται απευθείας στη βιομάζα μέσω της μεμβράνης (*bubble-less aeration*), αυξάνοντας σημαντικά την αποδοτικότητα μεταφοράς οξυγόνου και μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας (Downing et al., 2017).

Στο εσωτερικό του biofilm δημιουργούνται διαφορετικές μικροπεριβαλλοντικές ζώνες. Οι εξωτερικές περιοχές του βιοφίλμ είναι πλούσιες σε οργανικό φορτίο και σχετικά φτωχές σε οξυγόνο, ενώ κοντά στη μεμβράνη επικρατούν αερόβιες συνθήκες λόγω της παροχής οξυγόνου. Η δομή αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη πραγματοποίηση νιτροποίησης και απονιτροποίησης (*Simultaneous Nitrification–Denitrification, SND*) μέσα στην ίδια μονάδα, χωρίς την ανάγκη ξεχωριστών δεξαμενών ή επιπλέον ανακυκλοφορίας (Downing et al., 2017).

Σε υβριδικές διατάξεις, το MABR χρησιμοποιείται συχνά:

- ως στάδιο αναβάθμισης υφιστάμενων εγκαταστάσεων ενεργού ιλύος,
- ως μονάδα polishing για βελτίωση απομάκρυνσης αζώτου,
- ή ως βασικός προκατασκευασμένος βιοαντιδραστήρας σε αποκεντρωμένες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων.

Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι τα MABR-based systems μπορούν να επιτύχουν υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρύπων (BOD/COD), αμμωνιακού αζώτου και ολικού αζώτου, με σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με συμβατικές τεχνολογίες αερισμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εξοικονόμηση ενέργειας για αερισμό μπορεί να υπερβεί το 50–70%, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία ιδιαίτερα ελκυστική για βιώσιμες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων (Downing et al., 2017).

Επιπλέον, λόγω της υψηλής συγκράτησης βιομάζας πάνω στις μεμβράνες, τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν:

- αυξημένη σταθερότητα λειτουργίας,
- ανθεκτικότητα σε υδραυλικές και οργανικές διακυμάνσεις,
- μικρό απαιτούμενο αποτύπωμα εγκατάστασης,
- και μειωμένη παραγωγή περίσσειας ιλύος.

Για τον λόγο αυτό, τα MABR-based hybrid systems θεωρούνται κατάλληλα για:

- μικρούς και μεσαίους οικισμούς,
- τουριστικές εγκαταστάσεις,
- ξενοδοχειακές μονάδες,
- βιομηχανικές εφαρμογές χαμηλού έως μεσαίου φορτίου,
- καθώς και έργα αναβάθμισης υφιστάμενων ΕΕΛ με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο.

Πλεονεκτήματα

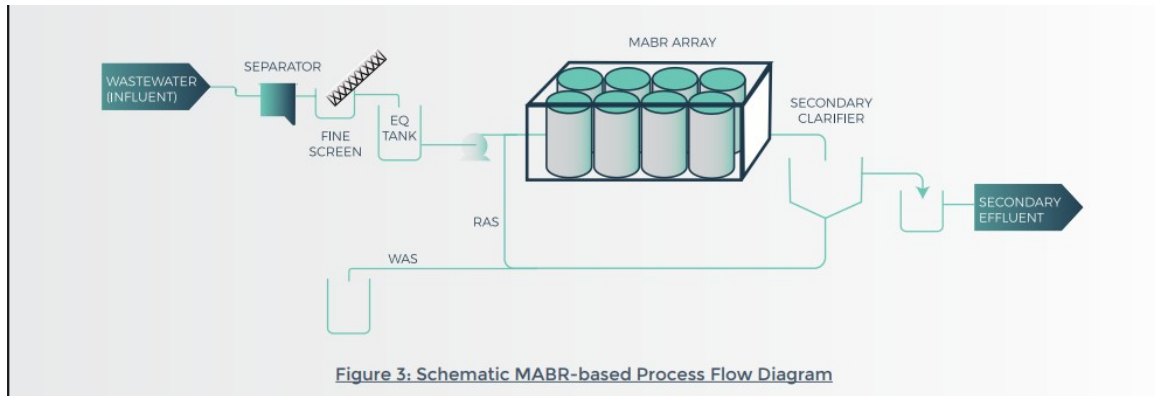
1. Πολύ υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα λόγω αερισμού χωρίς φουσαλίδες (*bubble-less aeration*).
2. Ταυτόχρονη νιτροποίηση και απονιτροποίηση μέσα στην ίδια μονάδα.
3. Μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης και προκατασκευασμένος σχεδιασμός.
4. Υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρύπων και αζώτου.
5. Σταθερή λειτουργία και ανθεκτικότητα σε διακυμάνσεις φορτίου.
6. Δυνατότητα αναβάθμισης υφιστάμενων εγκαταστάσεων χωρίς σημαντική αύξηση χώρου.
7. Μειωμένη παραγωγή περίσσειας ιλύος.

Μειονεκτήματα

1. Υψηλό αρχικό κόστος μεμβρανών και εξοπλισμού.
2. Πιθανότητα fouling ή επικαθίσεων στη μεμβράνη.
3. Απαιτεί εξειδικευμένο σχεδιασμό και λειτουργικό έλεγχο.
4. Η απόδοση επηρεάζεται από παραμέτρους όπως το πάχος biofilm, το pH και η θερμοκρασία.
5. Περιορισμένη ακόμη μακροχρόνια εφαρμογή σε πολύ μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις.

Συνολικά, τα υβριδικά συστήματα βασισμένα σε τεχνολογία MABR αποτελούν μία ιδιαίτερα υποσχόμενη λύση για τη σύγχρονη αποκεντρωμένη επεξεργασία λυμάτων,

συνδυάζοντας υψηλή απόδοση επεξεργασίας, μικρές απαιτήσεις χώρου και σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Η δυνατότητα επίτευξης αυστηρών ορίων εκροής αζώτου με μειωμένο ενεργειακό κόστος καθιστά τα συστήματα αυτά ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές βιώσιμης διαχείρισης υγρών αποβλήτων και επαναχρησιμοποίησης νερού.



Εικόνα 16 Σχηματική απεικόνιση συστήματος MABR–IFAS (Membrane Aerated Biofilm Reactor – Integrated Fixed-film Activated Sludge). **Fluence (2018)**: <https://www.fluencecorp.com/wp-content/uploads/2018/05/Fluence-MABR-Whitepaper-2018.pdf>

5.2.7 Μεμβρανικός Βιοαντιδραστήρας Αναερόβιας–Ανοξικής–Αερόβιας Διεργασίας A2O-MBR (Anaerobic–Anoxic–Oxic Membrane Bioreactor)

Το σύστημα A2O-MBR (Anaerobic–Anoxic–Oxic Membrane Bioreactor) αποτελεί μία προηγμένη υβριδική τεχνολογία βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, η οποία συνδυάζει την κλασική διεργασία A2O (Anaerobic–Anoxic–Oxic) με μεμβρανική διήθηση τύπου MBR. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει την ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικών ρύπων, αζώτου και φωσφόρου, ενώ παράλληλα παράγει εκροή πολύ υψηλής ποιότητας, κατάλληλη ακόμη και για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης νερού (Liu et al., 2014).

Η διεργασία A2O αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες βιολογικές μεθόδους απομάκρυνσης θρεπτικών στοιχείων (*Biological Nutrient Removal – BNR*), καθώς συνδυάζει τρεις διαφορετικές βιολογικές ζώνες:

- αναερόβια (Anaerobic),

- ανοξική (Anoxic),
- και αερόβια (Oxic).

Στο υβριδικό σύστημα A2O-MBR, όπως φαίνεται στην Εικόνα 17 η συμβατική δευτεροβάθμια καθίζηση αντικαθίσταται από μεμβράνες μικροδιήθησης ή υπερδιήθησης, οι οποίες συγκρατούν τη βιομάζα μέσα στο σύστημα και επιτρέπουν την παραγωγή διαυγούς εκροής με πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών, οργανικών ρύπων και παθογόνων μικροοργανισμών (Liu et al., 2014).

Αρχή λειτουργίας του συστήματος

Η λειτουργία του A2O-MBR πραγματοποιείται σε διαδοχικά στάδια βιολογικής επεξεργασίας:

1. Αναερόβια ζώνη (Anaerobic zone)

Στην πρώτη δεξαμενή επικρατούν αυστηρά αναερόβιες συνθήκες, χωρίς παρουσία διαλυμένου οξυγόνου ή νιτρικών. Στη ζώνη αυτή αναπτύσσονται κυρίως οι μικροοργανισμοί PAOs (*Phosphorus Accumulating Organisms*), οι οποίοι αποδεσμεύουν φωσφόρο στο υγρό μέσο και αποθηκεύουν οργανικές ενώσεις υπό μορφή εσωτερικών αποθεμάτων ενέργειας.

Παράλληλα πραγματοποιείται αρχική βιολογική αποικοδόμηση οργανικών ενώσεων (COD/BOD), προετοιμάζοντας το λύμα για τα επόμενα στάδια επεξεργασίας.

2. Ανοξική ζώνη (Anoxic zone)

Στη συνέχεια, το λύμα οδηγείται σε ανοξική δεξαμενή, όπου απουσιάζει το διαλυμένο οξυγόνο αλλά υπάρχουν διαθέσιμα νιτρικά ιόντα (NO_3^-). Σε αυτή τη φάση πραγματοποιείται απονιτροποίηση, δηλαδή η μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο (N_2), το οποίο απομακρύνεται από το σύστημα.

Οι ανοξικές συνθήκες επιτρέπουν σημαντική απομάκρυνση ολικού αζώτου (TN), μειώνοντας τον κίνδυνο ευτροφισμού των αποδεκτών υδάτων.

3. Αερόβια ζώνη (Oxic zone)

Στην αερόβια δεξαμενή παρέχεται αερισμός, δημιουργώντας συνθήκες κατάλληλες για:

- οξείδωση οργανικού φορτίου,
- νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$),
- και βιολογική πρόσληψη φωσφόρου από τους PAOs.

Η αερόβια φάση αποτελεί το κύριο στάδιο βιολογικής επεξεργασίας του συστήματος και εξασφαλίζει υψηλή απομάκρυνση BOD, COD και αμμωνιακού αζώτου.

4. Μεμβρανική μονάδα MBR

Μετά τη βιολογική επεξεργασία, το μικτό υγρό οδηγείται στη μονάδα μεμβρανών MBR, όπου πραγματοποιείται φυσικός διαχωρισμός στερεών–υγρού μέσω μικροδιήθησης ή υπερδιήθησης.

Οι μεμβράνες:

- συγκρατούν τη βιομάζα μέσα στο σύστημα,
- επιτρέπουν ανεξάρτητο έλεγχο του χρόνου παραμονής στερεών (SRT) και του υδραυλικού χρόνου παραμονής (HRT),
- αυξάνουν τη συγκέντρωση μικροοργανισμών στον αντιδραστήρα,
- και παράγουν εκροή πολύ υψηλής ποιότητας.

Η χρήση μεμβρανών καταργεί την ανάγκη δευτεροβάθμιας καθίζησης, μειώνοντας σημαντικά το απαιτούμενο αποτύπωμα εγκατάστασης.

Απόδοση και απομάκρυνση ρύπων

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα συστήματα A2O-MBR επιτυγχάνουν:

- πολύ υψηλή απομάκρυνση οργανικών ρύπων (BOD/COD),
- αποδοτική νιτροποίηση και απονιτροποίηση,
- σημαντική βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου,
- πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών (SS),
- καθώς και σημαντική μείωση παθογόνων μικροοργανισμών.

Λόγω της υψηλής ποιότητας εκροής, τα συστήματα αυτά θεωρούνται κατάλληλα για:

- επαναχρησιμοποίηση νερού,
- άρδευση,
- αστικές μη πόσιμες χρήσεις,
- καθώς και αποκεντρωμένες εφαρμογές με αυστηρά περιβαλλοντικά όρια.

Πλεονεκτήματα

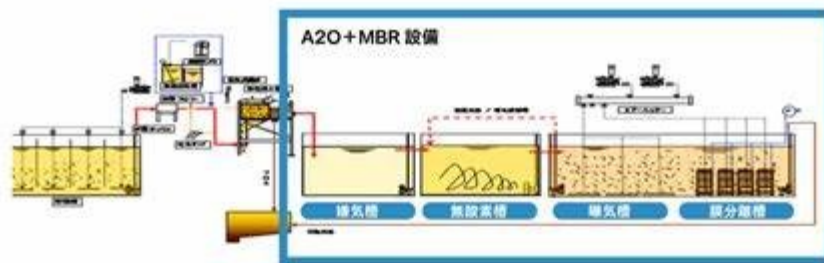
1. Πολύ υψηλή ποιότητα εκροής με χαμηλές συγκεντρώσεις BOD, COD, SS και παθογόνων.
2. Ταυτόχρονη απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου σε μία ενιαία διεργασία.
3. Ανεξάρτητος έλεγχος SRT και HRT μέσω της μεμβρανικής μονάδας.

4. Προκατασκευασμένος σχεδιασμός και μικρές απαιτήσεις χώρου.
5. Υψηλή σταθερότητα λειτουργίας ακόμη και σε μεταβαλλόμενα φορτία.
6. Κατάλληλο για αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις και εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης νερού.

Μειονεκτήματα

1. Αυξημένο αρχικό κόστος λόγω των μεμβρανών και του αυτοματισμού.
2. Πιθανότητα fouling (έμφραξης) των μεμβρανών, που απαιτεί τακτικό καθαρισμό.
3. Υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με φυσικά ή παθητικά συστήματα.
4. Αυξημένες απαιτήσεις λειτουργικού ελέγχου και συντήρησης.

Συνολικά, το A2O-MBR αποτελεί μία ολοκληρωμένη και ιδιαίτερα αποδοτική υβριδική τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων, ικανή να επιτύχει υψηλή απομάκρυνση οργανικών και θρεπτικών ρύπων σε προκατασκευασμένες εγκαταστάσεις μικρής και μεσαίας κλίμακας. Ο συνδυασμός βιολογικής απομάκρυνσης θρεπτικών και μεμβρανικής διήθησης καθιστά το σύστημα κατάλληλο για σύγχρονες αποκεντρωμένες εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας εκροής και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης νερού.



Εικόνα 17 Σχηματική απεικόνιση συστήματος A2O–MBR (Anaerobic–Anoxic–Oxic Membrane Bioreactor), Πηγή: Nikkan Technologies (2026).
<https://www.nikkan-t.co.jp/works/environment/wastewater>

5.2.8 Συστημα Μηδενικής Απόρριψης Υγρών Αποβλήτων (ZLD) Zero Liquid Discharge (ZLD)

Το Zero Liquid Discharge (ZLD) αποτελεί μία ολοκληρωμένη και ιδιαίτερα προηγμένη στρατηγική επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, με βασικό στόχο τη μηδενική απόρριψη υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον. Η φιλοσοφία του συστήματος βασίζεται στην πλήρη ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση του νερού που περιέχεται στα απόβλητα, ενώ οι ρυπαντές συμπυκνώνονται και μετατρέπονται σε στερεά υπολείμματα κατάλληλα για τελική διάθεση ή περαιτέρω αξιοποίηση (Panagoroulos, 2023).

Η τεχνολογία ZLD εφαρμόζεται κυρίως σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις υψηλής κατανάλωσης νερού και αυξημένου ρυπαντικού φορτίου, όπως:

- μονάδες παραγωγής ενέργειας,
- χημικές βιομηχανίες,
- κλωστοϋφαντουργικές εγκαταστάσεις,
- βιομηχανίες τροφίμων,
- καθώς και μονάδες αφαλάτωσης.

Τα τελευταία χρόνια, το αυξανόμενο ενδιαφέρον για επαναχρησιμοποίηση νερού, περιορισμό υγρών απορρίψεων και βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων έχει οδηγήσει σε σημαντική ανάπτυξη τεχνολογιών ZLD (Panagoroulos, 2023).

Αρχή λειτουργίας του συστήματος ZLD

Η λειτουργία ενός συστήματος Zero Liquid Discharge πραγματοποιείται συνήθως σε πολλαπλά διαδοχικά στάδια επεξεργασίας, με σκοπό τη σταδιακή απομάκρυνση νερού και τη συγκέντρωση των ρυπαντών.

1. Προεπεξεργασία

Στο αρχικό στάδιο πραγματοποιείται απομάκρυνση:

- αιωρούμενων στερεών,
- λιπών και ελαίων,
- οργανικών ρύπων,
- και ουσιών που μπορεί να προκαλέσουν επικαθίσεις ή fouling στις επόμενες μονάδες.

Η προεπεξεργασία μπορεί να περιλαμβάνει:

- φυσικοχημική καθίζηση,

- φίλτρα άμμου,
- χημική ρύθμιση pH,
- υπερδιήθηση (UF),
- ή μικροδιήθηση (MF).

Το στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για την προστασία των μεμβρανών και των θερμικών μονάδων που ακολουθούν.

2. Μεμβρανικές διεργασίες και απομάκρυνση ρύπων

Στη συνέχεια εφαρμόζονται τεχνολογίες μεμβρανικού διαχωρισμού, όπως:

- αντίστροφη ώσμωση (RO),
- νανοδιήθηση (NF),
- ηλεκτροδιάλυση,
- και άλλες διεργασίες συγκέντρωσης άλμης.

Οι διεργασίες αυτές επιτρέπουν:

- ανάκτηση μεγάλου ποσοστού καθαρού νερού,
- μείωση του όγκου των αποβλήτων,
- και συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων και ρυπαντών.

Η αντίστροφη ώσμωση αποτελεί συνήθως το βασικό στάδιο ανάκτησης νερού, καθώς μπορεί να ανακτήσει έως και 70–90% του εισερχόμενου νερού, ανάλογα με τη σύσταση των αποβλήτων.

3. Συγκέντρωση και εξάτμιση

Το συμπυκνωμένο ρεύμα (brine/concentrate) που προκύπτει από τις μεμβρανικές διεργασίες οδηγείται σε μονάδες εξάτμισης ή θερμικής συμπύκνωσης.

Σε αυτό το στάδιο:

- απομακρύνεται επιπλέον νερό,
- αυξάνεται η συγκέντρωση διαλυμένων στερεών,
- και μειώνεται περαιτέρω ο τελικός όγκος αποβλήτων.

Οι διεργασίες εξάτμισης είναι συνήθως οι πιο ενεργοβόρες μονάδες του ZLD συστήματος.

4. Κρυστάλλωση και στερεοποίηση

Στο τελικό στάδιο πραγματοποιείται:

- κρυστάλλωση αλάτων,

- στερεοποίηση των υπολειμμάτων,
- και παραγωγή στερεών αποβλήτων.

Τα στερεά αυτά μπορούν:

- είτε να διατεθούν με ασφαλή τρόπο,
- είτε να αξιοποιηθούν για ανάκτηση πολύτιμων υλικών και χημικών ενώσεων.

Το τελικό αποτέλεσμα του συστήματος είναι:

- καθαρό νερό προς επαναχρησιμοποίηση,
- και πλήρης εξάλειψη υγρής απόρριψης στο περιβάλλον.

Απόδοση και περιβαλλοντική σημασία

Τα συστήματα ZLD μπορούν να επιτύχουν:

- ανάκτηση νερού έως και 90–95%,
- δραστική μείωση περιβαλλοντικών απορρίψεων,
- σημαντική εξοικονόμηση υδατικών πόρων,
- και περιορισμό της ρύπανσης υδάτινων αποδεκτών.

Η τεχνολογία θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική σε:

- περιοχές με λειψυδρία,
- βιομηχανίες υψηλής κατανάλωσης νερού,
- και εφαρμογές με αυστηρή περιβαλλοντική νομοθεσία.

Πλεονεκτήματα

1. Σχεδόν πλήρης ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση νερού.
2. Μηδενική υγρή απόρριψη στο περιβάλλον.
3. Μείωση περιβαλλοντικής ρύπανσης και προστασία υδάτινων πόρων.
4. Δυνατότητα ανάκτησης αλάτων και πολύτιμων χημικών ενώσεων.
5. Συμβατότητα με σύγχρονες πολιτικές κυκλικής οικονομίας και βιωσιμότητας.

Μειονεκτήματα

1. Πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.
2. Αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση, ιδιαίτερα στις θερμικές διεργασίες εξάτμισης και κρυστάλλωσης.
3. Πολύπλοκος σχεδιασμός και ανάγκη εξειδικευμένου ελέγχου λειτουργίας.

4. Υψηλές απαιτήσεις συντήρησης μεμβρανών και θερμικού εξοπλισμού.

Εφαρμογές σε προκατασκευασμένα και αποκεντρωμένα συστήματα

Παρότι τα συστήματα ZLD χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, οι βασικές αρχές τους επηρεάζουν πλέον και τον σχεδιασμό σύγχρονων προκατασκευασμένων αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.

Στις μικρής κλίμακας εφαρμογές, η πλήρης εφαρμογή ενός ZLD συστήματος παραμένει δύσκολη λόγω:

- υψηλού ενεργειακού κόστους,
- αυξημένης πολυπλοκότητας,
- και μεγάλων απαιτήσεων συντήρησης.

Ωστόσο, τεχνολογίες όπως:

- οι μεμβρανικές διεργασίες,
- η μέγιστη ανάκτηση νερού,
- και η ελαχιστοποίηση της υγρής εκροής,

ενσωματώνονται σταδιακά σε σύγχρονες προκατασκευασμένες εγκαταστάσεις αποκεντρωμένης επεξεργασίας, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους ή αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς (Panagoroulos, 2025).

Συμπερασματικά, το Zero Liquid Discharge αποτελεί μία ιδιαίτερα προηγμένη και περιβαλλοντικά βιώσιμη προσέγγιση διαχείρισης υγρών αποβλήτων, η οποία συνδυάζει υψηλή ανάκτηση νερού, ελαχιστοποίηση απορρίψεων και δυνατότητα ανάκτησης πόρων. Παρά τους τεχνικούς και οικονομικούς περιορισμούς που παρουσιάζει σε μικρής κλίμακας εφαρμογές, θεωρείται μία τεχνολογία με σημαντικές προοπτικές για το μέλλον των προκατασκευασμένων και αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.



Εικόνα 18 Σχηματική απεικόνιση συστήματος Zero Liquid Discharge (ZLD),Netsol Water (2024). <https://www.netsolwater.com/zero-liquid-discharge-an-absolute-necessity.php?blog=3565>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία, η οποία εξαρτάται από τεχνικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και λειτουργικούς παράγοντες. Η συνεχής ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και η αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων έχουν οδηγήσει στην εμφάνιση μεγάλου αριθμού συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς την αποδοτικότητα, την ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, καθώς και τις απαιτήσεις συντήρησης.

Ιδιαίτερα στις εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων, η επιλογή τεχνολογίας αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία, καθώς οι περιορισμοί χώρου, η μεταβλητότητα των παροχών, η διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού και οι απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης του επεξεργασμένου νερού διαφοροποιούν σημαντικά τα κριτήρια σχεδιασμού σε σχέση με τις μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Crites & Tchobanoglous, 1998· Ανδρεαδάκης, 2009).

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές επεξεργασίας λυμάτων και αναλύθηκαν οι κυριότερες τεχνολογίες προκατασκευασμένων και αποκεντρωμένων συστημάτων.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών αυτών με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, τα οποία περιλαμβάνουν την τεχνική απόδοση, την ενεργειακή κατανάλωση, το οικονομικό κόστος, τις απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και την καταλληλότητά τους για διαφορετικές εφαρμογές. Παράλληλα, εξετάζονται οι σύγχρονες διεθνείς τάσεις και οι εφαρμογές των τεχνολογιών αυτών σε διαφορετικές γεωγραφικές και κοινωνικοοικονομικές συνθήκες.

Η συγκριτική ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται σε δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας, σε κατευθυντήριες οδηγίες διεθνών οργανισμών και σε αποτελέσματα εφαρμογών πραγματικών εγκαταστάσεων. Μέσω της ανάλυσης αυτής επιδιώκεται η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών κάθε τεχνολογίας, καθώς και η διαμόρφωση συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητά τους για εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων.

6.1.1 Κριτήρια τεχνικής αξιολόγησης

Η συγκριτική τεχνική αξιολόγηση των προκατασκευασμένων και αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί βασικό στάδιο για την επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Παρότι όλες οι τεχνολογίες έχουν ως κοινό στόχο την απομάκρυνση οργανικών ρύπων και τη βελτίωση της ποιότητας των λυμάτων, διαφέρουν σημαντικά ως προς τη βιολογική διεργασία που εφαρμόζουν, την απόδοση επεξεργασίας, τις απαιτήσεις χώρου, την ενεργειακή κατανάλωση και τη λειτουργική τους πολυπλοκότητα. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η χρήση κοινών κριτηρίων αξιολόγησης ώστε η σύγκριση να πραγματοποιείται με αντικειμενικό και τεκμηριωμένο τρόπο (Crites & Tchobanoglous, 1998· Ανδρεαδάκης, 2009).

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τόσο συμβατικά προκατασκευασμένα βιολογικά συστήματα όσο και σύγχρονες υβριδικές τεχνολογίες. Συγκεκριμένα, αξιολογούνται τα συστήματα SBR, MBBR, MBR, Oxidation Ditch, FBBR, SAF, RBC, ABR, MABR, SAFF και PABR, καθώς και οι υβριδικές διατάξεις IFAS, Hybrid SBR–IFAS, AnMBR, Hybrid SBR–MBR, ABR με αερόβια μετα-επεξεργασία, ABR σε συνδυασμό με βιοαντιδραστήρες βιοφίλμ, AVFCW, MABR-based hybrid systems και A2O–MBR. Οι τεχνολογίες αυτές αντιπροσωπεύουν διαφορετικές προσεγγίσεις βιολογικής επεξεργασίας, περιλαμβάνοντας συστήματα ενεργού ιλύος, αντιδραστήρες βιοφίλμ, αναερόβιες διεργασίες, τεχνολογίες μεμβρανών και υβριδικούς συνδυασμούς πολλαπλών διεργασιών.

Για τη συγκριτική αξιολόγηση επιλέχθηκαν κριτήρια τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία και στις τεχνικές οδηγίες σχεδιασμού εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Τα κριτήρια αυτά αφορούν τόσο την τεχνική απόδοση όσο και τη δυνατότητα εφαρμογής των συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Πρώτο και σημαντικότερο κριτήριο αποτελεί η **αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων**. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με βάση την ικανότητα κάθε συστήματος να απομακρύνει οργανικό φορτίο και θρεπτικά στοιχεία, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5), το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), το ολικό άζωτο (TN) και τον ολικό φώσφορο (TP). Οι παράμετροι αυτές αποτελούν τους σημαντικότερους δείκτες απόδοσης μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων και

χρησιμοποιούνται διεθνώς για την αξιολόγηση της ποιότητας της εκροής (Metcalf & Eddy, 2014).

Δεύτερο κριτήριο αποτελεί η **απαιτούμενη έκταση εγκατάστασης και η χωρική αποδοτικότητα** κάθε τεχνολογίας. Η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για προκατασκευασμένα και αποκεντρωμένα συστήματα, όπου η διαθέσιμη έκταση είναι συχνά περιορισμένη. Τεχνολογίες όπως τα MBR, MABR και τα υβριδικά συστήματα μεμβρανών χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση σε μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης, ενώ άλλες τεχνολογίες ενδέχεται να απαιτούν μεγαλύτερο χώρο για την επίτευξη αντίστοιχης ποιότητας εκροής.

Τρίτο κριτήριο αποτελεί η **λειτουργική σταθερότητα και η ανθεκτικότητα σε μεταβολές φορτίου**. Οι μικρές αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις συχνά λειτουργούν υπό συνθήκες έντονων διακυμάνσεων παροχής και οργανικού φορτίου, ιδιαίτερα σε τουριστικές περιοχές ή εποχιακά κατοικούμενους οικισμούς. Για τον λόγο αυτό αξιολογείται η ικανότητα κάθε συστήματος να διατηρεί σταθερή απόδοση υπό μεταβαλλόμενες υδραυλικές και οργανικές συνθήκες.

Τέταρτο κριτήριο αποτελεί η **δυνατότητα αναβάθμισης και επέκτασης της εγκατάστασης**. Τα σύγχρονα προκατασκευασμένα συστήματα σχεδιάζονται συχνά με φιλοσοφία modular ανάπτυξης, επιτρέποντας την εύκολη προσαρμογή τους σε αυξανόμενες ανάγκες επεξεργασίας χωρίς σημαντικές επεμβάσεις στις υφιστάμενες υποδομές.

Τέλος, αξιολογείται η **συνολική τεχνική καταλληλότητα** κάθε τεχνολογίας για εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων. Η αξιολόγηση αυτή προκύπτει από τον συνδυασμό όλων των παραπάνω κριτηρίων και αποσκοπεί στην ανάδειξη των συστημάτων που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα τεχνικά πλεονεκτήματα για εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, στις επόμενες ενότητες πραγματοποιείται αναλυτική συγκριτική αξιολόγηση όλων των εξεταζόμενων τεχνολογιών, αρχικά ως προς την απόδοση απομάκρυνσης ρύπων, στη συνέχεια ως προς τις απαιτήσεις χώρου και τη λειτουργική τους συμπεριφορά και τέλος ως προς τη συνολική τεχνική τους αποτελεσματικότητα.

6.1.2 Συγκριτική απόδοση απομάκρυνσης ρύπων

Η απομάκρυνση των ρυπαντικών φορτίων αποτελεί το βασικότερο κριτήριο τεχνικής αξιολόγησης ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων, καθώς καθορίζει άμεσα την ποιότητα της παραγόμενης εκροής και τη συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Στα συστήματα αποκεντρωμένης επεξεργασίας, η επίτευξη υψηλής απόδοσης απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών συστατικών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι εγκαταστάσεις αυτές καλούνται συχνά να λειτουργήσουν υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες παροχής και οργανικού φορτίου (Crites & Tchobanoglous, 1998· Massoud et al., 2009).

Η τεχνική απόδοση των εξεταζόμενων τεχνολογιών αξιολογείται με βάση την αποτελεσματικότητά τους στην απομάκρυνση των βασικών παραμέτρων ποιότητας των λυμάτων, δηλαδή του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD_5), του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS), του ολικού αζώτου (TN) και του ολικού φωσφόρου (TP). Οι παράμετροι αυτές αποτελούν τους σημαντικότερους δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων και χρησιμοποιούνται διεθνώς τόσο σε ερευνητικές εργασίες όσο και στις τεχνικές οδηγίες σχεδιασμού εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα συστήματα ενεργού ιλύος, όπως τα SBR και Oxidation Ditch, παρουσιάζουν γενικά υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών. Η δυνατότητα ελέγχου του χρόνου αερισμού και του χρόνου παραμονής της βιομάζας επιτρέπει την επίτευξη σταθερής ποιότητας εκροής, ενώ στα συστήματα SBR η διαδοχική λειτουργία των φάσεων επεξεργασίας διευκολύνει την ταυτόχρονη απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα MBBR, FBBR, SAF, SAFF, RBC και MABR, χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση ενεργού βιομάζας λόγω της ανάπτυξης μικροοργανισμών πάνω σε σταθερές ή κινητές επιφάνειες. Η παρουσία βιοφίλμ επιτρέπει τη λειτουργία των συστημάτων σε υψηλά οργανικά φορτία και αυξάνει τη σταθερότητα της διεργασίας έναντι μεταβολών των συνθηκών λειτουργίας. Σύμφωνα με τις ανασκοπήσεις των di Biase et al. (2019) και Leyva-Díaz et al. (2020), τα συστήματα MBBR εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση οργανικού

φορτίου και αζώτου, ενώ ταυτόχρονα απαιτούν σχετικά μικρό όγκο εγκατάστασης σε σύγκριση με συμβατικές διεργασίες ενεργού ιλύος.

Οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR) αποτελούν μία από τις πλέον αποδοτικές τεχνολογίες ως προς την ποιότητα της εκροής. Ο συνδυασμός βιολογικής επεξεργασίας και διαχωρισμού μέσω μεμβρανών επιτρέπει την αποτελεσματική συγκράτηση αιωρούμενων στερεών και μικροβιακής βιομάζας, οδηγώντας σε πολύ υψηλή ποιότητα εκροής. Σύμφωνα με τους Atasoy et al. (2007) και Saidulu et al. (2021), τα MBR επιτυγχάνουν σταθερά υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών, ενώ παράλληλα μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματική απομάκρυνση αζώτου όταν συνδυάζονται με κατάλληλες βιολογικές διεργασίες.

Τα αναερόβια συστήματα, όπως οι ABR, παρουσιάζουν διαφορετική φιλοσοφία λειτουργίας. Η απομάκρυνση οργανικού φορτίου πραγματοποιείται μέσω αναερόβιων μικροοργανισμών χωρίς την απαίτηση συνεχούς αερισμού, γεγονός που μειώνει σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις. Ωστόσο, η ποιότητα της εκροής είναι συνήθως χαμηλότερη σε σχέση με τα αερόβια συστήματα, ιδιαίτερα ως προς τα αιωρούμενα στερεά και τα θρεπτικά συστατικά. Για τον λόγο αυτό, οι ABR χρησιμοποιούνται συχνά ως πρώτο στάδιο επεξεργασίας σε συνδυασμό με αερόβιες ή υβριδικές διεργασίες (Massoud et al., 2009).

Οι υβριδικές τεχνολογίες, όπως τα IFAS, Hybrid SBR–IFAS, Hybrid SBR–MBR, A2O–MBR, AnMBR και τα MABR-based systems, επιχειρούν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα περισσότερων της μίας διεργασιών. Η συνύπαρξη αιωρούμενης και προσκολλημένης βιομάζας ή ο συνδυασμός βιολογικής επεξεργασίας με τεχνολογίες μεμβρανών οδηγεί συνήθως σε αυξημένη αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών, καθώς και σε μεγαλύτερη λειτουργική σταθερότητα. Για τον λόγο αυτό, οι υβριδικές τεχνολογίες θεωρούνται σήμερα από τις πλέον υποσχόμενες λύσεις για εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων (Saidulu et al., 2021).

Πίνακας 18 Συγκριτική τεχνική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων ως προς την απομάκρυνση BOD₅, COD, TSS, ολικού αζώτου (TN) και ολικού φωσφόρου (TP).

Σύστημα	BOD₅	COD	TSS	TN	TP
SBR	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια
MBBR	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια
MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
Oxidation Ditch	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια
FBBR	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια– Υψηλή	Μέτρια
SAF	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια– Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή– Μέτρια
RBC	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή
ABR	Μέτρια– Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή
MABR	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια
SAFF	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια– Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή– Μέτρια
PABR	Μέτρια– Υψηλή	Μέτρια– Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή– Μέτρια	Χαμηλή
IFAS	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια
Hybrid SBR–IFAS	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια– Υψηλή
AnMBR	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Hybrid SBR–MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
ABR Aerobic +	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια– Υψηλή	Μέτρια
ABR Biofilm +	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια– Υψηλή	Μέτρια

Σύστημα	BOD ₅	COD	TSS	TN	TP
AVFCW	Μέτρια– Υψηλή	Μέτρια– Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια
MABR- based Hybrid	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Πολύ υψηλή	Υψηλή
A2O–MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή	Υψηλή

Η αξιολόγηση είναι ποιοτική και βασίζεται σε σύνθεση δεδομένων της διεθνούς βιβλιογραφίας και τεχνικών οδηγών σχεδιασμού. Οι χαρακτηρισμοί Χαμηλή, Μέτρια, Υψηλή και Πολύ Υψηλή αποτυπώνουν τη σχετική απόδοση των τεχνολογιών υπό συνήθεις συνθήκες λειτουργίας και δεν αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες αριθμητικές τιμές.

Από τη συγκριτική αξιολόγηση προκύπτει ότι τα συστήματα μεμβρανών και ιδιαίτερα τα MBR, Hybrid SBR–MBR, AnMBR και A2O–MBR παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συνολική αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων. Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα MBBR, IFAS και MABR, εμφανίζουν επίσης ιδιαίτερα υψηλή τεχνική απόδοση και αυξημένη λειτουργική σταθερότητα, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για αποκεντρωμένες εφαρμογές. Αντίθετα, τα αναερόβια συστήματα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα ως προς την απλότητα και την ενεργειακή κατανάλωση, αλλά συνήθως απαιτούν συμπληρωματικά στάδια επεξεργασίας προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή ποιότητα εκροής.

Η συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων τεχνολογιών καταδεικνύει ότι δεν υπάρχει ένα σύστημα το οποίο να υπερτερεί σε όλα τα κριτήρια. Οι τεχνολογίες μεμβρανών, όπως τα MBR, Hybrid SBR–MBR και A2O–MBR, παρουσιάζουν γενικά την υψηλότερη ποιότητα εκροής και την αποτελεσματικότερη απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών. Παράλληλα, εμφανίζουν αυξημένη ικανότητα απομάκρυνσης θρεπτικών συστατικών όταν συνδυάζονται με κατάλληλες βιολογικές διεργασίες (Atasoy et al., 2007; Saidulu et al., 2021).

Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα MBBR, IFAS, MABR και οι αντίστοιχες υβριδικές διατάξεις, παρουσιάζουν επίσης ιδιαίτερα υψηλή τεχνική απόδοση, ενώ παράλληλα χαρακτηρίζονται από αυξημένη λειτουργική σταθερότητα και ανθεκτικότητα σε μεταβολές φορτίου. Η παρουσία προσκολλημένης βιομάζας επιτρέπει τη διατήρηση υψηλών συγκεντρώσεων ενεργών μικροοργανισμών και συμβάλλει στη σταθερότητα της διεργασίας (di Biase et al., 2019; Leyva-Díaz et al., 2020).

Αντίθετα, τα αναερόβια συστήματα, όπως οι ABR και οι παραλλαγές τους, εμφανίζουν μικρότερη συνολική απόδοση ως προς την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών, αλλά παρουσιάζουν πλεονεκτήματα που σχετίζονται με τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και την απλότητα λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συχνά ως προκαταρκτικό στάδιο σε υβριδικές διατάξεις επεξεργασίας (Massoud et al., 2009).

Συνολικά, οι υβριδικές τεχνολογίες φαίνεται να συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα περισσότερων επιμέρους διεργασιών, επιτυγχάνοντας υψηλή ποιότητα εκροής και αυξημένη λειτουργική αξιοπιστία. Η τάση αυτή αποτυπώνεται και στη σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία, όπου παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για συνδυασμένα συστήματα βιοφίλμ, μεμβρανών και αναερόβιων διεργασιών (Li et al., 2024; Saidulu et al., 2021).

6.1.3 Απαιτήσεις χώρου και δυναμικότητα εφαρμογής

Η απαιτούμενη έκταση εγκατάστασης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες κατά την επιλογή συστήματος επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα σε αποκεντρωμένες εφαρμογές όπου η διαθέσιμη γη είναι περιορισμένη ή υψηλού κόστους. Σε μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις και απομακρυσμένες περιοχές, η χωρική αποδοτικότητα μιας τεχνολογίας μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά τη δυνατότητα εφαρμογής της. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των συστημάτων δεν περιορίζεται μόνο στην αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων, αλλά επεκτείνεται και στις απαιτήσεις χώρου, στη δυνατότητα επέκτασης και στη δυναμικότητα εξυπηρέτησης διαφορετικών πληθυσμιακών φορτίων (Ανδρεαδάκης, 2009· ΥΠΕΚΑ, 2012).

Οι τεχνολογίες μεμβρανών, όπως τα MBR, Hybrid SBR–MBR, A2O–MBR και AnMBR, χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα μικρό απαιτούμενο αποτύπωμα εγκατάστασης. Η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές συγκεντρώσεις βιομάζας και η αντικατάσταση των

συμβατικών δεξαμενών καθίζησης από μονάδες μεμβρανών επιτρέπουν την επίτευξη υψηλής απόδοσης σε περιορισμένο χώρο. Για τον λόγο αυτό θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές όπου η διαθέσιμη έκταση είναι περιορισμένη, όπως σε τουριστικές μονάδες, ξενοδοχειακά συγκροτήματα και πυκνοδομημένες περιοχές (Atasoy et al., 2007· Saidulu et al., 2021).

Αντίστοιχα, τα συστήματα βιοφίλμ όπως τα MBBR, FBBR, IFAS, MABR και οι υβριδικές παραλλαγές τους παρουσιάζουν αυξημένη χωρική αποδοτικότητα λόγω της ανάπτυξης προσκολλημένης βιομάζας πάνω σε φορείς ή μεμβράνες. Η υψηλή συγκέντρωση ενεργών μικροοργανισμών επιτρέπει την επεξεργασία μεγαλύτερων φορτίων ανά μονάδα όγκου, μειώνοντας τις απαιτήσεις έκτασης σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος (di Biase et al., 2019).

Τα συστήματα SBR καταλαμβάνουν επίσης σχετικά περιορισμένη έκταση, καθώς όλες οι βασικές φάσεις επεξεργασίας πραγματοποιούνται στην ίδια δεξαμενή. Η κατάργηση ξεχωριστών δεξαμενών καθίζησης και η ευελιξία του σχεδιασμού συμβάλλουν στη μείωση του απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης. Παρόμοια χαρακτηριστικά παρουσιάζουν και τα προκατασκευασμένα Oxidation Ditch συστήματα, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας.

Οι τεχνολογίες SAF, SAFF και RBC απαιτούν συνήθως μεγαλύτερο χώρο σε σχέση με τα MBR ή MABR, αλλά εξακολουθούν να θεωρούνται κατάλληλες για αποκεντρωμένες εφαρμογές λόγω της απλότητας του εξοπλισμού τους και της δυνατότητας σταδιακής επέκτασης. Αντίθετα, τα φυσικά ή ημιφυσικά συστήματα, καθώς και ορισμένες υβριδικές διατάξεις που περιλαμβάνουν φυτεμένα φίλτρα, εμφανίζουν αυξημένες απαιτήσεις έκτασης, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε περιοχές με διαθέσιμη γη (Massoud et al., 2009).

Τα αναερόβια συστήματα ABR παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές απαιτήσεις χώρου σε σύγκριση με παραδοσιακές εκτατικές διεργασίες, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά ως προκαταρκτικό στάδιο επεξεργασίας. Ωστόσο, όταν απαιτείται υψηλή ποιότητα εκροής, η ανάγκη προσθήκης μεταγενέστερου αερόβιου σταδίου αυξάνει το συνολικό αποτύπωμα της εγκατάστασης.

Εξίσου σημαντική παράμετρος αποτελεί η δυνατότητα επέκτασης της εγκατάστασης. Οι σύγχρονες προκατασκευασμένες τεχνολογίες σχεδιάζονται συνήθως με φιλοσοφία

modular ανάπτυξης, επιτρέποντας την προσθήκη νέων μονάδων χωρίς σημαντικές παρεμβάσεις στον βασικό σχεδιασμό. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές με αναμενόμενη πληθυσμιακή ή τουριστική ανάπτυξη, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή της δυναμικότητας της εγκατάστασης στις μελλοντικές ανάγκες.

Η συγκριτική αξιολόγηση δείχνει ότι τα συστήματα μεμβρανών και οι σύγχρονες υβριδικές τεχνολογίες παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη χωρική αποδοτικότητα, επιτυγχάνοντας υψηλή δυναμικότητα επεξεργασίας σε περιορισμένη έκταση. Παράλληλα, τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα MBBR, IFAS και MABR, συνδυάζουν μικρές απαιτήσεις χώρου με αυξημένη λειτουργική ευελιξία, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για αποκεντρωμένες εφαρμογές. Αντίθετα, τεχνολογίες που βασίζονται σε φυσικές διεργασίες ή φυτεμένα φίλτρα απαιτούν μεγαλύτερες εκτάσεις εγκατάστασης, περιορίζοντας τη χρήση τους κυρίως σε περιοχές όπου υπάρχει επαρκής διαθέσιμη γη.

Πίνακας 19 Συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων ως προς τις απαιτήσεις εγκατάστασης και την καταλληλότητά τους για εφαρμογές περιορισμένου διαθέσιμου χώρου

Σύστημα	Απαιτούμενη έκταση	Καταλληλότητα σε περιορισμένο χώρο
SBR	Μικρή	Υψηλή
MBBR	Μικρή	Πολύ υψηλή
MBR	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή
Oxidation Ditch	Μέτρια	Μέτρια
FBBR	Μικρή	Υψηλή
SAF	Μέτρια	Μέτρια
RBC	Μέτρια	Μέτρια
ABR	Μικρή	Υψηλή
MABR	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή
SAFF	Μέτρια	Μέτρια
PABR	Μικρή	Υψηλή
IFAS	Μικρή	Πολύ υψηλή
Hybrid SBR–IFAS	Μικρή	Πολύ υψηλή
AnMBR	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή
Hybrid SBR–MBR	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή
ABR + Aerobic Post-Treatment	Μέτρια	Μέτρια
ABR + Biofilm Reactor	Μικρή–Μέτρια	Υψηλή
AVFCW	Μεγάλη	Χαμηλή
MABR-Based Hybrid Systems	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή
A2O–MBR	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή

Σημείωση: Η αξιολόγηση είναι ποιοτική και βασίζεται σε στοιχεία της διεθνούς βιβλιογραφίας και τεχνικών οδηγών σχεδιασμού. Η απαιτούμενη έκταση και η

καταλληλότητα σε περιορισμένο χώρο αξιολογούνται συγκριτικά μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών και αφορούν τυπικές εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων

6.1.4 Λειτουργική σταθερότητα και αντοχή σε μεταβολές φορτίου

Η λειτουργική σταθερότητα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια αξιολόγησης των αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Σε μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις και απομακρυσμένες περιοχές παρατηρούνται συχνά έντονες διακυμάνσεις τόσο στην παροχή όσο και στο οργανικό φορτίο των εισερχόμενων λυμάτων. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται κυρίως στην εποχικότητα, στις καθημερινές μεταβολές του πληθυσμού εξυπηρέτησης και στις μεταβολές των υδραυλικών συνθηκών λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, η ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί σταθερή ποιότητα εκροής υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες αποτελεί κρίσιμο παράγοντα επιλογής τεχνολογίας (Massoud et al., 2009).

Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα MBBR, FBBR, SAF, SAFF, IFAS και MABR, παρουσιάζουν γενικά υψηλή λειτουργική σταθερότητα λόγω της προσκολλημένης βιομάζας που αναπτύσσεται στις επιφάνειες των φορέων. Η βιομάζα αυτή παραμένει στο σύστημα ακόμη και όταν μεταβάλλονται οι υδραυλικές ή οργανικές συνθήκες, γεγονός που μειώνει τον κίνδυνο έκπλυσης μικροοργανισμών και συμβάλλει στη διατήρηση υψηλής απόδοσης επεξεργασίας. Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει τα MBBR και IFAS ως ιδιαίτερα ανθεκτικά συστήματα σε μεταβολές φορτίου και παροχής (di Biase et al., 2019· Leyva-Díaz et al., 2020).

Τα συστήματα SBR εμφανίζουν επίσης σημαντική λειτουργική ευελιξία, καθώς οι χρόνοι αερισμού, καθίζησης και εκκένωσης μπορούν να προσαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική αντιμετώπιση μεταβαλλόμενων συνθηκών λειτουργίας, ιδιαίτερα σε μικρές εγκαταστάσεις όπου οι ημερήσιες διακυμάνσεις είναι συχνές (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR) και οι υβριδικές παραλλαγές τους παρουσιάζουν επίσης υψηλή σταθερότητα λόγω της πλήρους συγκράτησης της βιομάζας μέσω των μεμβρανών. Ωστόσο, η ομαλή λειτουργία τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή συντήρηση και τον έλεγχο του φαινομένου έμφραξης των μεμβρανών. Παρά το

γεγονός αυτό, τα συστήματα αυτά μπορούν να διατηρούν εξαιρετικά σταθερή ποιότητα εκροής ακόμη και σε συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου (Atasoy et al., 2007· Saidulu et al., 2021).

Αντίθετα, συστήματα όπως τα RBC και ορισμένα φίλτρα βιοφίλμ επηρεάζονται περισσότερο από μηχανικές βλάβες ή απότομες μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας, γεγονός που μπορεί να μειώσει προσωρινά την απόδοσή τους. Παρ' όλα αυτά, εξακολουθούν να θεωρούνται αξιόπιστες λύσεις για μικρές αποκεντρωμένες εφαρμογές λόγω της απλότητας του εξοπλισμού τους (Cabije et al., 2009).

Τα αναερόβια συστήματα ABR παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε υδραυλικές διακυμάνσεις και χαρακτηρίζονται από απλή λειτουργία. Ωστόσο, η βιολογική τους δραστηριότητα επηρεάζεται περισσότερο από μεταβολές θερμοκρασίας και απότομες αλλαγές στο οργανικό φορτίο σε σχέση με τα αερόβια συστήματα. Για τον λόγο αυτό συχνά συνδυάζονται με μεταγενέστερα αερόβια στάδια επεξεργασίας ώστε να εξασφαλίζεται σταθερότερη ποιότητα εκροής (Massoud et al., 2009).

Οι σύγχρονες υβριδικές τεχνολογίες, όπως τα Hybrid SBR–MBR, Hybrid SBR–IFAS, MABR-based systems και A2O–MBR, συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα διαφορετικών διεργασιών και παρουσιάζουν από τις υψηλότερες επιδόσεις ως προς τη λειτουργική σταθερότητα. Η ταυτόχρονη αξιοποίηση προσκολλημένης βιομάζας, αιωρούμενης βιομάζας και τεχνολογιών μεμβρανών επιτρέπει την αποτελεσματική αντιμετώπιση μεταβολών φορτίου και παροχής, διατηρώντας υψηλή ποιότητα εκροής σε μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας (Saidulu et al., 2021).

Από τη συγκριτική ανάλυση προκύπτει ότι τα συστήματα που βασίζονται στην ανάπτυξη βιοφίλμ εμφανίζουν γενικά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε υδραυλικές και οργανικές διακυμάνσεις σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος. Η προσκολλημένη βιομάζα λειτουργεί ως μηχανισμός σταθεροποίησης της διεργασίας, επιτρέποντας τη διατήρηση υψηλής βιολογικής δραστηριότητας ακόμη και σε περιπτώσεις απότομης μεταβολής της παροχής ή του οργανικού φορτίου. Παράλληλα, τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν βιοφίλμ, ενεργό ιλύ και τεχνολογίες μεμβρανών παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συνολική λειτουργική αξιοπιστία, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για σύγχρονες αποκεντρωμένες εφαρμογές (di Biase et al., 2019; Saidulu et al., 2021)

Πίνακας 20 Συγκριτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των προκατασκευασμένων και υβριδικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων σε υδραυλικές και οργανικές διακυμάνσεις.

Σύστημα	Αντοχή σε μεταβολές παροχής	Αντοχή σε μεταβολές οργανικού φορτίου
SBR	Υψηλή	Υψηλή
MBBR	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή
MBR	Υψηλή	Υψηλή
Oxidation Ditch	Υψηλή	Υψηλή
FBBR	Υψηλή	Υψηλή
SAF	Υψηλή	Μέτρια–Υψηλή
RBC	Μέτρια	Μέτρια
ABR	Υψηλή	Μέτρια
MABR	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή
SAFF	Υψηλή	Μέτρια–Υψηλή
PABR	Μέτρια–Υψηλή	Μέτρια
IFAS	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή
Hybrid SBR–IFAS	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή
AnMBR	Υψηλή	Υψηλή
Hybrid SBR–MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή
ABR + Aerobic Post-Treatment	Υψηλή	Υψηλή
ABR + Biofilm Reactor	Υψηλή	Υψηλή
AVFCW	Μέτρια	Μέτρια
MABR-Based Hybrid Systems	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή
A2O–MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.3 επιβεβαιώνουν ότι οι τεχνολογίες βιοφίλμ και οι υβριδικές διατάξεις παρουσιάζουν αυξημένη ανθεκτικότητα σε μεταβολές φορτίου

συγκριτικά με συμβατικά συστήματα. Ιδιαίτερα τα MBBR, IFAS, MABR και τα αντίστοιχα υβριδικά συστήματα διατηρούν υψηλή βιολογική δραστηριότητα ακόμη και υπό συνθήκες έντονων διακυμάνσεων, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για εφαρμογές σε μικρούς οικισμούς και τουριστικές περιοχές. Αντίθετα, συστήματα όπως τα RBC και AVFCW εμφανίζουν μεγαλύτερη εξάρτηση από τις συνθήκες λειτουργίας και τις περιβαλλοντικές παραμέτρους, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα της απόδοσής τους.

Η συγκριτική αξιολόγηση δείχνει ότι τα συστήματα βιοφίλμ και οι υβριδικές τεχνολογίες παρουσιάζουν γενικά τη μεγαλύτερη λειτουργική σταθερότητα και ανθεκτικότητα σε μεταβολές φορτίου. Ιδιαίτερα τα MBBR, IFAS, MABR και τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν βιοφίλμ και μεμβράνες εμφανίζουν εξαιρετική προσαρμοστικότητα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Αντίθετα, τεχνολογίες όπως τα RBC και ορισμένα φυσικά συστήματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας, χωρίς ωστόσο να χάνουν την καταλληλότητά τους για μικρές αποκεντρωμένες εφαρμογές.

6.1.5 Συνολική τεχνική αξιολόγηση

Η συνολική τεχνική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων προκύπτει από τη συνδυασμένη εξέταση της αποδοτικότητας απομάκρυνσης ρύπων, των απαιτήσεων χώρου και της λειτουργικής σταθερότητας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει μια πιο ολοκληρωμένη αποτίμηση των τεχνολογιών, καθώς η επιλογή ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ποιότητα της εκροής αλλά και από την ικανότητά του να λειτουργεί αξιόπιστα σε πραγματικές συνθήκες εφαρμογής.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι τα συστήματα μεμβρανών και ιδιαίτερα τα MBR, Hybrid SBR–MBR, AnMBR και A2O–MBR εμφανίζουν την υψηλότερη συνολική τεχνική απόδοση. Η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές συγκεντρώσεις βιομάζας, η αποτελεσματική συγκράτηση αιωρούμενων στερεών και η παραγωγή εκροής υψηλής ποιότητας τα καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές επιλογές για εφαρμογές όπου απαιτείται αυξημένος βαθμός επεξεργασίας ή επαναχρησιμοποίηση των εκροών (Atasoy et al., 2007; Saidulu et al., 2021).

Παράλληλα, τα συστήματα βιοφίλμ όπως τα MBBR, IFAS, MABR και οι αντίστοιχες υβριδικές διατάξεις παρουσιάζουν εξαιρετική ισορροπία μεταξύ απόδοσης, λειτουργικής

σταθερότητας και απαιτήσεων χώρου. Η ανάπτυξη προσκολλημένης βιομάζας αυξάνει την ανθεκτικότητα της διεργασίας σε μεταβολές φορτίου, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη λειτουργία σε μικρότερο όγκο εγκατάστασης σε σχέση με συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος. Για τον λόγο αυτό, οι τεχνολογίες αυτές θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων (di Biase et al., 2019; Leyva-Díaz et al., 2020).

Τα συστήματα SBR και Oxidation Ditch εξακολουθούν να αποτελούν αξιόπιστες και ευρέως εφαρμοζόμενες τεχνολογίες. Η ευελιξία λειτουργίας τους, η σχετικά απλή διαχείριση και η ικανοποιητική απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών τα καθιστούν κατάλληλα για μικρούς και μεσαίους οικισμούς. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ιδιαίτερα υψηλή ποιότητα εκροής, ενδέχεται να υστερούν σε σχέση με τα σύγχρονα συστήματα μεμβρανών και τις προηγμένες υβριδικές τεχνολογίες (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα συστήματα SAF, SAFF, RBC και FBBR παρουσιάζουν γενικά καλή τεχνική συμπεριφορά και σχετικά απλή λειτουργία, αποτελώντας αξιόπιστες λύσεις για αποκεντρωμένες εφαρμογές. Παρά τα πλεονεκτήματά αυτά, η απόδοσή τους ως προς την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και η προσαρμοστικότητά τους σε ιδιαίτερα αυστηρές απαιτήσεις εκροής είναι συνήθως χαμηλότερη σε σχέση με πιο σύγχρονες τεχνολογίες βιοφίλμ και μεμβρανών (Cabije et al., 2009).

Τέλος, τα αναερόβια συστήματα ABR και οι παραλλαγές τους παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την απλότητα λειτουργίας και τις χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Ωστόσο, η περιορισμένη απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και η ανάγκη συμπληρωματικών σταδίων επεξεργασίας μειώνουν τη συνολική τεχνική τους αξιολόγηση όταν εξετάζονται ως αυτόνομα συστήματα. Αντίθετα, όταν συνδυάζονται με αερόβια ή βιοφιλμικά στάδια επεξεργασίας, η συνολική τους απόδοση βελτιώνεται σημαντικά (Massoud et al., 2009).

Πίνακας 21 Συνολική τεχνική κατάταξη των εξεταζόμενων τεχνολογιών με βάση την απόδοση επεξεργασίας, τις απαιτήσεις χώρου και τη λειτουργική σταθερότητα.

Σύστημα	Απόδοση επεξεργασίας	Απαιτήσεις χώρου	Λειτουργική σταθερότητα	Συνολική τεχνική αξιολόγηση
SBR	Υψηλή	Μικρή	Υψηλή	Πολύ καλή
MBBR	Υψηλή	Μικρή	Πολύ υψηλή	Εξαιρετική
MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Υψηλή	Εξαιρετική
Oxidation Ditch	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ καλή
FBBR	Υψηλή	Μικρή	Υψηλή	Πολύ καλή
SAF	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια–Υψηλή	Καλή
RBC	Μέτρια–Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Καλή
ABR	Μέτρια	Μικρή	Μέτρια	Ικανοποιητική
MABR	Υψηλή	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή	Εξαιρετική
SAFF	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια–Υψηλή	Καλή
PABR	Μέτρια	Μικρή	Μέτρια	Ικανοποιητική
IFAS	Υψηλή	Μικρή	Πολύ υψηλή	Εξαιρετική
Hybrid SBR–IFAS	Πολύ υψηλή	Μικρή	Πολύ υψηλή	Εξαιρετική
AnMBR	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Υψηλή	Εξαιρετική
Hybrid SBR–MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή	Εξαιρετική
ABR +	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ καλή

Σύστημα	Απόδοση επεξεργασίας	Απαιτήσεις χώρου	Λειτουργική σταθερότητα	Συνολική τεχνική αξιολόγηση
Aerobic Post-Treatment				
ABR + Biofilm Reactor	Υψηλή	Μικρή– Μέτρια	Υψηλή	Πολύ καλή
AVFCW	Μέτρια	Μεγάλη	Μέτρια	Ικανοποιητική
MABR- Based Hybrid Systems	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή	Εξαιρετική
A2O–MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Πολύ υψηλή	Εξαιρετική

Συμπεράσματα της τεχνικής αξιολόγησης

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι πλέον προηγμένες υβριδικές τεχνολογίες και τα συστήματα μεμβρανών παρουσιάζουν την υψηλότερη τεχνική απόδοση μεταξύ των εξεταζόμενων επιλογών. Παράλληλα, τα συστήματα βιοφίλμ εμφανίζουν ιδιαίτερα ισορροπημένη συμπεριφορά συνδυάζοντας υψηλή απόδοση, περιορισμένες απαιτήσεις χώρου και αυξημένη λειτουργική σταθερότητα. Αντίθετα, οι απλούστερες τεχνολογίες, αν και παραμένουν αξιόπιστες και οικονομικά προσιτές, εμφανίζουν συνήθως χαμηλότερη συνολική τεχνική αποτελεσματικότητα όταν συγκρίνονται με τα πλέον σύγχρονα υβριδικά συστήματα. Τα συμπεράσματα αυτά αποτελούν τη βάση για την ενεργειακή, οικονομική και λειτουργική αξιολόγηση που ακολουθεί στις επόμενες ενότητες.

6.2 Συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αξιολόγησης των σύγχρονων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο το λειτουργικό κόστος όσο και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μιας εγκατάστασης. Στα αποκεντρωμένα συστήματα, όπου οι διαθέσιμοι οικονομικοί και ενεργειακοί πόροι

είναι συχνά περιορισμένοι, η επιλογή ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Παράλληλα, η αυξανόμενη έμφαση στη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις.

Οι ενεργειακές ανάγκες των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων σχετίζονται κυρίως με τον αερισμό, την ανάδευση, την ανακυκλοφορία ροών, την άντληση και τη λειτουργία βοηθητικού εξοπλισμού. Ωστόσο, οι απαιτήσεις αυτές διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών, καθώς κάθε σύστημα βασίζεται σε διαφορετικές διεργασίες και λειτουργικές αρχές. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των συμβατικών προκατασκευασμένων συστημάτων, των αναερόβιων τεχνολογιών και των σύγχρονων υβριδικών διατάξεων, με στόχο την ανάδειξη των πλέον ενεργειακά αποδοτικών λύσεων για αποκεντρωμένες εφαρμογές.

6.2.1 Κριτήρια ενεργειακής αξιολόγησης

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες κατά την επιλογή και λειτουργία ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων. Στις αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις, όπου συχνά υπάρχουν περιορισμοί ως προς τη διαθεσιμότητα ενέργειας και το λειτουργικό κόστος, η ενεργειακή αποδοτικότητα αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Για τον λόγο αυτό, η ενεργειακή αξιολόγηση των εξεταζόμενων τεχνολογιών πραγματοποιείται παράλληλα με την τεχνική αξιολόγηση, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο η υψηλή απόδοση επεξεργασίας συνοδεύεται από αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις.

Η κατανάλωση ενέργειας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων σχετίζεται κυρίως με τις ανάγκες αερισμού, ανάδευσης, ανακυκλοφορίας ροών, άντλησης και λειτουργίας βοηθητικού εξοπλισμού. Στα αερόβια συστήματα, ο αερισμός αποτελεί συνήθως τη σημαντικότερη πηγή ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς μπορεί να αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 50–60% της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας μιας εγκατάστασης (Metcalf & Eddy, 2014). Αντίθετα, τα αναερόβια συστήματα χαρακτηρίζονται από σημαντικά χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς δεν απαιτούν συνεχή παροχή οξυγόνου.

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών χρησιμοποιούνται δύο βασικά κριτήρια. Το πρώτο αφορά τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος, ενώ το δεύτερο αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα, δηλαδή τη σχέση μεταξύ της καταναλισκόμενης ενέργειας και της επιτυγχανόμενης ποιότητας εκροής. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η σύγκριση τεχνολογιών που παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα απόδοσης επεξεργασίας και διαφορετικές λειτουργικές απαιτήσεις.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι σύγχρονες τεχνολογίες βιοφίλμ και τα υβριδικά συστήματα, τα οποία επιδιώκουν τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης χωρίς σημαντικές απώλειες στην ποιότητα της εκροής. Τεχνολογίες όπως τα MABR, IFAS και τα MABR-based hybrid systems έχουν αναπτυχθεί με στόχο την αύξηση της απόδοσης μεταφοράς οξυγόνου και τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων αερισμού σε σχέση με συμβατικά αερόβια συστήματα (di Biase et al., 2019).

Στις επόμενες ενότητες εξετάζονται αναλυτικά οι ενεργειακές απαιτήσεις των εξεταζόμενων τεχνολογιών, αρχικά για τα αερόβια συστήματα, στη συνέχεια για τα αναερόβια και υβριδικά συστήματα και τέλος πραγματοποιείται συνολική συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση.

6.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση ενεργειακών απαιτήσεων των εξεταζόμενων συστημάτων

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα και το λειτουργικό κόστος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Οι απαιτήσεις ενέργειας εξαρτώνται κυρίως από τις ανάγκες αερισμού, ανάδευσης, ανακυκλοφορίας ροών, άντλησης και λειτουργίας βοηθητικού εξοπλισμού. Για τον λόγο αυτό, τεχνολογίες που βασίζονται σε διαφορετικές βιολογικές διεργασίες παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τη συνολική ενεργειακή τους συμπεριφορά (Metcalf & Eddy, 2014).

Για τις ανάγκες της παρούσας συγκριτικής αξιολόγησης, η ενεργειακή κατανάλωση εκτιμάται ποιοτικά με βάση τη σχετική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα επεξεργαζόμενου όγκου λυμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις αερισμού και τη λειτουργία του απαιτούμενου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Οι χαρακτηρισμοί

«πολύ χαμηλή», «χαμηλή», «μέτρια» και «υψηλή» εκφράζουν τη σχετική θέση κάθε τεχνολογίας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα εξεταζόμενα συστήματα και όχι συγκεκριμένες αριθμητικές τιμές κατανάλωσης.

Τα συμβατικά αερόβια συστήματα, όπως τα SBR, MBBR, FBBR, SAF και SAFE, παρουσιάζουν γενικά μέτριες ενεργειακές απαιτήσεις. Η κατανάλωση ενέργειας προέρχεται κυρίως από τα συστήματα αερισμού, τα οποία είναι απαραίτητα για την παροχή οξυγόνου στους μικροοργανισμούς που πραγματοποιούν τη βιολογική αποδόμηση του οργανικού φορτίου. Στα συστήματα αυτά ο αερισμός αποτελεί συνήθως το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης της εγκατάστασης (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα συστήματα MBBR, FBBR και IFAS παρουσιάζουν βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με συμβατικές διεργασίες ενεργού ιλύος, καθώς η ανάπτυξη προσκολλημένης βιομάζας επιτρέπει την επίτευξη υψηλής βιολογικής δραστηριότητας σε μικρότερους όγκους αντιδραστήρων. Η αυξημένη συγκέντρωση ενεργών μικροοργανισμών συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης της διεργασίας χωρίς αντίστοιχη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας (di Biase et al., 2019; Leyva-Díaz et al., 2020).

Οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR) και τα υβριδικά συστήματα που βασίζονται σε τεχνολογίες μεμβρανών, όπως τα Hybrid SBR–MBR και A2O–MBR, παρουσιάζουν γενικά τις υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών. Η αυξημένη κατανάλωση οφείλεται όχι μόνο στις ανάγκες αερισμού αλλά και στη λειτουργία των μεμβρανών, στις ανακυκλοφορίες και στις διαδικασίες καθαρισμού των μεμβρανικών επιφανειών. Παρά το αυξημένο ενεργειακό κόστος, τα συστήματα αυτά προσφέρουν εξαιρετικά υψηλή ποιότητα εκροής και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων (Guo et al., 2012; Saidulu et al., 2021).

Αντίθετα, τα αναερόβια συστήματα όπως τα ABR και PABR χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς η βιολογική επεξεργασία πραγματοποιείται χωρίς την ανάγκη συνεχούς αερισμού. Η απουσία ενεργοβόρων συστημάτων παροχής οξυγόνου μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και καθιστά τις τεχνολογίες αυτές ιδιαίτερα ελκυστικές για εφαρμογές σε περιοχές με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους ή αυξημένες απαιτήσεις ενεργειακής βιωσιμότητας (Massoud et al., 2009).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι νεότερες τεχνολογίες MABR και τα MABR-based hybrid systems. Στα συστήματα αυτά το οξυγόνο μεταφέρεται μέσω ειδικών μεμβρανών απευθείας στο βιοφίλμ, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση μεταφοράς οξυγόνου και μειώνοντας τις απώλειες που παρατηρούνται στα συμβατικά συστήματα αερισμού. Ως αποτέλεσμα, τα συστήματα MABR επιτυγχάνουν υψηλή αποδοτικότητα επεξεργασίας με σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με πολλές συμβατικές αερόβιες τεχνολογίες, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για μελλοντικές εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων.

Παρόμοια πλεονεκτήματα εμφανίζουν και τα συστήματα RBC, στα οποία η παροχή οξυγόνου επιτυγχάνεται μέσω της περιστροφής των δίσκων και όχι μέσω εντατικού αερισμού. Η λειτουργική αυτή αρχή συμβάλλει στη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων, διατηρώντας παράλληλα ικανοποιητικά επίπεδα απόδοσης επεξεργασίας (Cabije et al., 2009).

Συνολικά, η συγκριτική αξιολόγηση δείχνει ότι οι χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις παρατηρούνται στα αναερόβια συστήματα και στις τεχνολογίες υψηλής απόδοσης μεταφοράς οξυγόνου, ενώ οι μεγαλύτερες απαιτήσεις εντοπίζονται στα συστήματα μεμβρανών και στις διεργασίες που βασίζονται σε παρατεταμένο αερισμό. Παράλληλα, οι σύγχρονες υβριδικές τεχνολογίες επιχειρούν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα διαφορετικών διεργασιών, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ υψηλής απόδοσης επεξεργασίας και αποδεκτών ενεργειακών απαιτήσεων.

Πίνακας 22 Συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση των εξεταζόμενων τεχνολογιών με βάση τις απαιτήσεις αερισμού, τον βοηθητικό εξοπλισμό και τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση.

Σύστημα	Αερισμός	Βοηθητικός εξοπλισμός	Συνολική ενεργειακή κατανάλωση
SBR	Υψηλός	Μέτριος	Μέτρια
MBBR	Υψηλός	Χαμηλός	Μέτρια
MBR	Υψηλός	Υψηλός	Υψηλή
Oxidation Ditch	Πολύ	Μέτριος	Υψηλή

Σύστημα	Αερισμός	Βοηθητικός εξοπλισμός	Συνολική ενεργειακή κατανάλωση
	υψηλός		
FBBR	Υψηλός	Χαμηλός	Μέτρια
SAF	Μέτριος	Χαμηλός	Μέτρια
RBC	Χαμηλός	Χαμηλός	Χαμηλή
ABR	Πολύ χαμηλός	Χαμηλός	Πολύ χαμηλή
MABR	Χαμηλός	Μέτριος	Χαμηλή
SAFF	Μέτριος	Χαμηλός	Μέτρια
PABR	Πολύ χαμηλός	Χαμηλός	Πολύ χαμηλή
IFAS	Μέτριος	Μέτριος	Μέτρια
Hybrid SBR– IFAS	Μέτριος	Μέτριος	Μέτρια
AnMBR	Πολύ χαμηλός	Μέτριος	Χαμηλή
Hybrid SBR– MBR	Υψηλός	Υψηλός	Υψηλή
ABR + Aerobic	Μέτριος	Μέτριος	Μέτρια
ABR + Biofilm	Μέτριος	Μέτριος	Μέτρια
AVFCW	Πολύ χαμηλός	Πολύ χαμηλός	Πολύ χαμηλή
MABR-Based Hybrid	Χαμηλός	Μέτριος	Χαμηλή
A2O–MBR	Υψηλός	Υψηλός	Υψηλή

6.2.3 Συνολική ενεργειακή αξιολόγηση

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα και το λειτουργικό κόστος των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Η αυξανόμενη έμφαση στη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων, στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας έχει οδηγήσει στη συστηματική αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων (McCarty et al., 2011).

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, η αξιολόγηση πραγματοποιείται με βάση δύο βασικές παραμέτρους:

- **Ενεργειακή κατανάλωση**, η οποία εκφράζει τη σχετική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία κάθε συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες αερισμού, ανάδευσης, ανακυκλοφορίας, άντλησης και λειτουργίας βοηθητικού εξοπλισμού.
- **Ενεργειακή αποδοτικότητα**, η οποία εκφράζει τη σχέση μεταξύ της καταναλισκόμενης ενέργειας και της επιτυγχάνομενης απόδοσης επεξεργασίας. Ένα σύστημα θεωρείται ενεργειακά αποδοτικό όταν επιτυγχάνει υψηλή ποιότητα εκροής με σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Οι χαρακτηρισμοί «πολύ χαμηλή», «χαμηλή», «μέτρια», «υψηλή» και «πολύ υψηλή» δεν αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες αριθμητικές τιμές, αλλά αποτυπώνουν τη σχετική θέση κάθε τεχνολογίας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα εξεταζόμενα συστήματα, βάσει στοιχείων της διεθνούς βιβλιογραφίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών τους (Metcalf & Eddy, 2014; Saidulu et al., 2021).

Τα αποτελέσματα της προηγούμενης ανάλυσης δείχνουν ότι οι σημαντικότερες ενεργειακές απαιτήσεις προέρχονται από τις διεργασίες αερισμού, οι οποίες αποτελούν συνήθως το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στις αερόβιες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Ως εκ τούτου, τα συστήματα που απαιτούν εκτεταμένο αερισμό ή συνδυάζουν αερισμό με λειτουργία μεμβρανών εμφανίζουν αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με άλλες τεχνολογίες (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι τεχνολογίες **MBR**, **Hybrid SBR–MBR** και **A2O–MBR** παρουσιάζουν γενικά τις υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις μεταξύ των εξεταζόμενων συστημάτων. Η λειτουργία

των μεμβρανών, οι διαδικασίες καθαρισμού τους και οι απαιτήσεις αερισμού αυξάνουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, οι τεχνολογίες αυτές επιτυγχάνουν εξαιρετικά υψηλή ποιότητα εκροής και υψηλό βαθμό απομάκρυνσης ρύπων, γεγονός που διατηρεί την ενεργειακή τους αποδοτικότητα σε υψηλά επίπεδα (Guo et al., 2012; Saidulu et al., 2021).

Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα **MBBR**, **IFAS**, **Hybrid SBR-IFAS**, **FBBR** και **MABR**, παρουσιάζουν γενικά καλύτερη ισορροπία μεταξύ ενεργειακής κατανάλωσης και απόδοσης επεξεργασίας. Η παρουσία προσκολλημένης βιομάζας επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροοργανισμών, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα της διεργασίας χωρίς αντίστοιχη αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων (di Biase et al., 2019; Leyva-Díaz et al., 2020).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα **MABR** και **MABR-Based Hybrid Systems**, τα οποία αξιοποιούν βελτιωμένους μηχανισμούς μεταφοράς οξυγόνου μέσω ειδικών μεμβρανών. Η τεχνολογία αυτή μειώνει σημαντικά τις απώλειες οξυγόνου που παρατηρούνται στα συμβατικά συστήματα αερισμού, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, τα MABR θεωρούνται σήμερα από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες για ενεργειακά αποδοτική επεξεργασία λυμάτων.

Τα αναερόβια συστήματα **ABR** και **PABR** παρουσιάζουν τις χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς η επεξεργασία πραγματοποιείται χωρίς συνεχή παροχή οξυγόνου. Παράλληλα, οι **AnMBR** συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της αναερόβιας επεξεργασίας με τα πλεονεκτήματα των μεμβρανών, επιτυγχάνοντας υψηλή ποιότητα εκροής με σχετικά περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, οι αναερόβιες τεχνολογίες προσφέρουν τη δυνατότητα παραγωγής βιοαερίου και ανάκτησης ενέργειας, στοιχείο που ενισχύει σημαντικά το συνολικό ενεργειακό τους ισοζύγιο (McCarty et al., 2011).

Συνολικά, οι σύγχρονες υβριδικές τεχνολογίες και τα συστήματα βιοφίλμ φαίνεται να προσφέρουν την καλύτερη ισορροπία μεταξύ απόδοσης επεξεργασίας και ενεργειακής κατανάλωσης. Η δυνατότητα συνδυασμού διαφορετικών βιολογικών διεργασιών επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος, χωρίς σημαντικές απώλειες στην ποιότητα της εκροής.

Πίνακας 23 Συνολική ενεργειακή αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων

Σύστημα	Ενεργειακή κατανάλωση	Ενεργειακή αποδοτικότητα
SBR	Μέτρια	Υψηλή
MBBR	Μέτρια	Υψηλή
MBR	Υψηλή	Υψηλή
Oxidation Ditch	Υψηλή	Μέτρια
FBBR	Μέτρια	Υψηλή
SAF	Μέτρια	Μέτρια
RBC	Χαμηλή	Υψηλή
ABR	Πολύ χαμηλή	Υψηλή
MABR	Χαμηλή	Πολύ υψηλή
SAFF	Μέτρια	Μέτρια
PABR	Πολύ χαμηλή	Υψηλή
IFAS	Μέτρια	Πολύ υψηλή
Hybrid SBR–IFAS	Μέτρια	Πολύ υψηλή
AnMBR	Χαμηλή	Πολύ υψηλή
Hybrid SBR–MBR	Υψηλή	Υψηλή
ABR + Aerobic Post-Treatment	Μέτρια	Υψηλή
ABR + Biofilm Reactor	Μέτρια	Υψηλή
AVFCW	Πολύ χαμηλή	Υψηλή
MABR-Based Hybrid Systems	Χαμηλή	Πολύ υψηλή
A2O–MBR	Υψηλή	Υψηλή

Συμπεράσματα

Η συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση δείχνει ότι οι χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις παρατηρούνται στις αναερόβιες τεχνολογίες και στα συστήματα υψηλής απόδοσης μεταφοράς οξυγόνου. Αντίθετα, οι τεχνολογίες μεμβρανών εμφανίζουν αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, η οποία όμως συνοδεύεται από ιδιαίτερα υψηλή

ποιότητα εκροής. Οι πλέον ισορροπημένες λύσεις από ενεργειακή άποψη φαίνεται να είναι τα συστήματα MABR, IFAS, Hybrid SBR–IFAS, AnMBR και τα MABR-Based Hybrid Systems, τα οποία συνδυάζουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας με σχετικά περιορισμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Η τάση αυτή επιβεβαιώνει τη διεθνή στροφή προς υβριδικές τεχνολογίες και συστήματα βιοφίλμ ως βασικό άξονα εξέλιξης των αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.

6.3 Συγκριτική οικονομική αξιολόγηση

Η οικονομική διάσταση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιλογής συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές μικρών οικισμών και αποκεντρωμένων εγκαταστάσεων όπου οι διαθέσιμοι οικονομικοί πόροι είναι συχνά περιορισμένοι. Παρότι η τεχνική απόδοση, η ενεργειακή συμπεριφορά και η περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα αποτελούν βασικά κριτήρια αξιολόγησης, η τελική επιλογή μιας τεχνολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το συνολικό οικονομικό κόστος που συνεπάγεται η κατασκευή και η λειτουργία της εγκατάστασης.

Οι εξεταζόμενες τεχνολογίες παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς το απαιτούμενο αρχικό επενδυτικό κόστος, τις ανάγκες ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, τις ενεργειακές απαιτήσεις και το συνολικό λειτουργικό κόστος. Για παράδειγμα, προηγμένες τεχνολογίες όπως τα συστήματα μεμβρανών και τα σύνθετα υβριδικά συστήματα προσφέρουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας, συνοδεύονται όμως συνήθως από αυξημένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Αντίθετα, απλούστερες τεχνολογίες όπως τα ABR, PABR και ορισμένα φυσικά συστήματα επεξεργασίας εμφανίζουν χαμηλότερες οικονομικές απαιτήσεις, αλλά συχνά υστερούν ως προς την ποιότητα της εκροής και την ευελιξία λειτουργίας.

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων από οικονομική σκοπιά, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το κόστος επένδυσης (CAPEX) όσο και το λειτουργικό κόστος (OPEX). Μέσα από τη σύγκριση αυτή επιδιώκεται η ανάδειξη των τεχνολογιών που προσφέρουν την καλύτερη ισορροπία μεταξύ

οικονομικού κόστους και απόδοσης επεξεργασίας, συμβάλλοντας στην επιλογή κατάλληλων λύσεων για εφαρμογές αποκεντρωμένης διαχείρισης λυμάτων.

6.3.1 Κριτήρια οικονομικής αξιολόγησης

Η οικονομική αξιολόγηση αποτελεί βασικό στάδιο κατά την επιλογή ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές μικρών οικισμών και αποκεντρωμένων εγκαταστάσεων όπου οι διαθέσιμοι οικονομικοί πόροι είναι συνήθως περιορισμένοι. Παρότι η τεχνική και περιβαλλοντική απόδοση ενός συστήματος είναι καθοριστικής σημασίας, η τελική επιλογή επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το συνολικό κόστος που συνεπάγεται η κατασκευή και η λειτουργία της εγκατάστασης. Για τον λόγο αυτό, η οικονομική αξιολόγηση αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της συγκριτικής ανάλυσης των εξεταζόμενων τεχνολογιών (Metcalf & Eddy, 2014).

Στην πράξη, το συνολικό οικονομικό κόστος ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες:

Κόστος επένδυσης (Capital Expenditure – CAPEX)

Το κόστος επένδυσης περιλαμβάνει τις δαπάνες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό, την προμήθεια εξοπλισμού, την κατασκευή και τη θέση σε λειτουργία της εγκατάστασης. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι δεξαμενές επεξεργασίας, οι σωληνώσεις, οι αντλίες, οι φυσητήρες, τα συστήματα αυτοματισμού, οι μονάδες μεμβρανών, τα πληρωτικά υλικά βιοφίλμ, καθώς και κάθε άλλο απαραίτητο ηλεκτρομηχανολογικό στοιχείο της εγκατάστασης (Crites & Tchobanoglous, 1998).

Γενικά, τεχνολογίες που βασίζονται σε μεμβράνες ή σύνθετες υβριδικές διεργασίες εμφανίζουν υψηλότερο κόστος επένδυσης σε σχέση με απλούστερα συστήματα, όπως τα ABR ή τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας.

Λειτουργικό κόστος (Operational Expenditure – OPEX)

Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει τις δαπάνες που απαιτούνται για τη συνεχή λειτουργία της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ζωής της. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται κυρίως το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, τα χημικά πρόσθετα όπου απαιτούνται, καθώς και τα αναλώσιμα υλικά που σχετίζονται άμεσα με τη λειτουργία του συστήματος (Molinos-Senante et al., 2010).

Οι δαπάνες συντήρησης και οι απαιτήσεις προσωπικού δεν εξετάζονται στην παρούσα ενότητα, καθώς αναλύονται ξεχωριστά στο Κεφάλαιο 6.4, προκειμένου να διαχωριστεί η καθαρά οικονομική αξιολόγηση από την αξιολόγηση λειτουργικής πολυπλοκότητας και συντηρησιμότητας.

Οικονομική αποδοτικότητα

Πέρα από το απόλυτο κόστος, σημαντικό κριτήριο αποτελεί και η οικονομική αποδοτικότητα κάθε τεχνολογίας. Η έννοια αυτή εκφράζει τη σχέση μεταξύ του συνολικού οικονομικού κόστους και της ποιότητας επεξεργασίας που επιτυγχάνει το σύστημα. Συνεπώς, ένα σύστημα με υψηλό αρχικό κόστος μπορεί να θεωρείται οικονομικά αποδοτικό εφόσον επιτυγχάνει σημαντικά καλύτερη ποιότητα εκροής ή μειωμένες λειτουργικές δαπάνες κατά τη διάρκεια ζωής του.

Στην παρούσα συγκριτική αξιολόγηση, η οικονομική αποδοτικότητα εξετάζεται ποιοτικά και βασίζεται στη συνδυασμένη αξιολόγηση του κόστους επένδυσης και του λειτουργικού κόστους των εξεταζόμενων τεχνολογιών. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη σύγκριση συστημάτων διαφορετικής πολυπλοκότητας και διαφορετικού επιπέδου τεχνολογικής ανάπτυξης, χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένα οικονομικά δεδομένα για κάθε επιμέρους εφαρμογή.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται αρχικά η συγκριτική αξιολόγηση του κόστους επένδυσης (CAPEX) των εξεταζόμενων τεχνολογιών και στη συνέχεια η συγκριτική αξιολόγηση του λειτουργικού κόστους (OPEX), προκειμένου να εξαχθούν συνολικά συμπεράσματα σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

6.3.2 Συγκριτική αξιολόγηση κόστους επένδυσης (CAPEX)

Το κόστος επένδυσης (Capital Expenditure – CAPEX) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά την επιλογή ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει τις δαπάνες που σχετίζονται με τον σχεδιασμό, την προμήθεια εξοπλισμού, την κατασκευή των έργων πολιτικού μηχανικού, την εγκατάσταση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και τη θέση της μονάδας σε λειτουργία. Η αρχική επένδυση επηρεάζεται άμεσα από την πολυπλοκότητα της τεχνολογίας, τον απαιτούμενο

εξοπλισμό, το επίπεδο αυτοματισμού και τις απαιτήσεις υποδομών κάθε συστήματος (Crites & Tchobanoglous, 1998).

Γενικά, τα απλούστερα αναερόβια συστήματα, όπως τα ABR και PABR, παρουσιάζουν τις χαμηλότερες απαιτήσεις αρχικής επένδυσης. Η κατασκευή τους βασίζεται κυρίως σε δεξαμενές και απλές υδραυλικές διατάξεις, χωρίς την ανάγκη πολύπλοκου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ή εκτεταμένων συστημάτων αυτοματισμού. Για τον λόγο αυτό αποτελούν ιδιαίτερα ελκυστικές λύσεις σε περιοχές όπου το διαθέσιμο επενδυτικό κεφάλαιο είναι περιορισμένο (Massoud et al., 2009).

Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα MBBR, FBBR, SAF, SAFF και IFAS, εμφανίζουν συνήθως μέτριο κόστος επένδυσης. Παρότι απαιτούν πρόσθετο εξοπλισμό, όπως φορείς βιοφίλμ και συστήματα αερισμού, το συνολικό κόστος παραμένει χαμηλότερο από αυτό των τεχνολογιών μεμβρανών. Παράλληλα, η υψηλή απόδοση επεξεργασίας που επιτυγχάνουν συχνά δικαιολογεί το πρόσθετο αρχικό κόστος εγκατάστασης (di Biase et al., 2019).

Τα συστήματα SBR και Oxidation Ditch καταλαμβάνουν ενδιάμεση θέση ως προς το κόστος επένδυσης. Η ανάγκη δεξαμενών αερισμού, συστημάτων αυτοματισμού και εξοπλισμού αερισμού αυξάνει το αρχικό κόστος σε σχέση με απλούστερες τεχνολογίες, χωρίς όμως να φθάνει στα επίπεδα των συστημάτων μεμβρανών (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR) και οι υβριδικές τεχνολογίες που βασίζονται σε μεμβράνες, όπως τα Hybrid SBR–MBR, AnMBR και A2O–MBR, παρουσιάζουν συνήθως το υψηλότερο κόστος επένδυσης μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών. Η ανάγκη προμήθειας και εγκατάστασης μεμβρανικών μονάδων, η αυξημένη πολυπλοκότητα του εξοπλισμού και οι υψηλότερες απαιτήσεις αυτοματισμού αυξάνουν σημαντικά το συνολικό κόστος κατασκευής (Guo et al., 2012).

Οι νεότερες τεχνολογίες MABR και τα MABR-Based Hybrid Systems παρουσιάζουν επίσης σχετικά αυξημένο αρχικό κόστος, λόγω της εξειδικευμένης τεχνολογίας μεμβρανών αερισμού που χρησιμοποιούν. Ωστόσο, η βελτιωμένη ενεργειακή συμπεριφορά και οι μειωμένες απαιτήσεις λειτουργίας που παρουσιάζουν μπορούν να αντισταθμίσουν μέρος του αυξημένου επενδυτικού κόστους κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

Συνολικά, η σύγκριση των τεχνολογιών δείχνει ότι η αυξανόμενη πολυπλοκότητα και το επίπεδο τεχνολογικής ανάπτυξης συνοδεύονται συνήθως από αυξημένο αρχικό κόστος

επένδυσης. Παρ' όλα αυτά, η επιλογή ενός συστήματος δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στο κόστος κατασκευής, αλλά να λαμβάνει υπόψη και την ποιότητα της εκροής, τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις ανάγκες λειτουργίας της εγκατάστασης.

Πίνακας 24 Συγκριτική κατάταξη των εξεταζόμενων τεχνολογιών ως προς το απαιτούμενο κόστος αρχικής επένδυσης (CAPEX).

Σύστημα	Κόστος επένδυσης (CAPEX)
ABR	Πολύ χαμηλό
PABR	Πολύ χαμηλό
AVFCW	Χαμηλό
RBC	Χαμηλό
SAF	Μέτριο
SAFF	Μέτριο
FBBR	Μέτριο
SBR	Μέτριο
MBBR	Μέτριο
IFAS	Μέτριο–Υψηλό
Oxidation Ditch	Μέτριο–Υψηλό
ABR + Aerobic Post-Treatment	Μέτριο
ABR + Biofilm Reactor	Μέτριο
MABR	Υψηλό
MABR-Based Hybrid Systems	Υψηλό
MBR	Πολύ υψηλό
Hybrid SBR–IFAS	Υψηλό
AnMBR	Πολύ υψηλό
Hybrid SBR–MBR	Πολύ υψηλό
A2O–MBR	Πολύ υψηλό

Σημείωση

Οι χαρακτηρισμοί του Πίνακα 6.7 εκφράζουν τη σχετική κατάταξη των τεχνολογιών ως προς το αρχικό επενδυτικό κόστος και βασίζονται στη σύνθεση στοιχείων της διεθνούς βιβλιογραφίας. Η πραγματική δαπάνη κατασκευής εξαρτάται από το μέγεθος της εγκατάστασης, τις τοπικές συνθήκες, τις διάφορες απαιτήσεις επεξεργασίας και τις τεχνικές προδιαγραφές κάθε εφαρμογής.

6.3.3 Συγκριτική αξιολόγηση λειτουργικού κόστους (OPEX)

Το λειτουργικό κόστος (Operational Expenditure – OPEX) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους αξιολόγησης των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, καθώς επηρεάζει άμεσα τη μακροχρόνια οικονομική βιωσιμότητα μιας εγκατάστασης. Σε αντίθεση με το κόστος επένδυσης, το οποίο πραγματοποιείται κατά την κατασκευή της μονάδας, το λειτουργικό κόστος επαναλαμβάνεται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος και μπορεί να αποτελέσει σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους ενός έργου (Molinos-Senante et al., 2010).

Στην παρούσα εργασία το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει κυρίως την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρήση χημικών ουσιών όπου απαιτούνται, τα αναλώσιμα λειτουργίας και τις περιοδικές αντικαταστάσεις υλικών που σχετίζονται άμεσα με τη διεργασία επεξεργασίας. Οι απαιτήσεις συντήρησης και προσωπικού εξετάζονται ξεχωριστά στο Κεφάλαιο 6.4.

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί συνήθως το σημαντικότερο μέρος του λειτουργικού κόστους στα αερόβια συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα συστήματα που βασίζονται σε εκτεταμένο αερισμό ή σε τεχνολογίες μεμβρανών εμφανίζουν γενικά αυξημένες λειτουργικές δαπάνες σε σχέση με απλούστερες τεχνολογίες βιοφίλμ ή αναερόβιες διεργασίες (Metcalf & Eddy, 2014).

Τα συστήματα **ABR**, **PABR** και **AVFCW** παρουσιάζουν συνήθως τα χαμηλότερα λειτουργικά κόστη μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών. Η περιορισμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και η μικρή ανάγκη χρήσης χημικών ή εξειδικευμένων αναλωσίμων συμβάλλουν στη διατήρηση χαμηλών λειτουργικών δαπανών κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης (Massoud et al., 2009).

Τα συστήματα **SBR**, **MBBR**, **FBBR**, **SAF**, **SAFF** και **IFAS** εμφανίζουν γενικά μέτριο λειτουργικό κόστος. Παρότι απαιτούν συνεχή παροχή ενέργειας για αερισμό και λειτουργία βοηθητικού εξοπλισμού, η απουσία ιδιαίτερα εξειδικευμένων αναλωσίμων και η σχετικά σταθερή λειτουργία τους συμβάλλουν στη διατήρηση του κόστους σε αποδεκτά επίπεδα (di Biase et al., 2019).

Τα συστήματα **MBR**, **Hybrid SBR–MBR**, **AnMBR** και **A2O–MBR** παρουσιάζουν συνήθως αυξημένο λειτουργικό κόστος λόγω της χρήσης μεμβρανών. Η περιοδική αντικατάσταση ή ο καθαρισμός των μεμβρανών, σε συνδυασμό με τις αυξημένες απαιτήσεις ενέργειας, οδηγούν σε υψηλότερες λειτουργικές δαπάνες σε σχέση με συμβατικές τεχνολογίες (Guo et al., 2012).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα **MABR** και **MABR-Based Hybrid Systems**, τα οποία παρά το σχετικά υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης εμφανίζουν μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις σε σύγκριση με άλλες προηγμένες τεχνολογίες. Ως αποτέλεσμα, μπορούν να επιτύχουν ευνοϊκότερο λειτουργικό κόστος κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για μελλοντικές εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων.

Συνολικά, η σύγκριση των εξεταζόμενων τεχνολογιών δείχνει ότι το λειτουργικό κόστος επηρεάζεται κυρίως από τις απαιτήσεις αερισμού, τη χρήση μεμβρανών και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αναερόβιες τεχνολογίες εμφανίζουν γενικά τα χαμηλότερα λειτουργικά κόστη, ενώ τα συστήματα μεμβρανών παρουσιάζουν τις υψηλότερες δαπάνες λειτουργίας. Οι τεχνολογίες βιοφίλμ και τα σύγχρονα υβριδικά συστήματα καταλαμβάνουν συνήθως ενδιάμεση θέση, προσφέροντας ισορροπία μεταξύ λειτουργικού κόστους και απόδοσης επεξεργασίας.

Πίνακας 25 Συγκριτική αξιολόγηση λειτουργικού κόστους (OPEX)

Σύστημα	Λειτουργικό κόστος (OPEX)
ABR	Πολύ χαμηλό
PABR	Πολύ χαμηλό
AVFCW	Πολύ χαμηλό
RBC	Χαμηλό
SAF	Μέτριο
SAFF	Μέτριο
FBBR	Μέτριο
SBR	Μέτριο
MBBR	Μέτριο
IFAS	Μέτριο
Oxidation Ditch	Υψηλό
ABR + Aerobic Post-Treatment	Μέτριο
ABR + Biofilm Reactor	Μέτριο
MABR	Χαμηλό
MABR-Based Hybrid Systems	Χαμηλό
MBR	Υψηλό
Hybrid SBR–IFAS	Μέτριο
AnMBR	Μέτριο–Υψηλό
Hybrid SBR–MBR	Υψηλό
A2O–MBR	Υψηλό

Σημείωση: Ο Πίνακας 6.8 προέκυψε από σύνθεση βιβλιογραφικών δεδομένων που αφορούν το λειτουργικό κόστος αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Η αξιολόγηση λαμβάνει υπόψη την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρήση χημικών, τις ανάγκες αναλωσίμων και τις απαιτήσεις λειτουργίας των επιμέρους τεχνολογιών. Η κατάταξη είναι ποιοτική και βασίζεται στη συγκριτική ανάλυση των Crites & Tchobanoglous (1998), Massoud et al. (2009), Molinos-Senante et al. (2010),

Hernández-Sancho et al. (2011), Muga & Mihelcic (2008), di Biase et al. (2019), Guo et al. (2012) και Saidulu et al. (2021).

6.3.4 Συνολική οικονομική αξιολόγηση

Η συνολική οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων τεχνολογιών προκύπτει από τη συνδυασμένη εξέταση του κόστους επένδυσης (CAPEX) και του λειτουργικού κόστους (OPEX). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ολοκληρωμένη αποτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας κάθε συστήματος, καθώς μία τεχνολογία με χαμηλό αρχικό κόστος ενδέχεται να παρουσιάζει αυξημένες λειτουργικές δαπάνες κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, ενώ αντίθετα μία τεχνολογία με υψηλότερο κόστος κατασκευής μπορεί να εμφανίζει χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και συνεπώς καλύτερη μακροχρόνια οικονομική συμπεριφορά (Molinos-Senante et al., 2010).

Η ανάλυση που προηγήθηκε έδειξε ότι τα συστήματα **ABR**, **PABR** και **AVFCW** παρουσιάζουν τα χαμηλότερα συνολικά οικονομικά βάρη, καθώς συνδυάζουν χαμηλό κόστος επένδυσης με ιδιαίτερα περιορισμένες λειτουργικές απαιτήσεις. Οι τεχνολογίες αυτές αποτελούν ελκυστικές λύσεις για μικρούς οικισμούς και αποκεντρωμένες εφαρμογές όπου το διαθέσιμο επενδυτικό κεφάλαιο είναι περιορισμένο. Ωστόσο, η οικονομική τους υπεροχή συχνά συνοδεύεται από χαμηλότερες επιδόσεις επεξεργασίας σε σχέση με πιο προηγμένες τεχνολογίες.

Τα συστήματα **SBR**, **MBBR**, **FBBR**, **SAF**, **SAFF** και **IFAS** καταλαμβάνουν ενδιάμεση θέση ως προς τη συνολική οικονομική αξιολόγηση. Παρουσιάζουν μέτριο κόστος επένδυσης και λειτουργίας, ενώ παράλληλα προσφέρουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας και αυξημένη λειτουργική αξιοπιστία. Για τον λόγο αυτό θεωρούνται συχνά από τις πλέον ισορροπημένες λύσεις για αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων (di Biase et al., 2019).

Οι τεχνολογίες **MBR**, **Hybrid SBR–MBR**, **AnMBR** και **A2O–MBR** εμφανίζουν γενικά το υψηλότερο συνολικό οικονομικό κόστος. Το αυξημένο κόστος επένδυσης, η ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού και οι απαιτήσεις λειτουργίας των μεμβρανών αυξάνουν σημαντικά τόσο το CAPEX όσο και το OPEX. Παρ' όλα αυτά, οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν εξαιρετικά υψηλή ποιότητα εκροής και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων λυμάτων, χαρακτηριστικά που συχνά δικαιολογούν το αυξημένο

οικονομικό κόστος σε εφαρμογές με αυστηρές περιβαλλοντικές απαιτήσεις (Guo et al., 2012).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα **MABR**, **MABR-Based Hybrid Systems** και **Hybrid SBR-IFAS**, τα οποία επιχειρούν να συνδυάσουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας με περιορισμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Παρότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι συχνά υψηλότερο από αυτό των συμβατικών τεχνολογιών, η βελτιωμένη ενεργειακή τους συμπεριφορά μπορεί να συμβάλει στη μείωση του συνολικού κόστους κύκλου ζωής της εγκατάστασης.

Συνολικά, η οικονομική αξιολόγηση δείχνει ότι η επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ επενδυτικού κόστους, λειτουργικών δαπανών και απαιτούμενης ποιότητας εκροής. Οι απλούστερες τεχνολογίες εμφανίζουν πλεονέκτημα ως προς το κόστος, ενώ οι πιο προηγμένες υπερτερούν ως προς την απόδοση επεξεργασίας και την περιβαλλοντική προστασία.

Πίνακας 26 Συνολική οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων

Σύστημα	CAPEX	OPEX	Οικονομική αποδοτικότητα
ABR	Πολύ χαμηλό	Πολύ χαμηλό	Υψηλή
PABR	Πολύ χαμηλό	Πολύ χαμηλό	Υψηλή
AVFCW	Χαμηλό	Πολύ χαμηλό	Υψηλή
RBC	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλή
SAF	Μέτριο	Μέτριο	Μέτρια
SAFF	Μέτριο	Μέτριο	Μέτρια
FBBR	Μέτριο	Μέτριο	Υψηλή
SBR	Μέτριο	Μέτριο	Υψηλή
MBBR	Μέτριο	Μέτριο	Πολύ υψηλή
IFAS	Μέτριο– Υψηλό	Μέτριο	Πολύ υψηλή
Oxidation Ditch	Μέτριο– Υψηλό	Υψηλό	Μέτρια
ABR + Aerobic Post-Treatment	Μέτριο	Μέτριο	Υψηλή
ABR + Biofilm Reactor	Μέτριο	Μέτριο	Υψηλή
MABR	Υψηλό	Χαμηλό	Πολύ υψηλή
MABR-Based Hybrid Systems	Υψηλό	Χαμηλό	Πολύ υψηλή
MBR	Πολύ υψηλό	Υψηλό	Υψηλή
Hybrid SBR–IFAS	Υψηλό	Μέτριο	Πολύ υψηλή
AnMBR	Πολύ υψηλό	Μέτριο– Υψηλό	Υψηλή
Hybrid SBR–MBR	Πολύ υψηλό	Υψηλό	Υψηλή
A2O–MBR	Πολύ υψηλό	Υψηλό	Υψηλή

Σημείωση

Ο Πίνακας 6.9 βασίζεται σε σύνθεση στοιχείων της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με το κόστος επένδυσης, το λειτουργικό κόστος και τη συνολική οικονομική απόδοση συστημάτων αποκεντρωμένης και προκατασκευασμένης επεξεργασίας λυμάτων (Crites & Tchobanoglous, 1998; Massoud et al., 2009; Molinos-Senante et al., 2010; Hernández-Sancho et al., 2011; Muga & Mihelcic, 2008; di Biase et al., 2019; Guo et al., 2012; Saidulu et al., 2021).

Συμπέρασμα

Η συνολική οικονομική αξιολόγηση δείχνει ότι οι τεχνολογίες βιοφίλμ και τα σύγχρονα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν την καλύτερη ισορροπία μεταξύ κόστους και απόδοσης επεξεργασίας. Τα MBBR, IFAS, MABR και Hybrid SBR-IFAS εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή οικονομική αποδοτικότητα, ενώ οι τεχνολογίες μεμβρανών, παρά το αυξημένο οικονομικό κόστος, παραμένουν ελκυστικές σε εφαρμογές όπου απαιτείται πολύ υψηλή ποιότητα εκροής. Αντίθετα, τα ABR και PABR αποτελούν τις πλέον οικονομικές λύσεις, κυρίως για μικρές αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις με περιορισμένους οικονομικούς πόρους.

6.4 Σύγκριση απαιτήσεων συντήρησης και λειτουργίας

Η αποτελεσματική λειτουργία ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνική του απόδοση ή την οικονομική του βιωσιμότητα, αλλά και από τις απαιτήσεις συντήρησης και λειτουργικής διαχείρισης που παρουσιάζει κατά τη διάρκεια ζωής του. Ιδιαίτερα στις αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις και στους μικρούς οικισμούς, όπου συχνά δεν υπάρχει μόνιμο εξειδικευμένο προσωπικό, η απλότητα λειτουργίας και η περιορισμένη ανάγκη συντήρησης αποτελούν κρίσιμα κριτήρια επιλογής τεχνολογίας

Οι απαιτήσεις συντήρησης σχετίζονται κυρίως με τον αριθμό και την πολυπλοκότητα του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, τη συχνότητα επιθεωρήσεων, τον καθαρισμό επιμέρους μονάδων, την αντικατάσταση εξαρτημάτων και την ανάγκη παρακολούθησης κρίσιμων λειτουργικών παραμέτρων. Παράλληλα, η λειτουργική πολυπλοκότητα επηρεάζεται από το επίπεδο αυτοματισμού, την ανάγκη συνεχούς ελέγχου της διεργασίας και τον βαθμό εξειδίκευσης που απαιτείται από το προσωπικό λειτουργίας

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων ως προς τις απαιτήσεις συντήρησης και λειτουργίας, με στόχο την ανάδειξη των τεχνολογιών που παρουσιάζουν αυξημένη λειτουργική ευκολία και των τεχνολογιών που απαιτούν υψηλότερο επίπεδο τεχνικής υποστήριξης.

6.4.1 Κριτήρια αξιολόγησης απαιτήσεων συντήρησης και λειτουργίας

Η αξιολόγηση των απαιτήσεων συντήρησης και λειτουργίας αποτελεί βασικό κριτήριο επιλογής ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα σε αποκεντρωμένες εφαρμογές και μικρούς οικισμούς όπου η διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού είναι συχνά περιορισμένη. Ένα σύστημα με υψηλή απόδοση επεξεργασίας μπορεί να μην αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή εάν απαιτεί συχνές επεμβάσεις, εξειδικευμένη τεχνική υποστήριξη ή αυξημένη παρακολούθηση της λειτουργίας του (USEPA, 2002; Tchobanoglous et al., 2004).

Οι απαιτήσεις συντήρησης σχετίζονται με τη συχνότητα επιθεωρήσεων, τον καθαρισμό του εξοπλισμού, την αντικατάσταση αναλωσίμων ή εξαρτημάτων και τη διατήρηση της ορθής λειτουργίας των επιμέρους μονάδων της εγκατάστασης. Αντίστοιχα, οι απαιτήσεις λειτουργίας αφορούν την πολυπλοκότητα της διεργασίας, την ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης, τον βαθμό αυτοματισμού και το επίπεδο εξειδίκευσης που απαιτείται από το προσωπικό λειτουργίας (Judd, 2011).

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων τεχνολογιών χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

Απαιτήσεις συντήρησης

Το κριτήριο αυτό αξιολογεί τη συχνότητα και την πολυπλοκότητα των εργασιών συντήρησης που απαιτούνται για τη διατήρηση της αποδοτικής λειτουργίας του συστήματος. Συστήματα με περιορισμένο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, όπως τα ABR και PABR, εμφανίζουν συνήθως χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Αντίθετα, τεχνολογίες μεμβρανών, όπως τα MBR και A2O-MBR, απαιτούν τακτικούς ελέγχους, καθαρισμούς και περιοδική αντικατάσταση μεμβρανών (Judd, 2011).

Πολυπλοκότητα λειτουργίας

Η πολυπλοκότητα λειτουργίας σχετίζεται με τον αριθμό των διεργασιών που πρέπει να ελέγχονται, την ανάγκη ρύθμισης παραμέτρων λειτουργίας και τον βαθμό αυτοματισμού του συστήματος. Τα απλά αναερόβια συστήματα και αρκετές τεχνολογίες βιοφίλμ

χαρακτηρίζονται από σχετικά απλή λειτουργία, ενώ τα συστήματα μεμβρανών και ορισμένα σύνθετα υβριδικά συστήματα απαιτούν αυξημένο έλεγχο και παρακολούθηση (USEPA, 1999).

Απαιτήσεις προσωπικού

Το κριτήριο αυτό εξετάζει το επίπεδο εξειδίκευσης και τη συχνότητα παρουσίας προσωπικού που απαιτείται για την ομαλή λειτουργία της εγκατάστασης. Οι αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας επιδιώκεται να λειτουργούν με περιορισμένες απαιτήσεις ανθρώπινης παρέμβασης, γεγονός που ευνοεί απλούστερες τεχνολογίες με υψηλό βαθμό λειτουργικής σταθερότητας (Tchobanoglous et al., 2004).

Λειτουργική αξιοπιστία

Η λειτουργική αξιοπιστία εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί σταθερή απόδοση επεξεργασίας υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας, χωρίς συχνές βλάβες ή ανάγκη διορθωτικών παρεμβάσεων. Η αξιοπιστία επηρεάζεται από την πολυπλοκότητα του εξοπλισμού, τον αριθμό των κρίσιμων μηχανικών μερών και την ευαισθησία της διεργασίας σε μεταβολές φορτίου ή περιβαλλοντικών συνθηκών (Ødegaard, 2006).

Βαθμός αυτοματισμού και παρακολούθησης

Η χρήση αυτοματισμών μπορεί να διευκολύνει σημαντικά τη λειτουργία μιας εγκατάστασης, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου δεν υπάρχει μόνιμο προσωπικό. Ωστόσο, η αυξημένη αυτοματοποίηση συνοδεύεται συχνά από μεγαλύτερη τεχνική πολυπλοκότητα και ανάγκη εξειδικευμένης τεχνικής υποστήριξης. Για τον λόγο αυτό, ο βαθμός αυτοματισμού εξετάζεται ως ξεχωριστό κριτήριο κατά την αξιολόγηση των τεχνολογιών (Syron & Casey, 2008).

Συνολικά, η αξιολόγηση των απαιτήσεων συντήρησης και λειτουργίας επιτρέπει την εκτίμηση της πρακτικής εφαρμοσιμότητας κάθε τεχνολογίας πέρα από τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά της. Ιδιαίτερα για εφαρμογές μικρών οικισμών, η απλότητα λειτουργίας και η περιορισμένη ανάγκη συντήρησης αποτελούν συχνά εξίσου σημαντικά κριτήρια με την απόδοση επεξεργασίας και το οικονομικό κόστος.

6.4.2 Συγκριτική αξιολόγηση απαιτήσεων συντήρησης

Οι απαιτήσεις συντήρησης διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων, καθώς εξαρτώνται από τον βαθμό μηχανολογικής πολυπλοκότητας, την ύπαρξη κινούμενων μερών, τη χρήση μεμβρανών, την ανάγκη καθαρισμού επιμέρους μονάδων και τη συχνότητα επιθεώρησης του συστήματος. Στις αποκεντρωμένες εφαρμογές, όπου συχνά δεν υπάρχει συνεχής παρουσία εξειδικευμένου προσωπικού, η επιλογή τεχνολογιών με χαμηλές και προβλέψιμες απαιτήσεις συντήρησης αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα (USEPA, 2002).

Τα απλούστερα αναερόβια και παθητικά συστήματα, όπως τα **ABR** και **PABR**, παρουσιάζουν γενικά τις χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης. Η απουσία συστημάτων εντατικού αερισμού, μεμβρανών και σύνθετων μηχανικών διατάξεων περιορίζει τις ανάγκες τακτικών επεμβάσεων. Ωστόσο, απαιτείται περιοδικός έλεγχος της συσσώρευσης ιλύος, της υδραυλικής ροής και της πιθανής εμφάνισης αποφράξεων, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερή λειτουργία του συστήματος (Tchobanoglous et al., 2004).

Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα **MBBR**, **FBBR**, **SAF**, **SAFF**, **IFAS** και **MABR**, εμφανίζουν μέτριες απαιτήσεις συντήρησης. Η ύπαρξη φορέων βιοφίλμ ή σταθερών επιφανειών ανάπτυξης μικροοργανισμών αυξάνει τη λειτουργική σταθερότητα, αλλά απαιτεί τακτικό έλεγχο της ομοιόμορφης κατανομής του αέρα, της ανάδευσης και της πιθανής συσσώρευσης βιομάζας. Στα MBBR και IFAS, η σωστή λειτουργία των φορέων και η αποφυγή υπερβολικής ανάπτυξης βιοφίλμ είναι κρίσιμα στοιχεία για τη διατήρηση της απόδοσης (Ødegaard, 2006).

Τα **RBC** απαιτούν συντήρηση των περιστρεφόμενων μηχανικών μερών, των αξόνων, των εδράνων και του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Παρότι η λειτουργία τους είναι σχετικά απλή και οι ενεργειακές απαιτήσεις χαμηλές, η παρουσία μηχανικά κινούμενων δίσκων αυξάνει την ανάγκη τακτικής επιθεώρησης σε σχέση με πιο παθητικά συστήματα (Cabije et al., 2009).

Τα συστήματα **SBR** και **Oxidation Ditch** απαιτούν συντήρηση του εξοπλισμού αερισμού, των αντλιών, των βαλβίδων και των αυτοματισμών που ελέγχουν τους κύκλους λειτουργίας ή τη συνεχή ανάδευση. Στα SBR, η αξιοπιστία του αυτοματισμού είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η επεξεργασία βασίζεται στη σωστή διαδοχή των φάσεων πλήρωσης, αντίδρασης, καθίζησης και εκκένωσης. Αντίστοιχα, στα Oxidation Ditch, η

συνεχής λειτουργία του εξοπλισμού αερισμού και ανάδευσης αυξάνει τις απαιτήσεις τακτικής παρακολούθησης (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι τεχνολογίες μεμβρανών, όπως τα **MBR**, **AnMBR**, **Hybrid SBR–MBR** και **A2O–MBR**, παρουσιάζουν τις υψηλότερες απαιτήσεις συντήρησης. Το βασικότερο ζήτημα είναι το fouling των μεμβρανών, δηλαδή η συσσώρευση οργανικών, ανόργανων και βιολογικών επικαθίσεων στην επιφάνεια ή στους πόρους των μεμβρανών. Το φαινόμενο αυτό απαιτεί τακτικό έλεγχο, φυσικό ή χημικό καθαρισμό, backwashing και περιοδική αντικατάσταση μεμβρανικών στοιχείων. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα μεμβρανών απαιτούν υψηλότερο επίπεδο τεχνικής υποστήριξης σε σχέση με τις απλούστερες τεχνολογίες (Judd, 2011).

Τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν διαφοροποιημένες απαιτήσεις συντήρησης ανάλογα με τις τεχνολογίες που συνδυάζουν. Τα **Hybrid SBR–IFAS** και **MABR-Based Hybrid Systems** εμφανίζουν αυξημένες απαιτήσεις σε σχέση με απλά συστήματα βιοφίλμ, αλλά χαμηλότερες από σύνθετα μεμβρανικά συστήματα. Αντίθετα, τα υβριδικά συστήματα που περιλαμβάνουν μεμβρανική διήθηση, όπως τα **Hybrid SBR–MBR** και **A2O–MBR**, απαιτούν συχνότερη παρακολούθηση και εξειδικευμένη συντήρηση λόγω της παρουσίας μεμβρανών (Syron & Casey, 2008; Judd, 2011).

Πίνακας 27 Συγκριτική αξιολόγηση απαιτήσεων συντήρησης

Σύστημα	Απαιτήσεις συντήρησης
ABR	Πολύ χαμηλές
PABR	Πολύ χαμηλές
AVFCW	Χαμηλές
RBC	Μέτριες
SAF	Μέτριες
SAFF	Μέτριες
FBBR	Μέτριες
SBR	Μέτριες
MBBR	Μέτριες
IFAS	Μέτριες–Υψηλές
Oxidation Ditch	Μέτριες–Υψηλές
ABR + Aerobic Post-Treatment	Μέτριες
ABR + Biofilm Reactor	Μέτριες
MABR	Μέτριες–Υψηλές
MABR-Based Hybrid Systems	Μέτριες–Υψηλές
MBR	Υψηλές
Hybrid SBR–IFAS	Μέτριες–Υψηλές
AnMBR	Υψηλές
Hybrid SBR–MBR	Υψηλές
A2O–MBR	Υψηλές

Σημείωση: Η αξιολόγηση του πίνακα είναι ποιοτική και βασίζεται στη σχετική σύγκριση των τεχνολογιών ως προς τη συχνότητα επιθεωρήσεων, την ανάγκη καθαρισμού, την ύπαρξη κινούμενων μερών, τη χρήση μεμβρανών και τον βαθμό εξειδικευμένης τεχνικής υποστήριξης.

Συμπέρασμα

Από τη συγκριτική αξιολόγηση προκύπτει ότι τα απλούστερα αναερόβια και παθητικά συστήματα εμφανίζουν τις χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης, γεγονός που τα καθιστά

κατάλληλα για εφαρμογές με περιορισμένη τεχνική υποστήριξη. Τα συστήματα βιοφίλμ παρουσιάζουν ισορροπημένη συμπεριφορά, καθώς προσφέρουν υψηλή λειτουργική σταθερότητα με μέτριες ανάγκες συντήρησης. Αντίθετα, οι τεχνολογίες μεμβρανών και τα σύνθετα υβριδικά συστήματα απαιτούν αυξημένη παρακολούθηση και εξειδικευμένες εργασίες συντήρησης, κυρίως λόγω του κινδύνου έμφραξης των μεμβρανών και της πολυπλοκότητας του εξοπλισμού.

6.4.3 Συγκριτική αξιολόγηση λειτουργικών απαιτήσεων

Πέρα από τις απαιτήσεις συντήρησης, ιδιαίτερη σημασία για την επιλογή μιας τεχνολογίας επεξεργασίας λυμάτων έχει η ευκολία λειτουργίας της εγκατάστασης. Η λειτουργική διαχείριση περιλαμβάνει την καθημερινή παρακολούθηση της διεργασίας, τον έλεγχο των κρίσιμων παραμέτρων λειτουργίας, τη ρύθμιση του εξοπλισμού, την αντιμετώπιση πιθανών βλαβών και τη διασφάλιση της σταθερής ποιότητας της εκροής. Οι απαιτήσεις αυτές διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών και επηρεάζουν άμεσα την καταλληλότητά τους για εφαρμογή σε μικρούς οικισμούς και αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων (USEPA, 1999).

Τα συστήματα **ABR**, **PABR** και **AVFCW** χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλή λειτουργική πολυπλοκότητα. Η λειτουργία τους βασίζεται κυρίως σε φυσικές ή βιολογικές διεργασίες χωρίς την ανάγκη συνεχούς ρύθμισης ή πολύπλοκων αυτοματισμών. Ως αποτέλεσμα, μπορούν να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα με περιορισμένες απαιτήσεις παρακολούθησης και χωρίς μόνιμη παρουσία εξειδικευμένου προσωπικού (Tchobanoglous et al., 2004).

Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα **MBBR**, **FBBR**, **SAF**, **SAFF** και **IFAS**, εμφανίζουν γενικά χαμηλή έως μέτρια λειτουργική πολυπλοκότητα. Παρότι απαιτείται παρακολούθηση του αερισμού, της βιομάζας και των υδραυλικών συνθηκών λειτουργίας, τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από αυξημένη σταθερότητα και αντοχή σε διακυμάνσεις παροχής και οργανικού φορτίου. Η ιδιότητα αυτή μειώνει σημαντικά την ανάγκη συνεχών παρεμβάσεων από το προσωπικό λειτουργίας (Ødegaard, 2006; Rusten et al., 2006).

Τα **SBR** παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμό λειτουργικής πολυπλοκότητας λόγω της κυκλικής λειτουργίας τους. Η επιτυχής λειτουργία τους εξαρτάται από τον σωστό

συγχρονισμό των φάσεων πλήρωσης, αερισμού, καθίζησης και εκκένωσης, γεγονός που απαιτεί αξιόπιστα συστήματα αυτοματισμού και περιοδικό έλεγχο της λειτουργίας τους (USEPA, 1999).

Τα **Oxidation Ditch** χαρακτηρίζονται από σχετικά απλή αλλά συνεχή λειτουργία. Παρότι απαιτούν παρακολούθηση του αερισμού και της ανακυκλοφορίας, η διαδικασία είναι σταθερή και καλά τεκμηριωμένη, γεγονός που διευκολύνει τη διαχείριση της εγκατάστασης σε σύγκριση με πιο σύνθετες τεχνολογίες.

Οι τεχνολογίες μεμβρανών (**MBR, AnMBR, Hybrid SBR–MBR, A2O–MBR**) παρουσιάζουν τις υψηλότερες απαιτήσεις λειτουργικής διαχείρισης. Η παρακολούθηση της διαμεμβρανικής πίεσης, η πρόληψη και αντιμετώπιση του fouling, η διαχείριση των κύκλων καθαρισμού και η ανάγκη διατήρησης σταθερών λειτουργικών συνθηκών απαιτούν υψηλό επίπεδο τεχνικής κατάρτισης και συστηματική παρακολούθηση της εγκατάστασης (Judd, 2011).

Τα **MABR** και τα **MABR-Based Hybrid Systems** καταλαμβάνουν ενδιάμεση θέση ως προς τις λειτουργικές απαιτήσεις. Η βελτιωμένη μεταφορά οξυγόνου και η υψηλή σταθερότητα της βιομάζας μειώνουν τις ανάγκες καθημερινών ρυθμίσεων, ωστόσο η παρουσία εξειδικευμένων μεμβρανικών στοιχείων απαιτεί τεχνική γνώση και περιοδικό έλεγχο της εγκατάστασης (Syron & Casey, 2008).

Συνολικά, οι απλούστερες αναερόβιες και φυσικές τεχνολογίες παρουσιάζουν τις χαμηλότερες απαιτήσεις λειτουργίας, ενώ οι τεχνολογίες μεμβρανών και ορισμένα σύνθετα υβριδικά συστήματα απαιτούν αυξημένο επίπεδο τεχνικής υποστήριξης και εξειδίκευσης προσωπικού.

Πίνακας 28 Συγκριτική αξιολόγηση λειτουργικών απαιτήσεων

Σύστημα	Λειτουργικές απαιτήσεις
ABR	Πολύ χαμηλές
PABR	Πολύ χαμηλές
AVFCW	Πολύ χαμηλές
RBC	Χαμηλές
SAF	Χαμηλές
SAFF	Χαμηλές
FBBR	Χαμηλές
MBBR	Χαμηλές
SBR	Μέτριες
IFAS	Μέτριες
Oxidation Ditch	Μέτριες
ABR + Aerobic Post-Treatment	Μέτριες
ABR + Biofilm Reactor	Μέτριες
MABR	Μέτριες
MABR-Based Hybrid Systems	Μέτριες
Hybrid SBR–IFAS	Μέτριες–Υψηλές
MBR	Υψηλές
AnMBR	Υψηλές
Hybrid SBR–MBR	Υψηλές
A2O–MBR	Πολύ υψηλές

Η κατάταξη του Πίνακα 6.11 βασίζεται στη σχετική πολυπλοκότητα λειτουργίας των τεχνολογιών, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις παρακολούθησης, το επίπεδο αυτοματισμού, την ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού και την ευαισθησία των διεργασιών σε λειτουργικές μεταβολές.

6.4.4 Συνολική αξιολόγηση συντήρησης και λειτουργίας

Η συνολική αξιολόγηση των απαιτήσεων συντήρησης και λειτουργίας προκύπτει από τη συνδυασμένη εξέταση των αναγκών συντήρησης του εξοπλισμού, της πολυπλοκότητας της λειτουργίας, των απαιτήσεων παρακολούθησης και του βαθμού εξειδίκευσης που απαιτείται από το προσωπικό λειτουργίας. Τα κριτήρια αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και μικρούς οικισμούς, όπου η διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού και τεχνικής υποστήριξης είναι συχνά περιορισμένη (USEPA, 2002).

Η ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων έδειξε ότι τα αναερόβια συστήματα, όπως τα **ABR** και **PABR**, καθώς και τα φυσικά συστήματα όπως τα **AVFCW**, εμφανίζουν τις χαμηλότερες συνολικές απαιτήσεις συντήρησης και λειτουργίας. Η περιορισμένη χρήση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, η απλή λειτουργία και η υψηλή αντοχή σε διακυμάνσεις φορτίου καθιστούν τις τεχνολογίες αυτές ιδιαίτερα κατάλληλες για μικρές κοινότητες και απομακρυσμένες περιοχές (Tchobanoglous et al., 2004).

Τα συστήματα βιοφίλμ (**MBBR**, **FBBR**, **SAF**, **SAFF**, **IFAS**) παρουσιάζουν γενικά καλή ισορροπία μεταξύ απόδοσης επεξεργασίας και απαιτήσεων διαχείρισης. Παρότι απαιτούν περιοδικό έλεγχο του αερισμού και της ανάπτυξης του βιοφίλμ, χαρακτηρίζονται από υψηλή λειτουργική σταθερότητα και περιορισμένες ανάγκες καθημερινών παρεμβάσεων. Για τον λόγο αυτό θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων (Ødegaard, 2006).

Τα **SBR** και **Oxidation Ditch** απαιτούν αυξημένο βαθμό παρακολούθησης λόγω της λειτουργίας του εξοπλισμού αερισμού και των αυτοματισμών που ελέγχουν τη διεργασία. Ωστόσο, πρόκειται για τεχνολογίες με μακρά εφαρμογή και σημαντική λειτουργική εμπειρία, γεγονός που διευκολύνει τη διαχείρισή τους όταν υπάρχει κατάλληλη τεχνική υποστήριξη.

Οι τεχνολογίες μεμβρανών (**MBR**, **AnMBR**, **Hybrid SBR–MBR**, **A2O–MBR**) παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης και λειτουργίας. Η ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης των μεμβρανών, η διαχείριση του *fouling*, οι διαδικασίες καθαρισμού και η αυξημένη πολυπλοκότητα του εξοπλισμού απαιτούν υψηλό επίπεδο τεχνικής κατάρτισης και συστηματική τεχνική υποστήριξη (Judd, 2011).

Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν τα **MABR** και τα **MABR-Based Hybrid Systems**, τα οποία συνδυάζουν σχετικά περιορισμένες απαιτήσεις λειτουργίας με υψηλή απόδοση επεξεργασίας. Παρότι η τεχνολογία τους είναι πιο σύνθετη σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα βιοφίλμ, οι ανάγκες παρακολούθησης παραμένουν χαμηλότερες από εκείνες των κλασικών συστημάτων μεμβρανών (Syron & Casey, 2008).

Συνολικά, η αξιολόγηση δείχνει ότι οι απλούστερες τεχνολογίες εμφανίζουν σημαντικό πλεονέκτημα ως προς τη διαχειρισσιμότητα και τη λειτουργική ευκολία, ενώ οι πλέον προηγμένες τεχνολογίες απαιτούν αυξημένη τεχνική υποστήριξη αλλά προσφέρουν υψηλότερες επιδόσεις επεξεργασίας και ποιότητας εκροής.

Πίνακας 29 Συνολική αξιολόγηση συντήρησης και λειτουργίας

Σύστημα	Απαιτήσεις συντήρησης	Λειτουργικές απαιτήσεις	Συνολική ευκολία διαχείρισης
ABR	Πολύ χαμηλές	Πολύ χαμηλές	Πολύ υψηλή
PABR	Πολύ χαμηλές	Πολύ χαμηλές	Πολύ υψηλή
AVFCW	Χαμηλές	Πολύ χαμηλές	Πολύ υψηλή
RBC	Μέτριες	Χαμηλές	Υψηλή
SAF	Μέτριες	Χαμηλές	Υψηλή
SAFF	Μέτριες	Χαμηλές	Υψηλή
FBBR	Μέτριες	Χαμηλές	Υψηλή
MBBR	Μέτριες	Χαμηλές	Υψηλή
SBR	Μέτριες	Μέτριες	Μέτρια–Υψηλή
IFAS	Μέτριες–Υψηλές	Μέτριες	Μέτρια–Υψηλή
Oxidation Ditch	Μέτριες–Υψηλές	Μέτριες	Μέτρια
ABR + Aerobic Post-Treatment	Μέτριες	Μέτριες	Μέτρια–Υψηλή
ABR + Biofilm Reactor	Μέτριες	Μέτριες	Μέτρια–Υψηλή
MABR	Μέτριες–Υψηλές	Μέτριες	Υψηλή

Σύστημα	Απαιτήσεις συντήρησης	Λειτουργικές απαιτήσεις	Συνολική ευκολία διαχείρισης
MABR-Based Hybrid Systems	Μέτριες–Υψηλές	Μέτριες	Υψηλή
Hybrid SBR–IFAS	Μέτριες–Υψηλές	Μέτριες–Υψηλές	Μέτρια
MBR	Υψηλές	Υψηλές	Χαμηλή
AnMBR	Υψηλές	Υψηλές	Χαμηλή
Hybrid SBR–MBR	Υψηλές	Υψηλές	Χαμηλή
A2O–MBR	Υψηλές	Πολύ υψηλές	Πολύ χαμηλή

Σημείωση

Ο Πίνακας 6.12 βασίζεται σε σύνθεση βιβλιογραφικών δεδομένων σχετικά με τις απαιτήσεις συντήρησης, τη λειτουργική πολυπλοκότητα, τον βαθμό αυτοματισμού, την ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού και τη συνολική διαχειρισσιμότητα των τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων. Η αξιολόγηση είναι ποιοτική και αποτυπώνει τη σχετική θέση κάθε τεχνολογίας σε σύγκριση με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες λύσεις.

Συμπεράσματα

Η συνολική αξιολόγηση δείχνει ότι τα **ABR, PABR και AVFCW** αποτελούν τις πλέον απλές και εύκολα διαχειρίσιμες τεχνολογίες, γεγονός που εξηγεί τη συχνή εφαρμογή τους σε μικρούς οικισμούς και αναπτυσσόμενες περιοχές. Τα συστήματα βιοφίλμ (**MBBR, IFAS, SAF, SAFF, FBBR**) προσφέρουν εξαιρετική ισορροπία μεταξύ λειτουργικής ευκολίας και απόδοσης επεξεργασίας, ενώ οι τεχνολογίες **MABR** και τα αντίστοιχα υβριδικά συστήματα εμφανίζονται ως ιδιαίτερα ελπιδοφόρες λύσεις για μελλοντικές εφαρμογές.

Αντίθετα, τα συστήματα μεμβρανών (**MBR, AnMBR, Hybrid SBR–MBR και A2O–MBR**) παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης και λειτουργικής διαχείρισης. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους ως προς την ποιότητα εκροής, απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό και αυξημένο βαθμό τεχνικής υποστήριξης, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή τους σε ορισμένες αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις.

6.5 Καταλληλότητα συστημάτων ανά εφαρμογή

Η επιλογή ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνική του απόδοση, το ενεργειακό του αποτύπωμα ή το οικονομικό του κόστος. Στην πράξη, η καταλληλότητα μιας τεχνολογίας καθορίζεται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εφαρμογής στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί, όπως το μέγεθος του εξυπηρετούμενου πληθυσμού, η διαθεσιμότητα έκτασης, η δυνατότητα τεχνικής υποστήριξης, οι απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης της εκροής και οι τοπικές κοινωνικοοικονομικές συνθήκες

Οι αποκεντρωμένες εφαρμογές επεξεργασίας λυμάτων παρουσιάζουν σημαντική ποικιλομορφία, καθώς περιλαμβάνουν μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις, απομακρυσμένες κοινότητες, αγροτικές περιοχές και εγκαταστάσεις όπου απαιτείται επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού. Ως αποτέλεσμα, δεν υπάρχει μία τεχνολογία που να θεωρείται βέλτιστη για όλες τις περιπτώσεις. Αντίθετα, η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος προϋποθέτει την αξιολόγηση τεχνικών, οικονομικών, ενεργειακών και λειτουργικών κριτηρίων σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής

Με βάση τα αποτελέσματα των προηγούμενων ενοτήτων, στις ακόλουθες παραγράφους πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση της καταλληλότητας των εξεταζόμενων τεχνολογιών για διαφορετικά πεδία εφαρμογής, με στόχο την ανάδειξη των πλέον κατάλληλων λύσεων ανά περίπτωση χρήσης.

6.5.1 Μικροί οικισμοί και αγροτικές περιοχές

Οι μικροί οικισμοί και οι αγροτικές περιοχές αποτελούν μία από τις συνηθέστερες εφαρμογές αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Στις περιπτώσεις αυτές, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας επηρεάζεται από παράγοντες όπως το περιορισμένο επενδυτικό κεφάλαιο, η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού, οι μικρές και συχνά μεταβαλλόμενες παροχές λυμάτων, καθώς και η ανάγκη για απλή και αξιόπιστη λειτουργία της εγκατάστασης (Tchobanoglous et al., 2004).

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται σε μικρούς οικισμούς θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης, ανθεκτικότητα σε διακυμάνσεις φορτίου και

δυνατότητα λειτουργίας χωρίς συνεχή παρουσία εξειδικευμένου προσωπικού (Massoud et al., 2009; USEPA, 2002).

Με βάση τα αποτελέσματα των προηγούμενων ενοτήτων, τα συστήματα **ABR**, **PABR** και **AVFCW** εμφανίζονται ως ιδιαίτερα κατάλληλες επιλογές για μικρούς οικισμούς και αγροτικές περιοχές. Οι τεχνολογίες αυτές παρουσιάζουν χαμηλό κόστος επένδυσης, ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις και περιορισμένες ανάγκες συντήρησης, ενώ παράλληλα μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά ακόμη και σε περιοχές με περιορισμένες τεχνικές υποδομές. Τα χαρακτηριστικά αυτά εξηγούν τη συχνή εφαρμογή τους σε αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης λυμάτων και σε αναπτυσσόμενες περιοχές (Massoud et al., 2009).

Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα **MBBR**, **IFAS**, **SAF**, **SAFF** και **FBBR**, αποτελούν επίσης ιδιαίτερα ελκυστικές λύσεις για μικρές κοινότητες. Η υψηλή αντοχή τους σε μεταβολές παροχής και οργανικού φορτίου, η καλή ποιότητα εκροής και οι σχετικά περιορισμένες απαιτήσεις λειτουργίας τα καθιστούν κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλότερη απόδοση επεξεργασίας χωρίς σημαντική αύξηση του λειτουργικού κόστους (Ødegaard, 2006; Rusten et al., 2006).

Τα **SBR** χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως σε μικρούς οικισμούς, κυρίως λόγω της δυνατότητας επίτευξης υψηλών αποδόσεων επεξεργασίας σε σχετικά μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης. Ωστόσο, η λειτουργία τους βασίζεται σε αυτοματισμούς και απαιτεί μεγαλύτερη παρακολούθηση σε σχέση με τα απλούστερα συστήματα βιοφίλμ ή τις αναερόβιες τεχνολογίες (USEPA, 1999).

Αντίθετα, οι τεχνολογίες μεμβρανών (**MBR**, **Hybrid SBR–MBR**, **A2O–MBR**) θεωρούνται συνήθως λιγότερο κατάλληλες για μικρούς οικισμούς, ιδιαίτερα όταν υπάρχει περιορισμένη τεχνική υποστήριξη ή περιορισμένοι οικονομικοί πόροι. Παρά την εξαιρετική ποιότητα εκροής που επιτυγχάνουν, το υψηλό κόστος επένδυσης, οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και οι ανάγκες συντήρησης περιορίζουν τη χρήση τους κυρίως σε περιπτώσεις όπου απαιτείται προηγμένη επεξεργασία ή επαναχρησιμοποίηση της εκροής (Judd, 2011).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα **MABR** και τα **MABR-Based Hybrid Systems**, τα οποία συνδυάζουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας, χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τα συμβατικά αερόβια συστήματα και σχετικά περιορισμένες

απαιτήσεις λειτουργίας. Παρότι η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ευρύτερης διάδοσης, τα συστήματα αυτά θεωρούνται ιδιαίτερα υποσχόμενες λύσεις για μελλοντικές εφαρμογές σε μικρούς οικισμούς (Syron & Casey, 2008).

6.5.2 Τουριστικές μονάδες και ξενοδοχεία

Οι τουριστικές μονάδες και οι ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία εφαρμογών επεξεργασίας λυμάτων, καθώς χαρακτηρίζονται από έντονες εποχικές διακυμάνσεις της παροχής και του οργανικού φορτίου. Σε πολλές περιπτώσεις, η παραγωγή λυμάτων αυξάνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της τουριστικής περιόδου, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρούνται χαμηλά φορτία ή ακόμη και προσωρινή παύση λειτουργίας. Η ιδιαιτερότητα αυτή απαιτεί τεχνολογίες που μπορούν να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά σε μεταβολές της παροχής χωρίς σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης επεξεργασίας (Tchobanoglous et al., 2004).

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό των τουριστικών εγκαταστάσεων είναι η αυξημένη ανάγκη για επαναχρησιμοποίηση της εκροής. Σε πολλές περιοχές με έντονη τουριστική δραστηριότητα, ιδιαίτερα στη Μεσόγειο, το επεξεργασμένο νερό χρησιμοποιείται για άρδευση κήπων, χώρων πρασίνου, γηπέδων ή άλλων μη πόσιμων χρήσεων. Ως αποτέλεσμα, η ποιότητα της εκροής αποτελεί βασικό κριτήριο επιλογής τεχνολογίας (Libralato et al., 2012).

Τα συστήματα **MBBR**, **IFAS** και **Hybrid SBR–IFAS** θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλα για ξενοδοχειακές εφαρμογές. Οι τεχνολογίες αυτές παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στις διακυμάνσεις φορτίου, καλή ποιότητα εκροής και σχετικά περιορισμένες απαιτήσεις λειτουργίας. Παράλληλα, η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλά οργανικά φορτία και η προσαρμοστικότητα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες τις καθιστούν ελκυστικές για εποχιακές τουριστικές εγκαταστάσεις (Ødegaard, 2006; Rusten et al., 2006).

Τα **SBR** αποτελούν επίσης διαδεδομένη επιλογή για ξενοδοχεία και τουριστικά καταλύματα. Η δυνατότητα επίτευξης υψηλών αποδόσεων απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών, σε συνδυασμό με τη σχετικά μικρή απαιτούμενη έκταση εγκατάστασης, τα καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλή σε τουριστικές εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας (USEPA, 1999).

Οι τεχνολογίες μεμβρανών (MBR, Hybrid SBR–MBR, A2O–MBR) εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε τουριστικές μονάδες υψηλών απαιτήσεων, καθώς μπορούν να παράγουν εκροή εξαιρετικά υψηλής ποιότητας κατάλληλη για επαναχρησιμοποίηση. Παρότι συνοδεύονται από αυξημένο κόστος και μεγαλύτερες απαιτήσεις λειτουργίας, χρησιμοποιούνται συχνά σε σύγχρονες ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις όπου η εξοικονόμηση νερού και η περιβαλλοντική διαχείριση αποτελούν βασικούς στόχους (Judd, 2011).

Τα MABR και τα MABR-Based Hybrid Systems εμφανίζουν σημαντικές προοπτικές για τουριστικές εφαρμογές λόγω του συνδυασμού υψηλής απόδοσης επεξεργασίας, περιορισμένων ενεργειακών απαιτήσεων και μικρού απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης. Τα χαρακτηριστικά αυτά ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις βιώσιμης διαχείρισης νερού στον τουριστικό τομέα (Syron & Casey, 2008).

Αντίθετα, τα απλά αναερόβια συστήματα όπως τα ABR και PABR, παρότι παρουσιάζουν σημαντικά οικονομικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα, δεν αποτελούν συνήθως την πρώτη επιλογή για ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις όταν απαιτείται υψηλή ποιότητα εκροής ή επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού. Ωστόσο, μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά ως προκαταρκτικό στάδιο επεξεργασίας σε υβριδικές διατάξεις (Massoud et al., 2009).

Συνολικά, οι τουριστικές μονάδες και τα ξενοδοχεία απαιτούν τεχνολογίες που συνδυάζουν υψηλή ποιότητα εκροής, ανθεκτικότητα σε εποχικές διακυμάνσεις και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του νερού. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα βιοφίλμ, τα SBR, οι τεχνολογίες MABR και τα προηγμένα συστήματα μεμβρανών εμφανίζονται ως οι πλέον κατάλληλες επιλογές για τις συγκεκριμένες εφαρμογές.

6.5.3 Απομακρυσμένες και αναπτυσσόμενες περιοχές

Οι απομακρυσμένες και οι αναπτυσσόμενες περιοχές αποτελούν ιδιαίτερη κατηγορία εφαρμογών επεξεργασίας λυμάτων, καθώς συχνά χαρακτηρίζονται από περιορισμένη πρόσβαση σε τεχνικές υποδομές, χαμηλή διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού, αυξημένους περιορισμούς χρηματοδότησης και δυσκολίες στην προμήθεια ανταλλακτικών ή εξοπλισμού. Στις περιπτώσεις αυτές, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας δεν βασίζεται αποκλειστικά στην απόδοση επεξεργασίας, αλλά επηρεάζεται σημαντικά από

την απλότητα λειτουργίας, την αξιοπιστία και τη δυνατότητα μακροχρόνιας λειτουργίας με περιορισμένες απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης (Massoud et al., 2009).

Σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία, οι πλέον κατάλληλες τεχνολογίες για απομακρυσμένες περιοχές είναι εκείνες που παρουσιάζουν χαμηλό ενεργειακό κόστος, περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης και υψηλή λειτουργική ανθεκτικότητα. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα **ABR**, **PABR** και **AVFCW** αποτελούν από τις συχνότερα προτεινόμενες λύσεις. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να λειτουργούν με περιορισμένη ανθρώπινη παρέμβαση, δεν απαιτούν πολύπλοκο εξοπλισμό και εμφανίζουν ιδιαίτερα χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, χαρακτηριστικά που τις καθιστούν κατάλληλες για περιοχές με ανεπαρκείς υποδομές ηλεκτροδότησης ή τεχνικής υποστήριξης (Massoud et al., 2009; USEPA, 2002).

Τα **ABR** παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για αναπτυσσόμενες χώρες λόγω της απλής κατασκευής τους, του χαμηλού κόστους επένδυσης και της ανθεκτικότητάς τους σε διακυμάνσεις φορτίου. Παράλληλα, η αναερόβια λειτουργία τους περιορίζει σημαντικά τις απαιτήσεις ενέργειας και συντήρησης. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα αυτά έχουν εφαρμοστεί εκτεταμένα σε μικρές κοινότητες της Ασίας, της Αφρικής και της Λατινικής Αμερικής (Foxon et al., 2004).

Τα φυσικά συστήματα, όπως τα **AVFCW**, αποτελούν επίσης ιδιαίτερα ελκυστικές επιλογές για απομακρυσμένες περιοχές, καθώς βασίζονται σε φυσικές διεργασίες και παρουσιάζουν πολύ χαμηλές απαιτήσεις λειτουργίας. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η αυξημένη απαίτηση σε διαθέσιμη έκταση, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την εφαρμογή τους σε ορισμένες περιπτώσεις (Vymazal, 2011).

Οι τεχνολογίες βιοφίλμ, όπως τα **MBBR**, **IFAS**, **SAF** και **FBBR**, μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά σε απομακρυσμένες περιοχές όταν υπάρχει βασική τεχνική υποστήριξη και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν σημαντικά υψηλότερη απόδοση επεξεργασίας σε σχέση με απλούστερες τεχνολογίες, διατηρώντας παράλληλα σχετικά περιορισμένες απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης (Ødegaard, 2006).

Αντίθετα, οι τεχνολογίες μεμβρανών (**MBR**, **Hybrid SBR–MBR**, **A2O–MBR**) θεωρούνται γενικά λιγότερο κατάλληλες για απομακρυσμένες ή αναπτυσσόμενες περιοχές. Η ανάγκη εξειδικευμένης τεχνικής υποστήριξης, η αυξημένη ενεργειακή

κατανάλωση, η πολυπλοκότητα λειτουργίας και το υψηλό κόστος αντικατάστασης εξοπλισμού περιορίζουν την εφαρμογή τους σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν επαρκείς τεχνικοί και οικονομικοί πόροι (Judd, 2011).

Παρόμοιοι περιορισμοί ισχύουν και για ορισμένα προηγμένα υβριδικά συστήματα, ιδιαίτερα όταν αυτά βασίζονται σε τεχνολογίες μεμβρανών. Αντίθετα, υβριδικές διατάξεις όπως τα **ABR + Biofilm Reactor** ή τα **ABR + Aerobic Post-Treatment** μπορούν να προσφέρουν μια ισορροπημένη λύση, συνδυάζοντας την απλότητα των αναερόβιων διεργασιών με τη βελτιωμένη ποιότητα εκροής που προσφέρουν τα αερόβια στάδια επεξεργασίας.

Συνολικά, για απομακρυσμένες και αναπτυσσόμενες περιοχές προτεραιότητα δίνεται στην αξιοπιστία, στην απλότητα και στη χαμηλή εξάρτηση από εξειδικευμένο προσωπικό και ενεργειακούς πόρους. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι αναερόβιες τεχνολογίες και τα φυσικά συστήματα εμφανίζονται ως οι πλέον κατάλληλες λύσεις, ενώ οι προηγμένες τεχνολογίες μεμβρανών εφαρμόζονται κυρίως σε περιπτώσεις όπου υπάρχει η απαραίτητη τεχνική και οικονομική υποστήριξη.

6.5.4 Εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης εκροής

Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους άξονες της σύγχρονης διαχείρισης υδατικών πόρων, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού ή αυξημένες αρδευτικές ανάγκες. Η αξιοποίηση της επεξεργασμένης εκροής για άρδευση, εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων, αστικές χρήσεις ή βιομηχανικές εφαρμογές συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης πόσιμου νερού και ενισχύει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης (Angelakis & Gikas, 2014).

Σε εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας καθορίζεται κυρίως από την ποιότητα της παραγόμενης εκροής. Εκτός από την απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών, ιδιαίτερη σημασία έχουν η απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών, η μείωση παθογόνων μικροοργανισμών και η επίτευξη σταθερών ποιοτικών χαρακτηριστικών που να συμμορφώνονται με τις ισχύουσες νομοθετικές απαιτήσεις (EU Regulation 2020/741).

Τα συστήματα **MBR** θεωρούνται από τις πλέον κατάλληλες τεχνολογίες για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης, καθώς η χρήση μεμβρανών επιτρέπει την παραγωγή εκροής πολύ υψηλής ποιότητας με εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών και σημαντική μείωση μικροβιολογικών παραμέτρων. Για τον λόγο αυτό, τα MBR χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε εγκαταστάσεις όπου απαιτείται άρδευση χώρων πρασίνου, γεωργικών καλλιεργειών ή άλλες μορφές επαναχρησιμοποίησης (Judd, 2011).

Αντίστοιχα, τα υβριδικά συστήματα **A2O-MBR**, **Hybrid SBR-MBR** και **AnMBR** μπορούν να επιτύχουν ακόμη υψηλότερα επίπεδα επεξεργασίας, συνδυάζοντας απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αζώτου και φωσφόρου με αποτελεσματική διαχωριστική ικανότητα των μεμβρανών. Οι τεχνολογίες αυτές θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλες για περιπτώσεις όπου εφαρμόζονται αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας εκροής ή προηγμένα προγράμματα επαναχρησιμοποίησης νερού (Meng et al., 2017).

Τα συστήματα **MABR** και **MABR-Based Hybrid Systems** εμφανίζουν επίσης σημαντικές δυνατότητες στον τομέα της επαναχρησιμοποίησης, καθώς συνδυάζουν υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με συμβατικές τεχνολογίες αερισμού. Η συνεχώς αυξανόμενη εφαρμογή τους τα τελευταία χρόνια υποδηλώνει ότι μπορούν να αποτελέσουν μια ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για μελλοντικά έργα επαναχρησιμοποίησης (Saidulu et al., 2021).

Οι τεχνολογίες βιοφίλμ, όπως τα **MBBR**, **IFAS**, **SAF**, **SAFF** και **FBBR**, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης όταν συνδυάζονται με κατάλληλη τριτοβάθμια επεξεργασία ή απολύμανση. Η υψηλή σταθερότητα λειτουργίας τους και η καλή ποιότητα εκροής τις καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλες για αποκεντρωμένες εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης σε μικρούς οικισμούς και τουριστικές μονάδες (Ødegaard, 2006).

Αντίθετα, τα απλά αναερόβια συστήματα όπως τα **ABR** και **PABR**, παρότι παρουσιάζουν σημαντικά οικονομικά και ενεργειακά πλεονεκτήματα, δεν επαρκούν συνήθως ως αυτόνομες λύσεις για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται πρόσθετο στάδιο αερόβιας επεξεργασίας, διήθησης ή απολύμανσης ώστε η εκροή να πληροί τις απαιτούμενες ποιοτικές προδιαγραφές (Massoud et al., 2009).

Συνολικά, η επαναχρησιμοποίηση εκροής ευνοεί τεχνολογίες που μπορούν να παρέχουν σταθερά υψηλή ποιότητα επεξεργασμένου νερού και αποτελεσματική απομάκρυνση παθογόνων και θρεπτικών συστατικών. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα μεμβρανών, οι προηγμένες υβριδικές διατάξεις και οι σύγχρονες τεχνολογίες MABR κατατάσσονται μεταξύ των πλέον κατάλληλων επιλογών για εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης.

6.5.5 Περιοχές με περιορισμένη διαθέσιμη έκταση

Η διαθεσιμότητα γης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιλογής τεχνολογίας επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές, τουριστικές εγκαταστάσεις, νησιωτικούς οικισμούς και περιοχές με υψηλή αξία γης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η απαιτούμενη έκταση εγκατάστασης μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά τόσο το κόστος του έργου όσο και τη δυνατότητα υλοποίησής του. Για τον λόγο αυτό, οι τεχνολογίες που επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας σε μικρό αποτύπωμα εγκατάστασης παρουσιάζουν σημαντικό πλεονέκτημα έναντι συστημάτων που απαιτούν μεγάλες επιφάνειες γης (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι πλέον κατάλληλες τεχνολογίες για περιοχές με περιορισμένη διαθέσιμη έκταση είναι εκείνες που λειτουργούν σε υψηλές συγκεντρώσεις βιομάζας ή αξιοποιούν προηγμένες διεργασίες συγκράτησης μικροοργανισμών. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως τα συστήματα **MBR**, **MABR**, **IFAS**, **MBBR**, καθώς και διάφορες υβριδικές διατάξεις όπως τα **Hybrid SBR–IFAS**, **Hybrid SBR–MBR** και **A2O–MBR** (Judd, 2011; Ødegaard, 2006).

Τα συστήματα **MBR** θεωρούνται από τις πλέον αποδοτικές τεχνολογίες ως προς την αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου. Η χρήση μεμβρανών επιτρέπει τη λειτουργία σε ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις ενεργού ιλύος, μειώνοντας σημαντικά τον απαιτούμενο όγκο δεξαμενών και καταργώντας την ανάγκη ξεχωριστής δευτεροβάθμιας καθίζησης. Ως αποτέλεσμα, το συνολικό αποτύπωμα της εγκατάστασης μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με συμβατικά συστήματα επεξεργασίας (Judd, 2011).

Αντίστοιχα, τα **MABR** και τα **MABR-Based Hybrid Systems** παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή χωρική αποδοτικότητα λόγω της αυξημένης μεταφοράς οξυγόνου και της αποτελεσματικής ανάπτυξης βιοφίλμ στις επιφάνειες των μεμβρανών. Η δυνατότητα επίτευξης υψηλών αποδόσεων επεξεργασίας σε μικρούς αντιδραστήρες τα καθιστά

ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές όπου ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος (Syron & Casey, 2008; Saidulu et al., 2021).

Τα συστήματα **MBBR**, **IFAS**, **SAF**, **SAFF** και **FBBR** παρουσιάζουν επίσης σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς τις απαιτήσεις έκτασης. Η ανάπτυξη βιομάζας σε φορείς βιοφίλμ επιτρέπει υψηλότερη συγκέντρωση ενεργής βιομάζας ανά μονάδα όγκου, οδηγώντας σε μικρότερες δεξαμενές και αυξημένη αποδοτικότητα αξιοποίησης του διαθέσιμου χώρου (Ødegaard, 2006; Rusten et al., 2006).

Τα **SBR** εμφανίζουν επίσης καλή χωρική αποδοτικότητα, καθώς η επεξεργασία πραγματοποιείται διαδοχικά στην ίδια δεξαμενή, μειώνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων μονάδων επεξεργασίας. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει συμβάλει στην ευρεία εφαρμογή τους σε μικρές και μεσαίες εγκαταστάσεις όπου ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος (USEPA, 1999).

Αντίθετα, τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, όπως τα **AVFCW**, παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε γη. Παρότι προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς το λειτουργικό κόστος και την απλότητα λειτουργίας, η ανάγκη ανάπτυξης εκτεταμένων επιφανειών επεξεργασίας περιορίζει την εφαρμογή τους σε περιοχές με άφθονο διαθέσιμο χώρο και χαμηλή αξία γης (Vymazal, 2011).

Παρόμοια, τα απλά αναερόβια συστήματα **ABR** και **PABR** απαιτούν γενικά μεγαλύτερους υδραυλικούς χρόνους παραμονής και συνεπώς μεγαλύτερους όγκους δεξαμενών σε σχέση με σύγχρονες τεχνολογίες βιοφίλμ ή μεμβρανών. Αν και οι απαιτήσεις τους σε έκταση παραμένουν μικρότερες από εκείνες των φυσικών συστημάτων, δεν θεωρούνται οι πλέον αποδοτικές λύσεις όταν ο διαθέσιμος χώρος είναι ιδιαίτερα περιορισμένος (Massoud et al., 2009).

Συνολικά, σε περιοχές όπου η διαθέσιμη έκταση αποτελεί κρίσιμο περιορισμό, προτεραιότητα δίνεται σε τεχνολογίες υψηλής χωρικής αποδοτικότητας, όπως τα συστήματα μεμβρανών, οι τεχνολογίες βιοφίλμ και τα σύγχρονα υβριδικά συστήματα. Αντίθετα, οι φυσικές διεργασίες και ορισμένα απλούστερα αναερόβια συστήματα είναι περισσότερο κατάλληλα για εφαρμογές όπου η διαθεσιμότητα γης δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα.

6.5.6 Συνολική αξιολόγηση καταλληλότητας εφαρμογών

Πίνακας 30 Συνολική αξιολόγηση καταλληλότητας τεχνολογιών ανά εφαρμογή

Σύστημα	Μικροί οικισμοί	Ξενοδοχεία	Απομακρυσμένες	Επαναχρησιμοποίηση	Περιορισμένος χώρος
ABR	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★☆☆	★★☆☆
FABR	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★☆☆	★★☆☆
ATFCW	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★☆☆	★★☆☆
RBC	★★★★	★★☆☆	★★☆☆	★★☆☆	★★☆☆
SAF	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
SAFF	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
FBBR	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
SBR	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
MBBR	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
IFAS	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
Oxidation Ditch	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
MABR	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
MBR	★★☆☆	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
AnMBR	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★

Πίνακας 31 Συνολική αξιολόγηση καταλληλότητας τεχνολογιών ανά εφαρμογή

Σύστημα	Μικροί οικισμοί	Ξενοδοχεία	Απομακρυσμένες	Επαναχρησιμοποίηση	Περιορισμένος χώρος
ABR+Aerobic	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★☆☆
ABR+Biofilm	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★
Hybrid SBR-IFAS	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
MABR-Based Hybrid	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
Hybrid SBR-MBR	★★☆☆	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★
A2O-MBR	★★☆☆	★★★★	★★☆☆	★★★★	★★★★

Υπόμνημα

Πίνακας 32 Ερμηνεία της κλίμακας βαθμολόγησης καταλληλότητας

Βαθμολογία	Ερμηνεία
★★★★★	Πολύ υψηλή καταλληλότητα
★★★★☆	Υψηλή καταλληλότητα
★★★☆☆	Μέτρια καταλληλότητα

Βαθμολογία	Ερμηνεία
★ ★ ☆ ☆ ☆	Περιορισμένη καταλληλότητα
★ ☆ ☆ ☆ ☆	Χαμηλή καταλληλότητα

Από τη συνολική αξιολόγηση των τεχνολογιών προκύπτει ότι δεν υπάρχει μία ενιαία λύση που να θεωρείται βέλτιστη για όλες τις εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων. Η καταλληλότητα κάθε συστήματος εξαρτάται από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως η διαθεσιμότητα χώρου, η απαιτούμενη ποιότητα εκροής, οι οικονομικοί πόροι, οι ενεργειακές απαιτήσεις και η δυνατότητα τεχνικής υποστήριξης. Τα αναερόβια και φυσικά συστήματα εμφανίζονται ιδιαίτερα κατάλληλα για μικρούς οικισμούς και απομακρυσμένες περιοχές, ενώ τα συστήματα βιοφίλμ παρουσιάζουν σημαντική ευελιξία και ισορροπία μεταξύ απόδοσης, κόστους και λειτουργικών απαιτήσεων. Αντίστοιχα, οι τεχνολογίες μεμβρανών και τα προηγμένα υβριδικά συστήματα υπερτερούν σε εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης εκροής και σε περιοχές με περιορισμένη διαθέσιμη έκταση. Συνεπώς, η επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας θα πρέπει να πραγματοποιείται μετά από ολοκληρωμένη αξιολόγηση των τεχνικών, ενεργειακών, οικονομικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών κάθε εφαρμογής.

6.6 Διεθνείς τάσεις και εφαρμογές αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

Τα ατομικά, αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν σήμερα μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες τεχνολογιών για τη διαχείριση λυμάτων μικρής και μεσαίας κλίμακας. Η αυξανόμενη ανάγκη προστασίας των υδατικών πόρων, η βελτίωση της ποιότητας των εκροών, η επαναχρησιμοποίηση νερού και οι δυσκολίες επέκτασης κεντρικών αποχετευτικών δικτύων έχουν οδηγήσει πολλές χώρες στην ευρύτερη εφαρμογή αποκεντρωμένων λύσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται σε ένα ευρύ φάσμα εγκαταστάσεων, όπως μεμονωμένες κατοικίες, μικρούς οικισμούς, τουριστικές μονάδες, αγροτικές περιοχές και απομακρυσμένες κοινότητες. Παράλληλα, η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη σύγχρονων προκατασκευασμένων συστημάτων υψηλής απόδοσης, τα

οποία μπορούν να επιτύχουν επίπεδα επεξεργασίας αντίστοιχα ή και ανώτερα από πολλές συμβατικές κεντρικές εγκαταστάσεις.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι κυριότερες διεθνείς τάσεις και εφαρμογές αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, με έμφαση στην Ευρώπη, την Ελλάδα, την Ιαπωνία και άλλες ασιατικές χώρες, καθώς και στις αναπτυσσόμενες περιοχές όπου οι αποκεντρωμένες τεχνολογίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση των υποδομών υγιεινής και προστασίας του περιβάλλοντος.

6.6.1 Ευρώπη

Η εφαρμογή αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων στην Ευρώπη παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις γίνονται αυστηρότερες και παράλληλα αναζητούνται οικονομικά αποδοτικές λύσεις για μικρούς οικισμούς, αγροτικές περιοχές και διάσπαρτους πληθυσμούς. Αν και τα κεντρικά συστήματα αποχέτευσης εξακολουθούν να αποτελούν τη βασική προσέγγιση στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, τα αποκεντρωμένα συστήματα αναγνωρίζονται ολοένα και περισσότερο ως βιώσιμη εναλλακτική για εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας (Van Ginkel, 2006· Water Reuse Europe, 2024).

Η ανάπτυξη των αποκεντρωμένων συστημάτων συνδέεται άμεσα με την ευρωπαϊκή περιβαλλοντική πολιτική και ιδιαίτερα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ για την επεξεργασία αστικών λυμάτων (Urban Waste Water Treatment Directive), η οποία αποτέλεσε τη βάση για τη βελτίωση της συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων σε ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση. Παράλληλα, η πρόσφατη αναθεώρηση του ευρωπαϊκού πλαισίου ενισχύει ακόμη περισσότερο τις απαιτήσεις για αποτελεσματική επεξεργασία, προστασία των υδάτινων αποδεκτών, ενεργειακή αποδοτικότητα και παρακολούθηση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων (European Commission, 2025· Urban Waste Water Treatment Directive, 2025).

Ιδιαίτερη σημασία για τις μικρές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων έχει το ευρωπαϊκό πρότυπο **EN 12566**, το οποίο καθορίζει τις απαιτήσεις σχεδιασμού, κατασκευής και πιστοποίησης αποκεντρωμένων μονάδων επεξεργασίας έως 50 ισοδύναμων κατοίκων. Η εφαρμογή του προτύπου έχει συμβάλει σημαντικά στη διάδοση

προκατασκευασμένων μονάδων σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες, ιδιαίτερα στη Γερμανία, τη Γαλλία, την Αυστρία και τις Σκανδιναβικές χώρες (EN 12566, 2025· Dorgeloh, n.d.).

Στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες παρατηρείται εκτεταμένη εφαρμογή τεχνολογιών όπως τα **SBR**, **MBBR**, **IFAS**, καθώς και άλλων συστημάτων βιοφίλμ, λόγω της υψηλής απόδοσής τους, της ευελιξίας σε μεταβολές φορτίου και της δυνατότητας εγκατάστασης σε περιορισμένο χώρο. Παράλληλα, αυξάνεται συνεχώς η χρήση προηγμένων τεχνολογιών όπως τα **MBR**, **MABR** και διάφορα υβριδικά συστήματα, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου απαιτείται υψηλή ποιότητα εκροής ή επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού (Van Ginkel, 2006· Water Reuse Europe, 2024).

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τις σύγχρονες ευρωπαϊκές τάσεις είναι η αυξανόμενη ανάγκη επαναχρησιμοποίησης νερού. Ο Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 για την επαναχρησιμοποίηση νερού στη γεωργία ενίσχυσε σημαντικά την αξιοποίηση της επεξεργασμένης εκροής ως εναλλακτικού υδατικού πόρου, ιδιαίτερα στις χώρες της Νότιας Ευρώπης που αντιμετωπίζουν προβλήματα λειψυδρίας. Ως αποτέλεσμα, δίνεται αυξανόμενη έμφαση σε τεχνολογίες που μπορούν να παράγουν εκροή υψηλής ποιότητας με σταθερά χαρακτηριστικά και αυξημένη ασφάλεια για επαναχρησιμοποίηση (European Union, 2020· Water Europe, 2023· Malinauskaitė, 2024).

Παράλληλα, η κλιματική αλλαγή, η αύξηση του ενεργειακού κόστους και οι στόχοι βιωσιμότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης οδηγούν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που συνδυάζουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Στο πλαίσιο αυτό, τεχνολογίες όπως τα MABR, τα προηγμένα συστήματα βιοφίλμ και οι υβριδικές διατάξεις αποκτούν ολοένα μεγαλύτερη σημασία, ενώ παράλληλα ενισχύεται η χρήση ψηφιακών συστημάτων παρακολούθησης και αυτοματισμού για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων (Water Reuse Europe, 2024· Tiwari et al., 2025).

Συνολικά, η ευρωπαϊκή εμπειρία δείχνει ότι τα αποκεντρωμένα προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν πλέον ώριμες, αξιόπιστες και ευρέως εφαρμοζόμενες τεχνολογίες. Η μελλοντική ανάπτυξη του τομέα αναμένεται να επικεντρωθεί στην ενεργειακή αποδοτικότητα, στην επαναχρησιμοποίηση νερού, στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος και στην αξιοποίηση προηγμένων τεχνολογιών βιοφίλμ και μεμβρανών, οι οποίες μπορούν να ανταποκριθούν στις ολοένα αυξανόμενες

περιβαλλοντικές απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Commission, 2025· Water Europe, 2023).

6.6.2 Ελλάδα

Η Ελλάδα αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας όπου τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της γεωγραφικής της ιδιαιτερότητας. Η ύπαρξη χιλιάδων μικρών οικισμών, ο μεγάλος αριθμός νησιών, η έντονη τουριστική δραστηριότητα και η εποχική διακύμανση του πληθυσμού δημιουργούν σημαντικές προκλήσεις για την ανάπτυξη εκτεταμένων κεντρικών αποχετευτικών δικτύων και μεγάλων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Για τον λόγο αυτό, οι αποκεντρωμένες λύσεις επεξεργασίας έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία τις τελευταίες δεκαετίες (Ανδρεαδάκης, 2009· ΥΠΕΚΑ, 2012).

Η ανάπτυξη των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων στην Ελλάδα επηρεάστηκε σημαντικά από την εφαρμογή της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ, η οποία οδήγησε στην κατασκευή μεγάλου αριθμού εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων σε οικισμούς διαφόρων κατηγοριών. Παράλληλα, σε μικρούς οικισμούς και απομακρυσμένες περιοχές αναπτύχθηκαν αποκεντρωμένες λύσεις μικρής κλίμακας, οι οποίες συχνά αποτελούν οικονομικότερη και τεχνικά καταλληλότερη επιλογή σε σχέση με τη σύνδεση σε κεντρικά δίκτυα (Terms and Definitions of the Urban Waste Water Treatment Directive 91/271/EEC, 2007).

Στην ελληνική αγορά κυριαρχούν κυρίως προκατασκευασμένες μονάδες βιολογικής επεξεργασίας βασισμένες στις τεχνολογίες **SBR**, **MBBR** και γενικότερα σε συστήματα ενεργού ιλύος ή βιοφίλμ. Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικρούς οικισμούς, ξενοδοχειακές μονάδες, κάμπινγκ, βιοτεχνικές εγκαταστάσεις και μεμονωμένα κτίρια, καθώς συνδυάζουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας με σχετικά περιορισμένες απαιτήσεις χώρου εγκατάστασης (USEPA, 1999· Metcalf & Eddy, 2014).

Ιδιαίτερη ανάπτυξη παρουσιάζουν επίσης οι προκατασκευασμένες μονάδες ελληνικής κατασκευής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σύστημα **Rotoseptic**, το οποίο έχει αναπτυχθεί και εφαρμόζεται σε πολλές μικρές εγκαταστάσεις στην Ελλάδα. Τα συστήματα αυτά βασίζονται συνήθως σε συνδυασμό πρωτοβάθμιας καθίζησης, βιολογικής

επεξεργασίας και τελικής διαύγασης, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη λύση σε προκατασκευασμένη μορφή για μικρές παροχές λυμάτων. Η ευκολία μεταφοράς, εγκατάστασης και λειτουργίας έχει συμβάλει στην ευρεία διάδοσή τους σε αποκεντρωμένες εφαρμογές.

Παράλληλα, σε πολλές αγροτικές περιοχές της χώρας έχουν εφαρμοστεί φυσικά συστήματα επεξεργασίας, όπως τεχνητοί υγρότοποι οριζόντιας και κατακόρυφης ροής, συχνά σε συνδυασμό με σηπτικές δεξαμενές ή αναερόβια στάδια προεπεξεργασίας. Οι λύσεις αυτές εμφανίζουν χαμηλό ενεργειακό κόστος και περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλες για μικρούς οικισμούς και περιοχές με περιορισμένη τεχνική υποστήριξη (Vymazal, 2011· Ανδρεαδάκης, 2009).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για τεχνολογίες υψηλότερης απόδοσης, όπως τα **MBR**, κυρίως σε τουριστικές μονάδες, ξενοδοχεία και εγκαταστάσεις όπου απαιτείται επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού για άρδευση. Η αυξανόμενη πίεση στους υδατικούς πόρους, ιδιαίτερα στα νησιά και στις τουριστικές περιοχές, αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω την εφαρμογή προηγμένων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας κατά τα επόμενα χρόνια (Angelakis & Gikas, 2014).

Συνολικά, η ελληνική εμπειρία δείχνει ότι τα αποκεντρωμένα προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν πλέον ώριμες και τεχνικά αξιόπιστες λύσεις για εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από το μέγεθος του εξυπηρετούμενου πληθυσμού, τη διακύμανση των φορτίων, τη διαθεσιμότητα χώρου, τις απαιτήσεις ποιότητας εκροής και τις δυνατότητες λειτουργίας και συντήρησης κάθε εγκατάστασης (Ανδρεαδάκης, 2009· Tchobanoglous et al., 2004).

6.6.3 Ιαπωνία και Ασία

Η Ασία αποτελεί μία από τις πλέον δυναμικές περιοχές παγκοσμίως ως προς την ανάπτυξη και εφαρμογή αποκεντρωμένων, συμπαγών και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Η υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, η ταχεία αστικοποίηση, η περιορισμένη διαθεσιμότητα γης και η αυξανόμενη ζήτηση για υδατικούς πόρους έχουν οδηγήσει πολλές ασιατικές χώρες στην ανάπτυξη και εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών μικρής και μεσαίας κλίμακας επεξεργασίας λυμάτων (Massoud et al., 2009).

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η περίπτωση της Ιαπωνίας, η οποία θεωρείται μία από τις πρωτοπόρες χώρες στην εφαρμογή αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Η χώρα διαθέτει εκτεταμένη εμπειρία στα συστήματα Johkasou, τα οποία αποτελούν προκατασκευασμένες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων για μεμονωμένες κατοικίες, μικρά συγκροτήματα κατοικιών και αποκεντρωμένες κοινότητες. Τα συστήματα αυτά εφαρμόζονται ευρέως σε περιοχές όπου δεν υπάρχει σύνδεση με κεντρικά αποχετευτικά δίκτυα και έχουν συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων της χώρας (Matsumoto & Takahashi, 2007).

Παράλληλα, η Ιαπωνία έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών βιολογικής επεξεργασίας μικρού αποτυπώματος, όπως τα συστήματα βιοφίλμ, οι τεχνολογίες μεμβρανών (MBR) και οι σύγχρονες υβριδικές διατάξεις. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα χώρου και οι αυστηρές περιβαλλοντικές απαιτήσεις έχουν ευνοήσει την ανάπτυξη συστημάτων υψηλής απόδοσης και μικρού αποτυπώματος εγκατάστασης (Judd, 2011).

Στην Κίνα, η ταχεία αστικοποίηση και η ανάγκη παροχής υπηρεσιών επεξεργασίας λυμάτων σε απομακρυσμένες περιοχές έχουν οδηγήσει στην ευρεία εφαρμογή αποκεντρωμένων τεχνολογιών, ιδιαίτερα σε μικρές κοινότητες και αγροτικές περιοχές. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση της χρήσης συστημάτων MBBR, IFAS, MBR και τεχνολογιών τεχνητών υγροτόπων, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και στην επαναχρησιμοποίηση της εκροής (Liu et al., 2021).

Αντίστοιχα, χώρες όπως η Νότια Κορέα, η Σιγκαπούρη και η Ταϊβάν επενδύουν σημαντικά σε προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων και επαναχρησιμοποίησης νερού. Η Σιγκαπούρη αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα, καθώς μέσω του προγράμματος NEWater έχει αναπτύξει ολοκληρωμένες στρατηγικές ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων, αξιοποιώντας τεχνολογίες μεμβρανών και προηγμένης επεξεργασίας (PUB Singapore, 2023).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον στην Ασία για τεχνολογίες υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας, όπως τα MABR και τα υβριδικά συστήματα βιοφίλμ, τα οποία προσφέρουν υψηλή ποιότητα εκροής με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με συμβατικά αερόβια συστήματα. Η τάση αυτή συνδέεται άμεσα με τους

στόχους βιώσιμης ανάπτυξης και τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (Saidulu et al., 2021).

Συνολικά, η εμπειρία της Ιαπωνίας και των υπόλοιπων ασιατικών χωρών δείχνει ότι οι αποκεντρωμένες και προκατασκευασμένες τεχνολογίες μπορούν να αποτελέσουν αποτελεσματική λύση τόσο για πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές όσο και για απομακρυσμένες κοινότητες. Η συνεχής ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών βιοφίλμ, μεμβρανών και υβριδικών συστημάτων αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω τη χρήση αποκεντρωμένων λύσεων επεξεργασίας λυμάτων στην περιοχή.

6.6.4 Αναπτυσσόμενες χώρες

Στις αναπτυσσόμενες χώρες, η διαχείριση των αστικών λυμάτων εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική περιβαλλοντική και κοινωνική πρόκληση. Η ταχεία πληθυσμιακή αύξηση, η ανεπαρκής ανάπτυξη αποχετευτικών υποδομών, οι περιορισμένοι οικονομικοί πόροι και η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού δυσχεραίνουν την εφαρμογή μεγάλων κεντρικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Για τον λόγο αυτό, τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία ως εναλλακτικές λύσεις χαμηλού κόστους και αυξημένης λειτουργικής ευελιξίας (et al., 2009).

Σε πολλές χώρες της Αφρικής, της Νότιας Ασίας και της Λατινικής Αμερικής, τα αποκεντρωμένα συστήματα εφαρμόζονται κυρίως σε μικρούς οικισμούς, αγροτικές κοινότητες και περιαστικές περιοχές, όπου η σύνδεση με κεντρικά αποχετευτικά δίκτυα δεν είναι τεχνικά ή οικονομικά εφικτή. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι σε αυτές τις συνθήκες προτιμώνται τεχνολογίες που χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, περιορισμένες ενεργειακές απαιτήσεις και απλή συντήρηση (Tchobanoglous et al., 2004).

Ιδιαίτερα διαδεδομένα είναι τα αναερόβια συστήματα, όπως οι αναερόβιοι αντιδραστήρες διαφραγμάτων (**ABR**) και οι παραλλαγές τους (**PABR**), καθώς προσφέρουν ικανοποιητική απόδοση επεξεργασίας με ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις. Η απλή κατασκευή τους, η ανθεκτικότητα σε διακυμάνσεις φορτίου και οι περιορισμένες ανάγκες συντήρησης τα καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλα για περιοχές με περιορισμένους τεχνικούς και οικονομικούς πόρους (Foxon et al., 2004).

Παράλληλα, σημαντική εφαρμογή παρουσιάζουν τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, όπως οι τεχνητοί υγρότοποι και οι φυσικές διεργασίες εδαφικής διήθησης. Τα συστήματα αυτά αξιοποιούν φυσικούς μηχανισμούς επεξεργασίας και χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για μικρές κοινότητες και αγροτικές περιοχές. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η αυξημένη απαίτηση σε διαθέσιμη έκταση, η οποία όμως σε πολλές αναπτυσσόμενες περιοχές δεν αποτελεί κρίσιμο περιορισμό (Vymazal, 2011).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται επίσης αυξανόμενο ενδιαφέρον για τεχνολογίες βιοφίλμ, όπως τα **MBBR** και **IFAS**, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου απαιτείται υψηλότερη απόδοση επεξεργασίας χωρίς σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας λειτουργίας. Οι τεχνολογίες αυτές προσφέρουν καλύτερη ποιότητα εκροής και μεγαλύτερη λειτουργική σταθερότητα σε σχέση με απλούστερα συστήματα, ενώ παραμένουν πιο προσιτές από τις προηγμένες τεχνολογίες μεμβρανών (Ødegaard, 2006).

Αντίθετα, οι τεχνολογίες μεμβρανών (**MBR**, **AnMBR**, **A2O-MBR**) παρουσιάζουν ακόμη περιορισμένη εφαρμογή στις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες λόγω του υψηλού επενδυτικού κόστους, των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων και της ανάγκης εξειδικευμένης τεχνικής υποστήριξης. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμόζονται πιλοτικά ή σε ειδικές εγκαταστάσεις όπου απαιτείται υψηλή ποιότητα εκροής ή επαναχρησιμοποίηση του νερού (Judd, 2011).

Παράλληλα, διεθνείς οργανισμοί όπως ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών, η Παγκόσμια Τράπεζα και η UNICEF προωθούν ολοένα και περισσότερο αποκεντρωμένες λύσεις επεξεργασίας λυμάτων στο πλαίσιο των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs), με έμφαση στην πρόσβαση σε ασφαλείς υπηρεσίες αποχέτευσης και στην προστασία των υδατικών πόρων. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την κάλυψη των αναγκών εκατομμυρίων κατοίκων που εξακολουθούν να στερούνται επαρκών υποδομών υγιεινής (United Nations, 2023).

Συνολικά, η εμπειρία των αναπτυσσόμενων χωρών δείχνει ότι τα αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν συχνά τη μοναδική ρεαλιστική επιλογή για τη βελτίωση των συνθηκών υγιεινής και περιβαλλοντικής προστασίας. Οι αναερόβιες τεχνολογίες, τα φυσικά συστήματα και οι απλές προκατασκευασμένες μονάδες μικρής κλίμακας αναμένεται να συνεχίσουν να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στις

μελλοντικές στρατηγικές διαχείρισης λυμάτων στις αναπτυσσόμενες περιοχές του κόσμου
(Massoud et al., 2009; Tchobanoglous et al., 2004).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση σύγχρονων αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων μικρής και μεσαίας κλίμακας. Εξετάστηκαν συμβατικές, φυσικές, αναερόβιες, αερόβιες, μεμβρανικές και υβριδικές τεχνολογίες, με στόχο την αξιολόγηση της τεχνικής τους απόδοσης, των ενεργειακών και οικονομικών χαρακτηριστικών τους, των απαιτήσεων λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και της καταλληλότητάς τους για διαφορετικά πεδία εφαρμογής. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση, καθώς και προτάσεις σχετικά με την επιλογή των καταλληλότερων τεχνολογιών και τις μελλοντικές τάσεις στον τομέα της αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων.

7.1 Συμπεράσματα

Η συγκριτική αξιολόγηση των αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την τεχνική απόδοση, τις ενεργειακές απαιτήσεις, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, τις ανάγκες συντήρησης, καθώς και την καταλληλότητά τους για διαφορετικά πεδία εφαρμογής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν υπάρχει μία τεχνολογία που να υπερτερεί σε όλα τα κριτήρια αξιολόγησης, αλλά η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος εξαρτάται από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις και συνθήκες κάθε εφαρμογής.

Από τη συγκριτική τεχνική αξιολόγηση προέκυψε ότι οι τεχνολογίες μεμβρανών, όπως τα MBR, AnMBR, A2O–MBR και Hybrid SBR–MBR, παρουσιάζουν τις υψηλότερες αποδόσεις επεξεργασίας και την καλύτερη ποιότητα εκροής, επιτυγχάνοντας ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών συστατικών. Παράλληλα, τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα MBBR, IFAS, SAF, SAFF και FBBR, προσφέρουν ιδιαίτερα ικανοποιητική απόδοση με μικρότερη λειτουργική πολυπλοκότητα και αυξημένη ανθεκτικότητα σε μεταβολές φορτίου. Οι αναερόβιες τεχνολογίες, όπως τα ABR και PABR, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές όπου προτεραιότητα αποτελεί η απλότητα, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το περιορισμένο λειτουργικό κόστος.

Η ενεργειακή αξιολόγηση έδειξε ότι τα αναερόβια συστήματα εμφανίζουν τις χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις, ενώ τα συστήματα μεμβρανών παρουσιάζουν γενικά υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας λόγω των απαιτήσεων αερισμού και λειτουργίας των μεμβρανών. Ενδιάμεση θέση καταλαμβάνουν τα συστήματα βιοφίλμ και ιδιαίτερα οι τεχνολογίες MABR, οι οποίες συνδυάζουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας με βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικές για μελλοντικές εφαρμογές.

Από οικονομική άποψη διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει μία τεχνολογία που να υπερτερεί σε όλες τις περιπτώσεις. Τα απλούστερα συστήματα, όπως τα ABR, PABR και AVFCW, εμφανίζουν χαμηλότερο κόστος επένδυσης και λειτουργίας, ενώ οι προηγμένες τεχνολογίες μεμβρανών και τα σύνθετα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν αυξημένο κόστος αλλά προσφέρουν υψηλότερη ποιότητα εκροής και μεγαλύτερες δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης νερού.

Η αξιολόγηση των απαιτήσεων λειτουργίας και συντήρησης ανέδειξε ως πλέον εύκολα διαχειρίσιμες λύσεις τα ABR, PABR και AVFCW, ενώ τα συστήματα βιοφίλμ παρουσίασαν ιδιαίτερα καλή ισορροπία μεταξύ απόδοσης, αξιοπιστίας και λειτουργικής απλότητας. Αντίθετα, οι τεχνολογίες μεμβρανών απαιτούν αυξημένη τεχνική υποστήριξη, εξειδικευμένο προσωπικό και συστηματική παρακολούθηση της λειτουργίας τους.

Η ανάλυση της καταλληλότητας ανά εφαρμογή έδειξε ότι οι βέλτιστες τεχνολογίες διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες. Για μικρούς οικισμούς και απομακρυσμένες περιοχές αρκετά κατάλληλα εμφανίζονται τα ABR, PABR, AVFCW και MBBR. Για ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις και εφαρμογές με έντονες διακυμάνσεις φορτίου προτείνονται κυρίως τα MBBR, IFAS και SBR. Αντίστοιχα, σε εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης εκροής και περιορισμένου διαθέσιμου χώρου υπερτερούν οι τεχνολογίες MBR, MABR και τα προηγμένα υβριδικά συστήματα.

Η διεθνής εμπειρία από την Ευρώπη, την Ελλάδα, την Ιαπωνία και άλλες ασιατικές χώρες καταδεικνύει ότι τα αποκεντρωμένα προκατασκευασμένα συστήματα αποτελούν πλέον ώριμες και αξιόπιστες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων. Οι σύγχρονες τάσεις επικεντρώνονται στην ενεργειακή αποδοτικότητα, στην επαναχρησιμοποίηση νερού, στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών βιοφίλμ, μεμβρανών και υβριδικών συστημάτων.

Επιπλέον, η διεθνής και ελληνική εμπειρία δείχνει ότι στους μικρούς και διάσπαρτους οικισμούς το κόστος συλλογής και μεταφοράς των λυμάτων μέσω εκτεταμένων αποχετευτικών δικτύων αποτελεί συχνά το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους διαχείρισης. Για τον λόγο αυτό, τα αποκεντρωμένα προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων μπορούν να αποτελέσουν ιδιαίτερα ανταγωνιστικές λύσεις, τόσο από τεχνική όσο και από οικονομική άποψη.

Συνολικά, τα αποκεντρωμένα και προκατασκευασμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν μια αποτελεσματική και ευέλικτη προσέγγιση για τη διαχείριση λυμάτων μικρής και μεσαίας κλίμακας. Η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη και η αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω τον ρόλο τους στις μελλοντικές υποδομές επεξεργασίας λυμάτων.

7.2 Τεχνική και ενεργειακή αποτίμηση

Η συγκριτική τεχνική και ενεργειακή αξιολόγηση των εξεταζόμενων τεχνολογιών ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την απόδοση επεξεργασίας και τις απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι προηγμένες τεχνολογίες μεμβρανών, όπως τα MBR, AnMBR, A2O–MBR και Hybrid SBR–MBR, παρουσιάζουν τις υψηλότερες αποδόσεις απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών συστατικών, επιτυγχάνοντας παράλληλα εξαιρετική ποιότητα εκροής κατάλληλη για επαναχρησιμοποίηση. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά συνοδεύονται από αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω του αερισμού και της λειτουργίας των μεμβρανών.

Τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα MBBR, IFAS, SAF, SAFF και FBBR, παρουσίασαν ιδιαίτερα ικανοποιητική τεχνική απόδοση, συνδυάζοντας υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης ρύπων με σχετικά περιορισμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Ακόμα, η αυξημένη ανθεκτικότητα των συστημάτων αυτών σε διακυμάνσεις παροχής και οργανικού φορτίου τα καθιστά ιδιαίτερα αξιόπιστες λύσεις για αποκεντρωμένες εφαρμογές.

Οι τεχνολογίες MABR και τα αντίστοιχα υβριδικά συστήματα αναδείχθηκαν ως μία από τις πλέον υποσχόμενες κατηγορίες τεχνολογιών. Η βελτιωμένη μεταφορά οξυγόνου μέσω των μεμβρανών αερισμού επιτρέπει τη σημαντική μείωση της ενεργειακής

κατανάλωσης σε σχέση με τα συμβατικά αερόβια συστήματα, διατηρώντας παράλληλα υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών. Ως αποτέλεσμα, τα MABR συνδυάζουν υψηλή τεχνική απόδοση με βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα και αποτελούν μία από τις πλέον ελπιδοφόρες τεχνολογίες για μελλοντικές εφαρμογές.

Αντίθετα, τα αναερόβια συστήματα ABR και PABR παρουσίασαν τις χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις μεταξύ όλων των εξεταζόμενων τεχνολογιών, καθώς δεν απαιτούν συνεχή αερισμό. Παρότι η ποιότητα εκροής τους είναι συνήθως χαμηλότερη από εκείνη των προηγμένων αερόβιων και μεμβρανικών τεχνολογιών, τα συστήματα αυτά εμφανίζουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε εφαρμογές όπου προτεραιότητα αποτελεί η ενεργειακή εξοικονόμηση, η απλότητα λειτουργίας και το χαμηλό λειτουργικό κόστος.

Συνολικά, η τεχνική και ενεργειακή αποτίμηση έδειξε ότι οι τεχνολογίες μεμβρανών υπερτερούν ως προς την ποιότητα εκροής, οι αναερόβιες τεχνολογίες ως προς την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ τα συστήματα βιοφίλμ και ιδιαίτερα τα MABR επιτυγχάνουν την καλύτερη ισορροπία μεταξύ απόδοσης επεξεργασίας και ενεργειακής αποδοτικότητας. Η επιλογή της κατάλληλότερης τεχνολογίας θα πρέπει επομένως να βασίζεται στη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ τεχνικών απαιτήσεων, ενεργειακού κόστους και επιθυμητής ποιότητας εκροής.

7.3 Επιλογή κατάλληλου συστήματος ανά εφαρμογή

Η επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία, η οποία επηρεάζεται από τεχνικούς, οικονομικούς, ενεργειακούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έδειξαν ότι δεν υπάρχει μία ενιαία τεχνολογία που να μπορεί να θεωρηθεί βέλτιστη για όλες τις περιπτώσεις, καθώς κάθε εφαρμογή παρουσιάζει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ποιότητα εκροής, το διαθέσιμο χώρο, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, καθώς και το επίπεδο τεχνικής υποστήριξης που μπορεί να εξασφαλιστεί.

Για μικρούς οικισμούς και αγροτικές περιοχές, ιδιαίτερα κατάλληλες εμφανίζονται οι τεχνολογίες ABR, PABR, AVFCW και MBBR. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από χαμηλές απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης, περιορισμένο ενεργειακό κόστος και

ικανοποιητική απόδοση επεξεργασίας, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές μικρής κλίμακας και περιοχές με περιορισμένους οικονομικούς πόρους.

Για τουριστικές μονάδες, ξενοδοχεία και εγκαταστάσεις με σημαντικές εποχικές διακυμάνσεις φορτίου, προτείνονται κυρίως οι τεχνολογίες MBBR, IFAS, SBR και Hybrid SBR–IFAS. Οι τεχνολογίες αυτές εμφανίζουν υψηλή λειτουργική ευελιξία και αυξημένη αντοχή σε μεταβολές παροχής και οργανικού φορτίου, στοιχεία ιδιαίτερα σημαντικά για εφαρμογές με έντονη εποχικότητα.

Σε απομακρυσμένες περιοχές και αναπτυσσόμενες κοινότητες, προτεραιότητα θα πρέπει να δίνεται σε τεχνολογίες που χαρακτηρίζονται από απλή λειτουργία, περιορισμένες ενεργειακές απαιτήσεις και χαμηλό κόστος συντήρησης. Για τον λόγο αυτό, τα ABR, PABR, AVFCW και άλλες απλές αποκεντρωμένες λύσεις εμφανίζονται ως οι πλέον κατάλληλες επιλογές.

Για εφαρμογές όπου απαιτείται επαναχρησιμοποίηση της εκροής, όπως άρδευση γεωργικών εκτάσεων, χώρων πρασίνου ή τουριστικών εγκαταστάσεων, προτείνονται κυρίως οι τεχνολογίες MBR, A2O–MBR, Hybrid SBR–MBR, MABR και τα αντίστοιχα υβριδικά συστήματα. Οι τεχνολογίες αυτές προσφέρουν υψηλή ποιότητα εκροής και αυξημένη απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών συστατικών.

Σε περιοχές με περιορισμένη διαθέσιμη έκταση, όπως αστικές περιοχές, νησιά ή τουριστικές εγκαταστάσεις υψηλής πυκνότητας, οι πλέον κατάλληλες επιλογές είναι τα MBR, MABR, IFAS, MBBR και τα προηγμένα υβριδικά συστήματα. Οι τεχνολογίες αυτές επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση επεξεργασίας σε ιδιαίτερα περιορισμένο χώρο εγκατάστασης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τεχνολογίες MABR και τα σύγχρονα υβριδικά συστήματα, καθώς συνδυάζουν πολλά από τα πλεονεκτήματα των συμβατικών συστημάτων βιοφίλμ και των τεχνολογιών μεμβρανών. Η υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, η μικρή απαίτηση σε χώρο και η δυνατότητα επίτευξης υψηλής ποιότητας εκροής καθιστούν τις τεχνολογίες αυτές ιδιαίτερα ελπιδοφόρες για μελλοντικές εφαρμογές αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων.

Συνολικά, η επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας θα πρέπει να βασίζεται σε πολυκριτηριακή αξιολόγηση που να λαμβάνει υπόψη τις τεχνικές απαιτήσεις, την ποιότητα

εκροής, το διαθέσιμο χώρο, τις ενεργειακές απαιτήσεις, το οικονομικό κόστος και τις δυνατότητες λειτουργίας και συντήρησης κάθε εγκατάστασης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την επιλογή της καταλληλότερης λύσης για κάθε εφαρμογή, εξασφαλίζοντας τόσο την περιβαλλοντική προστασία όσο και τη βιώσιμη λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών επεξεργασίας λυμάτων, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις για προστασία του περιβάλλοντος, εξοικονόμηση ενέργειας και επαναχρησιμοποίηση υδατικών πόρων, δημιουργεί σημαντικές προοπτικές για περαιτέρω έρευνα στον τομέα των αποκεντρωμένων και προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.

Αρχικά, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περαιτέρω διερεύνηση των τεχνολογιών MABR και των υβριδικών συστημάτων που βασίζονται σε αυτές. Παρότι τα διαθέσιμα ερευνητικά αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός εφαρμογών πλήρους κλίμακας ώστε να αξιολογηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η μακροχρόνια λειτουργική τους συμπεριφορά, η αξιοπιστία τους και το πραγματικό ενεργειακό τους όφελος σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Παράλληλα, σημαντικό πεδίο έρευνας αποτελεί η περαιτέρω ανάπτυξη αναερόβιων τεχνολογιών υψηλής απόδοσης, όπως τα AnMBR και τα προηγμένα υβριδικά αναερόβια συστήματα. Η δυνατότητα συνδυασμού υψηλής απόδοσης επεξεργασίας με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και παραγωγή βιοαερίου δημιουργεί σημαντικές προοπτικές για την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντική θεωρείται η εφαρμογή μεθοδολογιών αξιολόγησης κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) και ανάλυσης ανθρακικού αποτυπώματος στις αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να προσφέρει πληρέστερη εικόνα σχετικά με τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαφόρων τεχνολογιών, πέρα από τις κλασικές παραμέτρους απόδοσης και κόστους.

Ένα ακόμη πεδίο με ιδιαίτερες προοπτικές είναι η ενσωμάτωση τεχνολογιών ψηφιακής παρακολούθησης, αυτοματισμών και συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης στη λειτουργία των αποκεντρωμένων μονάδων επεξεργασίας λυμάτων. Η αξιοποίηση αισθητήρων,

συστημάτων τηλεμετρίας και αλγορίθμων βελτιστοποίησης μπορεί να συμβάλει στη μείωση του λειτουργικού κόστους, στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και στην έγκαιρη ανίχνευση πιθανών προβλημάτων λειτουργίας.

Ιδιαίτερη έμφαση αναμένεται επίσης να δοθεί στο μέλλον στην ανάκτηση πόρων από τα λύματα, σύμφωνα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Η ανάκτηση νερού για επαναχρησιμοποίηση, η αξιοποίηση θρεπτικών συστατικών όπως το άζωτο και ο φώσφορος, καθώς και η παραγωγή ενέργειας μέσω βιοαερίου αναμένεται να αποτελέσουν βασικούς άξονες ανάπτυξης των νέων εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Τέλος, για την ελληνική πραγματικότητα κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η υλοποίηση περισσότερων πιλοτικών και πλήρους κλίμακας εφαρμογών αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων σε μικρούς οικισμούς, νησιωτικές περιοχές και τουριστικές εγκαταστάσεις. Η συλλογή πραγματικών λειτουργικών δεδομένων θα συμβάλει στη βελτίωση της τεχνικής αξιολόγησης των τεχνολογιών και στην επιλογή των πλέον κατάλληλων λύσεων για τις ιδιαίτερες συνθήκες της χώρας.

Συνολικά, οι μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα της αποκεντρωμένης επεξεργασίας λυμάτων αναμένεται να επικεντρωθούν στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, στην επαναχρησιμοποίηση νερού, στην ανάκτηση πόρων και στην ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων λειτουργίας και ελέγχου. Οι κατευθύνσεις αυτές αναμένεται να διαμορφώσουν την επόμενη γενιά προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και στην προστασία του περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Ανδρεαδάκης, Α. (2012). *Κείμενο Κατευθυντήριων Γραμμών για τη Διαχείριση Λυμάτων Μικρών Οικισμών*. Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής.

<https://www.apdkritis.gov.gr/sites/default/files/files/>

[%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%95%CE%A5%CE%98%CE%A5%CE%9D%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%99%CE%95%CE%A3%20%CE%93%CE%A1%CE%91%CE%9C%CE%9C%CE%95%CE%A3%20%CE%A5%CE%A0%CE%95%CE%9A%CE%91%20%CE%93%CE%99%CE%91%20%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%A1%CE%9F%CE%A5%CE%A3%20%CE%9F%CE%99%CE%9A%CE%99%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A5%CE%A3.pdf](https://www.apdkritis.gov.gr/sites/default/files/files/%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%95%CE%A5%CE%98%CE%A5%CE%9D%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%99%CE%95%CE%A3%20%CE%93%CE%A1%CE%91%CE%9C%CE%9C%CE%95%CE%A3%20%CE%A5%CE%A0%CE%95%CE%9A%CE%91%20%CE%93%CE%99%CE%91%20%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%A1%CE%9F%CE%A5%CE%A3%20%CE%9F%CE%99%CE%9A%CE%99%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A5%CE%A3.pdf)

Ελληνική Δημοκρατία. (1997). *Κοινή Υπουργική Απόφαση 5673/400/1997: Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων*. ΦΕΚ 192/Β/14.03.1997.
<https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-oik-56734001997-fek-192b-1431997>

Ελληνική Δημοκρατία. (2003). *Νόμος 3199/2003: Προστασία και διαχείριση των υδάτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ*. ΦΕΚ 280/Α/09.12.2003.
<https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/n-31992003-fek-280a-9122003>

Ελληνική Δημοκρατία. (2007). *Προεδρικό Διάταγμα 51/2007: Καθορισμός μέτρων και διαδικασιών για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ*. ΦΕΚ 54/Α/08.03.2007.
<https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/pd-512007-fek-54a-832007>

Ελληνική Δημοκρατία. (2011). *Κοινή Υπουργική Απόφαση 145116/2011: Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις*. ΦΕΚ 354/Β/08.03.2011. <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-oik-1451162011-fek-354b-832011>

Ελληνική Δημοκρατία. (2013). *Κοινή Υπουργική Απόφαση 191002/2013: Τροποποίηση της ΚΥΑ 145116/2011*. ΦΕΚ 2220/Β/09.09.2013.
<https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-oik-1910022013-fek-2220b-992013>

- Ευρωπαϊκή Ένωση. (1991). *Οδηγία 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 1991 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων*. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, L135, 40–52. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/ALL/?uri=CELEX:31991L0271>
- Ευρωπαϊκή Ένωση. (2020). *Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Μαΐου 2020 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση του νερού*. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L177, 32–55. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/ALL/?uri=CELEX:32020R0741>
- Καραπαπά, Β. (2018). *Αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης υγρών αστικών αποβλήτων*. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο. <https://apothesis.eap.gr/archive/download/34efbdad-3437-4c56-9d69-6b05523a146c.pdf>
- Κούκνα, Γ. (2016). *Διερεύνηση αποκεντρωμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων μικρών οικισμών*. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο. <https://apothesis.eap.gr/archive/item/82128>
- Ροϊκός, Κ. (2012). *Τελική έκθεση για τη διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων*. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. https://www.roikos.gr/wp-content/uploads/mikra_systimata_epeksergasias.pdf
- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (χ.χ.). *Τεχνικές οδηγίες και κατευθύνσεις για έργα επεξεργασίας λυμάτων*. <https://web.tee.gr>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2023). *Διαχείριση αστικών λυμάτων και προστασία υδατικών πόρων*. <https://ypen.gov.gr>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2024). *Πολιτική διαχείρισης υδατικών πόρων και επαναχρησιμοποίησης νερού στην Ελλάδα*. Αθήνα.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2024). *Σχέδια διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών και εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ στην Ελλάδα*. Αθήνα. <https://wfdver.ypeka.gr/>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. (2012). *Κατευθυντήριες γραμμές για τη διαχείριση λυμάτων μικρών οικισμών*. Ειδική Γραμματεία Υδάτων. <https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2025/12/%CE%9F%CE%B4%CE%B7%CE%B3%CF%8C%CF%82-%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7%CF%82-%CE%9B%CF%85%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD->

%CF%83%CE%B5-
%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%81%CE%BF%CF%8D%CF%82-
%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D%CF%
82.docx.pdf

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ

- AESA Arabia. (2023). *Submerged Aerobic Fixed Film Reactor (SAFF)*. Retrieved from <https://www.aesarabia.com/submerged-aerobic-fixed-film-reactor-saff>
- Alfadil, A., et al. (2023). Performance evaluation and operational characteristics of fixed-bed biofilm reactors treating high-strength wastewater. *Science of the Total Environment*, 889, 164796.
- Al-Rekabi, W. S., Qiang, H., & Qiang, Z. (2007). *Review on sequencing batch reactors..*
- Andreottola, G., Foladori, P., Ragazzi, M., & Tatàno, F. (2000). Experimental comparison between MBBR and activated sludge systems. <https://doi.org/10.3923/pjn.2007.11.19>
- Angelakis, A. N., & Gikas, P. (2014). Water reuse: Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU states. *Water Utility Journal*, 8, 67–78.
- Angelakis, A. N., & Snyder, S. A. (2015). *Wastewater Treatment and Reuse: Past, Present, and Future*. *Water*, 7, 4887–4895.
- Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B. E., & Tchobanoglous, G. (2018). *Water Reuse: From Ancient to Modern Times and the Future*.
- Angelakis, A. N., Kavoulaki, E., & Dialynas, M. G. (2014). *Sanitation and stormwater and wastewater technologies in Minoan Era*.
- Angelakis, A. N., Koutsoyiannis, D., & Tchobanoglous, G. (2005). *Urban wastewater and stormwater technologies in ancient Greece*. *Water Research*, 39, 210–220.
- Ardern, E., & Lockett, W. T. (1914). *Experiments on the Oxidation of Sewage Without the Aid of Filters*. *Journal of the Society of Chemical Industry*.
- Askari, M., et al. (2025). Enhancing sequencing batch reactors for wastewater treatment: Recent advances and sustainability aspects. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119656>

- Atasoy, E., Murat, S., Baban, A., & Tiris, M. (2007). Membrane bioreactor (MBR) treatment of segregated household wastewater for reuse. *Clean – Soil, Air, Water*, 35(5), 465–472.
- Bachmann, A., Beard, V. L., & McCarty, P. L. (1985). Performance characteristics of the anaerobic baffled reactor. *Water Research*, 19(1), 99–106. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90330-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90330-6)
- Barber, W. P., & Stuckey, D. C. (1999). The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review. *Water Research*, 33(7), 1559–1578. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00371-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00371-6)
- Bolto, B., & Gregory, J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research*, 41(11), 2301–2324.
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* (3rd ed.). IWA Publishing.
- Brown, J. (2005). *The Early History of Wastewater Treatment and Disinfection*.
- Burian, S. J., Nix, S. J., Pitt, R. E., & Durrans, S. R. (2000). *Urban Wastewater Management in the United States: Past, Present, and Future*.
- Cabije, A. H., Agapay, R. C., & Tampus, M. V. (2009). Carbon–nitrogen–phosphorus removal and biofilm growth characteristics in an integrated wastewater treatment system involving a rotating biological contactor. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 4(5), 735–743.
- Capodaglio, A. G. (2017). *Integrated, decentralized wastewater management for resource recovery in rural and peri-urban areas*. *Resources*, 6(2), 22. <https://doi.org/10.3390/resources6020022>
- Carrasquero-Ferrer, S., Pino-Rodríguez, J., & Díaz-Montiel, A. (2025). Sequencing batch reactor: A sustainable wastewater treatment option for the canned vegetable industry. *Sustainability*, 17(3), 818. <https://doi.org/10.3390/su17030818>
- Carrera Fernández, P., Ma, J., Caluwé, M., Wyffels, S., & Volcke, E. I. P. (2025). Next-generation continuous-flow SBR technology for municipal wastewater treatment: Design and optimisation. *Science of the Total Environment*, 973, 179165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179165>
- Casey, E., Syron, E., & Nerenberg, R. (2023). Membrane aerated biofilm reactors (MABRs) for energy-efficient wastewater treatment. In *Current Developments in Biotechnology and*

Bioengineering (pp. 173–205). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24826-9.00008-5>

- Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009). A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155(1–2), 1–18.
- Chimuca, J. F. J., de Sousa, J. T., Lopes, W. S., Leite, V. D., & do Canto, C. S. A. (2020). Decentralized treatment of domestic sewage in dynamic membrane bioreactor. *Desalination and Water Treatment*, 197, 76–89. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25981>
- Chisti, Y. (2007). *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306.
- Cinar, O., et al. (2021). Membrane bioreactor technology for decentralized wastewater treatment applications. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100109. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100109>
- Cooper, P. F. (2007). *Historical Aspects of Wastewater Treatment*.
- Craggs, R., Sutherland, D., & Campbell, H. (2012). Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *Journal of Applied Phycology*, 24, 329–337.
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). *Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment*. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 145–155.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). *Small and decentralized wastewater management systems*. McGraw-Hill.
- Atasoy, E., Murat, S., Baban, A., & Tiris, M. (2007). Membrane bioreactor (MBR) treatment of segregated household wastewater for reuse. *Clean – Soil, Air, Water*, 35(5), 465–472.
- De Feo, G., Antoniou, G., Fardin, H. F., El-Gohary, F., Zheng, X. Y., Reklaityte, I., Butler, D., Yannopoulos, S., & Angelakis, A. N. (2014). The historical development of sewers worldwide. 3936–3974. <https://doi.org/10.3390/su6063936><https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.053>
- di Biase, A., Kowalski, M. S., Devlin, T. R., & Oleszkiewicz, J. A. (2019). *Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review*. *Journal of Environmental Management*, 247, 849–866.

- Ding, Y., et al. (2025). Advances and challenges in anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment and energy recovery. *Journal of Environmental Management*, 124277. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124277>
- Dorgeloh, I. E. (n.d.). *European market for decentralized waste water systems*. National Technical University of Athens (NTUA).
- Downing, L. S., Nerenberg, R., & Oerther, D. B. (2017). Membrane aerated biofilm reactors for wastewater treatment: A review. *Water Research*, 117, 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.031>
- Enflow. (n.d.). *Wastewater treatment plants – SBR, MBBR and MBR systems*. Technical information and applications.
- EPA (1999). *Sequencing batch reactors factsheet*. EPA 932-F-99-073 **United States Environmental Protection Agency**. Washington, D.C.
- European Commission. (2023). *Water reuse in the European Union*. Directorate-General for Environment.
- European Commission. (2024). *Urban Wastewater Treatment Directive: Revision and implementation*. Directorate-General for Environment.
- European Commission. (2025). *Urban wastewater treatment (from 2027)*. Publications Office of the European Union.
- European Environment Agency (EEA). (2023). *Europe's waters: Status and pressures*.
- European Parliament, & Council of the European Union. (2024). *Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast)*. Official Journal of the European Union, L 2024/3019.
- European Union. (1991). *Council Directive 91/271/EEC concerning urban waste-water treatment*. Official Journal of the European Communities, L135, 40–52. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1991/271/oj/eng>
- European Union. (2000). *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Official Journal of the European Communities, L327, 1–73. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj/eng>

- European Union. (2020). *Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council on minimum requirements for water reuse*. Official Journal of the European Union, L177, 32–55. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj/eng>
- European Union. (2024). *Directive (EU) 2024/3019 concerning urban wastewater treatment*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024L3019>
- Feng, H., Hu, L., Mahmood, Q., Fang, C., Qiu, C., Shen, D., & Yu, C. (2014). Anaerobic baffled reactor coupled with other treatment technologies for wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, 117, 794–802. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.080>
- Flemming, H. C., & Wingender, J. (2010). *The biofilm matrix*. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623–633.
- Flemming, H. C., Wingender, J., Szewzyk, U., et al. (2016). *Biofilms: An emergent form of bacterial life*. *Nature Reviews Microbiology*, 14(9), 563–575.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10.
- Foxon, K. M., Pillay, S., Lalbahadur, T., Rodda, N., Buckley, C. A., & Kassim, A. (2004). The evaluation of anaerobic baffled reactors for sanitation in developing countries. *Water SA*, 30(5), 44–50.
- Grady, C. P. L., Daigger, G. T., Love, N. G., & Filipe, C. D. M. (2011). *Biological Wastewater Treatment* (3rd ed.). CRC Press.
- Gregory, J., & Barany, S. (2011). Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures. *Advances in Colloid and Interface Science*, 169(1), 1–12.
- Guo, W., Ngo, H. H., & Li, J. (2012). A mini-review on membrane bioreactor operation and energy consumption. *Bioresource Technology*, 122, 27–34.
- Hai, F. I., Yamamoto, K., & Fukushi, K. (2014). Hybrid treatment systems for water and wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(9), 937–971.
- Hammer, M. J., & Hammer, M. J. Jr. (2012). *Water and Wastewater Technology* (7th ed.). Pearson Education.
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing.

- Huarui Carbon. (2025). *Difference between PAC and GAC*. Retrieved June 2026, from
- Irvine, R. L., & Busch, A. W. (2002). Sequencing batch biological reactors—An overview. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. <https://doi.org/10.1021/ie0201821>
- Jansen, M. (1989). *Water Supply and Sewage Disposal at Mohenjo-Daro*.
- Jokić, M., et al. (2025). Hybrid anaerobic–aerobic decentralized wastewater treatment systems based on ABR technology. *Ekonomika Poljoprivrede*, 72(2), 441–458. <https://doi.org/10.59267/ekoPolj2502441J>
- Judd, S. (2006). The status of membrane bioreactor technology. *Water Research*, 40(5), 875–885. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.006>
- Judd, S. (2011). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment* (2nd ed.). Elsevier.
- Judd, S. (2013). Membrane fouling and operational performance in hybrid SBR–MBR systems. *Journal of Membrane Science*, 445, 88–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2013.06.021>
- Khalaf, M., et al. (2024). Fixed-bed biofilm reactor technology for compact wastewater treatment applications. *Digitalization Trends in Industry*, 2(3). <https://doi.org/10.38035/dit.v2i3.1790>
- Khan, N. A., Saidulu, D., Alsubih, M., López-Maldonado, E. A., Christwardana, M., Singh, S., Ramamurthy, A., & Majumder, A. (2025). Application of hybrid SBR–microalgae-based MBR for real wastewater treatment: Insights into role of operational parameters on system performance. *Biochemical Engineering Journal*, 226, 110005. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2025.110005>
- Khumalo, N., Mthembu, M. S., & Bakare, B. F. (2022). Aerobic sequencing batch reactor for wastewater treatment: A review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 11(10). [IJERT – Aerobic Sequencing Batch Reactor Review](#)
- Lazarova, V., & Manem, J. (2000). *Innovative Biofilm Treatment Technologies for Water and Wastewater Treatment*.
- Le-Clech, P., Chen, V., & Fane, T. A. G. (2006). Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 284(1–2), 17–53.
- Lettinga, G., & Hulshoff Pol, L. W. (1991). UASB-process design for various types of wastewaters. *Water Science and Technology*, 24(8), 87–107.

- Lettinga, G., Rebac, S., & Zeeman, G. (2001). *Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment*. *Trends in Biotechnology*, 19(9), 363–370.
- Leyva-Díaz, J. C., Monteoliva-García, A., Martín-Pascual, J., Muñío, M. M., González-López, J., & Poyatos, J. M. (2020). Moving bed biofilm reactor as an alternative wastewater treatment process for nutrient removal and recovery in the circular economy model. *Bioresource Technology*, 299, 122631. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122631> *
- Cabije, A. H., Agapay, R. C., & Tampus, M. V. (2009). Carbon–nitrogen–phosphorus removal and biofilm growth characteristics in an integrated wastewater treatment system involving a rotating biological contactor. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 4(5), 735–743.
- Leyva-Díaz, J. C., Monteoliva-García, A., Martín-Pascual, J., Muñío, M. M., González-López, J., & Poyatos, J. M. (2020). Moving bed biofilm reactor as an alternative wastewater treatment process for nutrient removal and recovery in the circular economy model. *Bioresource Technology*, 299, 122631.
- Li, X., Zhang, X., Zhao, M., Zheng, X., Wang, Z., & Fan, C. (2024). Application of decentralized wastewater treatment technology in rural domestic wastewater treatment. *Sustainability*, 16(19), 8635.
- Li, X., et al. (2025). Recent advances and operational optimization of compact oxidation ditch systems for decentralized wastewater treatment. *Results in Engineering*, 25, 107838. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107838>
- Libralato, G., Volpi Ghirardini, A., & Avezzi, F. (2012). To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. *Journal of Environmental Management*, 94(1), 61–68.
- Liu, Y., et al. (2015). Hybrid anaerobic baffled reactor and biofilm reactor systems for decentralized wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 273, 490–499. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.109>
- Liu, Y., Li, D., Zeng, G., Li, X., Fan, C., & Liu, S. (2014). Performance of A2O-MBR system for wastewater treatment and reuse under different operating conditions. *Desalination and Water Treatment*, 57(3), 1–10. <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2014.926647>
- Lofrano, G., & Brown, J. (2010). *Wastewater Management Through the Ages: A History of Mankind*.

- Malinauskaitė, J. (2024). Wastewater reuse in the EU and Southern European countries: Legislative developments and future perspectives. *Sustainability*, 16(24), 11277.
- Maliga, I., Purwono, S., Harini, R., Harahap, J., & Djafar, T. (2025). Evaluating the sustainability of AnMBR for domestic greywater treatment in small islands. *Environmental Challenges*, 21, 101369. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101369>
- Mannina, G., et al. (2023). Advances and operational performance of rotating biological contactors for wastewater treatment. *Water*, 15(10), 1913. <https://doi.org/10.3390/w15101913>
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555.
- Mara, D. (2004). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. Earthscan Publications.
- Martin, K. J., & Nerenberg, R. (2012). *The membrane biofilm reactor (MBfR) for water and wastewater treatment*. *Water Research*, 46(1), 1–10.
- Massoud, M. A., Tarhini, A., & Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 652–659.
- Masharqa, A., Abu Ghunmi, L., Abu Ghunmi, D., & Al-Khateeb, N. (2023). Vertical and hybrid constructed wetlands as a sustainable treatment solution for wastewater: A review. *Water*, 15(19), 3348. <https://doi.org/10.3390/w15193348>
- Matsumoto, S., & Takahashi, M. (2007). Development and dissemination of Johkasou systems in Japan. *Water Practice and Technology*, 2(4).
- Membranes Editorial Office. (2023). Integrated fixed-film activated sludge systems and membrane technologies for wastewater treatment. *Membranes*, 13(8), 704. <https://doi.org/10.3390/membranes13080704>
- Meng, F., Zhang, S., Oh, Y., Zhou, Z., Shin, H. S., & Chae, S. R. (2017). Fouling in membrane bioreactors: An updated review. *Water Research*, 114, 151–180. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.006>
- Metcalf & Eddy, AECOM. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*.

- Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F., & Sala-Garrido, R. (2010). Economic feasibility study for wastewater treatment: A cost-benefit analysis. *Science of the Total Environment*, 408(20), 4396–4402.
- Morse, G. K., Brett, S. W., Guy, J. A., & Lester, J. N. (1998). Review: Phosphorus removal and recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 212(1), 69–81.
- Murshid, S., Antonysamy, A., Dhakshinamoorthy, G., Jayaseelan, A., & Pugazhendhi, A. (2023). A review on biofilm-based reactors for wastewater treatment: Recent advancements in biofilm carriers, kinetics, reactors, economics, and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 892, 164796. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164796>
- Nerenberg, R. (2023). Advances in membrane aerated biofilm reactor technology for nitrogen removal. *Reviews in Chemical Engineering*, 39(4), 585–610. <https://doi.org/10.1515/revce-2021-0078>
- Ødegaard, H. (2006). Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process. *Water Science and Technology*, 53(9), 17–33.
- Ødegaard, H., Rusten, B., & Westrum, T. (2012). A new moving bed biofilm reactor—Applications and results. *Desalination and Water Treatment*. <https://doi.org/10.5004/dwt.2012.2461>
- Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577–2641.
- Panagopoulos, A. (2023). Zero liquid discharge desalination and wastewater treatment: A review of sustainable technologies and applications. *Journal of Environmental Management*, 347, 119614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119614>
- Panagopoulos, A. (2025). Recent advances and future perspectives of zero liquid discharge systems for sustainable wastewater management. *Water Practice and Technology*, 20(5). <https://doi.org/10.2166/wpt.2025.100>
- Pepper, I. L., Gerba, C. P., & Gentry, T. J. (2015). *Environmental Microbiology* (3rd ed.). Academic Press.
- Pittman, J. K., Dean, A. P., & Osundeko, O. (2011). The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology*, 102(1), 17–25.

- Posadas, E., García-Encina, P. A., Soltau, A., Domínguez, A., Díaz, I., & Muñoz, R. (2017). Carbon and nutrient removal from wastewater using microalgae. *Biotechnology Advances*, 35(3), 409–418.
- PUB Singapore. (2023). *NEWater and water reuse strategy in Singapore*. Public Utilities Board.
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels. *Applied Energy*, 88(10), 3411–3424.
- Revankar, A., et al. (2026). Operational optimization and fouling control in membrane aerated biofilm reactors for decentralized wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 109444. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.109444>
- Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. McGraw-Hill.
- Rotoseptic.. *Compact biological treatment units for urban sewage*. Retrieved from εταιρικό τεχνικό φυλλάδιο / ιστοσελίδα.
- Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., & Lygren, E. (2006). Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.002>
- Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., & Lygren, E. (2006). Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 322–331.
- Rusten, B., Hem, L., & Ødegaard, H. (1995). Nitrification of municipal wastewater in moving-bed biofilm reactors. *Water Environment Research*, 67(1), 75–86. <https://doi.org/10.2175/106143095X131213>
- Rusten, B., Hem, L., & Ødegaard, H. (2016). Nitrification of municipal wastewater in moving-bed biofilm reactors. *Water Research*, 41(7), 1459–1464. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.031>
- Saeed, T., et al. (2024). Recent advances in compact membrane bioreactor systems for decentralized wastewater treatment. *Cleaner Engineering and Circular Economy*, 8, 100886. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100886>

- Saidulu, D., Gupta, B., & Sharma, G. (2021). Membrane aerated biofilm reactors (MABR): Recent advances and future perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101857.
- Saidulu, D., Majumder, A., & Gupta, A. K. (2021). A systematic review of moving bed biofilm reactor, membrane bioreactor and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106112.
- Saidulu, D., Majumder, A., & Gupta, A. K. (2021). A systematic review of moving bed biofilm reactor, membrane bioreactor and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment: Comparison of research trends, removal mechanisms and performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106112.
- Shannon, M. A, Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301–310.
- Singh, K., Viraraghavan, T., & Tarkeshwar, P. (2011). Integrated anaerobic baffled reactor systems coupled with aerobic post-treatment for municipal wastewater treatment. *Desalination*, 276(1–3), 13–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.054>
- Smith, J., et al. (2023). Anaerobic membrane bioreactors and circular economy approaches in wastewater treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 100975. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2023.100975>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Speece, R. E. (2008). *Anaerobic Biotechnology and Odor/Corrosion Control for Municipalities and Industries*. Archae Press.
- Spellman, F. R. (2013). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations* (3rd ed.). CRC Press.
- SSWM – Sustainable Sanitation and Water Management. (2023). *Submerged Aerobic Fixed Film Reactor for Domestic Wastewater Treatment*. Retrieved from <https://sswm.info/pavitr-toolkit/get-know-pavitr-technologies/water-reclamation-solutions/submerged-aerobic-fixed-film-reactor-for-domestic-wastewater-treatment>
- Stamatelatou, K., & Lyberatos, G. (2000). *Simulation of a periodic anaerobic baffled reactor (PABR)*. Water Research.

- Syron, E., & Casey, E. (2008). Membrane-aerated biofilms for high-rate biotreatment: Performance appraisal, engineering principles, scale-up, and development requirements. *Environmental Science & Technology*, 42(6), 1833–1844. <https://doi.org/10.1021/es071946g>
- Syron, E., & Casey, E. (2008). Membrane-aerated biofilms for wastewater treatment applications. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 83(7), 964–970.
- Tawfik, A., Klapwijk, A., El-Gohary, F., & Lettinga, G. (2007). Treatment of anaerobically pre-treated domestic sewage by rotating biological contactors. *Waste Management*, 27(4), 550–560. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.08.003>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., Leverenz, H., & Darby, J. (2004). *Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., & Pfrang, W. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education
- Tiwari, A., et al. (2025). Coverage and treatment practices in Nordic wastewater systems under the revised Urban Wastewater Treatment Directive. *Environmental Science and Pollution Research*.
- U.S. EPA (1999). *Wastewater Technology Fact Sheet: Sequencing Batch Reactors*.
- Uggetti, E., Passos, F., Solé, M., García, J., & Ferrer, I. (2014). *Recent achievements in microalgae biomass production on municipal wastewater*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 228–238. [⋆]
- UNESCO. (2020). *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. UNESCO Publishing.
- UNESCO. (2024). *The United Nations world water development report 2024: Water for prosperity and peace*. UNESCO Publishing.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2016). *A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a Global Assessment*.

- United Nations Environment Programme. (2016). *A snapshot of the world's water quality: Towards a global assessment*. <https://www.unep.org/resources/report/snapshot-worlds-water-quality>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- United Nations. (2023). *Sustainable Development Goals Report 2023*. United Nations.
- UN-Water. (2021). *Summary progress update 2021: SDG 6 — Water and sanitation for all*. United Nations.
- USEPA. (1999). *Wastewater Treatment Manuals: Treatment Systems for Small Communities, Business, Leisure Centres and Hotels*.
- USEPA. (2002). *Onsite Wastewater Treatment Systems Manual*.
- Van Ginkel, K. (2006). *Types, numbers and performance of decentralized wastewater treatment systems in Europe*. ERASM Project Report.
- Vesilind, P. A., & Morgan, S. M. (2011). *Introduction to Environmental Engineering* (3rd ed.). Cengage Learning.
- von Sperling, M. (2007). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. IWA Publishing.
- Vuorinen, H. S., Juuti, P. S., & Katko, T. S. (2007). *History of Water and Health from Ancient Civilizations to Modern Times*. * Gerardi, M. H. (2006). *Wastewater Bacteria*. John Wiley & Sons.
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>
- Water Europe. (2023). *White paper on water reuse and the implementation of Regulation (EU) 2020/741*. Water Europe.
- Water Reuse Europe. (2024). *What is the place of decentralised wastewater treatment for water reuse?* Water Reuse Europe.
- WHO (2017). *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater*.
- Wikipedia contributors. (2025). *Urban Waste Water Treatment Directive*. In Wikipedia, *The Free Encyclopedia*.
- World Health Organization (WHO). (2018). *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater*.

- World Health Organization. (2017). *Guidelines on sanitation and health*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241514705>
- Wu, S., et al. (2016). *Aerated constructed wetlands for wastewater treatment: A review*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 329–340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.031>
- Xu, G., et al. (2014). Impact of hydraulic retention time on nutrient removal in modified sequencing batch reactors. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.019>
- Yang Y, Cui G, Lan CQ. Developments in evaporative cooling and enhanced evaporative cooling - A review. Renewable Sustainable Energy Reviews 2019;113:109230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.037>**
- Zhang, D., et al. (2015). *Enhanced nitrogen removal in aerated vertical flow constructed wetlands*. *Bioresource Technology*, 177, 318–325. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.041>
- Zhang, X., et al. (2023). Performance and molecular weight distribution evolution of traditional Chinese medicine wastewater treated by a periodic anaerobic baffled reactor. *Environmental Research*, 240, 117563. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117563>
- Πηγές στο διαδίκτυο