

Τεχνοοικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων.

Νικόλαος Αποστόλης Σούρσος
και Μεταπτ. Φοιτητής ΔΧΤ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ
std168130@ac.eap.gr

Ιωάννης Μαναριώτης
Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ
manariotis.ioannis@ac.eap.gr

Περίληψη – Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται την τεχνοοικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση σύγχρονων αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων, με στόχο τη συγκριτική διερεύνηση της τεχνικής τους απόδοσης, των ενεργειακών απαιτήσεων, του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας, καθώς και της καταλληλότητάς τους για εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας. Στο πλαίσιο της μελέτης εξετάζονται συμβατικές, αερόβιες, αναερόβιες, μεμβρανικές και υβριδικές τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων, ενώ η αξιολόγηση βασίζεται σε εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση διεθνών επιστημονικών δημοσιεύσεων, ευρωπαϊκής και ελληνικής νομοθεσίας, τεχνικών προτύπων και στοιχείων πραγματικών εφαρμογών. Για κάθε τεχνολογία αξιολογήθηκαν η αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών, οι απαιτήσεις σε χώρο, η λειτουργική σταθερότητα, η ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος επένδυσης και λειτουργίας, καθώς και οι απαιτήσεις συντήρησης. Από τη συγκριτική ανάλυση προέκυψε ότι δεν υπάρχει μία τεχνολογία που να υπερτερεί σε όλα τα κριτήρια αξιολόγησης, καθώς η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος εξαρτάται από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Τέλος, διατυπώνονται προτάσεις επιλογής τεχνολογιών ανά πεδίο εφαρμογής, με γνώμονα τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων και τις σύγχρονες απαιτήσεις της ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής πολιτικής.

Λέξεις-Κλειδιά: Επεξεργασία λυμάτων, αποκεντρωμένα συστήματα, προκατασκευασμένες μονάδες, τεχνοοικονομική αξιολόγηση, ενεργειακή αξιολόγηση.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποτελεσματική επεξεργασία των αστικών λυμάτων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την προστασία του περιβάλλοντος, της δημόσιας υγείας και των υδατικών πόρων. Η συνεχής αύξηση των περιβαλλοντικών απαιτήσεων, σε συνδυασμό με την ανάγκη περιορισμού του ενεργειακού κόστους και της κατανάλωσης φυσικών πόρων, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη σύγχρονων αποκεντρωμένων και compact συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Τα συστήματα αυτά αποτελούν ιδιαίτερα

κατάλληλη λύση για μικρούς οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις και απομακρυσμένες περιοχές, όπου η κατασκευή μεγάλων κεντρικών εγκαταστάσεων δεν είναι πάντοτε τεχνικά ή οικονομικά εφικτή.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η τεχνοοικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση των σημαντικότερων αποκεντρωμένων compact συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Εξετάζονται οι κυριότερες συμβατικές, αερόβιες, αναερόβιες, μεμβρανικές και υβριδικές τεχνολογίες, ενώ πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση ως προς την αποδοτικότητα επεξεργασίας, την ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, τις απαιτήσεις συντήρησης και την καταλληλότητά τους για διαφορετικά πεδία εφαρμογής. Τα συμπεράσματα της μελέτης αποσκοπούν στην υποστήριξη της επιλογής της κατάλληλης τεχνολογίας ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής και τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

A. Μεθοδολογία της έρευνας

Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση με αντικείμενο τις σύγχρονες τεχνολογίες αποκεντρωμένης επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Για τη συλλογή των δεδομένων αξιοποιήθηκαν διεθνή επιστημονικά άρθρα, βιβλία, τεχνικές οδηγίες, ευρωπαϊκή και ελληνική νομοθεσία, καθώς και τεχνικά εγχειρίδια κατασκευαστών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Η βιβλιογραφική έρευνα επικεντρώθηκε σε τεχνολογίες που εφαρμόζονται κυρίως σε μικρούς και μεσαίους οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις και αποκεντρωμένες εφαρμογές.

Στο πλαίσιο της μελέτης επιλέχθηκαν και αξιολογήθηκαν οι σημαντικότερες συμβατικές, αερόβιες, αναερόβιες, μεμβρανικές και υβριδικές τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω συγκριτικής ανάλυσης τεχνικών, ενεργειακών και οικονομικών χαρακτηριστικών, με στόχο την ανάδειξη

των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών κάθε τεχνολογίας.

Β. Κριτήρια συγκριτικής αξιολόγησης

Η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών πραγματοποιήθηκε με βάση ένα σύνολο τεχνικών και λειτουργικών κριτηρίων, τα οποία επηρεάζουν άμεσα την επιλογή ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων. Ειδικότερα, εξετάστηκαν η αποδοτικότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου (BOD₅, COD), αιωρούμενων στερεών (TSS), ολικού азώτου (TN) και ολικού φωσφόρου (TP), οι απαιτήσεις σε διαθέσιμη έκταση εγκατάστασης, η λειτουργική σταθερότητα έναντι μεταβολών παροχής και οργανικού φορτίου, η ενεργειακή κατανάλωση, το κόστος επένδυσης (CAPEX), καθώς και οι απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης (OPEX). Η αξιολόγηση αυτή επέτρεψε τη συνολική τεchnοοικονομική σύγκριση των εξεταζόμενων τεχνολογιών και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητά τους για διαφορετικά πεδία εφαρμογής.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΠΟΥ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΜΕΛΕΤΗ

Κατηγορία	Τεχνολογίες
Συστήματα ενεργού ιλύος	SBR, Oxidation Ditch
Συστήματα βιοφίλμ	MBBR, FBBR, SAF, SAFF, RBC
Αναερόβια συστήματα	ABR, PABR
Μεμβρανικά συστήματα	MBR, AnMBR, MABR
Υβριδικά συστήματα	IFAS, Hybrid SBR-IFAS, Hybrid SBR-MBR, ABR + Aerobic Post-treatment, ABR + Biofilm Reactor, AVFCW, MABR-Based Hybrid Systems, A2O-MBR

III. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Α. Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών

Η συγκριτική αξιολόγηση των αποκεντρωμένων compact συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων ανέδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την αποδοτικότητα επεξεργασίας, τις απαιτήσεις σε διαθέσιμο χώρο, την ενεργειακή κατανάλωση και το κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Οι τεχνολογίες μεμβρανών (MBR, AnMBR και A2O-MBR) παρουσίασαν την υψηλότερη ποιότητα εκροής, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών συστατικών. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά συνοδεύονται από αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.

Αντίθετα, οι τεχνολογίες βιοφίλμ, όπως οι MBBR και IFAS, εμφάνισαν ιδιαίτερα ικανοποιητική απόδοση επεξεργασίας, υψηλή λειτουργική σταθερότητα και μικρότερες απαιτήσεις σε χώρο, αποτελώντας μία ισορροπημένη λύση μεταξύ τεχνικής απόδοσης και

λειτουργικού κόστους. Τα αναερόβια συστήματα, όπως οι ABR και PABR, διακρίθηκαν για τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και την απλότητα λειτουργίας, ωστόσο απαιτούν συνδυασμό με αερόβιο στάδιο όταν απαιτείται υψηλή ποιότητα εκροής.

ΠΙΝΑΚΑΣ II

Συγκριτική τεχνική αξιολόγηση των αποκεντρωμένων compact συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

Σύστημα	Απόδοση επεξεργασίας	Απαιτήσεις χώρου	Συνολική τεχνική αξιολόγηση
SBR	Υψηλή	Μικρή	Πολύ καλή
MBBR	Υψηλή	Μικρή	Εξαιρετική
MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Εξαιρετική
Oxidation Ditch	Υψηλή	Μέτρια	Πολύ καλή
FBBR	Υψηλή	Μικρή	Πολύ καλή
SAF	Υψηλή	Μέτρια	Καλή
RBC	Μέτρια-Υψηλή	Μέτρια	Καλή
ABR	Μέτρια	Μικρή	Ικανοποιητική
MABR	Υψηλή	Πολύ μικρή	Εξαιρετική
SAFF	Υψηλή	Μέτρια	Καλή
PABR	Μέτρια	Μικρή	Ικανοποιητική
IFAS	Υψηλή	Μικρή	Εξαιρετική
Hybrid SBR-IFAS	Πολύ υψηλή	Μικρή	Εξαιρετική
AnMBR	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Εξαιρετική
Hybrid SBR-MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Εξαιρετική
ABR + Aerobic Post-Treatment	Υψηλή	Μέτρια	Πολύ καλή
ABR + Biofilm Reactor	Υψηλή	Μικρή-Μέτρια	Πολύ καλή
AVFCW	Μέτρια	Μεγάλη	Ικανοποιητική
MABR-Based Hybrid Systems	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Εξαιρετική
A2O-MBR	Πολύ υψηλή	Πολύ μικρή	Εξαιρετική

α αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν υπάρχει μία τεχνολογία που να υπερτερεί σε όλα τα κριτήρια αξιολόγησης. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων λυμάτων, τις απαιτήσεις ποιότητας της εκροής, τον

διαθέσιμο χώρο εγκατάστασης, το ενεργειακό κόστος και τον διαθέσιμο προϋπολογισμό. Για εφαρμογές όπου προτεραιότητα αποτελεί η επίτευξη υψηλής ποιότητας εκροής, οι τεχνολογίες μεμβρανών αποτελούν την καταλληλότερη επιλογή. Αντίθετα, σε εφαρμογές όπου κυριαρχούν οι απαιτήσεις χαμηλού κόστους και απλής λειτουργίας, οι τεχνολογίες βιοφίλμ και τα αναερόβια συστήματα αποτελούν ιδιαίτερα ανταγωνιστικές λύσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ III

Συγκριτική ενεργειακή αξιολόγηση των αποκεντρωμένων compact συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

Σύστημα	Απαιτήσεις αερισμού	Βοηθητικός εξοπλισμός	Συνολική ενεργειακή κατανάλωση
SBR	Υψηλές	Μέτριες	Μέτρια
MBBR	Υψηλές	Χαμηλές	Μέτρια
MBR	Υψηλές	Υψηλές	Υψηλή
n Ditch	Oxidatio	Μέτριες	Υψηλή
	υψηλές		
FBBR	Υψηλές	Χαμηλές	Μέτρια
SAF	Μέτριες	Χαμηλές	Μέτρια
RBC	Χαμηλές	Χαμηλές	Χαμηλή
ABR	Πολύ χαμηλές	Χαμηλές	Πολύ χαμηλή
MABR	Χαμηλές	Μέτριες	Χαμηλή
SAFF	Μέτριες	Χαμηλές	Μέτρια
PABR	Πολύ χαμηλές	Χαμηλές	Πολύ χαμηλή
IFAS	Μέτριες	Μέτριες	Μέτρια
Hybrid SBR-IFAS	Μέτριες	Μέτριες	Μέτρια
AnMBR	Πολύ χαμηλές	Μέτριες	Χαμηλή
Hybrid SBR-MBR	Υψηλές	Υψηλές	Υψηλή
ABR + Aerobic Post-Treatment	Μέτριες	Μέτριες	Μέτρια
ABR + Biofilm Reactor	Μέτριες	Μέτριες	Μέτρια
AVFCW	Πολύ χαμηλές	Πολύ χαμηλές	Πολύ χαμηλή
MABR-Based Hybrid Systems	Χαμηλές	Μέτριες	Χαμηλή
A2O-MBR	Υψηλές	Υψηλές	Υψηλή

Η ενεργειακή αξιολόγηση έδειξε ότι οι μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις προέρχονται κυρίως από τα συστήματα αερισμού και τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Τα συστήματα μεμβρανών (MBR, Hybrid SBR-MBR και A2O-MBR) παρουσίασαν τη μεγαλύτερη συνολική ενεργειακή κατανάλωση, λόγω της συνεχούς

λειτουργίας συστημάτων αερισμού και διήθησης μέσω μεμβρανών. Αντίθετα, οι αναερόβιες τεχνολογίες (ABR και PABR) εμφάνισαν τις χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς λειτουργούν χωρίς συνεχή αερισμό. Οι τεχνολογίες MABR και τα υβριδικά συστήματα που βασίζονται σε MABR παρουσίασαν ιδιαίτερα υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, συνδυάζοντας περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας με υψηλή απόδοση επεξεργασίας. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν τη σημασία της ενεργειακής κατανάλωσης ως βασικού κριτηρίου επιλογής για σύγχρονες αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία πραγματοποίησε μία ολοκληρωμένη συγκριτική τεχνικοοικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση των σημαντικότερων αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων που εφαρμόζονται σήμερα σε μικρούς και μεσαίους οικισμούς, τουριστικές εγκαταστάσεις, βιομηχανικές μονάδες και άλλες αποκεντρωμένες εφαρμογές. Η ανάλυση ανέδειξε ότι δεν υπάρχει μία τεχνολογία που να υπερτερεί σε όλα τα κριτήρια αξιολόγησης, καθώς η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος εξαρτάται από τις απαιτήσεις ποιότητας της εκροής, τη διαθέσιμη έκταση, την ενεργειακή κατανάλωση, τις ανάγκες λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και το συνολικό κόστος επένδυσης και λειτουργίας.

Οι τεχνολογίες μεμβρανών, όπως οι MBR, AnMBR και A2O-MBR, παρουσίασαν την υψηλότερη απόδοση επεξεργασίας και την καλύτερη ποιότητα εκροής, αποτελώντας κατάλληλη επιλογή σε εφαρμογές όπου απαιτείται επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού ή η συμμόρφωση με ιδιαίτερα αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα. Αντίστοιχα, τα συστήματα βιοφίλμ, όπως τα MBBR, IFAS και MABR, προσφέρουν υψηλή αποδοτικότητα σε συνδυασμό με μικρές απαιτήσεις χώρου και αυξημένη λειτουργική σταθερότητα, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικές λύσεις για αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις. Οι αναερόβιες τεχνολογίες (ABR και PABR) διακρίνονται για τις χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και την απλότητα λειτουργίας τους, ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται η συνδυασμένη εφαρμογή τους με αερόβιο στάδιο ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή ποιότητα εκροής.

Η ενεργειακή αξιολόγηση ανέδειξε ότι ο αερισμός αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα κατανάλωσης ενέργειας στις περισσότερες τεχνολογίες, ενώ οι νεότερες τεχνολογίες, όπως τα MABR και τα αντίστοιχα υβριδικά συστήματα, παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης χωρίς ουσιαστική υποβάθμιση της απόδοσης επεξεργασίας. Παράλληλα, η πρόσφατη ευρωπαϊκή νομοθεσία για την επεξεργασία αστικών λυμάτων ενισχύει την ανάγκη ανάπτυξης ενεργειακά αποδοτικών και βιώσιμων λύσεων, με έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση του νερού και στην ανάκτηση πόρων.

Συνολικά, η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η επιλογή ενός αποκεντρωμένου συστήματος επεξεργασίας λυμάτων πρέπει να βασίζεται σε μία ολοκληρωμένη

αξιολόγηση τεχνικών, ενεργειακών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων και όχι αποκλειστικά στην αποδοτικότητα επεξεργασίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για μηχανικούς, μελετητές και φορείς λήψης αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό νέων εγκαταστάσεων ή την αναβάθμιση υφιστάμενων μονάδων. Παράλληλα, η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών επεξεργασίας και η αυξανόμενη έμφαση στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων δημιουργούν σημαντικές προοπτικές για την ευρύτερη εφαρμογή αποκεντρωμένων προκατασκευασμένων συστημάτων στο άμεσο μέλλον.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Tsuchihashi, R., & Stensel, H. D. (2013). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

European Parliament & Council of the European Union. (2024). *Directive (EU) 2024/3019 concerning urban wastewater treatment (recast)*. Official Journal of the European Union.

Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., & Lygren, E. (2006). Design and operations of the moving bed biofilm reactor process. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 322–331.

Judd, S. (2011). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment* (2nd ed.). Elsevier.

Ødegaard, H. (2006). Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process. *Water Science and Technology*, 53(9), 17–33.

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.

Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2014). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill.

Massoud, M. A., Tarhini, A., & Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management. *Science of the Total Environment*, 407(2), 627–636.

Di Biase, A., Devlin, T. R., Kowalski, M. S., Oleszkiewicz, J. A., & others. (2020). Moving bed biofilm reactor technology: A review. *Bioresource Technology*.

Leyva-Díaz, J. C., et al. (2020). Comparative assessment of biofilm-based wastewater treatment technologies. *Science of the Total Environment*.

European Commission. (2020). *Regulation (EU) 2020/741 on minimum requirements for water reuse*.

Ελληνική Δημοκρατία. (2011). **KYA 145116/2011**. Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.