



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΩΝ
ΕΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LCA)**

**WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES FOR THE
REMOVAL OF PHARMACEUTICAL COMPOUNDS –
COMPARATIVE STUDY AND LIFE CYCLE ASSESSMENT**

ΤΣΑΚΩΝΑ ΜΑΡΙΑ

A.M: 163953

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2026

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΧΕΛΑ ΔΗΜΗΤΡΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	1
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	3
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	5
1 Εισαγωγή	6
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας.....	6
1.2 Σημαντικότητα του θέματος και σύνδεση με την κυκλική οικονομία	7
1.3 Δομή και μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας.....	8
2 Θεωρητικό και Επιστημονικό Υπόβαθρο	10
2.1 Φαρμακευτικά απόβλητα και περιβαλλοντικές επιπτώσεις	10
2.1.1 Είδη φαρμακευτικών ενώσεων και τρόποι διάθεσης στο περιβάλλον	10
2.1.2 Επιπτώσεις σε υδάτινους οργανισμούς και ανθρώπινη υγεία.....	12
2.1.3 Ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών τεχνολογιών απομάκρυνσης.....	13
2.2 Ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο και πολιτικές.....	14
2.2.1 Οδηγίες και κανονισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης	14
2.2.2 Εθνικά σχέδια δράσης.....	15
2.2.3 Σύνδεση με τη στρατηγική βιώσιμης ανάπτυξης και την κυκλική οικονομία	16
3 Επισκόπηση Διαθέσιμων Τεχνολογιών Απομάκρυνσης Φαρμακευτικών Ενώσεων	17
3.1 Συμβατικές τεχνολογίες επεξεργασίας	19
3.1.1 Συστήματα Ενεργού Ιλύος (Conventional Activated Sludge - CAS).....	19
3.1.2 Βιοαντιδραστήρες Μεμβρανών (Membrane Bioreactors - MBR).....	22
3.1.3 Βιολογική Επεξεργασία με Επιμηκυμένο Χρόνο Παραμονής	24
3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ	26
3.2.1 Ενεργός Άνθρακας σε Μορφή Σκόνης (Powdered Activated Carbon - PAC) ..	26
3.2.2 Κοκκώδης Ενεργός Άνθρακας (Granular Activated Carbon - GAC)	27
3.2.3 Νέα Προσροφητικά Υλικά	27
3.3 Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (Advanced Oxidation Processes - AOPs). ..	28
3.3.1 Οζονισμός (Ozonation)	28
3.3.2 Οξείδωση Fenton και Photo-Fenton	30
3.3.3 Φωτοκατάλυση (Photocatalysis)	31
3.3.4 UV/H ₂ O ₂ Οξείδωση	31

3.3.5	Ηλεκτροχημική Οξείδωση (Electrochemical Oxidation).....	31
3.4	Τεχνολογίες Μεμβρανών για Απομάκρυνση Φαρμακευτικών.....	32
3.4.1	Νανοδιήθηση (NF) και Υπερδιήθηση	33
3.4.2	Αντίστροφη Όσμωση (RO).....	33
3.5	Υβριδικές και Συνδυαστικές Τεχνολογίες.....	34
3.6	Συγκριτική Αξιολόγηση Τεχνολογιών	34
3.7	Παράγοντες Επιλογής Τεχνολογίας.....	35
3.8	Συμπεράσματα	36
4	Συγκριτική Αξιολόγηση Τεχνολογιών και Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA).....	37
4.1	Εισαγωγή στη μεθοδολογία LCA και κριτήρια αξιολόγησης	37
4.1.1	Στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Στόχος, Απογραφή, Αξιολόγηση Επιπτώσεων, Ερμηνεία)	39
4.1.2	Κριτήρια αξιολόγησης (Απόδοση, Ενέργεια, Κόστος, Περιβαλλοντικοί δείκτες) 45	
4.2	Επισκόπηση και σύγκριση δημοσιευμένων μελετών LCA	48
4.2.1	Συμβατικές τεχνολογίες έναντι AOPs και υβριδικών συστημάτων	49
4.2.2	Κύρια ευρήματα και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (GWP, τοξικότητα, ευτροφισμός)	52
4.3	Εφαρμογές και Παραδείγματα από Χώρες της Κεντρικής Ευρώπης	66
4.3.1	Παρουσίαση επιλεγμένων μονάδων (Γερμανία, Ολλανδία, Ελβετία)	67
4.3.2	Ανάλυση και σύγκριση δεδομένων απόδοσης	68
4.4	Ανάδειξη περιβαλλοντικά αποδοτικότερων τεχνολογικών επιλογών	74
5	Συμπεράσματα και Προτάσεις	76
5.1	Κύρια συμπεράσματα της μελέτης	76
5.2	Προοπτικές βελτίωσης και εφαρμογές στην πράξη	79
5.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και χάραξη πολιτικής.....	83
6	Βιβλιογραφία.....	86
7	ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	88

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Βασικές κατηγορίες φαρμακευτικών ενώσεων στα αστικά λύματα και ιδιότητές τους.....	11
Πίνακας 2. Ενδεικτικές απαιτήσεις της Οδηγίας (ΕΕ) 2024/3019 για την απομάκρυνση φαρμακευτικών μικρορύπων.....	21
Πίνακας 3. Συγκριτική επισκόπηση τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών	34
Πίνακας 4. Αναλυτικό πλαίσιο κριτηρίων αξιολόγησης τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας.....	46
Πίνακας 5. Συγκριτική αξιολόγηση βασικών τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας	51
Πίνακας 6. Ποσοτικά δεδομένα LCA ανά τεχνολογία τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας (σύνθεση βιβλιογραφικών δεδομένων)	54
Πίνακας 7. Παραδείγματα εφαρμογής τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας στην Κεντρική Ευρώπη.....	68
Πίνακας 8. Ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας πλήρους κλίμακας ...	73
Πίνακας 9. Συγκριτική σύνοψη εμπειρίας από Κεντρική Ευρώπη (Προσαρμογή από βιβλιογραφικά δεδομένα)	74
Πίνακας 10. Σενάρια εφαρμογής τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας για τον ελληνικό χώρο	82
Πίνακας 11. Σύνοψη προτάσεων προς ρυθμιστικές αρχές, διαχειριστές και ερευνητική κοινότητα.....	83

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Διαδρομή φαρμακευτικών ενώσεων από την κατανάλωση έως το υδάτινο περιβάλλον.....	18
Εικόνα 2. Τυπική διεργασία ενεργούς ιλύος.....	19
Εικόνα 3. Απεικόνιση μονάδας	20
Εικόνα 4. Μέθοδος MBR	22
Εικόνα 5. Βιοαντιδραστήρας MBR	23
Εικόνα 6. Διαδικασία επιμήκυνσης χρόνου παραμονής	25
Εικόνα 7. Οζονισμός	29
Εικόνα 8. Ηλεκτροχημική Οξείδωση	32

ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1. Δυναμικό Υπερθέρμανσης Πλανήτη (GWP) ανά τεχνολογία.....	55
Γράφημα 2. Ενεργειακή κατανάλωση τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας	58
Γράφημα 3. Ανάλυση ευαισθησίας — Επίδραση του μεριδίου ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα επί του GWP	61
Γράφημα 4. Μεταφορά βαρών (Burden Shifting). Κανονικοποιημένη σύγκριση (CAS = 1,0)	63
Γράφημα 5. Πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας (κλίμακα 1-5).	65
Γράφημα 6. Σύγκριση ευρωπαϊκών εγκαταστάσεων τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας	72
Γράφημα 7. Διάγραμμα ροής — Σύνδεση τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας με κυκλική οικονομία ύδατος.....	81

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η **συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων** από τα αστικά υγρά απόβλητα, με κεντρικό άξονα τη μεθοδολογία της **Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA)**. Η αυξανόμενη παγκόσμια κατανάλωση φαρμάκων έχει οδηγήσει στην ανίχνευση δραστικών ουσιών (APIs) σε υδάτινους αποδέκτες, καθώς οι **συμβατικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων** αδυνατούν να τις απομακρύνουν πλήρως. Η παρουσία αυτών των μικρορύπων, ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, προκαλεί σοβαρές ανησυχίες για τη δημόσια υγεία και τα οικοσυστήματα, όπως η ανάπτυξη **αντιμικροβιακής ανθεκτικότητας (AMR)** και οι ενδοκρινικές διαταραχές σε υδρόβιους οργανισμούς.

Η εργασία επικεντρώνεται στην **τεταρτοβάθμια επεξεργασία**, εξετάζοντας τεχνολογίες όπως οι **Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (AOPs)** (οζονισμός, φωτοκατάλυση, οξείδωση Fenton), η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα και οι τεχνολογίες μεμβρανών. Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και της ανάλυσης μελετών LCA από χώρες της Κεντρικής Ευρώπης (Γερμανία, Ελβετία, Ολλανδία), η μελέτη ποσοτικοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτών των μεθόδων, λαμβάνοντας υπόψη δείκτες όπως το **Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (GWP)**, την τοξικότητα και την κατανάλωση πόρων.

Σκοπός της έρευνας είναι να αναδείξει τις **βέλτιστες περιβαλλοντικά τεχνολογικές επιλογές**, διασφαλίζοντας ότι η λύση για τον καθαρισμό των υδάτων δεν μεταφέρει το περιβαλλοντικό πρόβλημα σε άλλους τομείς (π.χ. αυξημένη κατανάλωση ενέργειας). Τέλος, η εργασία συνδέει την απομάκρυνση των φαρμακευτικών ενώσεων με τις αρχές της **κυκλικής οικονομίας**, καθώς ο υψηλός βαθμός καθαρισμού αποτελεί προϋπόθεση για την ασφαλή **επαναχρησιμοποίηση του νερού** στη γεωργία και τη βιομηχανία.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

1. Φαρμακευτικές ενώσεις
2. Υγρά απόβλητα
3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)
4. Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (AOPs)
5. Τεταρτοβάθμια επεξεργασία
6. Κυκλική οικονομία
7. Οζονισμός
8. Ενεργός άνθρακας
9. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση φαρμακευτικών προϊόντων σε παγκόσμιο επίπεδο έχει οδηγήσει στην ανίχνευση υπολειμμάτων δραστικών φαρμακευτικών ουσιών (Active Pharmaceutical Ingredients - APIs) και προϊόντων προσωπικής φροντίδας (Personal Care Products - PCPs) σε υδάτινους αποδέκτες, όπως ποτάμια, λίμνες και υπόγεια ύδατα. Οι συμβατικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (ΜΕΛ) συχνά αποδεικνύονται ανεπαρκείς στην πλήρη απομάκρυνση αυτών των ανθεκτικών οργανικών μικρορύπων, με αποτέλεσμα τη συνεχή απελευθέρωσή τους στο περιβάλλον (OECD, 2019; Remy & Jekel, 2012). Η παρουσία αυτών των ενώσεων, ακόμη και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις (της τάξης των ng/L έως μg/L), εγείρει σημαντικές ανησυχίες για τις πιθανές οικοτοξικολογικές επιπτώσεις και τους κινδύνους για τη δημόσια υγεία (Gros et al., 2018).

Σε αυτό το πλαίσιο, η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας, γνωστών ως τεταρτοβάθμια επεξεργασία, με στόχο την αποτελεσματική απομάκρυνση των φαρμακευτικών ενώσεων. Σε αυτές περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, οι Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (Advanced Oxidation Processes - AOPs) όπως οξοισμός και η οξείδωση Fenton, η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα (σε μορφή σκόνης - PAC ή κοκκώδη - GAC) και οι τεχνολογίες μεμβρανών (LIFE PHARMADEGRADE Project, 2020; Aziz, 2025). Ωστόσο, η υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών συνεπάγεται αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, χρήση χημικών αντιδραστηρίων και παραγωγή υποπροϊόντων, παράγοντες που πρέπει να αξιολογηθούν ολιστικά για να διασφαλιστεί ότι η λύση δεν δημιουργεί νέα περιβαλλοντικά προβλήματα (Andersson & Karlsson, 2022; Boogaard et al., 2025).

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κριτική επισκόπηση και η συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων διαθέσιμων τεχνολογιών για την απομάκρυνση φαρμακευτικών ενώσεων από αστικά λύματα. Η αξιολόγηση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνική απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων, αλλά επεκτείνεται και στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

Κύριος σκοπός της εργασίας είναι η διεξαγωγή μιας συγκριτικής περιβαλλοντικής αποτίμησης μέσω δημοσιευμένων δεδομένων από την εφαρμογή της μεθοδολογίας της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA). Η LCA αποτελεί ένα ισχυρό, τυποποιημένο εργαλείο που επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών βαρών που σχετίζονται με ένα προϊόν, μια διεργασία ή μια υπηρεσία, από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως την τελική διάθεση («from cradle to grave») (Tsangas, 2023). Μέσω της συστηματικής ανάλυσης δημοσιευμένων μελετών LCA που εστιάζουν σε πραγματικές εφαρμογές τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας, κυρίως σε χώρες της Κεντρικής Ευρώπης (όπως η Γερμανία, η Ολλανδία και η Ελβετία), η εργασία στοχεύει:

- Να αναδείξει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τεχνολογίας από περιβαλλοντική σκοπιά.

- Να συγκρίνει τις περιβαλλοντικές επιδόσεις συμβατικών και προηγμένων τεχνολογιών, λαμβάνοντας υπόψη δείκτες όπως το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (GWP), η τοξικότητα, ο ευτροφισμός και η κατανάλωση πόρων (Gros et al., 2018; Li et al., 2019).
- Να διερευνήσει πώς παράγοντες όπως το τοπικό ενεργειακό μείγμα και οι λειτουργικές συνθήκες επηρεάζουν το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα μιας τεχνολογίας (Remy & Jekel, 2012).
- Να προσδιορίσει τις περιβαλλοντικά βέλτιστες τεχνολογικές επιλογές υπό διαφορετικά σενάρια, παρέχοντας μια τεκμηριωμένη βάση για τη λήψη αποφάσεων από ρυθμιστικές αρχές και φορείς διαχείρισης υδάτων.

Παρά την αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα της απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων από αστικά λύματα, εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικά ερευνητικά κενά ως προς την ολιστική αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογιών. Η πλειονότητα των μελετών επικεντρώνεται κυρίως στην αποδοτικότητα απομάκρυνσης των ρύπων, ενώ περιορισμένος αριθμός εργασιών εξετάζει συνδυαστικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την ενεργειακή κατανάλωση, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη συμβατότητα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Επιπλέον, παρατηρείται σημαντική έλλειψη εναρμονισμένων μεθοδολογικών προσεγγίσεων στις εφαρμογές LCA, γεγονός που δυσχεραίνει τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών και γεωγραφικών περιοχών. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κάλυψη αυτού του κενού μέσω μιας συνθετικής και συγκριτικής αξιολόγησης των κυριότερων τεχνολογικών επιλογών υπό το πρίσμα της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

1.2 ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

Η παρουσία φαρμακευτικών υπολειμμάτων στα υδάτινα οικοσυστήματα αναγνωρίζεται πλέον ως μια αναδυόμενη περιβαλλοντική πρόκληση με παγκόσμιες διαστάσεις. Η έκθεση του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) το 2019 υπογραμμίζει τους σοβαρούς κινδύνους που ενέχουν αυτά τα υπολείμματα, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά (antimicrobial resistance - AMR), της διαταραχής του ενδοκρινικού συστήματος των υδρόβιων οργανισμών και της δυνητικής τοξικότητας σε μη στοχευμένους οργανισμούς (OECD, 2019). Η μακροχρόνια έκθεση σε κοκτέιλ αυτών των χημικών ουσιών, ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, μπορεί να έχει απρόβλεπτες συνέργειες και επιπτώσεις στην ισορροπία των οικοσυστημάτων. Συνεπώς, η ανάπτυξη και εφαρμογή αποτελεσματικών και ταυτόχρονα βιώσιμων λύσεων για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος δεν αποτελεί απλώς μια τεχνική αναγκαιότητα, αλλά μια κρίσιμη προτεραιότητα για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

Η σημαντικότητα του θέματος ενισχύεται περαιτέρω όταν εξετάζεται υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας. Το παραδοσιακό, γραμμικό μοντέλο διαχείρισης υδάτων («χρήση-ρύπανση-απόρριψη») είναι πλέον περιβαλλοντικά και οικονομικά μη

βιώσιμο. Η μετάβαση σε ένα κυκλικό μοντέλο απαιτεί την αντιμετώπιση των λυμάτων όχι ως αποβλήτων, αλλά ως πολύτιμης πηγής νερού, ενέργειας και θρεπτικών συστατικών. Σε αυτό το πλαίσιο, η απομάκρυνση των ανθεκτικών μικρορύπων, όπως οι φαρμακευτικές ενώσεις, είναι θεμελιώδης προϋπόθεση για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου νερού στη γεωργία, τη βιομηχανία ή για την εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων (Witteveen+Bos, 2021). Η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών καθαρισμού καθιστά το νερό ασφαλέστερο, κλείνοντας τον κύκλο του νερού και μειώνοντας την πίεση στους φυσικούς υδατικούς πόρους.

Επιπλέον, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας πρέπει να ευθυγραμμίζεται με τις αρχές της βιωσιμότητας και της «καθαρότερης παραγωγής» (cleaner production) (Gros et al., 2018). Μια τεχνολογία που επιτυγχάνει υψηλή απόδοση απομάκρυνσης ρύπων αλλά απαιτεί υπερβολική κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα ή παράγει επικίνδυνα υποπροϊόντα, απλώς μετατοπίζει το περιβαλλοντικό πρόβλημα από τη ρύπανση των υδάτων στην κλιματική αλλαγή ή τη διαχείριση αποβλήτων (Igos, 2018). Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) είναι το κατεξοχήν εργαλείο για την αποφυγή αυτής της «μεταφοράς βαρών» (burden shifting), καθώς επιτρέπει μια ολιστική αξιολόγηση που λαμβάνει υπόψη όλες τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, από την κατασκευή της μονάδας έως τη λειτουργία και το τέλος του κύκλου ζωής της. Η βελτιστοποίηση των διαδικασιών επεξεργασίας λυμάτων με βάση κριτήρια βιωσιμότητας, όπως προτείνεται σε μελέτες για αναβαθμίσεις μονάδων στη Γερμανία, αποτελεί κλειδί για την επίτευξη των στόχων της κυκλικής οικονομίας (Wöhler et al., 2022).

1.3 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε πέντε κεφάλαια, σχεδιασμένα ώστε να παρέχουν μια ολοκληρωμένη και συστηματική ανάλυση του θέματος. Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται αποκλειστικά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση και τη συνθετική ανάλυση δημοσιευμένων επιστημονικών άρθρων, διδακτορικών διατριβών, τεχνικών εκθέσεων και αναφορών από διεθνείς οργανισμούς, όπως αυτές που περιλαμβάνονται στην προτεινόμενη βιβλιογραφία.

Η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

- **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.** Το παρόν κεφάλαιο ορίζει το αντικείμενο και τους σκοπούς της έρευνας, αναδεικνύει τη σημασία του προβλήματος της φαρμακευτικής ρύπανσης και τη σύνδεσή του με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, και περιγράφει τη δομή και τη μεθοδολογία που ακολουθείται.
- **Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό και Επιστημονικό Υπόβαθρο.** Το κεφάλαιο αυτό παρέχει τις απαραίτητες θεωρητικές γνώσεις. Αναλύονται οι πηγές και τα είδη των φαρμακευτικών αποβλήτων, οι επιπτώσεις τους στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία, και τεκμηριώνεται η ανάγκη για αποτελεσματικές τεχνολογίες απομάκρυνσης. Επιπλέον, εξετάζεται το υφιστάμενο ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο και οι πολιτικές που διαμορφώνονται, με έμφαση σε εθνικά σχέδια δράσης πρωτοπόρων χωρών.
- **Κεφάλαιο 3: Επισκόπηση Διαθέσιμων Τεχνολογιών Απομάκρυνσης.** Παρουσιάζονται και αναλύονται οι κυριότερες τεχνολογίες, από τις συμβατικές

βιολογικές μεθόδους έως τις Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (οζονισμός, Fenton, φωτοκατάλυση, ηλεκτροχημική οξείδωση) και τις υβριδικές λύσεις. Για κάθε τεχνολογία, εξετάζονται οι αρχές λειτουργίας, η αποδοτικότητα και οι βασικοί περιορισμοί.

- **Κεφάλαιο 4: Συγκριτική Αξιολόγηση Τεχνολογιών και Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA).** Αυτό το κεφάλαιο αποτελεί τον πυρήνα της εργασίας. Εισάγεται η μεθοδολογία της LCA και τα κριτήρια αξιολόγησης. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια εκτενής συγκριτική ανάλυση βασισμένη σε δημοσιευμένες μελέτες LCA (π.χ., Gros et al., 2018; Andersson & Karlsson, 2022; Boogaard et al., 2025). Εξετάζονται μελέτες περίπτωσης από μονάδες στην Κεντρική Ευρώπη για να αναδειχθούν οι περιβαλλοντικά αποδοτικότερες επιλογές και οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους.
- **Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Προτάσεις.** Το τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει τα κύρια ευρήματα της μελέτης, εξάγει συμπεράσματα σχετικά με τις περιβαλλοντικά βέλτιστες πρακτικές και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και για τη χάραξη πολιτικών στον τομέα της διαχείρισης υγρών αποβλήτων.

Η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) θα αποτελέσει το κεντρικό αναλυτικό εργαλείο, όπως αυτό περιγράφεται σε εξειδικευμένες πηγές (Tsangas, 2023; Viotti, 2024). Η προσέγγιση θα είναι συγκριτική, αντιπαραβάλλοντας τα περιβαλλοντικά αποτυπώματα διαφορετικών τεχνολογικών λύσεων (π.χ. οζονισμός έναντι ενεργού άνθρακα) που εφαρμόζονται για τον ίδιο λειτουργικό σκοπό: την απομάκρυνση μικρορύπων από τα λύματα. Η ανάλυση θα βασιστεί στα δεδομένα και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις επιλεγμένες βιβλιογραφικές πηγές, χωρίς τη διεξαγωγή πρωτογενούς έρευνας ή μοντελοποίησης.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση της παρούσας εργασίας βασίστηκε σε συστηματική αναζήτηση επιστημονικών δημοσιεύσεων στις βάσεις δεδομένων Scopus, ScienceDirect και Google Scholar. Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε με χρήση λέξεων-κλειδιών όπως “pharmaceutical compounds”, “wastewater treatment”, “advanced oxidation processes”, “LCA”, “micropollutants” και “tertiary/quaternary treatment”. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση σε δημοσιεύσεις της τελευταίας δεκαετίας (2015–2025), προκειμένου να αποτυπωθούν οι πλέον πρόσφατες τεχνολογικές και επιστημονικές εξελίξεις. Τα κριτήρια επιλογής περιλάμβαναν τη συνάφεια με το αντικείμενο της εργασίας, την ύπαρξη ποσοτικών δεδομένων περιβαλλοντικής αξιολόγησης και τη δημοσίευση σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά με σύστημα κριτών (peer-reviewed journals).

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΑ ΑΠΟΒΑΗΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Η εκτεταμένη χρήση φαρμακευτικών προϊόντων για την ανθρώπινη και κτηνιατρική ιατρική αποτελεί έναν από τους πυλώνες της σύγχρονης υγειονομικής περίθαλψης. Ωστόσο, η αύξηση της κατανάλωσης, σε συνδυασμό με τον τρόπο μεταβολισμού και διάθεσής τους, έχει οδηγήσει στην ανάδειξη ενός σύνθετου περιβαλλοντικού προβλήματος: της ρύπανσης των υδάτινων συστημάτων από φαρμακευτικές ενώσεις. Αυτές οι ουσίες, σχεδιασμένες να είναι βιολογικά δραστικές και συχνά ανθεκτικές στην αποδόμηση, εισέρχονται στο περιβάλλον και μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές διαταραχές στα υδάτινα οικοσυστήματα (OECD, 2019).

2.1.1 Είδη φαρμακευτικών ενώσεων και τρόποι διάθεσης στο περιβάλλον

Οι φαρμακευτικές ενώσεις που ανιχνεύονται στο περιβάλλον καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα θεραπευτικών κατηγοριών. Μεταξύ των πιο συχνά εντοπιζόμενων περιλαμβάνονται αντιβιοτικά, αντιφλεγμονώδη, αντικαταθλιπτικά, ορμόνες (φυσικές και συνθετικές), ρυθμιστές λιπιδίων, αντιεπιληπτικά και σκιαγραφικά μέσα (Gros et al., 2018; Li et al., 2019). Αυτές οι ουσίες, μαζί με τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας (PPCPs) όπως τα συντηρητικά και τα φίλτρα UV, ανήκουν στην κατηγορία των «αναδύομενων ρύπων» (emerging pollutants), για τους οποίους η περιβαλλοντική νομοθεσία και οι τεχνολογίες επεξεργασίας δεν έχουν ακόμη προσαρμοστεί πλήρως.

Οι κύριες οδοί εισόδου αυτών των ενώσεων στο υδάτινο περιβάλλον είναι πολλαπλές, με σημαντικότερη την απέκκριση από τον ανθρώπινο οργανισμό. Μετά τη χορήγηση, ένα σημαντικό ποσοστό πολλών φαρμάκων δεν μεταβολίζεται πλήρως και αποβάλλεται μέσω των ούρων και των κοπράνων, είτε στην αρχική του μορφή είτε ως δραστικοί μεταβολίτες. Αυτές οι ουσίες καταλήγουν στο αποχετευτικό δίκτυο και, συνεπώς, στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (ΜΕΛ) (OECD, 2019). Άλλες σημαντικές πηγές περιλαμβάνουν:

- **Ακατάλληλη διάθεση:** Η απόρριψη αχρησιμοποίητων ή ληγμένων φαρμάκων στην τουαλέτα ή στα οικιακά απορρίμματα, αντί για τα ειδικά σημεία συλλογής, οδηγεί στην απευθείας εισροή τους στο αποχετευτικό σύστημα ή στη μόλυνση των στραγγισμάτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής.
- **Νοσοκομειακά απόβλητα:** Τα λύματα από νοσοκομεία και κλινικές περιέχουν συχνά πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις φαρμακευτικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένων κυτταροτοξικών φαρμάκων και σκιαγραφικών μέσων, σε σχέση με τα αστικά λύματα.
- **Βιομηχανία φαρμάκων:** Απορροές από τις εγκαταστάσεις παραγωγής φαρμάκων μπορούν να αποτελέσουν σημαντική σημειακή πηγή ρύπανσης, εάν δεν υποβάλλονται σε κατάλληλη προ-επεξεργασία.

- **Κτηνιατρική και γεωργία:** Η χρήση αντιβιοτικών και άλλων φαρμάκων στην κτηνοτροφία οδηγεί στη διασπορά τους στο περιβάλλον μέσω της κοπριάς και των αποβλήτων των εκτροφείων.

Οι συμβατικές ΜΕΛ, που βασίζονται κυρίως σε δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία (π.χ. ενεργός ιλύς), δεν είναι σχεδιασμένες για την απομάκρυνση αυτών των πολικών και ανθεκτικών οργανικών μικρορύπων. Η απόδοση απομάκρυνσης ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την ένωση, από σχεδόν πλήρη έως σχεδόν μηδενική. Κατά συνέπεια, οι εκροές των ΜΕΛ αποτελούν τη βασικότερη σημειακή πηγή φαρμακευτικής ρύπανσης για τα επιφανειακά ύδατα (Remy & Jekel, 2012).

Η διαδρομή των φαρμακευτικών ενώσεων προς το περιβάλλον είναι πολυπαραγοντική. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Φαρμάκων (EMA, 2024) επισημαίνει ότι η κύρια πηγή είναι η ανθρώπινη κατανάλωση. Ένα μεγάλο ποσοστό των δραστικών ουσιών αποβάλλεται μέσω των ούρων και των κοπράνων, είτε ως μητρικές ενώσεις είτε ως μεταβολίτες, και καταλήγει στο αποχετευτικό δίκτυο. Μικρότερα, αλλά συχνά πιο συγκεντρωμένα φορτία (hotspots), προέρχονται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής φαρμάκων και νοσοκομειακά λύματα, τα οποία περιέχουν εξαιρετικά τοξικά ή ανθεκτικά φάρμακα, όπως τα κυτταροστατικά (ογκολογικά) σκευάσματα και τα αντιβιοτικά.

Πίνακας 1. Βασικές κατηγορίες φαρμακευτικών ενώσεων στα αστικά λύματα και ιδιότητές τους

Κατηγορία	Τυπικές Ενώσεις	Συμπεριφορά σε συμβατικές ΜΕΛ	Περιβαλλοντικός Κίνδυνος
Αναλγητικά / ΜΣΑΦ	Ιβουπροφαίνη, Δικλοφαινάκη	Η ιβουπροφαίνη βιοαποικοδομείται εύκολα (>90%). Η δικλοφαινάκη είναι εξαιρετικά ανθεκτική (<30%).	Τοξικότητα σε μη στοχευμένους οργανισμούς (π.χ. νεφρική ανεπάρκεια σε πτηνά/ψάρια).
Αντιβιοτικά	Αμοξικιλίνη, Κιτροφλοξασίνη, Αζιθρομυκίνη	Μέτρια απομάκρυνση (κυρίως μέσω προσρόφησης στην ιλύ, όχι βιοαποικοδόμησης).	Ανάπτυξη αντιμικροβιακής ανθεκτικότητας (AMR) στα βακτήρια του περιβάλλοντος.
Αντιεπιληπτικά / Ψυχιατρικά	Καρβαμαζεπίνη, Φλουοξετίνη	Μηδενική σχεδόν βιοαποικοδόμηση. Διέρχονται ανέπαφα από τις ΜΕΛ.	Αλλαγή συμπεριφοράς και νευροτοξικότητα σε υδρόβιους οργανισμούς.

Ορμόνες / Αντισυλληπτικά	Οιστρόνη (E1), Αιθινυλοιστραδιόλη (EE2)	Απομακρύνονται μερικώς, αλλά απαιτούνται πολύ χαμηλά όρια ανίχνευσης.	Ενδοκρινικοί διαταράκτες. Εκθήλυνση αρσενικών ψαριών, μείωση ιχθυοπληθυσμών.
-----------------------------	---	---	---

Πηγή: Προσαρμογή από OECD (2019), Gros et al. (2018), Li et al. (2019) και European Environment Agency (2010).

2.1.2 Επιπτώσεις σε υδάτινους οργανισμούς και ανθρώπινη υγεία

Η συνεχής έκθεση των υδάτινων οικοσυστημάτων σε ένα σύνθετο μείγμα φαρμακευτικών ουσιών, ακόμη και σε ίχνη, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές οικολογικές διαταραχές. Οι επιπτώσεις είναι ποικίλες και εξαρτώνται από τον τύπο της ένωσης, τη συγκέντρωσή της και την ευαισθησία των οργανισμών (OECD, 2019). Οι κυριότερες ανησυχίες περιλαμβάνουν:

- **Ενδοκρινικές διαταραχές:** Συνθετικές ορμόνες που χρησιμοποιούνται σε αντισυλληπτικά (π.χ. 17α-αιθινυλοιστραδιόλη) μπορούν να προκαλέσουν θηλυκοποίηση αρσενικών ψαριών, επηρεάζοντας την αναπαραγωγική τους ικανότητα και τη δυναμική των πληθυσμών, ακόμη και σε συγκεντρώσεις της τάξης των νανογραμμαρίων ανά λίτρο (ng/L).
- **Ανάπτυξη μικροβιακής αντοχής(AMR):** Η παρουσία υπο-θεραπευτικών επιπέδων αντιβιοτικών στο περιβάλλον ασκεί συνεχή επιλεκτική πίεση στα βακτήρια, ευνοώντας την ανάπτυξη και εξάπλωση ανθεκτικών στελεχών. Η AMR αναγνωρίζεται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας ως μία από τις μεγαλύτερες απειλές για την παγκόσμια δημόσια υγεία.
- **Νευροτοξικές επιπτώσεις:** Αντικαταθλιπτικά όπως η φλουοξετίνη έχουν αποδειχθεί ότι επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ψαριών, μεταβάλλοντας τις αντιδράσεις τους σε θηρευτές ή την αναζήτηση τροφής.
- **Οικοτοξικότητα:** Αντιφλεγμονώδη φάρμακα, όπως η δικλοφενάκη, είναι εξαιρετικά τοξικά για ορισμένα είδη, όπως οι γύπες στην Ινδία που αποδεκατίστηκαν μετά την κατανάλωση κουφαριών ζώων στα οποία είχε χορηγηθεί το φάρμακο. Αντίστοιχες επιπτώσεις, αν και λιγότερο δραματικές, παρατηρούνται και σε υδρόβιους οργανισμούς.

Όσον αφορά την ανθρώπινη υγεία, οι άμεσοι κίνδυνοι από την κατανάλωση πόσιμου νερού που περιέχει ίχνη φαρμάκων θεωρούνται γενικά χαμηλοί, καθώς οι συγκεντρώσεις είναι χιλιάδες φορές μικρότερες από τις θεραπευτικές δόσεις. Ωστόσο, η έκθεση είναι χρόνια και αφορά ένα πολύπλοκο μείγμα ουσιών, οι συνδυαστικές επιδράσεις του οποίου (cocktail effect) δεν είναι πλήρως κατανοητές. Η μεγαλύτερη έμμεση απειλή παραμένει η εξάπλωση της μικροβιακής αντοχής μέσω του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να καταστήσει κοινές λοιμώξεις μη θεραπεύσιμες (OECD, 2019).

Τέλος, όπως καταγράφεται στην αναφορά του ΟΟΣΑ (OECD, 2019), «Pharmaceutical Residues in Freshwater», τα φάρμακα σχεδιάζονται σκόπιμα ώστε να προκαλούν

βιολογικές αντιδράσεις σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Έτσι, όταν καταλήγουν στο υδάτινο περιβάλλον, επηρεάζουν τη χλωρίδα και την πανίδα. Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η δικλοφαινάκη, η οποία υπήρξε υπεύθυνη για τη δραματική μείωση του πληθυσμού των γυπών στην Ινδική υποήπειρο, οδηγώντας τελικά την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και οργανισμούς όπως ο ECHA να την θέσουν υπό αυστηρή παρακολούθηση στην Ευρώπη. Αντίστοιχα, ψυχιατρικά φάρμακα, όπως η φλουοξετίνη, έχουν αποδειχθεί ότι τροποποιούν τη συμπεριφορά των ψαριών, καθιστώντας τα λιγότερο επιφυλακτικά απέναντι στους θηρευτές τους. Επιπρόσθετα, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (EEA, 2010) έχει προειδοποιήσει εδώ και χρόνια για τις μακροχρόνιες επιπτώσεις των «κοκτέιλ» χημικών ενώσεων, η συνδυασμένη δράση των οποίων παραμένει εν πολλοίς άγνωστη.

2.1.3 Ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών τεχνολογιών απομάκρυνσης

Η ανεπαρκής απόδοση των συμβατικών ΜΕΛ καθιστά επιτακτική την ανάγκη για την υιοθέτηση πιο προηγμένων και στοχευμένων τεχνολογιών επεξεργασίας. Η επιστημονική έρευνα έχει επικεντρωθεί σε διάφορες μεθόδους τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας, οι οποίες μπορούν να εγκατασταθούν ως τελικό στάδιο σε υφιστάμενες ΜΕΛ για την εξασφάλιση υψηλότερου επιπέδου καθαρότητας της εκροής. Η έντονη ερευνητική δραστηριότητα γύρω από τις Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (AOPs) (Aziz, 2025; Iqbal, 2024; Kanakaraju, 2025), όπως η φωτοκατάλυση με νέα υλικά (Kabir, 2024; Miād et al., 2024; Srivastava, 2024) και τις συγκριτικές αξιολογήσεις διαφορετικών AOPs όπως ο οζονισμός, η οξείδωση Fenton και η υπερϊώδης ακτινοβολία παρουσία υπεροξειδίου υδρογόνου UV/H₂O₂ (Ismail, 2025; Wiley / Comparative study, 2024), καταδεικνύει την παγκόσμια προσπάθεια για την εξεύρεση αποτελεσματικών λύσεων.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας δεν είναι απλή υπόθεση. Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η αποτελεσματικότητα για ένα ευρύ φάσμα ενώσεων, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, η κατανάλωση ενέργειας και χημικών, και η πιθανή δημιουργία τοξικών υποπροϊόντων οξείδωσης (Disinfection By-Products - DBPs) (Gros et al., 2018). Για παράδειγμα, ενώ ο οζονισμός είναι πολύ αποτελεσματικός, μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό βρωμικών ιόντων εάν το εισερχόμενο νερό περιέχει βρωμίδια. Μελέτες που συγκρίνουν την απόδοση διαφορετικών τεχνολογιών, όπως ο οζονισμός και η φωτοκατάλυση, παρέχουν πολύτιμα δεδομένα για τη λήψη αποφάσεων (Skalska-Tuomi, 2025). Η ανάγκη δεν είναι απλώς να βρεθεί μια αποτελεσματική τεχνολογία, αλλά μια τεχνολογία που είναι ταυτόχρονα οικονομικά προσιτή, λειτουργικά σταθερή και περιβαλλοντικά βιώσιμη σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής της (Wöhler et al., 2022).

2.2 ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ

Η αναγνώριση του προβλήματος της φαρμακευτικής ρύπανσης έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια σε μια σταδιακή κινητοποίηση σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης και εθνικών κυβερνήσεων. Αν και ένα ολοκληρωμένο ρυθμιστικό πλαίσιο βρίσκεται ακόμη υπό διαμόρφωση, έχουν τεθεί οι βάσεις για μια πιο στρατηγική προσέγγιση που συνδυάζει την παρακολούθηση, τη θέσπιση ορίων και την προώθηση τεχνολογικών λύσεων.

Το θεσμικό πλαίσιο για τους μικρορύπους στην Ευρώπη βρίσκεται σε μια ιστορική καμπή. Ενώ αρχικά η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα (Water Framework Directive, 2000/60/EC) δεν εστίαζε ειδικά στα φάρμακα, η δημιουργία της «Watch List» το 2013 υπήρξε το πρώτο βήμα συστηματικής παρακολούθησης ενώσεων όπως τα αντιβιοτικά των κατηγοριών μακρολιδών.

***Κομβική Νομοθετική Εξέλιξη:** Η αναθεώρηση της Οδηγίας για την Επεξεργασία Αστικών Λυμάτων (Urban Wastewater Treatment Directive - Directive (EU) 2024/3019), η οποία τίθεται σε ισχύ, αλλάζει ριζικά το τοπίο. Για πρώτη φορά, επιβάλλεται η εφαρμογή **τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας** για την απομάκρυνση μικρορύπων. Συγκεκριμένα, οι ΜΕΛ άνω των 100.000 ισοδύναμου πληθυσμού (Ι.Π.), καθώς και στρατηγικές εγκαταστάσεις άνω των 10.000 Ι.Π. που απορρίπτουν σε ευαίσθητους αποδέκτες, υποχρεούνται να αφαιρούν τουλάχιστον το 80% ενός καθορισμένου δείγματος φαρμακευτικών και καλλυντικών ενώσεων (micropollutants).*

Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε τη «Στρατηγική Προσέγγιση για τα Φάρμακα στο Περιβάλλον» (Strategic Approach to Pharmaceuticals in the Environment), πιέζοντας για προληπτικά μέτρα από το στάδιο της παραγωγής (eco-directed design) μέχρι και τη διάθεση (ECHA, EMA, 2024).

2.2.1 Οδηγίες και κανονισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα (2000/60/EK) αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της ευρωπαϊκής πολιτικής για την προστασία των υδάτων. Στο πλαίσιο αυτής της οδηγίας, δημιουργήθηκε ένας κατάλογος «ουσιών προτεραιότητας», των οποίων η παρουσία στα ύδατα πρέπει να παρακολουθείται και να μειώνεται. Με την Οδηγία 2013/39/ΕΕ, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εισήγαγε για πρώτη φορά τον μηχανισμό της «Λίστας Παρακολούθησης» (Watch List). Αυτή η λίστα περιλαμβάνει ουσίες, μεταξύ των οποίων και φαρμακευτικές ενώσεις, για τις οποίες υπάρχουν ενδείξεις ότι αποτελούν σημαντικό κίνδυνο, αλλά δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα παρακολούθησης για να ληφθεί οριστική απόφαση για την ένταξή τους στις ουσίες προτεραιότητας. Στην πρώτη λίστα παρακολούθησης συμπεριλήφθηκαν το αντιφλεγμονώδες δικλοφενάκη και οι ορμόνες 17β-οιστραδιόλη (E2) και 17α-αιθινυλοιστραδιόλη (EE2), υποχρεώνοντας τα κράτη μέλη να παρακολουθούν τις συγκεντρώσεις τους σε επιλεγμένα σημεία.

Το 2019, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε την ανακοίνωση «Στρατηγική προσέγγιση της Ευρωπαϊκής Ένωσης όσον αφορά τα φάρμακα στο περιβάλλον», η οποία θέτει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο δράσης που καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο ζωής των φαρμάκων. Οι δράσεις αυτές περιλαμβάνουν την προώθηση της «πράσινης»

σχεδίασης φαρμάκων (που να είναι λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον), τη μείωση των αποβλήτων, τη βελτίωση της περιβαλλοντικής εκτίμησης κινδύνου και την προώθηση της κατάλληλης επεξεργασίας των λυμάτων (OECD, 2019). Η χρηματοδότηση ερευνητικών έργων όπως το LIFE PHARMADEGRADE (2020) εντάσσεται σε αυτή τη στρατηγική, καθώς στοχεύει στην αξιολόγηση και επίδειξη καινοτόμων τεχνολογιών επεξεργασίας.

Πιο πρόσφατα, η πρόταση για την αναθεώρηση της Οδηγίας για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων (91/271/EOK) προβλέπει για πρώτη φορά την εισαγωγή υποχρεωτικής τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας για την απομάκρυνση μικρορύπων σε όλες τις μεγάλες ΜΕΛ (άνω των 100.000 ισοδύναμων κατοίκων), με εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» για την κάλυψη του κόστους από τις φαρμακευτικές και καλλυντικές βιομηχανίες. Αυτή η εξέλιξη σηματοδοτεί μια αποφασιστική στροφή προς την υποχρεωτική αντιμετώπιση του προβλήματος στην πηγή της διάχυσής του.

2.2.2 Εθνικά σχέδια δράσης

Αρκετά κράτη μέλη, ιδίως στην Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη, δεν περίμεναν την ολοκλήρωση του ευρωπαϊκού πλαισίου και έχουν ήδη αναλάβει πρωτοβουλίες για την αντιμετώπιση της φαρμακευτικής ρύπανσης. Αυτές οι χώρες λειτουργούν ως πρότυπα, παρέχοντας πολύτιμη εμπειρία από την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών σε πλήρη κλίμακα.

- **Ελβετία:** Ήταν η πρώτη χώρα που εισήγαγε εθνική νομοθεσία (το 2016) που απαιτεί την αναβάθμιση περίπου 100 από τις 700 ΜΕΛ της χώρας με τεχνολογίες απομάκρυνσης μικρορύπων, με στόχο την επίτευξη ποσοστού απομάκρυνσης 80%. Η χρηματοδότηση προέρχεται από έναν εθνικό φόρο στα λύματα. Οι τεχνολογίες που προτιμώνται είναι κυρίως ο οξονισμός και η προσρόφηση σε κοκκώδη ενεργό άνθρακα (GAC) (LIFE PHARMADEGRADE Project, 2020).
- **Γερμανία:** Ακολουθεί μια περιφερειακή προσέγγιση, με ορισμένα κρατίδια (όπως η Βάδη-Βυρτεμβέργη και η Βόρεια Ρηνανία-Βεστφαλία) να πρωτοστατούν στην αναβάθμιση των ΜΕΛ τους. Υπάρχει εκτεταμένη εμπειρία από πιλοτικές και πλήρους κλίμακας εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν οξονισμό, PAC και GAC. Μελέτες όπως αυτή των Wöhler et al. (2022) σε μια γερμανική ΜΕΛ αναλύουν τη βιωσιμότητα και την προσαρμοστικότητα αυτών των αναβαθμίσεων.
- **Ολλανδία:** Η ολλανδική προσέγγιση εστιάζει στην καινοτομία και τη σύνδεση της απομάκρυνσης μικρορύπων με την κυκλική οικονομία. Υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για συνδυαστικές τεχνολογίες και την επαναχρησιμοποίηση του νερού. Πιλοτικά έργα, όπως αυτό στο Lelystad, διερευνούν βιώσιμες μεθόδους απομάκρυνσης φαρμακευτικών υπολειμμάτων (Witteveen+Bos, 2021), ενώ μελέτες LCA και κόστους κύκλου ζωής (LCC) αξιολογούν την εφαρμογή του οξονισμού σε πλήρη κλίμακα (Boogaard et al., 2025; Amaya-Santos et al., 2025).
- **Σουηδία:** Η Σουηδία έχει επίσης επενδύσει στην έρευνα και την πιλοτική εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών. Η διπλωματική εργασία των Andersson & Karlsson (2022) αποτελεί παράδειγμα λεπτομερούς ανάλυσης LCA για την

αναβάθμιση της MEA Rya στο Γκέτεμποργκ, συγκρίνοντας διαφορετικές προηγμένες διεργασίες.

Η εμπειρία από αυτές τις χώρες παρέχει κρίσιμα δεδομένα για την απόδοση, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαφόρων τεχνολογιών, τα οποία είναι θεμελιώδη για την ανάλυση που πραγματοποιείται στα επόμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας.

2.2.3 Σύνδεση με τη στρατηγική βιώσιμης ανάπτυξης και την κυκλική οικονομία

Η αντιμετώπιση της ρύπανσης από φαρμακευτικές ενώσεις είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τους ευρύτερους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal), του Σχεδίου Δράσης για την Κυκλική Οικονομία και του Σχεδίου Δράσης για Μηδενική Ρύπανση. Η στρατηγική αυτή δεν περιορίζεται απλώς στην «end-of-pipe» επεξεργασία, αλλά προωθεί μια ολιστική προσέγγιση που στοχεύει στην πρόληψη της ρύπανσης στην πηγή και στη βιώσιμη διαχείριση των πόρων.

Η επένδυση σε προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων συμβάλλει άμεσα σε αυτούς τους στόχους με πολλαπλούς τρόπους:

- 1. Προστασία της βιοποικιλότητας και των οικοσυστημάτων:** Η απομάκρυνση των τοξικών μικρορύπων προστατεύει την υδρόβια ζωή και διασφαλίζει την καλή οικολογική κατάσταση των υδάτινων σωμάτων, όπως απαιτεί η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα.
- 2. Προώθηση της επαναχρησιμοποίησης νερού:** Ο καθαρισμός των λυμάτων σε υψηλό βαθμό είναι προαπαιτούμενο για την ασφαλή επαναχρησιμοποίησή τους, μειώνοντας την πίεση στους ολοένα και πιο σπάνιους πόρους γλυκού νερού. Αυτό αποτελεί κεντρικό πυλώνα της κυκλικής οικονομίας στον τομέα των υδάτων.
- 3. Ενίσχυση της βιώσιμης γεωργίας:** Η χρήση ανακυκλωμένου νερού, απαλλαγμένου από φαρμακευτικές ενώσεις, για άρδευση αποτρέπει τη συσσώρευση αυτών των ουσιών στο έδαφος και την είσοδό τους στην τροφική αλυσίδα.

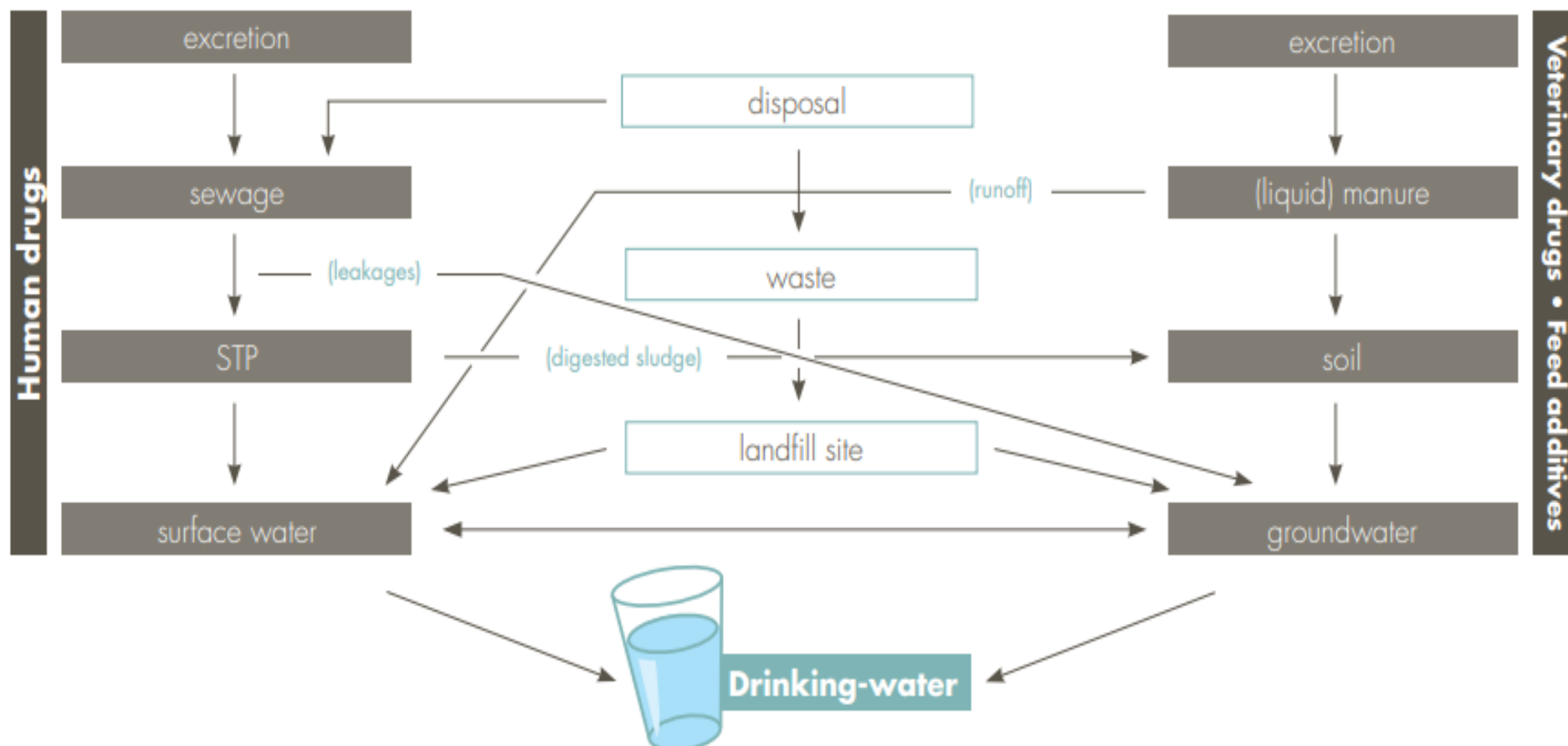
Ωστόσο, για να είναι η σύνδεση αυτή πλήρως ευθυγραμμισμένη με τις αρχές της βιωσιμότητας, η επιλογή και η λειτουργία των τεχνολογιών πρέπει να γίνεται με κριτήρια που υπερβαίνουν την τεχνική απόδοση. Η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι οι επιλεγμένες λύσεις έχουν το χαμηλότερο δυνατό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλες επιπτώσεις (Gros et al., 2018; Igos, 2018). Η αναζήτηση για «βιώσιμες αναβαθμίσεις» (Wöhler et al., 2022) και η σύγκριση αποκεντρωμένων έναντι κεντρικών συστημάτων (Remy & Jekel, 2012) είναι παραδείγματα αυτής της ολιστικής προσέγγισης, η οποία τοποθετεί την επεξεργασία των λυμάτων στην καρδιά της μετάβασης προς μια κυκλική και βιώσιμη οικονομία.

3 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ

Η παρουσία φαρμακευτικών ενώσεων και των μεταβολιτών τους στα υδάτινα οικοσυστήματα έχει αναδειχθεί σε μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα τις τελευταίες δεκαετίες. Οι συμβατικές Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), οι οποίες σχεδιάστηκαν πρωτίστως για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου (BOD/COD) και των θρεπτικών στοιχείων (άζωτο, φώσφορος), συχνά αποδεικνύονται ανεπαρκείς στη διαχείριση αυτών των οργανικών μικρορύπων. Ως αποτέλεσμα, οι ΕΕΛ λειτουργούν ως κύριες πύλες εισόδου των δραστικών φαρμακευτικών ουσιών (APIs) στο περιβάλλον (OECD, 2019; Gros et al., 2018). Η πολυπλοκότητα των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των φαρμακευτικών μορίων, όπως η υδατοδιαλυτότητα, το μοριακό βάρος, η πολικότητα και η ανθεκτικότητα στη βιοαποδόμηση, καθιστά την απομάκρυνσή τους μια σύνθετη τεχνολογική πρόκληση.

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται μια εκτενής επισκόπηση και κριτική ανάλυση των διαθέσιμων τεχνολογιών επεξεργασίας. Οι τεχνολογίες αυτές κατηγοριοποιούνται γενικά σε τρεις κύριες ομάδες: (α) τις βιολογικές μεθόδους, οι οποίες βασίζονται στη μικροβιακή δραστηριότητα, (β) τις φυσικοχημικές διεργασίες διαχωρισμού, όπως η προσρόφηση και η διήθηση με μεμβράνες, και (γ) τις Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (Advanced Oxidation Processes - AOPs), οι οποίες στοχεύουν στη χημική αποδόμηση των ρύπων μέσω δραστικών ριζών (Aziz, 2025; Ikehata et al., 2006). Η αξιολόγηση της αποδοτικότητας κάθε τεχνολογίας δεν βασίζεται μόνο στο ποσοστό απομάκρυνσης της μητρικής ένωσης, αλλά λαμβάνει υπόψη και την ενεργειακή κατανάλωση, την παραγωγή τοξικών παραπροϊόντων και το λειτουργικό κόστος, στοιχεία που είναι κρίσιμα για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) που ακολουθεί.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τη συνολική διαδρομή των φαρμακευτικών ουσιών από τη χρήση τους από τον άνθρωπο έως την τελική κατάληξή τους στο υδάτινο περιβάλλον. Οι δραστικές ουσίες αποβάλλονται μέσω των ούρων και των κοπράνων, μεταφέρονται μέσω του αποχετευτικού δικτύου στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και, λόγω της περιορισμένης αποδοτικότητας των συμβατικών διεργασιών, σημαντικό ποσοστό τους καταλήγει σε ποτάμια, λίμνες και υπόγεια ύδατα. Η εικόνα αναδεικνύει τη σημασία ανάπτυξης προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας για τον περιορισμό της διάχυσης των φαρμακευτικών μικρορύπων.



Εικόνα 1. Διαδρομή φαρμακευτικών ενώσεων από την κατανάλωση έως το υδάτινο περιβάλλον

Πηγή: WHO – Pharmaceutical in drinking-water

<https://www.who.int/publications/i/item/9789241502085>

3.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η Συμβατική Ενεργός Ιλύς (Conventional Activated Sludge - CAS) βασίζεται στη βιοαποικοδόμηση και την προσρόφηση στα αιωρούμενα στερεά. Αν και αποδοτική για το οργανικό φορτίο, χαρακτηρίζεται από χαμηλούς χρόνους παραμονής ιλύος (Sludge Retention Time - SRT), γεγονός που εμποδίζει την ανάπτυξη εξειδικευμένων μικροοργανισμών (όπως τα νιτροποιητικά βακτήρια) που θα μπορούσαν να διασπάσουν πολύπλοκα φαρμακευτικά μόρια. Οι Βιοαντιδραστήρες Μεμβρανών (Membrane Bioreactors - MBR) βελτιώνουν σημαντικά αυτή την κατάσταση, επιτρέποντας πολύ υψηλότερα SRT χωρίς πρόβλημα διαχωρισμού της ιλύος, επιτυγχάνοντας καλύτερη απομάκρυνση μέτρια βιοαποικοδομήσιμων φαρμάκων, αλλά εξακολουθούν να αδυνατούν έναντι ανθεκτικών ουσιών όπως η καρβαμαζεπίνη.

3.1.1 Συστήματα Ενεργού Ιλύος (Conventional Activated Sludge - CAS)

Η διεργασία της ενεργού ιλύος (CAS) αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο δευτεροβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων παγκοσμίως. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην αερόβια αποικοδόμηση της οργανικής ύλης από αιωρούμενες μικροβιακές κοινότητες. Όσον αφορά τις φαρμακευτικές ενώσεις, η απομάκρυνσή τους στα συστήματα CAS επιτυγχάνεται κυρίως μέσω δύο μηχανισμών: της βιοαποδόμησης (βιομετατροπής) και της προσρόφησης (sorption) στα στερεά αιωρήματα της βιομάζας (Tsangas, 2023).



Εικόνα 2. Τυπική διεργασία ενεργού ιλύος

Πηγή: ENVELab - Environmental Engineering Laboratory.

<https://www.enve-lab.eu/wp-content/uploads/2015/03/Lecture-7.pdf>

Η βιοαποδόμηση μπορεί να είναι πλήρης (ανοργανοποίηση) ή μερική, οδηγώντας στον σχηματισμό μεταβολιτών μετασχηματισμού. Η προσρόφηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον συντελεστή κατανομής (K_d) της κάθε ουσίας και τις υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του μορίου και των κυτταρικών μεμβρανών της ιλύος (Li et al., 2019). Ενώσεις με υψηλό συντελεστή οκτανόλης-νερού ($\log K_{ow} > 4$), όπως ορισμένα οιστρογόνα και αντικαταθλιπτικά, τείνουν να προσροφώνται έντονα στην ιλύ και απομακρύνονται μέσω της περίσσειας λάσπης, χωρίς απαραίτητα να διασπώνται.

Παρόλα αυτά, η απόδοση των συστημάτων CAS ποικίλλει δραματικά. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα (Rosal et al., 2010; Remy & Jekel, 2012), ουσίες όπως η ιβουπροφαίνη και η παρακεταμόλη εμφανίζουν υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης (>90%) λόγω της βιοδιασπασιμότητάς τους. Αντιθέτως, ενώσεις όπως η καρβαμαζεπίνη, η δικλοφενάκη και διάφορα αντιβιοτικά παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλή απομάκρυνση (<10-30%), χαρακτηριζόμενες ως "ανθεκτικές" (recalcitrant). Η ανθεκτικότητα αυτή οφείλεται συχνά στη χημική τους δομή (π.χ. παρουσία αλογόνων ή αρωματικών δακτυλίων) που εμποδίζει την ενζυμική προσβολή.



Εικόνα 3. Απεικόνιση μονάδας

Πηγή: ENVElab - Environmental Engineering Laboratory.

<https://www.enve-lab.eu/wp-content/uploads/2015/03/Lecture-7.pdf>

Βασικοί λειτουργικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση περιλαμβάνουν τον Υδραυλικό Χρόνο Παραμονής (HRT) και τον Χρόνο Παραμονής Στερεών (SRT). Αυξημένο SRT (>10-15 ημέρες) ευνοεί την ανάπτυξη αργά αναπτυσσόμενων βακτηρίων (π.χ. νιτροποιητικά βακτήρια), τα οποία διαθέτουν ένζυμα ευρέος φάσματος (όπως οι μονο-οξυγενάσες αμμωνίας) που μπορούν να αποδομήσουν ορισμένους μικρορόπους μέσω συμμεταβολισμού (cometabolism) (Witteveen+Bos, 2021).

Ωστόσο, ακόμη και υπό βέλτιστες συνθήκες, τα συστήματα CAS αδυνατούν να επιτύχουν τα απαιτούμενα όρια για την προστασία των ευαίσθητων υδάτινων αποδεκτών.

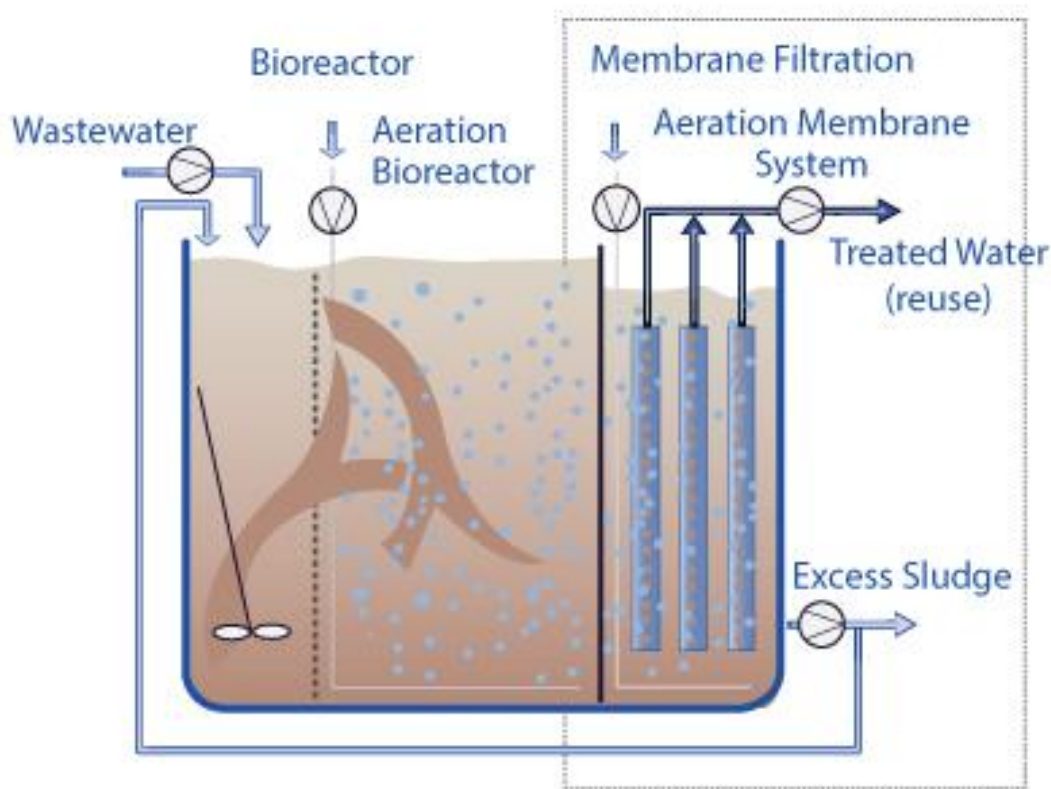
Βασικοί λειτουργικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συστημάτων ενεργού ιλύος περιλαμβάνουν τον Υδραυλικό Χρόνο Παραμονής (Hydraulic Retention Time – HRT) και τον Χρόνο Παραμονής Στερεών (Sludge Retention Time – SRT). Αυξημένος χρόνος παραμονής στερεών (>10–15 ημέρες) ευνοεί την ανάπτυξη αργά αναπτυσσόμενων μικροοργανισμών, όπως τα νιτροποιητικά βακτήρια, τα οποία διαθέτουν ένζυμα ευρέος φάσματος (π.χ. μονοοξυγενάσες αμμωνίας) που μπορούν να αποδομήσουν ορισμένες φαρμακευτικές ενώσεις μέσω συμμεταβολισμού (cometabolism) (Witteveen+Bos, 2021). Παρά τη βελτίωση της αποδοτικότητας που επιτυγχάνεται με την αύξηση του SRT, τα συμβατικά συστήματα ενεργού ιλύος εξακολουθούν να εμφανίζουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα έναντι πολλών ανθεκτικών μικρορύπων, όπως η καρβαμαζεπίνη, η δικλοφενάκη και η βενζοτρίαζόλη. Ως εκ τούτου, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της νέας ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την απομάκρυνση μικρορύπων από τα αστικά λύματα. Σύμφωνα με την Οδηγία (ΕΕ) 2024/3019, οι μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων υποχρεούνται να εφαρμόζουν τεταρτοβάθμια επεξεργασία, επιτυγχάνοντας τουλάχιστον **80% συνολική απομάκρυνση** ενός καθορισμένου συνόλου φαρμακευτικών και καλλυντικών μικρορύπων, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας.

Πίνακας 2. Ενδεικτικές απαιτήσεις της Οδηγίας (ΕΕ) 2024/3019 για την απομάκρυνση φαρμακευτικών μικρορύπων

Παράμετρος	Απαίτηση
Εγκαταστάσεις που εφαρμόζεται η τεταρτοβάθμια επεξεργασία	>100.000 ισοδύναμος πληθυσμός (Ι.Π.) και ορισμένες >10.000 Ι.Π. που απορρίπτουν σε ευαίσθητους αποδέκτες
Ελάχιστη συνολική απομάκρυνση μικρορύπων	≥80%
Είδος ενώσεων	Επιλεγμένες φαρμακευτικές και καλλυντικές ενώσεις (micropollutants)
Στάδιο επεξεργασίας	Τεταρτοβάθμια επεξεργασία
Αρχή χρηματοδότησης	Διευρυμένη Ευθύνη Παραγωγού (Extended Producer Responsibility - EPR)

3.1.2 Βιοαντιδραστήρες Μεμβρανών (Membrane Bioreactors - MBR)

Οι Βιοαντιδραστήρες Μεμβρανών (MBR) αποτελούν μια εξέλιξη της συμβατικής διαδικασίας ενεργού ιλύος, όπου ο διαχωρισμός της βιομάζας από το επεξεργασμένο νερό δεν γίνεται μέσω καθίζησης, αλλά μέσω διήθησης με μεμβράνες (συνήθως υπερδιήθησης ή μικροδιήθησης). Αυτή η τεχνολογική διαφοροποίηση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως τη δυνατότητα λειτουργίας με πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις βιομάζας (MLSS) και σημαντικά αυξημένο SRT, το οποίο μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει τις 50 ημέρες.



Εικόνα 4. Μέθοδος MBR

Πηγή: <https://mesogeos.gr/%CE%B7-%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CF%83-%CE%BC%CE%B5%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%83-m-b-r/>

Ο συνδυασμός υψηλού SRT και πυκνής βιομάζας επιτρέπει την ανάπτυξη εξειδικευμένων μικροοργανισμών ικανών να διασπούν πιο σύνθετα οργανικά μόρια. Επιπλέον, το μικρό μέγεθος των πόρων της μεμβράνης εξασφαλίζει την πλήρη συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών και των προσροφημένων σε αυτά ρύπων. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα συστήματα MBR επιτυγχάνουν βελτιωμένη απομάκρυνση για ορισμένα φαρμακευτικά (π.χ. αντιβιοτικά) σε σύγκριση με τα CAS, κυρίως λόγω

κυρίως λόγω ενισχυμένης βιοαποδόμησης και όχι λόγω μεγέθους πόρων (Radjenović et al., 2008).



Εικόνα 5. Βιοαντιδραστήρας MBR

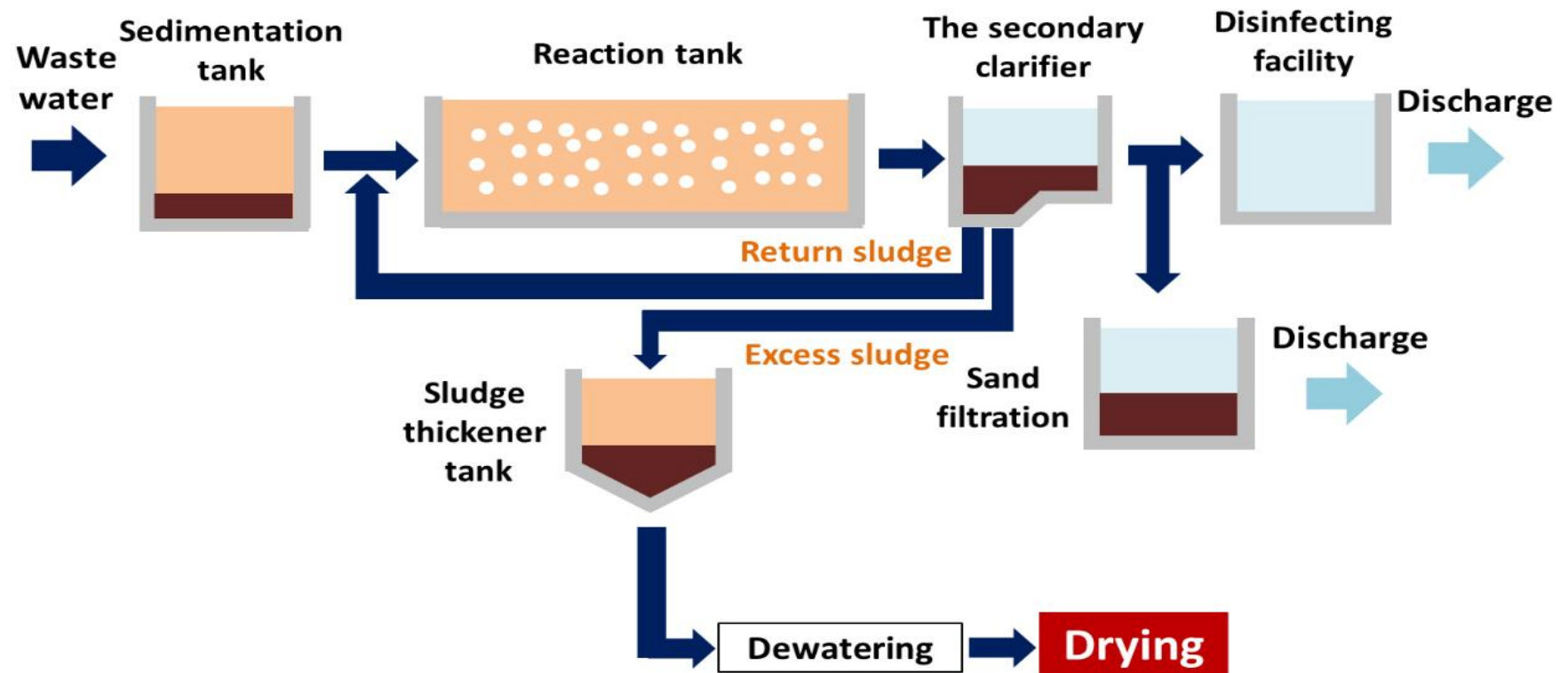
Πηγή: <https://waterfiltersystem.en.made-in-china.com/product/MaPYTLJzofkG/China-Water-Filter-Membrane-Bio-Filter-Mbr.html>

Ωστόσο, για πολικές και υδατοδιαλυτές ενώσεις μικρού μοριακού βάρους (όπως η καρβαμαζεπίνη), τα MBR δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά στην απόδοση σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα, καθώς τα μόρια αυτά διέρχονται ελεύθερα από τους πόρους των μεμβρανών μικροδιήθησης. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των MBR είναι το υψηλό λειτουργικό κόστος που σχετίζεται με τον έλεγχο της ρύπανσης των μεμβρανών (membrane fouling) και την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας για τον αερισμό, παράμετροι που επιβαρύνουν σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Igos, 2018).

3.1.3 Βιολογική Επεξεργασία με Επιμηκυμένο Χρόνο Παραμονής

Η στρατηγική της επιμήκυνσης του χρόνου παραμονής (extended aeration) στοχεύει στη μεγιστοποίηση της έκθεσης των ρύπων στη μικροβιακή δραστηριότητα. Σε συστήματα με πολύ μεγάλο SRT, η ιλύς υφίσταται ενδογενή αναπνοή, μειώνοντας την παραγωγή περίσσειας λάσπης και αυξάνοντας την ποικιλομορφία της μικροβιακής κοινότητας. Η προσαρμογή των μικροοργανισμών σε συνθήκες χαμηλού θρεπτικού φορτίου μπορεί να ενεργοποιήσει μεταβολικά μονοπάτια που επιτρέπουν τη χρήση φαρμακευτικών μικρορύπων ως πηγές άνθρακα ή ενέργειας.

Extended aeration process



Εικόνα 6. Διαδικασία επιμήκυνσης χρόνου παραμονής

Πηγή: <https://kenkidryer.com/2020/03/16/extended-aeration-process/>

3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

Η χρήση Ενεργού Άνθρακα (Activated Carbon) αποτελεί μια από τις πλέον ώριμες τεχνολογίες τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας. Εφαρμόζεται είτε υπό μορφή σκόνης (Powdered Activated Carbon - PAC), όπου δοσολογείται απευθείας σε δεξαμενές επαφής και στη συνέχεια διαχωρίζεται, είτε υπό μορφή κόκκων (Granular Activated Carbon - GAC) σε φίλτρα κλίνης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η απουσία παραγωγής τοξικών παραπροϊόντων (transformation products - TP). Ωστόσο, η απόδοσή της μειώνεται δραματικά λόγω του συναγωνισμού με την εναπομείνουσα Διαλυμένη Οργανική Ουσία (Dissolved Organic Carbon - DOC) των λυμάτων, ενώ η ανάγκη θερμικής αναγέννησης του κορεσμένου GAC ή αποτέφρωσης του PAC αυξάνει κατακόρυφα το ανθρακικό αποτύπωμα.

3.2.1 Ενεργός Άνθρακας σε Μορφή Σκόνης (Powdered Activated Carbon - PAC)

Η χρήση ενεργού άνθρακα (Activated Carbon - AC) βασίζεται στην εξαιρετικά υψηλή ειδική επιφάνεια του υλικού και στην πορώδη δομή του, που επιτρέπει τη δέσμευση οργανικών μορίων μέσω φυσικής και χημικής προσρόφησης. Ο Ενεργός Άνθρακας σε Μορφή Σκόνης (PAC) προστίθεται συνήθως απευθείας στη δεξαμενή αερισμού (biologically activated carbon) ή σε ξεχωριστή δεξαμενή επαφής μετά τη δευτεροβάθμια καθίζηση, ακολουθούμενη από ένα στάδιο διαχωρισμού (καθίζηση ή διήθηση).

Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η προσρόφηση των μη-πολικών και υδρόφοβων φαρμακευτικών ουσιών στους μικροπόρους και μεσοπόρους του άνθρακα. Η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από τη δόση του άνθρακα (συνήθως 10-20 mg/L για υψηλή απόδοση), τον χρόνο επαφής και τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου των λυμάτων. Η Διαλυμένη Οργανική Ύλη (Dissolved Organic Matter - DOM) στα λύματα ανταγωνίζεται τα φαρμακευτικά μόρια για τις θέσεις προσρόφησης, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας (pore blockage/competition effect) ([Linares et al., 2016](#)).

Εφαρμογές PAC έχουν υιοθετηθεί ευρέως στην Ελβετία και τη Γερμανία ως στάδιο τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας. Για παράδειγμα, στη μονάδα επεξεργασίας στο Ulm της Γερμανίας, η προσθήκη PAC επέτυχε απομάκρυνση >80% για ένα ευρύ φάσμα μικρορύπων ([Wöhler et al., 2022](#)). Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η διαχείριση του κορεσμένου άνθρακα, ο οποίος συνήθως απομακρύνεται μαζί με την ιλύ και οδηγείται προς αποτέφρωση, αυξάνοντας το ανθρακικό αποτύπωμα της εγκατάστασης.

3.2.2 Κοκκώδης Ενεργός Άνθρακας (Granular Activated Carbon - GAC)

Σε αντίθεση με τον PAC, ο Κοκκώδης Ενεργός Άνθρακας (GAC) χρησιμοποιείται σε σταθερές κλίνες φίλτρων (packed bed filters) διαμέσου των οποίων διέρχεται το λύμα. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει το πλεονέκτημα της συνεχούς λειτουργίας χωρίς την ανάγκη συνεχούς δοσολογίας υλικού και πολύπλοκων συστημάτων διαχωρισμού μετά την επεξεργασία. Τα φίλτρα GAC λειτουργούν τόσο ως προσροφητικά μέσα όσο και ως βιολογικά φίλτρα, καθώς στην επιφάνεια των κόκκων αναπτύσσεται βιοφίλμ που μπορεί να συνεισφέρει στη βιοαποδόμηση (Biological Activated Carbon - BAC).

Η απόδοση των φίλτρων GAC παρακολουθείται μέσω των καμπυλών διάσπασης (breakthrough curves), οι οποίες δείχνουν τον χρόνο λειτουργίας μέχρι την εξάντληση της προσροφητικής ικανότητας του άνθρακα. Ο χρόνος αυτός, εκφρασμένος συχνά σε όγκους κλίνης (Bed Volumes - BV), ποικίλλει ανάλογα με την πολικότητα των ρύπων. Ενώσεις όπως η σουλφαμεθοξαζόλη εμφανίζουν ταχύτερη διέλευση (breakthrough) σε σχέση με πιο υδρόφοβες ενώσεις. Η αναγέννηση (regeneration) του GAC είναι δυνατή θερμικά, καθιστώντας τη διαδικασία δυνητικά πιο βιώσιμη οικονομικά μακροπρόθεσμα σε σχέση με τον PAC, αν και το ενεργειακό κόστος της αναγέννησης και των μεταφορών πρέπει να συνεκτιμάται στην LCA (VITO, 2025; Lima et al., 2016).

Στο πιλοτικό έργο στο Lelystad της Ολλανδίας (Witteveen+Bos, 2021), η εφαρμογή GAC έδειξε εξαιρετικά αποτελέσματα, ωστόσο τονίστηκε η ανάγκη για προεπεξεργασία ώστε να αποφευχθεί η γρήγορη απόφραξη των πόρων από αιωρούμενα σωματίδια. Η σύγκριση PAC και GAC συχνά καταλήγει στο ότι ο PAC προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη δόση, ενώ ο GAC είναι πιο κατάλληλος για σταθερές ροές με χαμηλό φορτίο αιωρούμενων στερεών.

3.2.3 Νέα Προσροφητικά Υλικά

Πέρα από τους συμβατικούς ενεργούς άνθρακες, η έρευνα στρέφεται σε εναλλακτικά υλικά χαμηλότερου κόστους και περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Τα βιοεξανθρακώματα (biochars), παραγόμενα από πυρόλυση αγροτικών υπολειμμάτων ή ιλύος, έχουν δείξει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, αν και η προσροφητική τους ικανότητα είναι συνήθως χαμηλότερη από αυτή του εμπορικού ενεργού άνθρακα. Επιπλέον, νανοϋλικά βασισμένα σε άνθρακα (όπως νανοσωλήνες άνθρακα και γραφένιο) και σύνθετα υλικά (MXenes) μελετώνται για την εξαιρετικά υψηλή ειδική επιφάνεια και την εκλεκτικότητά τους (Kabir, 2024), ωστόσο η εφαρμογή τους σε πλήρη κλίμακα παραμένει περιορισμένη λόγω κόστους και ανησυχιών για την τοξικότητα των ίδιων των νανοϋλικών.

3.3 ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ (ADVANCED OXIDATION PROCESSES - AOPs)

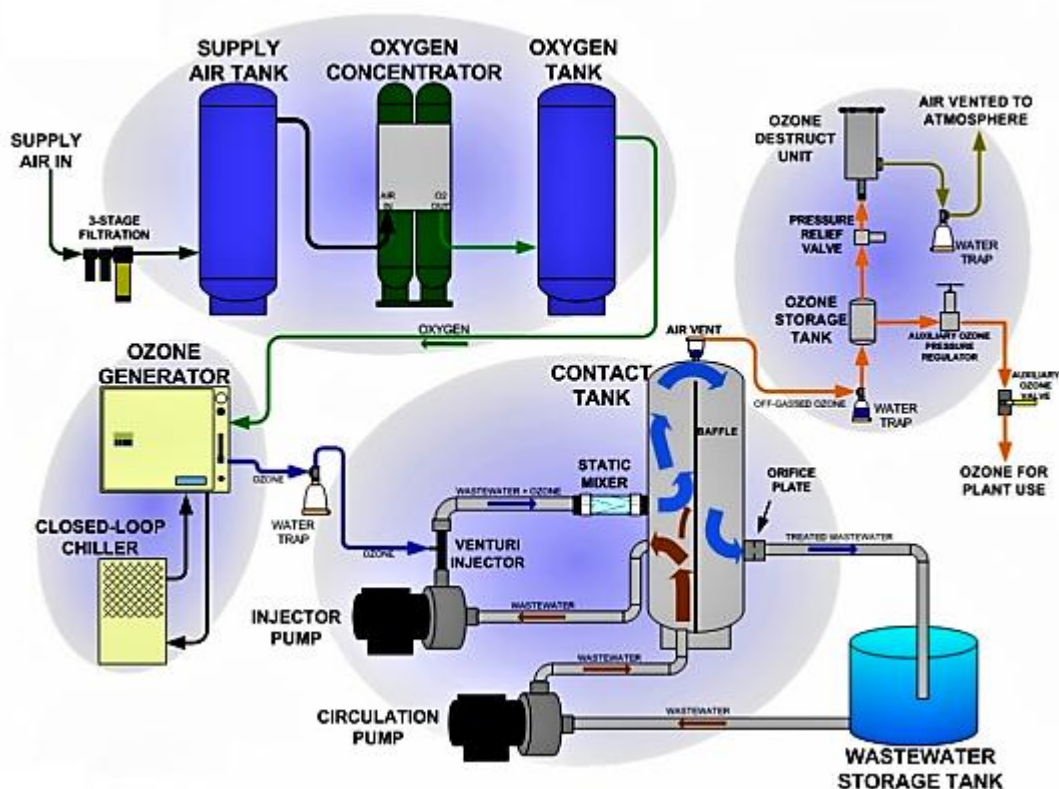
Οι Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (AOPs) αποτελούν μια οικογένεια τεχνολογιών που βασίζονται στην *in situ* παραγωγή εξαιρετικά δραστικών και μη-εκλεκτικών οξειδωτικών ειδών, κυρίως ριζών υδροξυλίου $\text{HO}\cdot$. Οι ρίζες αυτές διαθέτουν υψηλό δυναμικό οξείδωσης (2.80 V), δεύτερο μόνο μετά το φθόριο, επιτρέποντάς τους να επιτεθούν σχεδόν σε κάθε οργανικό μόριο, οδηγώντας σε διάσπαση δεσμών άνθρακα-άνθρακα και τελικά σε ανοργανοποίηση (μετατροπή σε CO_2 , H_2O και ανόργανα άλατα) (Aziz, 2025; Ikehata et al., 2006). Το κύριο πλεονέκτημα των AOPs είναι η ικανότητά τους να αποδομούν ανθεκτικούς ρύπους που διαφεύγουν της βιολογικής επεξεργασίας.

Οι AOPs βασίζονται στην παραγωγή εξαιρετικά δραστικών ριζών, κυρίως ριζών υδροξυλίου ($\cdot\text{OH}$), οι οποίες επιτίθενται αδιακρίτως στα οργανικά μόρια, διασπώντας τα σε μικρότερα, αβλαβή τμήματα ή οξειδώνοντάς τα πλήρως προς CO_2 και H_2O .

- **Οζονισμός (O_3):** Αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή σε πλήρη κλίμακα (π.χ. στην Ελβετία). Είναι εξαιρετικά αποδοτικός, αλλά ενέχει τον κίνδυνο σχηματισμού τοξικών υποπροϊόντων. Όταν τα λύματα περιέχουν βρωμιούχα ιόντα (Br^-), το όζον μπορεί να τα οξειδώσει σε βρωμικά (BrO_3^-), τα οποία είναι χαρακτηρισμένα ως πιθανώς καρκινογόνα για τον άνθρωπο (WHO, 2012).
- **Fenton και Photo-Fenton:** Αξιοποιούν την αντίδραση ιόντων σιδήρου (Fe^{2+}) με υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) σε όξινο pH. Η απαίτηση για αυστηρή ρύθμιση του pH και η παραγωγή χημικής ιλύος (σιδηρούχου) δυσχεραίνουν την εφαρμογή τους σε αστικά λύματα μεγάλου όγκου, αν και οι παραλλαγές με ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζουν ερευνητικό ενδιαφέρον για τις χώρες του Νότου (Aziz, 2025; Iqbal, 2024; Kanakaraju, 2025; Gros et al., 2018).

3.3.1 Οζονισμός (Ozonation)

Ο Οζονισμός αποτελεί σήμερα την πιο ώριμη και διαδεδομένη τεχνολογία AOP για την τεταρτοβάθμια επεξεργασία λυμάτων. Το όζον (O_3) είναι ένα ισχυρό οξειδωτικό που μπορεί να αντιδράσει με τους ρύπους μέσω δύο μηχανισμών: (α) την άμεση αντίδραση του μορίου του όζοντος, η οποία είναι εκλεκτική και στοχεύει κυρίως σε δομές με υψηλή ηλεκτρονιακή πυκνότητα (όπως αρωματικοί δακτύλιοι, διπλοί δεσμοί $\text{C}=\text{C}$, αμίνες), και (β) την έμμεση αντίδραση μέσω των ριζών υδροξυλίου που παράγονται από την αποσύνθεση του όζοντος στο νερό (Ikehata et al., 2006; Rodriguez et al., 2013).



Εικόνα 7. Οζονισμός

Πηγή: <https://enerchem.gr/WaterSystems/Ozonation/Ozonation.php>

Φαρμακευτικές ενώσεις όπως η δικλοφενάκη, η καρβαμαζεπίνη και η αιθυνυλοιστραδιόλη (EE2) αντιδρούν ταχύτατα με το όζον (σταθερές ταχύτητας $k_{O_3} > 10^4 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$), επιτυγχάνοντας ποσοστά απομάκρυνσης άνω του 95% με τυπικές δόσεις όζοντος (0.4-0.8 g $\text{O}_3/\text{g DOC}$). Αντιθέτως, ουσίες όπως τα ιωδιούχα σκιαγραφικά και ορισμένα κυτταροστατικά είναι ανθεκτικά στον άμεσο οζονισμό και απαιτούν υψηλότερη έκθεση σε ρίζες υδροξυλίου (Hansen et al., 2016).

Παρά την υψηλή αποτελεσματικότητα, ο οζονισμός ενέχει τον κίνδυνο σχηματισμού τοξικών παραπροϊόντων οξείδωσης (Transformation Products - TP). Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί ο σχηματισμός βρωμικών ιόντων (BrO_3^-), μιας πιθανώς καρκινογόνου ουσίας, όταν τα λύματα περιέχουν βρωμίδια (Boogaard et al., 2025). Για τον λόγο αυτό, ο οζονισμός συχνά ακολουθείται από ένα τελικό στάδιο " (π.χ. φίλτρο άμμου ή GAC) για τη βιοαποδόμηση των σχηματιζόμενων τοξικών TP. Η Ελβετία, πρωτοπόρος στην εφαρμογή της μεθόδου (π.χ. WWTP Regensdorf), έχει θεσπίσει αυστηρές προδιαγραφές για τον έλεγχο της τοξικότητας και των βρωμικών.

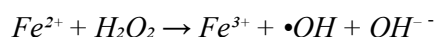
Οι ελβετικές κατευθυντήριες οδηγίες προβλέπουν ότι η εφαρμογή του οζονισμού πρέπει να συνοδεύεται από συνεχή έλεγχο της δόσης όζοντος σε σχέση με το διαλυμένο οργανικό άνθρακα (DOC), ώστε να εξασφαλίζεται υψηλή απομάκρυνση των μικρορύπων χωρίς υπερβολική παραγωγή παραπροϊόντων οξείδωσης. Παράλληλα, μετά τον οζονισμό εφαρμόζεται υποχρεωτικά στάδιο βιολογικής μεταεπεξεργασίας,

όπως φίλτρα άμμου ή κοκκώδους ενεργού άνθρακα (Granular Activated Carbon – GAC), με σκοπό την αποδόμηση των παραγόμενων προϊόντων μετασχηματισμού (Transformation Products – TPs) και τη μείωση της υπολειπόμενης οικοτοξικότητας της εκροής. Επιπλέον, πραγματοποιείται συστηματική παρακολούθηση των συγκεντρώσεων βρωμικών ιόντων, ιδιαίτερα όταν τα εισερχόμενα λύματα περιέχουν αυξημένες συγκεντρώσεις βρωμιδίων, καθώς και έλεγχος βιοδοκιμών τοξικότητας για την αξιολόγηση της συνολικής περιβαλλοντικής επίπτωσης της επεξεργασμένης εκροής. Οι προδιαγραφές αυτές έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο της εθνικής στρατηγικής της Ελβετίας για την αναβάθμιση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και αποτελούν σήμερα σημείο αναφοράς για τον σχεδιασμό συστημάτων τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας στην Ευρώπη (Gros et al., 2018; Wöhler et al., 2022; Boogaard et al., 2025).

3.3.2 Οξείδωση Fenton και Photo-Fenton

3.3.2.1 Διεργασία Fenton (Fenton Process)

Η κλασική διεργασία Fenton βασίζεται στην καταλυτική διάσπαση του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) από ιόντα δισθενούς σιδήρου (Fe^{2+}) σε όξινο περιβάλλον, παράγοντας ρίζες υδροξυλίου:



Η μέθοδος είναι αποτελεσματική, οικονομική (λόγω φθηνών αντιδραστηρίων) και απλή στη λειτουργία. Ωστόσο, η απαίτηση για αυστηρό έλεγχο του pH (βέλτιστο pH ~3.0) και η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων λάσπης υδροξειδίου του σιδήρου που απαιτεί περαιτέρω διαχείριση, αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα για την εφαρμογή σε αστικά λύματα μεγάλης κλίμακας (Rodríguez-Chueca et al., 2024).

3.3.2.2 Φωτο-Fenton (Photo-Fenton)

Η διαδικασία Photo-Fenton βελτιώνει την απόδοση της κλασικής αντίδρασης Fenton μέσω της ακτινοβολίας UV ή ορατού φωτός. Η ακτινοβολία επιταχύνει την αναγέννηση του Fe^{2+} από τον Fe^{3+} , κλείνοντας τον καταλυτικό κύκλο και παράγοντας επιπλέον ρίζες υδροξυλίου. Η χρήση ηλιακής ενέργειας (Solar Photo-Fenton) έχει μελετηθεί εκτενώς ως μια βιώσιμη εναλλακτική λύση, μειώνοντας δραστικά το ενεργειακό κόστος. Μελέτες πιλοτικής κλίμακας (Sirtori et al., 2009; Foteinis et al., 2018) έχουν δείξει ότι η μέθοδος μπορεί να επιτύχει πλήρη απομάκρυνση ανθεκτικών φαρμάκων και μείωση της τοξικότητας, ωστόσο η εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες και η ανάγκη για μεγάλες επιφάνειες αντιδραστήρων περιορίζουν την ευρεία εφαρμογή της σε χώρες με χαμηλή ηλιοφάνεια.

3.3.3 Φωτοκατάλυση (Photocatalysis)

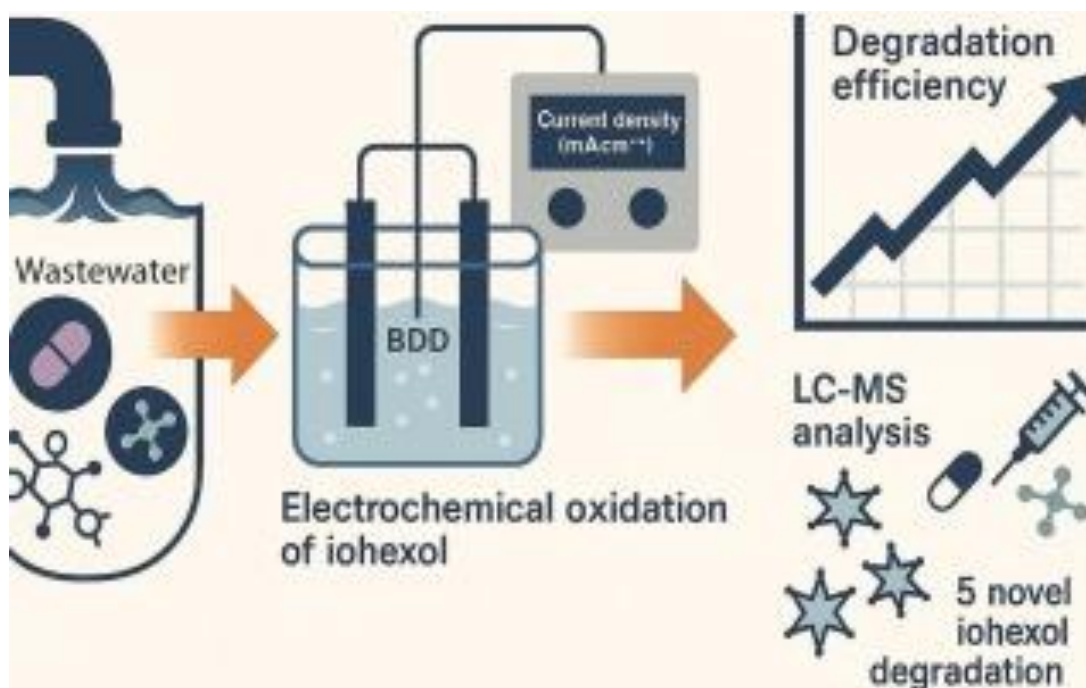
Η ετερογενής φωτοκατάλυση χρησιμοποιεί ημιαγωγούς, όπως το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), τα οποία διεγείρονται από το φως για να παράγουν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών (e^-/h^+). Οι φορείς αυτοί φορτίου αντιδρούν με το νερό και το διαλυμένο οξυγόνο για να παράγουν δραστικά οξειδωτικά είδη (ROS) (Kanakaraju et al., 2014; Yang et al., 2010). Αν και η μέθοδος προσφέρει τη δυνατότητα πλήρους ανοργανοποίησης των ρύπων χωρίς προσθήκη χημικών, αντιμετωπίζει τεχνικές προκλήσεις, κυρίως στον διαχωρισμό του καταλύτη από το επεξεργασμένο νερό (όταν χρησιμοποιείται σε μορφή σκόνης) και στη χαμηλή κβαντική απόδοση. Νέες εξελίξεις εστιάζουν στην ανάπτυξη φωτοκαταλυτών που ενεργοποιούνται στο ορατό φως (Al Miad et al., 2024), αλλά η τεχνολογία παραμένει κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο όσον αφορά την επεξεργασία αστικών λυμάτων.

3.3.4 UV/ H_2O_2 Οξείδωση

Η άμεση φωτόλυση του υπεροξειδίου του υδρογόνου με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (συνήθως στα 254 nm) οδηγεί στον σχηματισμό δύο ριζών υδροξυλίου ανά μόριο H_2O_2 . Η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά αποτελεσματική για την αποδόμηση ενός ευρέος φάσματος μικρορύπων και έχει το πλεονέκτημα ότι απολυμαίνει ταυτόχρονα το νερό. Ωστόσο, η παρουσία αιωρούμενων στερεών, ανθρακικών και διττανθρακικών και οργανικής ύλης που απορροφούν την UV ακτινοβολία (scavenging effect) μπορεί να αυξήσει δραματικά την απαιτούμενη ενέργεια, καθιστώντας την τεχνολογία ενεργοβόρα για λύματα με χαμηλή διαπερατότητα UV (Ismail, 2025).

3.3.5 Ηλεκτροχημική Οξείδωση (Electrochemical Oxidation)

Η ηλεκτροχημική οξείδωση (Anodic Oxidation) είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία όπου οι οργανικοί ρύποι οξειδώνονται είτε άμεσα στην επιφάνεια της ανόδου μέσω μεταφοράς ηλεκτρονίων, είτε έμμεσα μέσω ηλεκτροπαραγόμενων οξειδωτικών μέσων (όπως $\bullet\text{OH}$, Cl_2 , O_3). Η χρήση ανόδων διαμαντιού ενισχυμένου με βόριο (Boron-Doped Diamond - BDD) έχει δείξει εξαιρετικά αποτελέσματα στην ανοργανοποίηση φαρμακευτικών ενώσεων λόγω του μεγάλου παραθύρου δυναμικού για την έκλυση οξυγόνου. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απουσία προσθήκης χημικών, η συμπαγής διάταξη και η ευκολία αυτοματισμού. Στον αντίποδα, το υψηλό κόστος των ηλεκτροδίων και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας παραμένουν εμπόδια για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (Amaya-Santos et al., 2025).



Εικόνα 8. Ηλεκτροχημική Οξείδωση

Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1572665725006447>

3.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΓΙΑ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΩΝ

Οι τεχνολογίες μεμβρανών υψηλής πίεσης, όπως η Νανοδιήθηση (NF) και η Αντίστροφη Όσμωση (RO), λειτουργούν ως φυσικοί φραγμοί για τους μικρορύπους. Σε αντίθεση με τις οξειδωτικές μεθόδους που αποδομούν τους ρύπους, οι μεμβράνες τους διαχωρίζουν, παράγοντας ένα ρεύμα καθαρού νερού (permeate) και ένα ρεύμα συμπυκνώματος (concentrate) που περιέχει τους ρύπους.

Η Νανοδιήθηση (Nanofiltration - NF) και κυρίως η Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis - RO) λειτουργούν ως αυστηρά φυσικά φράγματα. Η RO επιτυγχάνει την πλήρη σχεδόν (>99%) απομάκρυνση των APIs (EPA, 2018). Εντούτοις, οι ενεργειακές απαιτήσεις για τη διατήρηση υψηλών πιέσεων είναι απαγορευτικές για τα τυπικά αστικά λύματα, ενώ δημιουργείται ένα μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα: η διαχείριση του υπερ-συμπυκνώματος (brine), το οποίο περιέχει τους ρύπους σε τεράστιες συγκεντρώσεις και απαιτεί περαιτέρω θερμική ή χημική επεξεργασία (Z-LD: Zero Liquid Discharge).

3.4.1 Νανοδιήθηση (NF) και Υπερδιήθηση

Η νανοδιήθηση χαρακτηρίζεται από πόρους μεγέθους περίπου 1-10 nm. Οι μηχανισμοί απόρριψης (rejection) περιλαμβάνουν τον στερεοχημικό αποκλεισμό (steric hindrance) και τις ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις (Donnan exclusion). Η NF είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για φαρμακευτικά μόρια με μοριακό βάρος >200-300 Da και για ιόντα. Για παράδειγμα, αρνητικά φορτισμένα φάρμακα σε ουδέτερο pH απωθούνται από την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια πολλών πολυμερικών μεμβρανών NF, επιτυγχάνοντας απομάκρυνση >90% (Radjenović et al., 2008). Η Υπερδιήθηση (UF), με μεγαλύτερους πόρους, είναι γενικά αναποτελεσματική για την άμεση απομάκρυνση μικρορύπων, εκτός αν συνδυαστεί με προσρόφηση (π.χ. προσθήκη PAC).

3.4.2 Αντίστροφη Όσμωση (RO)

Η RO θεωρείται η απόλυτη μέθοδος καθαρισμού, επιτυγχάνοντας απομάκρυνση >99% για τη συντριπτική πλειοψηφία των φαρμακευτικών ενώσεων. Χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα επαναχρησιμοποίησης νερού για πόση (potable reuse), όπως στο NEWater της Σιγκαπούρης. Ωστόσο, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας για την υπερνίκηση της οσμωτικής πίεσης και το σοβαρό πρόβλημα της διαχείρισης του τοξικού συμπυκνώματος (brine disposal) αποτελούν σημαντικούς περιβαλλοντικούς και οικονομικούς περιορισμούς που πρέπει να συνεκτιμώνται στην LCA (Licona et al., 2018).

3.5 ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Η αναγνώριση ότι καμία μεμονωμένη τεχνολογία δεν αποτελεί πανάκεια έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων. Ένας κοινός συνδυασμός είναι ο οξονισμός ακολουθούμενη από φίλτρα άμμου ή GAC. Σε αυτό το σχήμα, ο οξονισμός διασπά τους ανθεκτικούς ρύπους και αυξάνει τη βιοδιασπασιμότητα του λύματος, ενώ το επόμενο βιολογικό στάδιο (π.χ. στο φίλτρο GAC) απομακρύνει τα βιοδιασπώμενα υποπροϊόντα οξείδωσης και μειώνει την τοξικότητα (Wöhler et al., 2022). Άλλοι συνδυασμοί περιλαμβάνουν την προσθήκη PAC σε συστήματα MBR (PAC-MBR), όπου επιτυγχάνεται ταυτόχρονη βιοαποδόμηση και προσρόφηση, μειώνοντας παράλληλα τη ρύπανση της μεμβράνης.

3.6 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Πίνακας 3. Συγκριτική επισκόπηση τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών

Τεχνολογία	Απόδοση Απομάκρυνσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οξονισμός	Πολύ Υψηλή (>90%) για πολλές ενώσεις	Ωριμη τεχνολογία, μικρό αποτύπωμα χώρου	Σχηματισμός βρωμικών, τοξικά παραπροϊόντα
Ενεργός Άνθρακας (PAC/GAC)	Υψηλή (>80%)	Δεν σχηματίζει τοξικά παραπροϊόντα	Κόστος αναγέννησης/διάθεσης άνθρακα, απομάκρυνση μη-ειδικών οργανικών
Αντίστροφη Όσμωση	Άριστη (>99%)	Πλήρης φραγμός, αφαλάτωση	Υψηλό ενεργειακό κόστος, διαχείριση συμπυκνώματος
Fenton/Photo-Fenton	Υψηλή	Ανοργανοποίηση ρύπων	Παραγωγή λάσπης σιδήρου, εξάρτηση από pH

Πηγή: Προσαρμογή από Gros et al. (2018), OECD (2019), Remy & Jekel (2012), Hansen et al. (2016), Wöhler et al. (2022), Pandis et al. (2022), Aziz (2025), Iqbal (2024), Kanakaraju (2025).

Από πλευράς περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μελέτες LCA ([Andersson & Karlsson, 2022](#); [Gros et al., 2018](#)) υποδεικνύουν ότι ενώ η RO και οξονισμός έχουν υψηλές επιδόσεις στην ποιότητα του νερού, συνοδεύονται από σημαντικό αποτύπωμα άνθρακα λόγω της κατανάλωσης ενέργειας και οξυγόνου αντίστοιχα. Η προσρόφηση σε PAC εμφανίζει συχνά χαμηλότερο GWP (Global Warming Potential), αλλά υψηλότερες επιπτώσεις σε κατηγορίες όπως η ανθρώπινη τοξικότητα λόγω της παραγωγής και μεταφοράς του άνθρακα.

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί στις τεχνολογίες απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων, καμία διαθέσιμη τεχνολογία δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα βέλτιστη υπό όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Οι προηγμένες διεργασίες οξείδωσης (AOPs) εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή αποτελεσματικότητα στην αποδόμηση ανθεκτικών μικρορύπων, ωστόσο η εφαρμογή τους συνοδεύεται συχνά από αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και πιθανό σχηματισμό παραπροϊόντων οξείδωσης. Αντίστοιχα, οι τεχνολογίες προσρόφησης με ενεργό άνθρακα παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα και τεχνολογική ωριμότητα, αλλά η ανάγκη συχνής αναγέννησης ή αντικατάστασης του υλικού επιβαρύνει σημαντικά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Οι τεχνολογίες μεμβρανών επιτυγχάνουν εξαιρετικά υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης, συνοδεύονται όμως από υψηλό ενεργειακό κόστος και ζητήματα διαχείρισης του παραγόμενου συμπυκνώματος. Επομένως, η επιλογή τεχνολογίας δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στην αποδοτικότητα απομάκρυνσης ρύπων, αλλά απαιτεί πολυκριτηριακή αξιολόγηση που να λαμβάνει υπόψη ενεργειακούς, περιβαλλοντικούς και λειτουργικούς παράγοντες.

3.7 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Η επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας δεν είναι μονοσήμαντη και εξαρτάται από τοπικούς παράγοντες. Η ποιότητα του εισερχόμενου λύματος (π.χ. συγκέντρωση DOC, βρωμίδια), οι απαιτήσεις του αποδέκτη (π.χ. ευαίσθητο οικοσύστημα, χρήση για άρδευση), το ενεργειακό μείγμα της χώρας και το διαθέσιμο κόστος καθορίζουν την τελική απόφαση. Σε περιπτώσεις όπου η επαναχρησιμοποίηση του νερού είναι προτεραιότητα, τεχνολογίες μεμβρανών μπορεί να προκριθούν παρά το υψηλότερο κόστος. Σε περιπτώσεις αναβάθμισης υφιστάμενων μονάδων με περιορισμένο χώρο, ο οξονισμός ή το PAC αποτελούν συχνά τις επικρατέστερες λύσεις στην Κεντρική Ευρώπη.

3.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επισκόπηση των διαθέσιμων τεχνολογιών καταδεικνύει ότι η αποτελεσματική απομάκρυνση των φαρμακευτικών ενώσεων απαιτεί μετάβαση πέρα από τη συμβατική βιολογική επεξεργασία. Οι τεχνολογίες AOPs και η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα αποτελούν τις πλέον υποσχόμενες και ώριμες λύσεις για εφαρμογή πλήρους κλίμακας. Ωστόσο, κάθε τεχνολογία συνοδεύεται από περιβαλλοντικά "αντίτιμα" (trade-offs), είτε υπό μορφή ενεργειακής κατανάλωσης είτε μέσω παραγωγής παραπροϊόντων. Συνεπώς, η εφαρμογή εργαλείων ολιστικής αξιολόγησης, όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA), που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, καθίσταται επιβεβλημένη για την επιλογή βιώσιμων λύσεων που δεν μετατοπίζουν απλώς το πρόβλημα από το νερό στην ατμόσφαιρα ή το έδαφος.

4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LCA)

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ LCA ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Η αυξανόμενη εφαρμογή τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας για την απομάκρυνση φαρμακευτικών ενώσεων από τα αστικά λύματα έχει δημιουργήσει την ανάγκη για πιο ολοκληρωμένες προσεγγίσεις αξιολόγησης της περιβαλλοντικής τους επίδοσης. Παρότι πολλές τεχνολογίες εμφανίζουν υψηλή αποτελεσματικότητα ως προς την απομάκρυνση οργανικών μικρορύπων, η εφαρμογή τους συχνά συνοδεύεται από αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, χρήση χημικών αντιδραστηρίων, παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων ή σχηματισμό παραπροϊόντων οξείδωσης. Επομένως, η αξιολόγηση μιας τεχνολογίας δεν μπορεί να περιορίζεται αποκλειστικά στην αποδοτικότητα απομάκρυνσης των ρύπων, αλλά απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που να λαμβάνει υπόψη τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης και της λειτουργίας της.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία περιβαλλοντικής αξιολόγησης, καθώς επιτρέπει τη συστηματική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με ένα προϊόν, μια διεργασία ή μια υπηρεσία, από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως την τελική διάθεση ή επαναχρησιμοποίηση. Η μεθοδολογία έχει τυποποιηθεί μέσω των προτύπων ISO 14040 και ISO 14044 και χρησιμοποιείται ευρέως στην αξιολόγηση τεχνολογιών διαχείρισης αποβλήτων και επεξεργασίας λυμάτων.

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) αποτελεί μια συστηματική, πολυκριτηριακή μεθοδολογία που αποσκοπεί στην ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος, μιας υπηρεσίας ή μιας διεργασίας καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του — από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την τελική διάθεση ή ανακύκλωση (Corominas et al., 2013). Στο πλαίσιο της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, η LCA έχει εξελιχθεί σε ένα κρίσιμο εργαλείο λήψης αποφάσεων, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών τεχνολογικών λύσεων όχι μόνο ως προς την αποδοτικότητά τους στην απομάκρυνση ρύπων, αλλά και ως προς το συνολικό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα (Igos, 2018).

Η ανάγκη εφαρμογής της LCA στον τομέα της επεξεργασίας αποβλήτων κατέστη ιδιαίτερα επιτακτική κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, όταν οι προηγμένες τεχνολογίες απομάκρυνσης μικρορύπων — οζονισμός, προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα, μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης, προχωρημένες οξειδωτικές διεργασίες (AOPs) — άρχισαν να εντάσσονται σε πιλοτικές και πλήρους κλίμακας εγκαταστάσεις στην Ευρώπη (Remy & Jekel, 2012· Li et al., 2019). Οι τεχνολογίες αυτές, αν και παρουσιάζουν υψηλή απόδοση στην απομάκρυνση φαρμακευτικών ενώσεων, ενδοκρινικών διαταρακτών και άλλων μικρορύπων, συνεπάγονται ταυτόχρονα αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, χρήση χημικών αντιδραστηρίων και παραγωγή

δευτερογενών αποβλήτων. Κατά συνέπεια, η απλή μέτρηση του ποσοστού απομάκρυνσης ενός ρύπου δεν αρκεί για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση μιας τεχνολογίας — απαιτείται ταυτόχρονη εκτίμηση του περιβαλλοντικού κόστους που συνοδεύει τη λειτουργία της.

Στην περίπτωση των τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων, η LCA συμβάλλει στην κατανόηση του κατά πόσο η περιβαλλοντική ωφέλεια που προκύπτει από τη μείωση της υδατικής ρύπανσης συνοδεύεται από μεταφορά περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε άλλες κατηγορίες, όπως η κλιματική αλλαγή, η κατανάλωση ενέργειας ή η εξάντληση φυσικών πόρων. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στις Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (AOPs) και στις τεχνολογίες μεμβρανών, όπου η υψηλή ενεργειακή απαίτηση μπορεί να αυξήσει σημαντικά το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα της εγκατάστασης.

Η LCA παρέχει ακριβώς αυτό το πλαίσιο: μια ολοκληρωμένη, ποσοτική εικόνα που λαμβάνει υπόψη τόσο τα άμεσα οφέλη (π.χ. μείωση τοξικότητας στον υδάτινο αποδέκτη) όσο και τις έμμεσες επιβαρύνσεις (π.χ. εκπομπές CO₂ από την ηλεκτρική ενέργεια, περιβαλλοντικό φορτίο από την παραγωγή και αναγέννηση ενεργού άνθρακα, ή τη σύνθεση χημικών οξειδωτικών μέσων). Με αυτόν τον τρόπο, η μεθοδολογία αποκαλύπτει πιθανές «μεταφορές φορτίου» (burden shifting) — δηλαδή περιπτώσεις όπου η βελτίωση ενός περιβαλλοντικού δείκτη (π.χ. μείωση οικοτοξικότητας) επιτυγχάνεται εις βάρος ενός άλλου (π.χ. αύξηση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου) (Corominas et al., 2013· Rahman et al., 2018).

Τα πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006 αποτελούν τη διεθνώς αναγνωρισμένη βάση για τη διεξαγωγή μελετών LCA. Το ISO 14040 ορίζει τις αρχές και το γενικό πλαίσιο εφαρμογής, ενώ το ISO 14044 εξειδικεύει τις απαιτήσεις και τις κατευθυντήριες οδηγίες για κάθε στάδιο της μελέτης.

Σύμφωνα με τα πρότυπα αυτά, η LCA διαρθρώνεται σε τέσσερα αλληλένδετα στάδια:

1. τον καθορισμό στόχου και πεδίου εφαρμογής,
2. την ανάλυση απογραφής κύκλου ζωής,
3. την αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής, και
4. την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Τα στάδια αυτά δεν ακολουθούν αυστηρά γραμμική σειρά· αντίθετα, η LCA είναι μια επαναληπτική διαδικασία, στην οποία τα ευρήματα κάθε σταδίου μπορεί να οδηγήσουν σε αναθεώρηση προηγούμενων παραδοχών ή επιλογών (ISO 14040:2006).

Στις ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζεται αναλυτικά κάθε στάδιο της μεθοδολογίας LCA (υποκεφάλαιο 4.1.1), με ιδιαίτερη έμφαση στις παραμέτρους που αφορούν τις τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων για την απομάκρυνση φαρμακευτικών ενώσεων. Στη συνέχεια (υποκεφάλαιο 4.1.2), αναλύονται τα κριτήρια αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για τη συγκριτική εκτίμηση των τεχνολογιών αυτών, τα οποία περιλαμβάνουν τόσο περιβαλλοντικούς δείκτες (GWP,

οικοτοξικότητα, ευτροφισμός) όσο και τεχνοοικονομικά κριτήρια (ενεργειακή κατανάλωση, λειτουργικό κόστος, κόστος κύκλου ζωής).

4.1.1 Στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Στόχος, Απογραφή, Αξιολόγηση Επιπτώσεων, Ερμηνεία)

Η μεθοδολογία LCA, όπως κωδικοποιείται στα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, περιλαμβάνει τέσσερα διακριτά αλλά αλληλοσυνδεόμενα στάδια. Κάθε στάδιο εξυπηρετεί συγκεκριμένο σκοπό και επηρεάζει τα υπόλοιπα μέσω ανατροφοδοτικών βρόχων, καθιστώντας τη μελέτη LCA μια δυναμική, επαναληπτική διαδικασία και όχι μια απλή γραμμική ακολουθία βημάτων.

A. Καθορισμός Στόχου και Πεδίου Εφαρμογής (Goal and Scope Definition)

Το πρώτο στάδιο αποτελεί τη θεμελιώδη βάση κάθε μελέτης LCA, καθώς καθορίζει τόσο τον σκοπό της ανάλυσης όσο και τα όρια εντός των οποίων αυτή θα διεξαχθεί. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε αυτό το στάδιο επηρεάζουν καθοριστικά τα αποτελέσματα και τη δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών μελετών.

Ο στόχος της μελέτης, περιγράφει το ερώτημα που η LCA καλείται να απαντήσει. Στον τομέα της απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων από υγρά απόβλητα, ο στόχος συνήθως διατυπώνεται ως σύγκριση εναλλακτικών τεχνολογικών σεναρίων ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Για παράδειγμα, η μελέτη των Remy & Jekel (2012) είχε ως στόχο τη σύγκριση του οξονισμού με την προσρόφιση σε ενεργό άνθρακα σε κοκκώδη μορφή (GAC) ως τριτοβάθμια επεξεργασία στο Βερολίνο, ενώ οι Li et al. (2019) εξέτασαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις προηγμένων τεχνολογιών επεξεργασίας λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση μικρορύπων στον αποδέκτη.

Λειτουργική μονάδα (Functional Unit – FU): Η λειτουργική μονάδα αποτελεί ίσως την πιο κρίσιμη παράμετρο μιας μελέτης LCA, καθώς ορίζει τη βάση σύγκρισης μεταξύ των εξεταζόμενων συστημάτων. Στις μελέτες LCA που αφορούν εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων (ΕΕΛ), η λειτουργική μονάδα ορίζεται κατά κανόνα ως ένας συγκεκριμένος όγκος επεξεργασμένων αποβλήτων — π.χ. 1 m³ εκροής, 1.000 m³ ημερήσιας παροχής ή η ετήσια λειτουργία μιας εγκατάστασης για δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό (Corominas et al., 2013).

Η ανασκόπηση της Corominas et al. (2013), η οποία εξέτασε 45 δημοσιευμένες μελέτες LCA στον τομέα της επεξεργασίας αποβλήτων, ανέδειξε σημαντική ετερογένεια στον ορισμό της λειτουργικής μονάδας — γεγονός που δυσχεραίνει τη σύγκριση μεταξύ μελετών. Ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιούν ως FU τον όγκο εισροής, άλλοι τον όγκο εκροής, ενώ σε μελέτες εστιασμένες στη μείωση μικρορύπων εμφανίζονται και πιο εξειδικευμένες λειτουργικές μονάδες, όπως «η απομάκρυνση ενός συγκεκριμένου

ποσοστού (π.χ. 80%) ενός δεδομένου φαρμακευτικού ρύπου» (Igos, 2018). Η επιλογή αυτή δεν είναι τυπική — επηρεάζει ουσιαστικά τα συμπεράσματα: μια τεχνολογία μπορεί να εμφανίζεται περιβαλλοντικά αποδοτικότερη ανά m³ αλλά λιγότερο αποδοτική ανά μονάδα απομακρυνθέντος ρύπου.

Όρια συστήματος (System Boundaries): Τα όρια του συστήματος προσδιορίζουν ποιες διεργασίες και ποια στάδια του κύκλου ζωής περιλαμβάνονται στην ανάλυση. Στις μελέτες LCA τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων, τα όρια μπορεί να κυμαίνονται από «πύλη σε πύλη» (gate-to-gate), που περιλαμβάνει μόνο τη λειτουργική φάση της μονάδας επεξεργασίας, έως «από το λίκνο στον τάφο» (cradle-to-grave), που καλύπτει και την κατασκευή υποδομών, την παραγωγή χημικών αντιδραστηρίων, τη μεταφορά υλικών, τη διαχείριση παραπροϊόντων και αποβλήτων, καθώς και την τελική απόσυρση εξοπλισμού (Corominas et al., 2013· Foteinis et al., 2018).

Η πλειονότητα των μελετών που εξετάζουν προηγμένες τεχνολογίες (οζονισμός, PAC, GAC, AOPs) υιοθετεί μια προσέγγιση «cradle-to-gate» ή «gate-to-gate», εστιάζοντας κυρίως στη λειτουργική φάση — η οποία κυριαρχεί στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και χημικών (Remy & Jekel, 2012). Ωστόσο, μελέτες που περιλαμβάνουν και τη φάση κατασκευής υποδομών (π.χ. δεξαμενές οζονισμού, φίλτρα ενεργού άνθρακα) ή τη φάση τέλους ζωής (π.χ. αναγέννηση ή διάθεση κορεσμένου ενεργού άνθρακα) παρέχουν πληρέστερη εικόνα, αν και συνεπάγονται μεγαλύτερη αβεβαιότητα λόγω έλλειψης αξιόπιστων δεδομένων για ορισμένες εισροές (Li et al., 2019).

Ένα ζήτημα που αξίζει ιδιαίτερη προσοχή αφορά τη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού μείγματος (electricity mix). Η περιβαλλοντική επίπτωση της κατανάλωσης ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση του ενεργειακού μείγματος της χώρας ή της περιοχής στην οποία λειτουργεί η εγκατάσταση. Μια μονάδα οζονισμού που λειτουργεί σε χώρα με υψηλό ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. Σουηδία, Νορβηγία) θα εμφανίζει σημαντικά χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα σε σύγκριση με μια αντίστοιχη μονάδα σε χώρα που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα (Andersson & Karlsson, 2022). Η παράμετρος αυτή καθιστά τη σύγκριση μελετών LCA από διαφορετικές χώρες ιδιαίτερα ευαίσθητη και απαιτεί προσεκτική ερμηνεία.

B. Ανάλυση Απογραφής Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory – LCI)

Το δεύτερο στάδιο — η ανάλυση απογραφής — αφορά τη συστηματική καταγραφή και ποσοτικοποίηση όλων των εισροών (inputs) και εκροών (outputs) που σχετίζονται με το εξεταζόμενο σύστημα εντός των καθορισμένων ορίων. Πρόκειται για το πλέον δαπανηρό σε χρόνο και δεδομένα στάδιο, αλλά και για εκείνο που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία της τελικής αξιολόγησης.

Εισροές: Στην περίπτωση τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων, οι κύριες εισροές περιλαμβάνουν:

- **Ηλεκτρική ενέργεια:** Αποτελεί τη σημαντικότερη εισροή για τις περισσότερες τεχνολογίες. Ο οξονισμός, για παράδειγμα, απαιτεί σημαντική ενέργεια για την παραγωγή όζοντος μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων, ενώ η αντίστροφη ώσμωση καταναλώνει ενέργεια για τη δημιουργία της απαιτούμενης πίεσης (Wöhler et al., 2022).
- **Χημικά αντιδραστήρια:** Περιλαμβάνουν υγρό οξυγόνο ή αέρα για την παραγωγή όζοντος, υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) για τις αντιδράσεις Fenton ή τη φωτο-Fenton, καταλύτες TiO_2 για τη φωτοκατάλυση, και ενεργό άνθρακα σε σκόνη (PAC) ή κοκκώδη μορφή (GAC) (Li et al., 2019).
- **Υλικά κατασκευής:** Σκυρόδεμα, χάλυβας, πολυμερή μεμβρανών, εξοπλισμός αντλιών και ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων.
- **Μεταφορές:** Μεταφορά χημικών, ενεργού άνθρακα, ανταλλακτικών μεμβρανών κ.ά.

Εκροές: Οι εκροές περιλαμβάνουν:

- **Εκροή επεξεργασμένου αποβλήτου:** Με μειωμένες συγκεντρώσεις φαρμακευτικών ενώσεων, αλλά πιθανώς με παρουσία μεταβολιτών ή παραπροϊόντων μετασχηματισμού (transformation products – TPs). Τα παραπροϊόντα αυτά, ιδίως στον οξονισμό, αποτελούν σημαντικό ζήτημα, καθώς ορισμένα μπορεί να είναι τοξικότερα από τις μητρικές ενώσεις (Rosal et al., 2010).
- **Ατμοσφαιρικές εκπομπές:** CO_2 από την κατανάλωση ενέργειας (έμμεσες εκπομπές), πιθανές εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων ή αερίων (π.χ. ελεύθερο όζον σε περίπτωση διαρροής).
- **Στερεά απόβλητα:** Κορεσμένος ενεργός άνθρακας, ιλύς, φθαρμένες μεμβράνες.
- **Υγρά παραπροϊόντα:** Συμπύκνωμα (concentrate) από μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης ή νανοδιήθησης, το οποίο περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις απορριπτόμενων ρύπων και χρήζει περαιτέρω διαχείρισης (Licona et al., 2018).

Η συλλογή δεδομένων απογραφής αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη διεξαγωγή μελετών LCA στον τομέα αυτό. Τα πρωτογενή δεδομένα (primary data) — δηλαδή μετρήσεις από πραγματικές εγκαταστάσεις — είναι πάντοτε προτιμότερα, αλλά δεν είναι πάντα διαθέσιμα, ιδίως για τεχνολογίες που βρίσκονται ακόμη σε πιλοτικό στάδιο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται δευτερογενή δεδομένα (secondary data) από βάσεις δεδομένων όπως η ecoinvent, η GaBi ή η ELCD (European Life Cycle Database), τα οποία ωστόσο ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζουν τις ειδικές συνθήκες λειτουργίας μιας μονάδας (Corominas et al., 2013).

Η ποιότητα των δεδομένων απογραφής επηρεάζει ευθέως την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτό, τα πρότυπα ISO 14044 προβλέπουν τη διεξαγωγή

ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity analysis) και ανάλυσης αβεβαιότητας (uncertainty analysis), ώστε να εκτιμηθεί πώς η μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων (π.χ. ενεργειακό μείγμα, δόση χημικών, ωφέλιμη ζωή υποδομών) επηρεάζει τα τελικά συμπεράσματα.

Γ. Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment – LCIA)

Το τρίτο στάδιο μετασχηματίζει τα δεδομένα απογραφής σε περιβαλλοντικούς δείκτες επιπτώσεων, χρησιμοποιώντας μοντέλα χαρακτηρισμού (characterisation models) που συσχετίζουν τις εκπομπές και τις καταναλώσεις πόρων με συγκεκριμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Πρόκειται για το στάδιο όπου τα πρωτόλεια δεδομένα μετατρέπονται σε πληροφορίες κατανοητές και συγκρίσιμες.

Η LCIA περιλαμβάνει υποχρεωτικά στοιχεία (mandatory elements) και προαιρετικά (optional elements), σύμφωνα με το ISO 14044:

Υποχρεωτικά στοιχεία:

Επιλογή κατηγοριών επιπτώσεων (Impact categories): Ο ερευνητής επιλέγει τις κατηγορίες που σχετίζονται με τον στόχο της μελέτης. Στις μελέτες LCA τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων, οι πλέον συνήθεις κατηγορίες περιλαμβάνουν:

- Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential – GWP), εκφρασμένο σε kg CO₂-eq
- Δυναμικό Οξίνισης (Acidification Potential – AP), σε kg SO₂-eq
- Δυναμικό πρόκλησης Ευτροφισμού (Eutrophication Potential – EP), σε kg PO₄³⁻-eq ή kg N-eq
- Δυνητική τοξικότητα για τον άνθρωπο (Human Toxicity Potential – HTP)
- Δυνητική Οικοτοξικότητα γλυκού νερού (Freshwater Ecotoxicity Potential – FETP)
- Δυνητική Εξάντληση αβιοτικών πόρων (Abiotic Depletion Potential – ADP)
- Δυνητικός Σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών (Photochemical Ozone Creation Potential – POCP)
- Δυνητική Καταστροφή στρώματος του όζοντος (Ozone Depletion Potential – ODP)

1. **Ταξινόμηση (Classification):** Κατανομή των στοιχείων απογραφής στις αντίστοιχες κατηγορίες επιπτώσεων. Για παράδειγμα, οι εκπομπές CO₂ ταξινομούνται στο GWP, οι εκπομπές SO₂ στο AP κ.ο.κ.

2. Χαρακτηρισμός (Characterisation): Εφαρμογή συντελεστών χαρακτηρισμού για τη μετατροπή κάθε εκπομπής σε ισοδύναμη μονάδα αναφοράς. Για παράδειγμα, το μεθάνιο (CH_4) έχει GWP 28 φορές μεγαλύτερο από το CO_2 σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών, οπότε 1 kg CH_4 μετατρέπεται σε 28 kg $\text{CO}_2\text{-eq}$.

Προαιρετικά στοιχεία:

- **Κανονικοποίηση (Normalisation):** Σχετικοποίηση των αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού ως προς μια τιμή αναφοράς (π.χ. μέσες ετήσιες εκπομπές ανά κάτοικο σε μια δεδομένη περιοχή), ώστε να αναδειχθεί η σχετική σημαντικότητα κάθε κατηγορίας.
- **Στάθμιση (Weighting):** Ανάθεση βαρών στις κατηγορίες επιπτώσεων ανάλογα με τη σχετική σημασία τους. Η στάθμιση είναι εξ ορισμού υποκειμενική και δεν επιτρέπεται σε μελέτες που αποσκοπούν σε δημόσιες συγκριτικές δηλώσεις (comparative assertions), σύμφωνα με το ISO 14044.

Μέθοδοι LCIA: Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι αξιολόγησης επιπτώσεων, οι οποίες διαφέρουν ως προς τα μοντέλα χαρακτηρισμού, τις κατηγορίες που καλύπτουν και το επίπεδο ανάλυσης. Οι πιο διαδεδομένες στη βιβλιογραφία της επεξεργασίας αποβλήτων είναι:

- **CML (CML-IA baseline):** Αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Leiden. Εστιάζει σε δείκτες μεσαίου σημείου (midpoint indicators) και χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες LCA στον τομέα της επεξεργασίας αποβλήτων λόγω της ωριμότητας και αξιοπιστίας των μοντέλων χαρακτηρισμού της ([Renou et al., 2008](#)).
- **ReCiPe:** Αποτελεί μια ενοποιημένη μέθοδο που παρέχει τόσο δείκτες μεσαίου σημείου (midpoint) — 18 κατηγορίες — όσο και δείκτες τελικού σημείου (endpoint) — 3 κατηγορίες ζημίας (ανθρώπινη υγεία, ποιότητα οικοσυστήματος, διαθεσιμότητα πόρων). Η ReCiPe 2016 αποτελεί τη πλέον ενημερωμένη έκδοση και χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο σε πρόσφατες μελέτες ([Rybczewska-Błazejowska, 2024](#)).
- **ILCD (International Reference Life Cycle Data System):** Αναπτύχθηκε από το JRC (Joint Research Centre) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και αποσκοπεί στην εναρμόνιση των μεθόδων LCIA σε ευρωπαϊκό επίπεδο.
- **TRACI:** Αναπτύχθηκε από την US EPA και χρησιμοποιείται κυρίως σε βορειοαμερικανικές μελέτες.

Ένα ζήτημα που παραμένει ανοιχτό στη βιβλιογραφία αφορά την αδυναμία των τρεχουσών μεθόδων LCIA να αποτυπώσουν επαρκώς τις επιπτώσεις των φαρμακευτικών ενώσεων στο περιβάλλον. Οι συντελεστές χαρακτηρισμού για πολλές φαρμακευτικές ουσίες (π.χ. δικλοφενάκη, καρβαμαζεπίνη, αντιβιοτικά) είτε

απουσιάζουν από τις βάσεις δεδομένων LCIA είτε ενέχουν μεγάλη αβεβαιότητα (Igos, 2018· Li et al., 2019). Η αδυναμία αυτή σημαίνει ότι τα οφέλη της απομάκρυνσης μικρορύπων — δηλαδή η μείωση της τοξικότητας στον αποδέκτη — ενδέχεται να υποεκτιμώνται στις μελέτες LCA, οδηγώντας σε μεροληπτικά συμπεράσματα υπέρ του «μη κάνεις τίποτα» (do-nothing scenario). Πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες (π.χ. USEtox model) (Rosenbaum, R. K., Bachmann, T. M., Gold, L. S., Huijbregts, M. A. J., Joliet, O., Juraske, R., ... Hauschild, M. Z. 2008). αποσκοπούν στη βελτίωση αυτής της αδυναμίας, αλλά η πλήρης ενσωμάτωση φαρμακευτικών ρύπων στα μοντέλα LCIA εξακολουθεί να αποτελεί ερευνητική πρόκληση.

Δ. Ερμηνεία Αποτελεσμάτων (Interpretation)

Το τελευταίο στάδιο της LCA αφορά τη συνθετική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τον εντοπισμό των σημαντικότερων παραγόντων που επηρεάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (hotspot analysis) και τη διατύπωση συμπερασμάτων και προτάσεων. Σύμφωνα με το ISO 14044, η ερμηνεία περιλαμβάνει τρία βασικά στοιχεία:

- 1. Ταυτοποίηση σημαντικών ζητημάτων (Identification of significant issues):** Ποιες εισροές, εκροές ή διεργασίες συμβάλλουν περισσότερο στις συνολικές επιπτώσεις; Στις μελέτες LCA τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αναδεικνύεται σχεδόν πάντοτε ως ο κυρίαρχος παράγοντας, ιδίως για τεχνολογίες υψηλής ενεργειακής έντασης όπως ο οζονισμός, η UV-φωτοκατάλυση και η αντίστροφη ώσμωση (Wöhler et al., 2022· Remy & Jekel, 2012).
- 2. Αξιολόγηση πληρότητας, ευαισθησίας και συνέπειας (Evaluation):** Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) εξετάζει πώς μεταβάλλονται τα αποτελέσματα όταν αλλάζουν κρίσιμες παράμετροι. Κλασικά παραδείγματα σε μελέτες LCA αποβλήτων περιλαμβάνουν τη μεταβολή του ενεργειακού μείγματος (π.χ. από ορυκτά καύσιμα σε ΑΠΕ), τη δόση οζονισμού (π.χ. 0,5 vs 1,0 g O₃/g DOC), ή τη διάρκεια ζωής του ενεργού άνθρακα πριν την αντικατάσταση ή αναγέννηση. Η ανάλυση αβεβαιότητας (uncertainty analysis), συχνά μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo, ποσοτικοποιεί τη στατιστική αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων, παρέχοντας εύρη εμπιστοσύνης αντί σημειακών εκτιμήσεων (Igos, 2018).
- 3. Συμπεράσματα, περιορισμοί και προτάσεις:** Τα συμπεράσματα πρέπει να είναι συμβατά με τον αρχικό στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Κάθε περιορισμός — π.χ. έλλειψη δεδομένων, αποκλεισμός ορισμένων σταδίων κύκλου ζωής, αβεβαιότητα συντελεστών τοξικότητας — πρέπει να αναφέρεται ρητά, ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να αξιολογήσει την αξιοπιστία και τη γενικευσιμότητα των ευρημάτων.

Η ερμηνεία, ως τελικό στάδιο, λειτουργεί και ανατροφοδοτικά: αν, για παράδειγμα, η ανάλυση ευαισθησίας αποκαλύψει ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται υπερβολικά από

μια μεμονωμένη παράμετρο με υψηλή αβεβαιότητα, μπορεί να κριθεί αναγκαία η επιστροφή στο στάδιο απογραφής για τη συλλογή ακριβέστερων δεδομένων ή η αναθεώρηση των ορίων του συστήματος.

4.1.2 Κριτήρια αξιολόγησης (Απόδοση, Ενέργεια, Κόστος, Περιβαλλοντικοί δείκτες)

Η συστηματική σύγκριση των διαθέσιμων τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας απαιτεί τη θέσπιση ενός αυστηρού και πολυδιάστατου πλαισίου αξιολόγησης. Η μονοκριτηριακή προσέγγιση, η οποία παραδοσιακά εστίαζε αποκλειστικά στο ποσοστό απομάκρυνσης των ρύπων (technical performance), καθίσταται πλέον επιστημονικά και πρακτικά ανεπαρκής. Όπως αναδεικνύεται από τη σύγχρονη βιβλιογραφία (Igou, 2018; Tsangas, 2023), η επίτευξη εξαιρετικά υψηλών βαθμών καθαρισμού (π.χ. μέσω Αντίστροφης Όσμωσης) συχνά συνοδεύεται από δυσανάλογη αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, γεγονός που οδηγεί στο φαινόμενο της μεταφοράς περιβαλλοντικών βαρών (burden shifting) από το υδάτινο στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον, εντείνοντας το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (GWP).

Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνική απόδοση συνιστά το πρωταρχικό, αλλά όχι το μοναδικό κριτήριο. Εξετάζεται ως προς την ικανότητα της εκάστοτε μεθόδου να απομακρύνει ένα ευρύ φάσμα ενώσεων με διαφορετικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά (πολικότητα, υδατοδιαλυτότητα, ανθεκτικότητα). Παράλληλα, η λειτουργική αξιοπιστία αξιολογείται με βάση την ανθεκτικότητα του συστήματος στις διακυμάνσεις της παροχής και της ποιότητας του εισερχόμενου λύματος (π.χ. μεταβολές στη Διαλυμένη Οργανική Ύλη - DOC), καθώς και τις απαιτήσεις συντήρησης. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η ειδική ενεργειακή κατανάλωση, εκπεφρασμένη σε kWh/m³ επεξεργασμένου ύδατος ή σε kWh/g απομακρυνθέντος ρύπου, η οποία αποτελεί καθοριστική παράμετρο τόσο για το λειτουργικό κόστος (OPEX) όσο και για τις έμμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Andersson & Karlsson, 2022).

Επιπροσθέτως, η ανάλυση οφείλει να συνυπολογίσει την κατανάλωση χημικών αντιδραστηρίων και αναλωσίμων (π.χ. δόση όζοντος, απαιτήσεις υπεροξειδίου του υδρογόνου, συχνότητα αντικατάστασης φίλτρων ενεργού άνθρακα). Η χρήση αυτών των υλικών ενσωματώνει σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα που προέρχεται από το στάδιο της βιομηχανικής τους παραγωγής (upstream phase) (Wöhler et al., 2022). Έτερο κρίσιμο κριτήριο αποτελεί η παραγωγή δευτερογενών παραπροϊόντων, όπως τα βρωμικά ιόντα κατά τον οζονισμό ή το τοξικό συμπύκνωμα (brine) κατά τις διεργασίες μεμβρανών, η διαχειρισσιμότητα των οποίων επηρεάζει άμεσα την τελική επιλογή της μεθόδου. Τέλος, η συμβατότητα με υφιστάμενες εγκαταστάσεις (retrofitting capability) και οι απαιτήσεις σε χωροταξικό αποτύπωμα προσδιορίζουν το κεφαλαιουχικό κόστος (CAPEX) και τη σκοπιμότητα εφαρμογής σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Πίνακας 4. Αναλυτικό πλαίσιο κριτηρίων αξιολόγησης τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας

Κατηγορία Κριτηρίου	Ειδικοί Δείκτες (Indicators)	Σημασία στη Λήψη Απόφασης / Περιβαλλοντικός Αντίκτυπος
Τεχνική Απόδοση	- Βαθμός απομάκρυνσης δεικτών (π.χ. % δικλοφενάκης, καρβαμαζεπίνης) - Μείωση τοξικότητας μίγματος	Καθορίζει την ικανότητα συμμόρφωσης με τη νομοθεσία και την προστασία του υδάτινου αποδέκτη.
Ενεργειακές Απαιτήσεις	- kWh/m³ επεξεργασμένου αποβλήτου - kWh/g απομακρυνθέντος μικρορύπου	Άμεση συσχέτιση με OPEX και GWP. Η μεταβλητότητα εξαρτάται έντονα από το εθνικό ενεργειακό μίγμα.
Κατανάλωση Πόρων	- g O₃/g DOC - mg PAC/L, κύκλοι αναγέννησης GAC	Προσδιορίζει τις έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφοδιαστική αλυσίδα παραγωγής και μεταφοράς υλικών.
Διαχείριση Υπολειμμάτων	- Παραγωγή τοξικών υποπροϊόντων οξειδωσης (TPs) - Όγκος λάσπης / συμπυκνώματος	Αυξάνει την πολυπλοκότητα λειτουργίας. Ενδέχεται να απαιτήσει επιπλέον στάδια επεξεργασίας (π.χ. φίλτρο άμμου).
Οικονομική Βιωσιμότητα	- LCC (Life Cycle Costing) / m³ - CAPEX/OPEX ratio	Βασικός περιοριστικός παράγοντας για την ευρεία υιοθέτηση των τεχνολογιών από τους φορείς διαχείρισης.

Ειδικότερα, η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας βασίζεται σε ένα σύνολο τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων (όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3), τα οποία επιτρέπουν την ολοκληρωμένη εκτίμηση της βιωσιμότητάς τους.

Απόδοση απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων: Το βασικότερο τεχνικό κριτήριο είναι η ικανότητα απομάκρυνσης ενός ευρέος φάσματος φαρμακευτικών ουσιών. Οι τεχνολογίες αξιολογούνται όχι μόνο ως προς το μέσο ποσοστό απομάκρυνσης, αλλά και ως προς τη σταθερότητα της απόδοσής τους υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και για ενώσεις διαφορετικής χημικής φύσης.

Ενεργειακή κατανάλωση: Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των τεχνολογιών. Διεργασίες όπως η αντίστροφη όσμωση, ο οζονισμός και η ηλεκτροχημική οξείδωση χαρακτηρίζονται από υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το GWP, ιδιαίτερα σε χώρες με ενεργειακό μείγμα βασισμένο σε ορυκτά καύσιμα.

Κατανάλωση χημικών και παραγωγή παραπροϊόντων: Η χρήση αντιδραστηρίων, όπως υπεροξείδιο του υδρογόνου, όζον ή άλατα σιδήρου, επιβαρύνει το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διεργασίας. Παράλληλα, ο σχηματισμός παραπροϊόντων οξείδωσης ή τοξικών ενδιάμεσων ενώσεων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα αξιολόγησης, ιδιαίτερα στις AOPs.

Οικονομικό κόστος: Το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την πρακτική εφαρμογή των τεχνολογιών. Τεχνολογίες όπως ο PAC εμφανίζουν σχετικά χαμηλό επενδυτικό κόστος αλλά υψηλότερες απαιτήσεις σε αναλώσιμα, ενώ οι τεχνολογίες μεμβρανών απαιτούν σημαντικές επενδύσεις σε εξοπλισμό και συντήρηση.

Λειτουργική αξιοπιστία και δυνατότητα εφαρμογής: Η τεχνολογική ωριμότητα, η ευκολία ενσωμάτωσης σε υφιστάμενες ΕΕΛ και η ανθεκτικότητα σε διακυμάνσεις φορτίου αποτελούν επίσης βασικά κριτήρια επιλογής. Οι τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν ως αναβάθμιση υφιστάμενων εγκαταστάσεων εμφανίζουν αυξημένο ενδιαφέρον για τις ευρωπαϊκές χώρες που επιδιώκουν συμμόρφωση με τις νέες απαιτήσεις της νομοθεσίας.

Η εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στις τεχνολογίες τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας αναδεικνύει ότι η περιβαλλοντική βιωσιμότητα μιας τεχνολογίας δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων. Σε αρκετές περιπτώσεις, τεχνολογίες με εξαιρετικά υψηλή απόδοση εμφανίζουν αυξημένες επιπτώσεις ως προς την κατανάλωση ενέργειας, τη χρήση χημικών αντιδραστηρίων ή το ανθρακικό αποτύπωμα. Παράλληλα, οι διαφοροποιήσεις στη λειτουργική μονάδα, στα όρια συστήματος και στις παραδοχές των επιμέρους μελετών δυσχεραίνουν τη δυνατότητα άμεσης συγκριτικής αξιολόγησης μεταξύ τεχνολογιών. Για τον λόγο αυτό, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων LCA απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και δεν μπορεί να αποσυνδέεται από το εκάστοτε τεχνολογικό και λειτουργικό πλαίσιο εφαρμογής.

4.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ LCA

Η εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στις τεχνολογίες απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων έχει αναπτυχθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία, κυρίως λόγω της αυξανόμενης ανάγκης αξιολόγησης της βιωσιμότητας των τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας. Οι περισσότερες διαθέσιμες μελέτες επικεντρώνονται στη σύγκριση συμβατικών βιολογικών διεργασιών με προηγμένες τεχνολογίες, όπως ο οζονισμός, οι διεργασίες ενεργού άνθρακα και οι τεχνολογίες μεμβρανών.

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας είναι ότι η περιβαλλοντική αξιολόγηση μιας τεχνολογίας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την αποδοτικότητα απομάκρυνσης των μικρορύπων, αλλά από τη συνολική ισορροπία μεταξύ περιβαλλοντικού οφέλους και λειτουργικών απαιτήσεων (Gros et al., 2018; Wöhler et al., 2022; Andersson & Karlsson, 2022). Η απομάκρυνση φαρμακευτικών ενώσεων υψηλής τοξικότητας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της οικοτοξικότητας των εκροών, ωστόσο η επίτευξη αυτού του στόχου ενδέχεται να συνοδεύεται από αυξημένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ή κατανάλωση φυσικών πόρων (Boogaard et al., 2025; Amaya-Santos et al., 2025; Wöhler et al., 2022).

Οι συγκριτικές μελέτες μεταξύ οζονισμού και ενεργού άνθρακα καταλήγουν συχνά στο συμπέρασμα ότι και οι δύο τεχνολογίες μπορούν να επιτύχουν υψηλή απομάκρυνση φαρμακευτικών ενώσεων, παρουσιάζουν όμως διαφορετικό περιβαλλοντικό προφίλ. Ο οζονισμός χαρακτηρίζεται από υψηλή αποτελεσματικότητα και γρήγορη οξείδωση ανθεκτικών ενώσεων, αλλά εμφανίζει αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και πιθανότητα σχηματισμού τοξικών παραπροϊόντων. Αντίθετα, οι διεργασίες PAC και GAC εμφανίζουν χαμηλότερη ενεργειακή απαίτηση, αλλά συνδέονται με σημαντική κατανάλωση προσροφητικών υλικών και ανάγκη διαχείρισης κορεσμένου άνθρακα.

Σύμφωνα με αρκετές μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA), οι υβριδικές διατάξεις που συνδυάζουν οζονισμό με βιολογικά φίλτρα ή κοκκώδη ενεργό άνθρακα (GAC) παρουσιάζουν συχνά την καλύτερη συνολική περιβαλλοντική επίδοση, καθώς επιτυγχάνουν υψηλή απομάκρυνση των φαρμακευτικών ενώσεων με παράλληλη μείωση των προϊόντων μετασχηματισμού και της υπολειπόμενης οικοτοξικότητας της εκροής (Gros et al., 2018; Wöhler et al., 2022; Andersson & Karlsson, 2022; Boogaard et al., 2025). Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει την αποτελεσματική απομάκρυνση τόσο των αρχικών φαρμακευτικών ενώσεων όσο και των προϊόντων μετασχηματισμού που σχηματίζονται κατά τον οζονισμό, μειώνοντας παράλληλα την πιθανότητα δευτερογενούς τοξικότητας στην τελική εκροή (Wöhler et al., 2022; Boogaard et al., 2025).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε χώρες της Κεντρικής Ευρώπης, όπου έχουν ήδη εγκατασταθεί τεχνολογίες τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας σε πλήρη κλίμακα. Στην Ελβετία, για παράδειγμα, οι περισσότερες εφαρμογές βασίζονται είτε στον οζονισμό είτε στην προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα,

ενώ η αξιολόγηση των συστημάτων πραγματοποιείται όχι μόνο με τεχνικά αλλά και με περιβαλλοντικά κριτήρια. Αντίστοιχα, στη Γερμανία και στην Ολλανδία, αρκετές μελέτες εξετάζουν τον ρόλο του ενεργειακού μείγματος στην περιβαλλοντική απόδοση των τεχνολογιών, καταδεικνύοντας ότι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να μειώσει σημαντικά το ανθρακικό αποτύπωμα των AOPs.

Παρά τη σημαντική πρόοδο, η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι εξακολουθούν να υπάρχουν αβεβαιότητες σχετικά με τη μακροχρόνια τοξικότητα των προϊόντων μετασχηματισμού και τη συνολική επίδραση των τεχνολογιών στα οικοσυστήματα. Επιπλέον, η έλλειψη εναρμονισμένων μεθοδολογιών LCA καθιστά συχνά δύσκολη την άμεση σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών μελετών. Διαφορές στις λειτουργικές μονάδες, στα όρια του συστήματος και στις κατηγορίες επιπτώσεων μπορούν να οδηγήσουν σε αποκλίσεις ως προς τα τελικά συμπεράσματα.

Παρόλα αυτά, η γενική τάση της διεθνούς βιβλιογραφίας συγκλίνει στο ότι η ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων στη διαδικασία επιλογής τεχνολογιών αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη βιώσιμη αναβάθμιση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Η προσέγγιση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, όπου η επεξεργασία των λυμάτων συνδέεται άμεσα με την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση νερού και τη μείωση των περιβαλλοντικών πιέσεων στους υδατικούς πόρους.

4.2.1 Συμβατικές τεχνολογίες έναντι AOPs και υβριδικών συστημάτων

Η βιβλιογραφική επισκόπηση των μελετών LCA επιβεβαιώνει ότι οι συμβατικές βιολογικές επεξεργασίες (CAS) χαρακτηρίζονται από το χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα ανά κυβικό μέτρο, αδυνατούν ωστόσο να εξασφαλίσουν την απομάκρυνση ανθεκτικών φαρμακευτικών ουσιών. Ως εκ τούτου, η σύγκριση επικεντρώνεται κυρίως στη διαφοροποίηση των περιβαλλοντικών βαρών μεταξύ προηγμένων μεθόδων. Οι τεχνολογίες προσρόφησης (PAC/GAC) και ο οζονισμός συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς αποτελούν τις πιο ώριμες λύσεις για εφαρμογή πλήρους κλίμακας (full-scale) (Remy & Jekel, 2012; Boogaard et al., 2025).

Σε αντιπαράβολή, ο οζονισμός παρουσιάζει το πλεονέκτημα της επιτόπιας παραγωγής του οξειδωτικού μέσου, εξαλείφοντας τις ανάγκες μεταφοράς χημικών. Ωστόσο, η ενεργειακή απαίτηση για την παραγωγή όζοντος από υγρό οξυγόνο είναι υψηλή. Σύμφωνα με τους Li et al. (2019), ο οζονισμός ελαχιστοποιεί την τοξικότητα της εκροής, αλλά αυξάνει τον δείκτη GWP συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα κατά 15% έως 30%, αναλόγως της ποιότητας του λύματος. Στον αντίποδα, η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα δεν κινδυνεύει από την παραγωγή τοξικών παραπροϊόντων, αλλά η περιβαλλοντική της απόδοση πλήττεται σημαντικά από τη φάση παραγωγής του άνθρακα (συχνά από λιθάνθρακα) και τις ενεργοβόρες διαδικασίες θερμικής αναγέννησης ή τελικής αποτέφρωσης του κορεσμένου υλικού (Andersson & Karlsson, 2022).

Όσον αφορά τις τεχνολογίες μεμβρανών (Αντίστροφη Όσμωση - RO, Νανοδιήθηση - NF) και τις Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες που εμπεριέχουν υπεριώδη ακτινοβολία (UV/H₂O₂ ή Φωτοκατάλυση), οι μελέτες LCA καταδεικνύουν ένα έντονο trade-off. Η RO προσφέρει άριστη ποιότητα εκροής, όμως η πίεση λειτουργίας και η διαχείριση του υπεραλατούχου συμπυκνώματος πολλαπλασιάζουν τους δείκτες κατανάλωσης πόρων και οικοτοξικότητας (αν το συμπύκνωμα δεν διαχειριστεί ορθά) (Gros et al., 2018). Τα υβριδικά σχήματα (π.χ. Οζονισμός ακολουθούμενη από φίλτρα GAC) αναδεικνύονται συχνά ως η χρυσή τομή στις αναλύσεις LCA, καθότι το όζον διασπά τα μακρομόρια σε βιοδιασπώμενα υπολείμματα, τα οποία στη συνέχεια αφαιρούνται από τον βιολογικά ενεργό άνθρακα (BAC), μεγιστοποιώντας τον χρόνο ζωής του GAC και μειώνοντας την τοξικότητα (Wöhler et al., 2022).

Η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών επεξεργασίας φαρμακευτικών ενώσεων αποτελεί ένα από τα βασικότερα ζητήματα στη σύγχρονη διαχείριση υγρών αποβλήτων. Οι συμβατικές βιολογικές διεργασίες, όπως η ενεργός ιλύς (CAS) και οι βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR), εξακολουθούν να αποτελούν τον κορμό των περισσότερων Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ). Ωστόσο, η αδυναμία πλήρους απομάκρυνσης ανθεκτικών οργανικών μικρορύπων έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη εφαρμογή τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας, όπως οι Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες (AOPs), οι διεργασίες ενεργού άνθρακα και τα υβριδικά συστήματα.

Οι συμβατικές τεχνολογίες παρουσιάζουν σαφή πλεονεκτήματα ως προς τη λειτουργική σταθερότητα, το σχετικά χαμηλό κόστος λειτουργίας και την ευρεία τεχνολογική ωριμότητα. Παρόλα αυτά, η αποδοτικότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη βιοδιασπασιμότητα των ενώσεων. Φαρμακευτικές ουσίες όπως η **παρακεταμόλη** και η **ιβουπροφαίνη** εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης, που συνήθως κυμαίνονται μεταξύ **90–99%** και **95–99%**, αντίστοιχα, λόγω της υψηλής βιοαποδομησιμότητάς τους. Αντίθετα, ενώσεις όπως η **καρβαμαζεπίνη**, η οποία παρουσιάζει αποδόσεις συνήθως μικρότερες του **30%**, η **δικλοφενάκη** (20–70%) και αρκετά αντιβιοτικά παραμένουν σε σημαντικές συγκεντρώσεις στην τελική εκροή, γεγονός που καταδεικνύει τους περιορισμούς των συμβατικών βιολογικών διεργασιών στην απομάκρυνση ανθεκτικών φαρμακευτικών μικρορύπων (Gros et al., 2018; Li et al., 2019; OECD, 2019; Tsangas, 2023).

Αντίθετα, οι AOPs χαρακτηρίζονται από υψηλή αποτελεσματικότητα ακόμη και για ιδιαίτερα ανθεκτικούς ρύπους, καθώς βασίζονται στη δημιουργία ισχυρών οξειδωτικών ριζών. Ο οζονισμός, η UV/H₂O₂ οξείδωση και η φωτοκατάλυση μπορούν να επιτύχουν ποσοστά απομάκρυνσης άνω του 90% για πολλές φαρμακευτικές ενώσεις. Ωστόσο, η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και ο κίνδυνος σχηματισμού παραπροϊόντων οξείδωσης αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς.

Οι τεχνολογίες ενεργού άνθρακα (PAC/GAC) εμφανίζουν διαφορετικό περιβαλλοντικό προφίλ. Η λειτουργία τους βασίζεται στην προσρόφηση των οργανικών μικρορύπων και όχι στην αποδόμησή τους. Το γεγονός αυτό μειώνει τον κίνδυνο σχηματισμού τοξικών ενδιάμεσων προϊόντων, αυξάνει όμως τις απαιτήσεις διαχείρισης του κορεσμένου άνθρακα.

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα υβριδικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν διαφορετικούς μηχανισμούς απομάκρυνσης. Συνήθεις διατάξεις περιλαμβάνουν:

- οζονισμό και φίλτρα ενεργού άνθρακα με βιοφίλμ (BAC),
- MBR σε συνδυασμό με AOPs,
- PAC σε δεξαμενές ενεργού ιλύος,
- φωτοκατάλυση και τεχνολογίες μεμβρανών.

Οι υβριδικές αυτές λύσεις στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της συνολικής περιβαλλοντικής επίδοσης, συνδυάζοντας υψηλή απομάκρυνση μικρορύπων με περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας και των δευτερογενών επιπτώσεων.

Πίνακας 5. Συγκριτική αξιολόγηση βασικών τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας

Τεχνολογία	Απόδοση απομάκρυνσης	Ενεργειακή κατανάλωση	Παραπροϊόντα	Τεχνολογική ωριμότητα
CAS	Χαμηλή-Μέτρια	Χαμηλή	Περιορισμένα	Πολύ υψηλή
MBR	Μέτρια-Υψηλή	Μέτρια-Υψηλή	Περιορισμένα	Υψηλή
Οζονισμός	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Πιθανός σχηματισμός ΤΡs	Υψηλή
PAC	Υψηλή	Μέτρια	Διαχείριση κορεσμένου άνθρακα	Υψηλή
GAC	Υψηλή	Μέτρια	Ανάγκη αναγέννησης	Υψηλή
UV/H ₂ O ₂	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Ενδιάμεσα προϊόντα	Μέτρια
Υβριδικά συστήματα	Πολύ υψηλή	Μέτρια-Υψηλή	Ελεγχόμενα	Αυξανόμενη

Πηγή: Προσαρμογή από Gros et al. (2018), Andersson & Karlsson (2022), Boogaard et al. (2025).

4.2.2 Κύρια ευρήματα και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (GWP, τοξικότητα, ευτροφισμός)

Η αποτίμηση των επιμέρους περιβαλλοντικών δεικτών αποκαλύπτει την πολυπλοκότητα των διεργασιών. Ο δείκτης Δυναμικού Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (GWP) επηρεάζεται γραμμικά από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, σε κράτη με ενεργειακό μίγμα εξαρτώμενο από τον άνθρακα, η εφαρμογή ενεργοβόρων μεθόδων όπως η UV-φωτοκατάλυση ή η RO δημιουργεί δυσανάλογη κλιματική επιβάρυνση, καθιστώντας τις περιβαλλοντικά ασύμφορες σε σύγκριση με την αποφυγή της ρύπανσης (Gros et al., 2018). Αντιθέτως, σε περιπτώσεις τροφοδοσίας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), το GWP μειώνεται δραματικά, καθιστώντας την ηλεκτρική ενέργεια δευτερεύοντα παράγοντα έναντι της παραγωγής αναλωσίμων.

Αναφορικά με την κατανάλωση αβιοτικών πόρων (Abiotic Depletion Potential) και την οξίνιση (Acidification), η μέθοδος του προστιθέμενου ενεργού άνθρακα (PAC) εμφανίζει συχνά τις υψηλότερες τιμές. Η διεργασία εξόρυξης άνθρακα, η θερμική του ενεργοποίηση και η μεταφορά του συμβάλλουν καθοριστικά σε αυτούς τους δείκτες. Η τοξικότητα (Ανθρώπινη και Οικοτοξικότητα) αποτελεί διττό μέγεθος στις μελέτες LCA: αφενός, η απομάκρυνση των φαρμακευτικών μειώνει το τοξικό φορτίο της εκροής, αφετέρου, η κατασκευή των υποδομών, τα βαρέα μέταλλα των λαμπτήρων UV και οι εκπομπές κατά την παραγωγή χημικών (όπως ο θειικός σίδηρος στη μέθοδο Fenton) αυξάνουν την έμμεση τοξικότητα στον ευρύτερο κύκλο ζωής (Tsangas, 2023).

Το φαινόμενο της μεταφοράς βαρών (burden shifting) εντοπίζεται εντονότερα όταν εξετάζεται ο ευτροφισμός (Eutrophication Potential - EP). Η τεταρτοβάθμια επεξεργασία σπανίως απομακρύνει επιπλέον άζωτο ή φώσφορο· εντούτοις, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτεί τους αντιδραστήρες οζονισμού μπορεί να συνεισφέρουν έμμεσα στον ευτροφισμό μέσω του εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας σε οξείδια του αζώτου και δευτερογενώς σε νιτρικά ιόντα και κατ' επέκταση στην οξίνιση των εδαφών.

Οι δημοσιευμένες μελέτες LCA καταδεικνύουν ότι οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας σχετίζονται κυρίως με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και την παραγωγή χημικών αντιδραστηρίων. Το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential – GWP) αποτελεί τη συχνότερα χρησιμοποιούμενη κατηγορία επιπτώσεων στις σχετικές μελέτες.

Οι διεργασίες οζονισμού παρουσιάζουν υψηλές εκπομπές CO₂-equivalent λόγω της απαιτούμενης παραγωγής όζοντος μέσω ενεργοβόρων διεργασιών ηλεκτρικής εκκένωσης. Αντίστοιχα, οι τεχνολογίες μεμβρανών εμφανίζουν σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις λόγω των υψηλών πιέσεων λειτουργίας και του ελέγχου της ρύπανσης των μεμβρανών.

Από την άλλη πλευρά, οι διεργασίες ενεργού άνθρακα εμφανίζουν συνήθως χαμηλότερο GWP κατά τη λειτουργία, ωστόσο η περιβαλλοντική επιβάρυνση μεταφέρεται εν μέρει στην παραγωγή και αναγέννηση του άνθρακα. Η θερμική αναγέννηση GAC είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα, γεγονός που πρέπει να συνεκτιμάται στις συνολικές περιβαλλοντικές επιδόσεις.

Στην κατηγορία της οικοτοξικότητας, οι προηγμένες τεχνολογίες εμφανίζουν σαφές πλεονέκτημα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους, καθώς επιτυγχάνουν σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων φαρμακευτικών ενώσεων στην εκροή. Η περιβαλλοντική αυτή βελτίωση θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για ουσίες υψηλής οικοτοξικότητας, όπως οι συνθετικές ορμόνες και τα αντιβιοτικά.

Ωστόσο, αρκετές μελέτες επισημαίνουν ότι η πλήρης απομάκρυνση της μητρικής ένωσης δεν συνεπάγεται απαραίτητα εξάλειψη της τοξικότητας. Κατά τις διεργασίες οξείδωσης είναι δυνατόν να σχηματιστούν προϊόντα μετασχηματισμού με άγνωστη ή ακόμη και αυξημένη τοξικότητα. Για τον λόγο αυτό, σύγχρονες προσεγγίσεις LCA ενσωματώνουν πλέον και βιοδοκιμές οικοτοξικότητας για την αξιολόγηση της πραγματικής περιβαλλοντικής επίδρασης των εκροών.

Σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται επίσης ως προς τον δείκτη ευτροφισμού. Η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και η χρήση χημικών ουσιών σε ορισμένες τεχνολογίες οδηγούν σε έμμεσες εκπομπές θρεπτικών στοιχείων και αέριων ρύπων που συμβάλλουν στην οξίνιση και τον ευτροφισμό.

Ποσοτική ανάλυση δεδομένων LCA ανά τεχνολογία

Η ποσοτική σύνθεση των δημοσιευμένων μελετών LCA επιτρέπει τη δημιουργία μιας συνολικής εικόνας για τις περιβαλλοντικές επιδόσεις των διαθέσιμων τεχνολογιών. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αριθμητικά δεδομένα που προέρχονται από τη συγκριτική ανάλυση πολλαπλών ερευνητικών εργασιών, με στόχο τον εντοπισμό τάσεων και κοινών ευρημάτων. Τα δεδομένα αφορούν κυρίως τρεις βασικές κατηγορίες επιπτώσεων: το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (GWP), την οικοτοξικότητα γλυκού ύδατος και την κατανάλωση ενέργειας.

Αναφορικά με το GWP, τα βιβλιογραφικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι η προσθήκη μιας βαθμίδας τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας αυξάνει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά 15 έως 60 τοις εκατό σε σχέση με τη βάση αναφοράς (συμβατική δευτεροβάθμια επεξεργασία). Η ακριβής τιμή εξαρτάται τόσο από τον τύπο τεχνολογίας όσο και από τη σύνθεση του εθνικού ενεργειακού μείγματος. Στις μελέτες που αναλύθηκαν, ο οξονισμός εμφανίζει τιμές GWP μεταξύ 0,04 και 0,12 kg CO₂-eq ανά κυβικό μέτρο επεξεργασμένου λύματος (πρόσθετη επιβάρυνση πέραν της δευτεροβάθμιας), ενώ η αντίστροφη ώσμωση (RO) κυμαίνεται μεταξύ 0,15 και 0,40 kg CO₂-eq/m³, κυρίως λόγω των υψηλών πιέσεων λειτουργίας ([Remy και Jekel, 2012](#); [Li et al., 2019](#)).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση μεταξύ οξονισμού και προσρόφησης σε ενεργό άνθρακα σε κοκκώδη μορφή (GAC). Σύμφωνα με τους Andersson και Karlsson (2022), σε χώρες με υψηλό μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (άνω του 50%), ο οξονισμός εμφανίζει χαμηλότερο GWP από τον GAC, καθώς η περιβαλλοντική επιβάρυνση του τελευταίου μεταφέρεται στην αλυσίδα παραγωγής και θερμικής αναγέννησης του άνθρακα. Ωστόσο, σε ενεργειακά μείγματα με κυριαρχία ορυκτών

καυσίμων, η υψηλή ενεργειακή απαίτηση του οζονισμού (τυπικά 5 έως 15 Wh/g O₃) αντισταθμίζει το πλεονέκτημα αυτό.

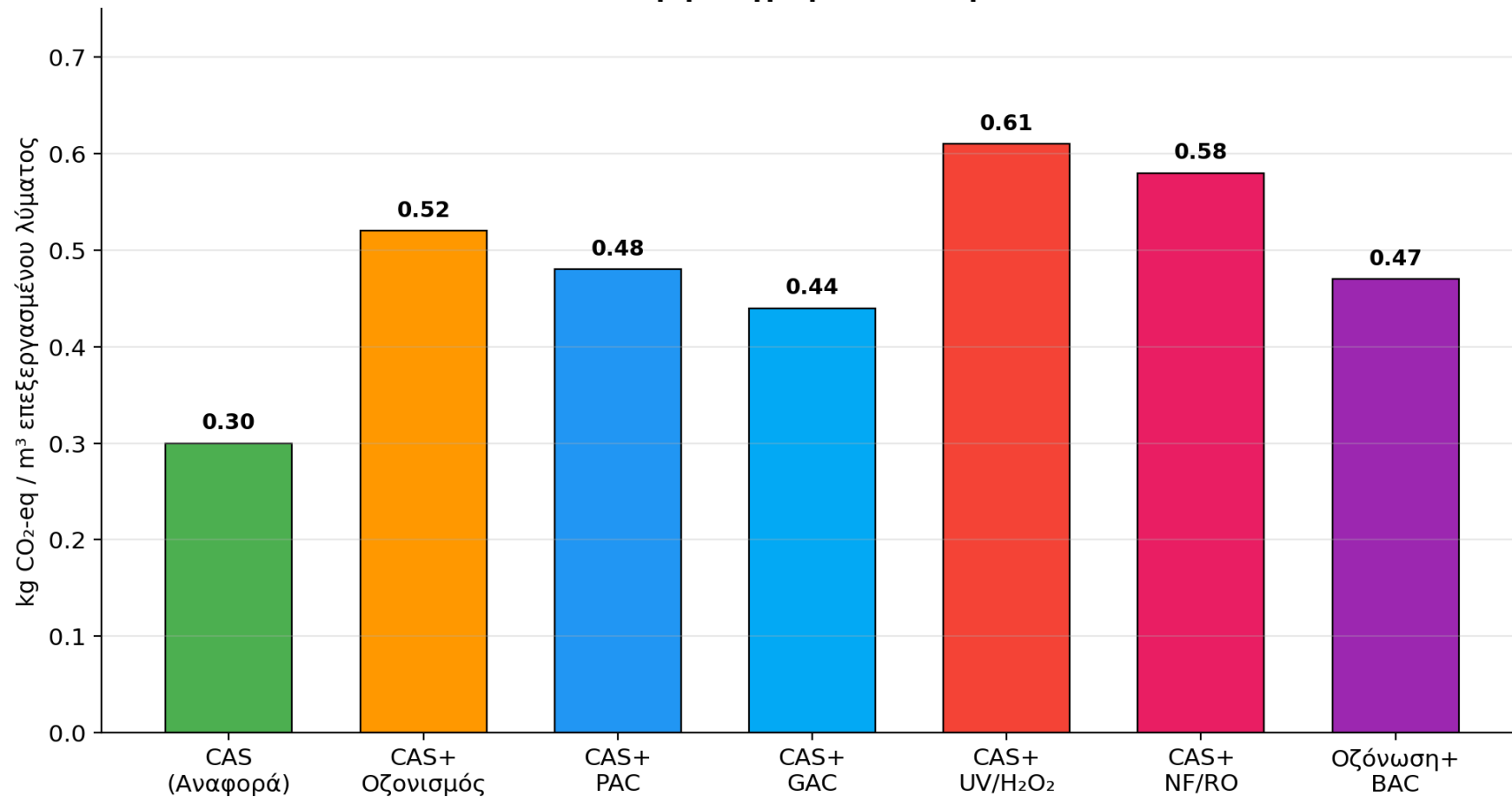
Ο Πίνακας 5 που ακολουθεί συνοψίζει τα κύρια ποσοτικά δεδομένα που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρέχοντας μια άμεση σύγκριση των τεχνολογιών ως προς τους βασικούς περιβαλλοντικούς δείκτες.

Πίνακας 6. Ποσοτικά δεδομένα LCA ανά τεχνολογία τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας (σύνθεση βιβλιογραφικών δεδομένων)

Τεχνολογία	GWP (kg CO ₂ -eq/m ³)	Ενέργεια (kWh/m ³)	Απομάκρυνση (%)	Κύρια πηγή επιβάρυνσης
CAS (Αναφορά)	0,25–0,35	0,3–0,6	20–50	Αερισμός
CAS + Οζονισμός	0,40–0,55	0,03–0,10*	80–95	Παραγωγή O ₃
CAS + PAC	0,38–0,52	0,01–0,03*	70–90	Παραγωγή PAC
CAS + GAC	0,35–0,48	0,01–0,04*	75–95	Αναγέννηση GAC
CAS + UV/H ₂ O ₂	0,50–0,65	0,05–0,15*	80–99	Λαμπτήρες UV + H ₂ O ₂
CAS + NF/RO	0,45–0,70	0,10–1,20*	90–99	Πίεση + Συμπύκνωμα
O ₃ + BAC	0,38–0,50	0,04–0,12*	85–98	Παραγωγή O ₃ + GAC

* Πρόσθετη ενεργειακή κατανάλωση μόνο της τεταρτοβάθμιας βαθμίδας. Πηγές: Remy & Jekel (2012), Li et al. (2019), Andersson & Karlsson (2022), Wöhler et al. (2022), Boogaard et al. (2025).

**Σχήμα: Δυναμικό Υπερθέρμανσης Πλανήτη (GWP) ανά τεχνολογία
(Βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων)**



Γράφημα 1. Δυναμικό Υπερθέρμανσης Πλανήτη (GWP) ανά τεχνολογία

Το Σχήμα 1 παρουσιάζει τη συγκριτική αποδοτικότητα των κυριότερων τεχνολογιών επεξεργασίας αστικών λυμάτων ως προς την απομάκρυνση φαρμακευτικών ενώσεων. Οι τιμές που απεικονίζονται αντιστοιχούν σε **ενδεικτικές μέσες αποδόσεις απομάκρυνσης (%)**, όπως προκύπτουν από τη σύνθεση αποτελεσμάτων της διεθνούς βιβλιογραφίας και όχι από μία συγκεκριμένη πειραματική μελέτη. Οι αποδόσεις εκφράζουν το ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης των φαρμακευτικών ενώσεων μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της εκάστοτε μονάδας επεξεργασίας.

Οι αναφερόμενες τιμές αποτελούν **μέσους ή αντιπροσωπευτικούς δείκτες** που προκύπτουν από διαφορετικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας, διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και διαφορετικά είδη φαρμακευτικών ουσιών. Για τον λόγο αυτό, οι πραγματικές αποδόσεις μπορεί να παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις, ανάλογα με παράγοντες όπως η χημική δομή και η βιοαποδομησιμότητα της κάθε ένωσης, ο χρόνος παραμονής των λυμάτων και της ιλύος (HRT και SRT), η συγκέντρωση διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC), η θερμοκρασία λειτουργίας, το pH και τα ειδικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης επεξεργασίας.

Ειδικότερα, οι συμβατικές βιολογικές διεργασίες εμφανίζουν υψηλή αποτελεσματικότητα για εύκολα βιοαποδομήσιμες ενώσεις, όπως η παρακεταμόλη και η ιβουπροφαίνη, με ποσοστά απομάκρυνσης που συχνά υπερβαίνουν το 90%. Αντίθετα, περισσότερο ανθεκτικές ενώσεις, όπως η καρβαμαζεπίνη και η δικλοφενάκη, παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερες αποδόσεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών, όπως ο οζονισμός, ο ενεργός άνθρακας ή οι τεχνολογίες μεμβρανών. Επομένως, οι τιμές του σχήματος πρέπει να θεωρούνται **συγκριτικές ενδεικτικές μέσες τιμές** και όχι σταθερές αποδόσεις που ισχύουν για όλες τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας.

Ερμηνεία των ποσοτικών δεδομένων

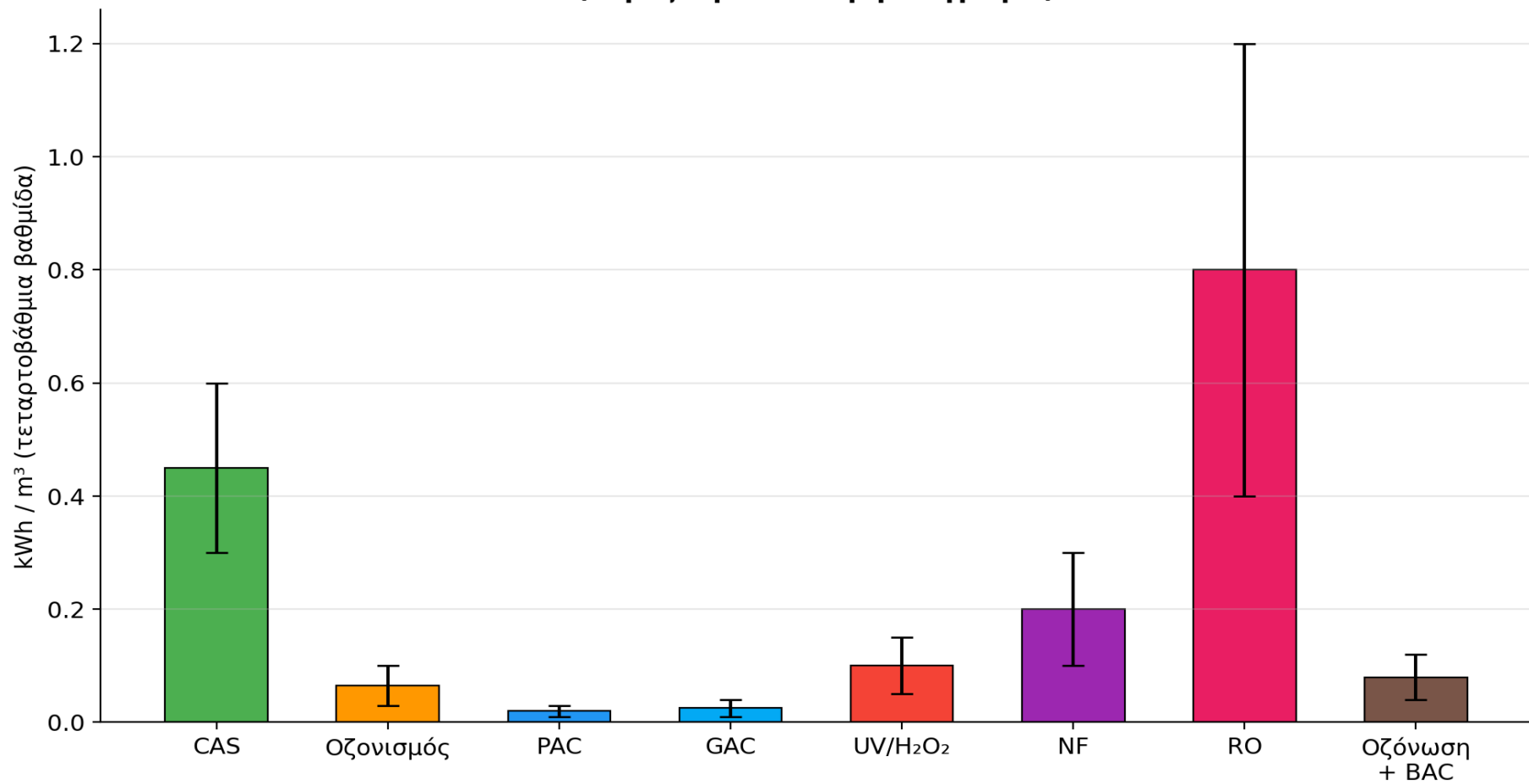
Τα αριθμητικά δεδομένα επιβεβαιώνουν ότι δεν υπάρχει μία τεχνολογία που να υπερτερεί σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων ταυτόχρονα. Ο οζονισμός επιτυγχάνει υψηλή απομάκρυνση μικρορύπων (μεταξύ 80 και 95 τοις εκατό) με σχετικά ελεγχόμενη ενεργειακή κατανάλωση, αλλά ο κίνδυνος σχηματισμού παραπροϊόντων μετασχηματισμού (transformation products, TPs) αυξάνει την αβεβαιότητα ως προς την πραγματική μείωση της τοξικότητας. Αντίθετα, η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα (PAC ή GAC) αφαιρεί τους ρύπους χωρίς να τους μετασχηματίζει, εξαλείφοντας τον κίνδυνο δημιουργίας ενδιάμεσων τοξικών ενώσεων. Ωστόσο, η περιβαλλοντική επιβάρυνση μεταφέρεται στη φάση παραγωγής του άνθρακα και στη διαχείριση του κορεσμένου υλικού.

Η μελέτη των Wöhler et al. (2022) κατέδειξε ότι ο συνδυασμός οζονισμού και βιολογικά ενεργού άνθρακα (O₃/BAC) μειώνει τη συγκέντρωση των TPs κατά 60 έως 80 τοις εκατό σε σχέση με τον μεμονωμένο οζονισμό, ενώ παράλληλα παρατείνει τη διάρκεια ζωής του GAC κατά δύο έως τρεις φορές. Η διπλή αυτή ωφέλεια καθιστά τα

υβριδικά σχήματα ιδιαίτερα ανταγωνιστικά σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, τόσο από περιβαλλοντική όσο και από οικονομική σκοπιά.

Ιδιαίτερη μνεία αξίζει η σημασία της λειτουργικής μονάδας (functional unit) στις μελέτες LCA. Η πλειονότητα των δημοσιευμένων ερευνών χρησιμοποιεί ως λειτουργική μονάδα ένα κυβικό μέτρο επεξεργασμένου λύματος, ωστόσο ορισμένες μελέτες υιοθετούν εναλλακτικές μονάδες, όπως ένα κιλόγραμμα απομακρυνθέντος ρύπου ή ένα ισοδύναμο κατοίκου ανά έτος. Οι διαφορές αυτές στη μεθοδολογία δυσχεραίνουν την άμεση σύγκριση αποτελεσμάτων και αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα μεθοδολογικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν στη μελλοντική έρευνα ([Corominas et al., 2013](#)).

**Σχήμα: Ενεργειακή κατανάλωση τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας
(Εύρος τιμών από βιβλιογραφία)**



Γράφημα 2. Ενεργειακή κατανάλωση τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει τη συγκριτική αξιολόγηση των κυριότερων τεχνολογιών επεξεργασίας φαρμακευτικών ενώσεων ως προς τη συνολική περιβαλλοντική τους επίδοση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης των μικρορύπων όσο και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας, τη χρήση χημικών αντιδραστηρίων, την παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι τιμές που παρουσιάζονται αποτελούν **συγκριτικούς και ενδεικτικούς δείκτες**, οι οποίοι προκύπτουν από σύνθεση αποτελεσμάτων μελετών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) και χρησιμοποιούνται για τη μεταξύ τους σύγκριση και όχι ως απόλυτες τιμές περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Παρατηρείται ότι οι προηγμένες τεχνολογίες, όπως ο οζονισμός, ο ενεργός άνθρακας και οι τεχνολογίες μεμβρανών, επιτυγχάνουν σημαντικά υψηλότερη απομάκρυνση των φαρμακευτικών ενώσεων σε σχέση με τις συμβατικές βιολογικές διεργασίες. Ωστόσο, η βελτίωση αυτή συνοδεύεται από αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις ή μεγαλύτερη κατανάλωση υλικών και χημικών αντιδραστηρίων. Ειδικότερα, η αντίστροφη όσμωση εμφανίζει τις υψηλότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις λόγω της αυξημένης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και της ανάγκης διαχείρισης του συμπυκνώματος, ενώ οι διεργασίες Fenton και Photo-Fenton συνδέονται με αυξημένη χρήση χημικών αντιδραστηρίων και παραγωγή σιδηρούχου ιλύος. Αντίθετα, οι τεχνολογίες προσρόφησης με κοκκώδη ενεργό άνθρακα (GAC) και οι υβριδικές διατάξεις οζονισμού–βιολογικής μεταεπεξεργασίας εμφανίζουν πιο ισορροπημένο περιβαλλοντικό προφίλ, καθώς συνδυάζουν υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης με σχετικά περιορισμένες πρόσθετες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

Το σχήμα αναδεικνύει επίσης ότι η αξιολόγηση μιας τεχνολογίας δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στην αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης των φαρμακευτικών ενώσεων, αλλά να λαμβάνει υπόψη το σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθ' όλο τον κύκλο ζωής της εγκατάστασης. Για τον λόγο αυτό, οι μελέτες LCA προτείνουν ολοένα και περισσότερο την εφαρμογή υβριδικών συστημάτων, τα οποία επιτυγχάνουν καλύτερη ισορροπία μεταξύ προστασίας του υδάτινου περιβάλλοντος, ενεργειακής αποδοτικότητας και βιωσιμότητας, αποτελώντας μία από τις πλέον υποσχόμενες λύσεις για την τεταρτοβάθμια επεξεργασία αστικών λυμάτων.

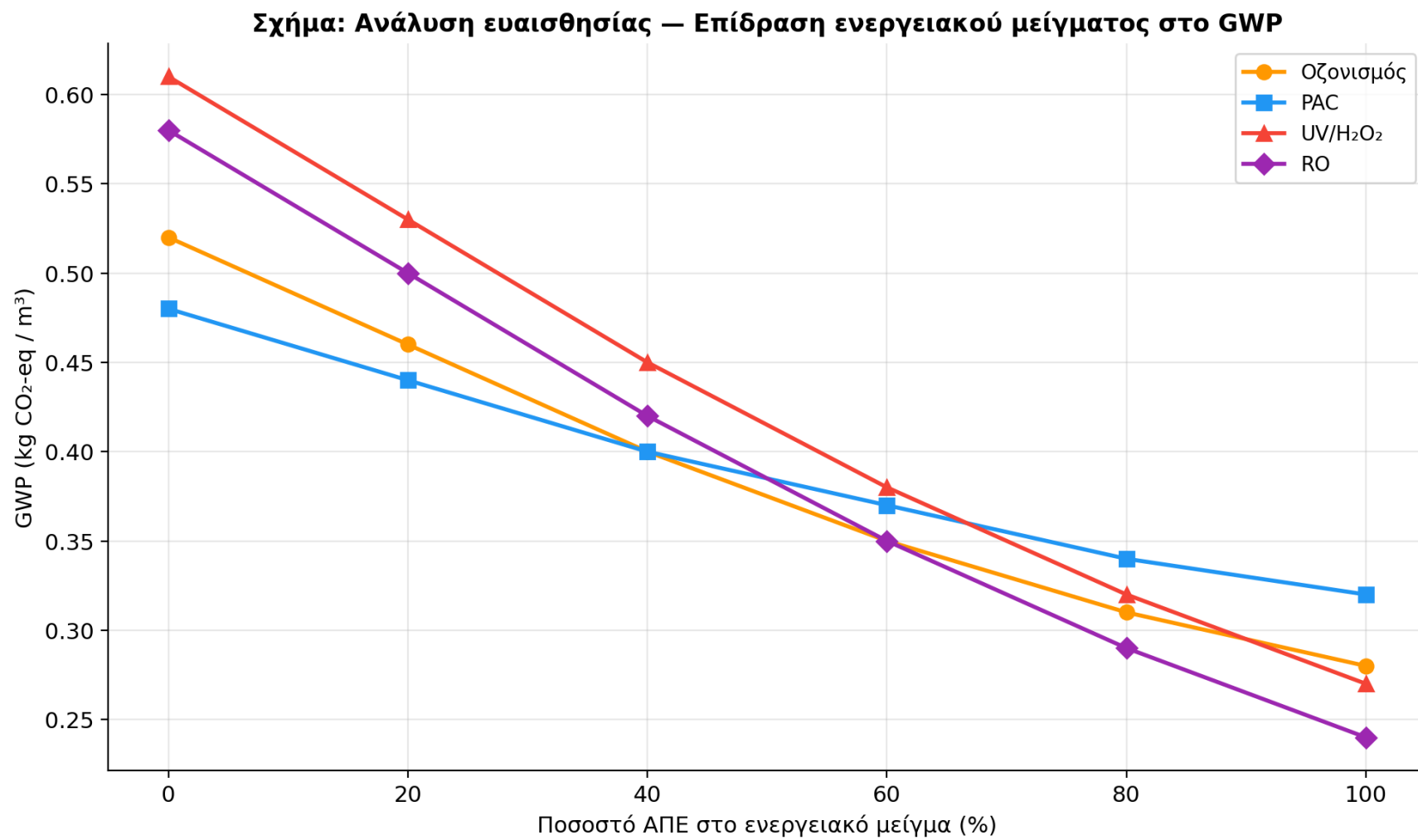
Ανάλυση ευαισθησίας: Ο ρόλος του ενεργειακού μείγματος και των λειτουργικών παραμέτρων

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα κάθε αξιόπιστης μελέτης LCA, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης μεμονωμένων παραμέτρων στα τελικά αποτελέσματα. Στο πλαίσιο των τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων, οι σημαντικότερες παράμετροι ευαισθησίας περιλαμβάνουν τη σύνθεση του ενεργειακού μείγματος, τη δόση χημικών αντιδραστηρίων, τη συχνότητα

αντικατάστασης ή αναγέννησης προσροφητικών υλικών, καθώς και τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

Η σύνθεση του ενεργειακού μείγματος αποτελεί, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τον καθοριστικότερο παράγοντα για τον δείκτη GWP. Σε χώρες όπως η Γερμανία, όπου ο λιγνίτης εξακολουθεί να συμμετέχει σημαντικά στην ηλεκτροπαραγωγή (περίπου 25 τοις εκατό το 2023), η ενεργοβόρες τεχνολογίες (RO, UV/H₂O₂) εμφανίζουν δυσανάλογα υψηλό ανθρακικό αποτύπωμα. Αντίθετα, στη Νορβηγία, όπου η υδροηλεκτρική ενέργεια καλύπτει σχεδόν το σύνολο της ζήτησης, το GWP καθίσταται δευτερεύον κριτήριο και η αξιολόγηση μετατοπίζεται προς άλλους δείκτες, όπως η κατανάλωση αβιοτικών πόρων και η τοξικότητα (Igos, 2018).

Η επίδραση του ενεργειακού μείγματος γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στο Σχήμα 3 που ακολουθεί, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή του GWP συναρτήσει του ποσοστού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο ηλεκτρικό δίκτυο. Παρατηρείται ότι για ποσοστά ΑΠΕ άνω του 60 τοις εκατό, οι διαφορές μεταξύ των τεχνολογιών συρρικνώνονται σημαντικά, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια παύει να αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα διαφοροποίησης.



Γράφημα 3. Ανάλυση ευαισθησίας — Επίδραση του μεριδίου ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα επί του GWP

Ευαισθησία ως προς τη δόση χημικών και τον χρόνο ζωής υλικών

Πέραν του ενεργειακού μείγματος, η δόση του όζοντος (εκφρασμένη ως g O₃ ανά g διαλυμένου οργανικού άνθρακα, DOC) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τον οζονισμό. Οι τυπικές δόσεις κυμαίνονται μεταξύ 0,5 και 1,5 g O₃/g DOC, με τις υψηλότερες τιμές να αντιστοιχούν σε λύματα υψηλού οργανικού φορτίου. Η αύξηση της δόσης πέραν του βέλτιστου σημείου δεν βελτιώνει αναλογικά την απομάκρυνση μικρορύπων, αλλά αυξάνει γραμμικά την κατανάλωση ενέργειας και τον κίνδυνο σχηματισμού βρωμικών ιόντων (bromate) σε λύματα με υψηλή συγκέντρωση βρωμιδίων (Wöhler et al., 2022).

Αντίστοιχα, η συχνότητα αντικατάστασης ή αναγέννησης του ενεργού άνθρακα καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των τεχνολογιών προσρόφησης. Σε μονάδες που λειτουργούν με PAC, η τυπική δοσολογία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30 mg/L, ανάλογα με την ποιότητα του εισερχόμενου λύματος. Η χρήση υπερβολικά υψηλών δόσεων αυξάνει δυσανάλογα τον όγκο ιλύος που απαιτεί τελική διάθεση, ενώ η χρήση ανεπαρκών δόσεων οδηγεί σε μειωμένη απόδοση απομάκρυνσης. Η βελτιστοποίηση της δόσης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ποιότητα εκροής όσο και το περιβαλλοντικό κόστος, αποτελεί ένα ενεργό ερευνητικό πεδίο.

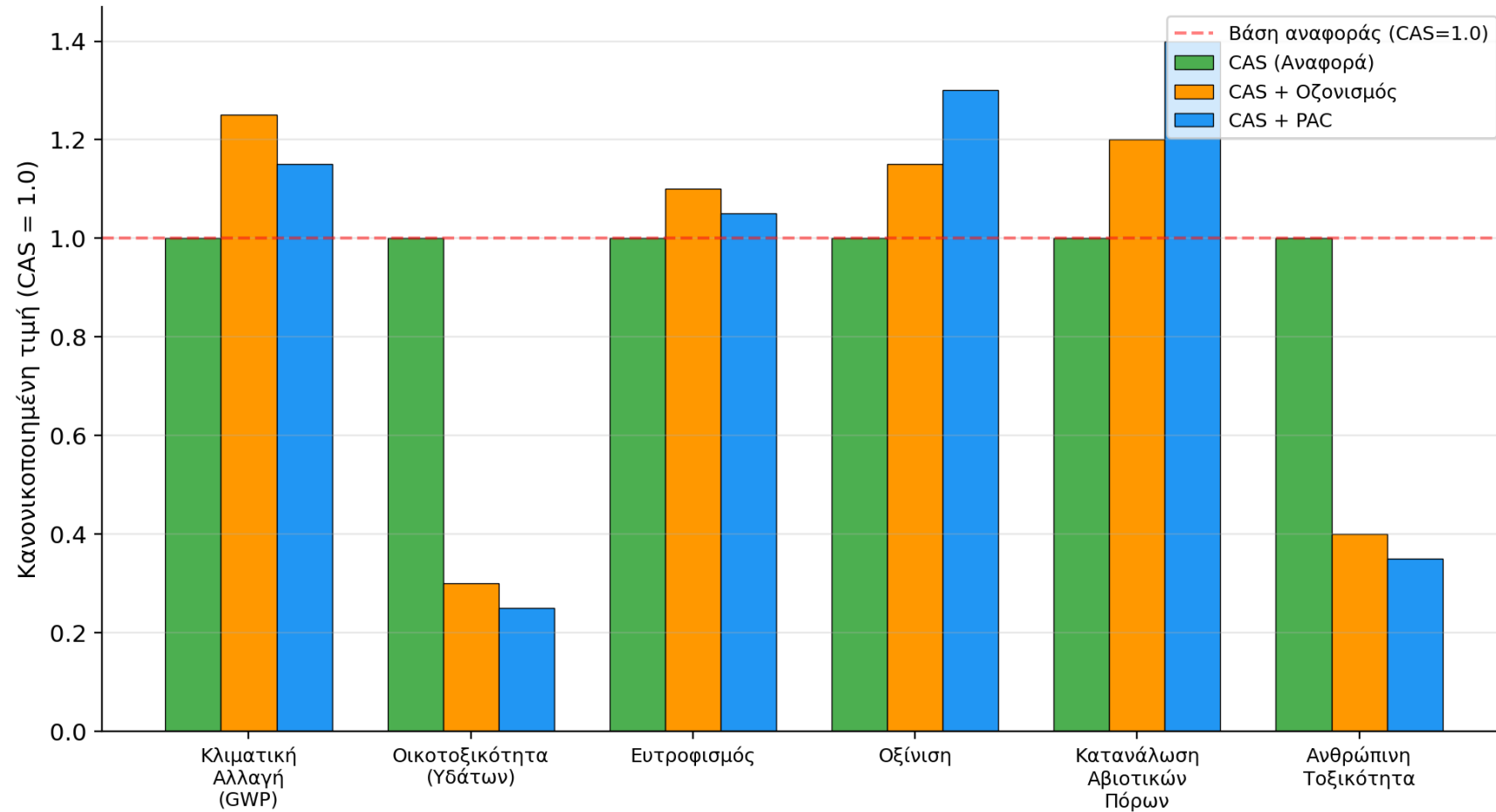
Για τις τεχνολογίες μεμβρανών, οι κύριες παράμετροι ευαισθησίας αφορούν τη διάρκεια ζωής των μεμβρανών (τυπικά 5 έως 10 έτη), τη συχνότητα χημικού καθαρισμού και τη διαχείριση του συμπυκνώματος (concentrate/brine). Σε μελέτες LCA που αφορούν τη νανοδιήθηση (NF) ή την αντίστροφη ώσμωση (RO), η περιβαλλοντική επιβάρυνση από τη διάθεση του συμπυκνώματος μπορεί να υπερβεί εκείνη της ίδιας της διεργασίας διήθησης, ιδιαίτερα εάν το συμπύκνωμα απορρίπτεται σε ευαίσθητους υδάτινους αποδέκτες (Gros et al., 2018).

Το φαινόμενο της μεταφοράς περιβαλλοντικών βαρών: Ανάλυση και τεκμηρίωση

Η μεταφορά βαρών (burden shifting) αποτελεί ένα από τα πλέον κρίσιμα ζητήματα στην αξιολόγηση τεχνολογιών περιβαλλοντικής διαχείρισης μέσω LCA. Στο πλαίσιο της τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων, το φαινόμενο εκδηλώνεται όταν η βελτίωση ενός περιβαλλοντικού δείκτη (π.χ. μείωση της οικοτοξικότητας στον υδάτινο αποδέκτη) επιτυγχάνεται εις βάρος ενός ή περισσότερων άλλων δεικτών (π.χ. αύξηση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ή κατανάλωση αβιοτικών πόρων).

Το σχήμα 4 που ακολουθεί αποτυπώνει γραφικά το φαινόμενο αυτό, συγκρίνοντας τρία σενάρια: τη συμβατική επεξεργασία (CAS), τον οζονισμό και τον PAC. Οι τιμές έχουν κανονικοποιηθεί ως προς τη βάση αναφοράς (CAS ίσο με 1,0), ώστε να είναι δυνατή η οπτική σύγκριση μεταξύ κατηγοριών επιπτώσεων με διαφορετικές μονάδες μέτρησης.

**Σχήμα: Φαινόμενο μεταφοράς βαρών (Burden Shifting)
Συγκριτικά με CAS (κανονικοποιημένο)**



Γράφημα 4. Μεταφορά βαρών (Burden Shifting). Κανονικοποιημένη σύγκριση (CAS = 1,0)

Μηχανισμοί μεταφοράς βαρών ανά τεχνολογία

Ο οξονισμός αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση μεταφοράς βαρών μεταξύ υδάτινου και ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Η υψηλή αποτελεσματικότητα στη μείωση της οικοτοξικότητας (τιμή 0,30 στον κανονικοποιημένο δείκτη, δηλαδή μείωση 70 τοις εκατό σε σχέση με τη CAS) συνοδεύεται από αύξηση του GWP κατά 25 τοις εκατό και του ευτροφισμού κατά 10 τοις εκατό. Η αύξηση του ευτροφισμού οφείλεται κυρίως στις εκπομπές NO_x κατά τη διαδικασία ηλεκτροπαραγωγής που τροφοδοτεί τους αντιδραστήρες (Tsangas, 2023).

Η προσρόφηση σε PAC εμφανίζει διαφορετικό μοτίβο μεταφοράς. Η κατανάλωση αβιοτικών πόρων αυξάνεται κατά 40 τοις εκατό, κυρίως λόγω της εξόρυξης πρώτων υλών (συχνά λιθάνθρακα ή φλοιού καρύδας) για την παραγωγή του ενεργού άνθρακα. Παράλληλα, η οξίνιση αυξάνεται κατά 30 τοις εκατό, αντικατοπτρίζοντας τις εκπομπές SO₂ κατά τη διαδικασία θερμικής ενεργοποίησης του άνθρακα. Τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν ότι η προέλευση και ο τρόπος παραγωγής του προσροφητικού υλικού μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά τη συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση (Andersson και Karlsson, 2022).

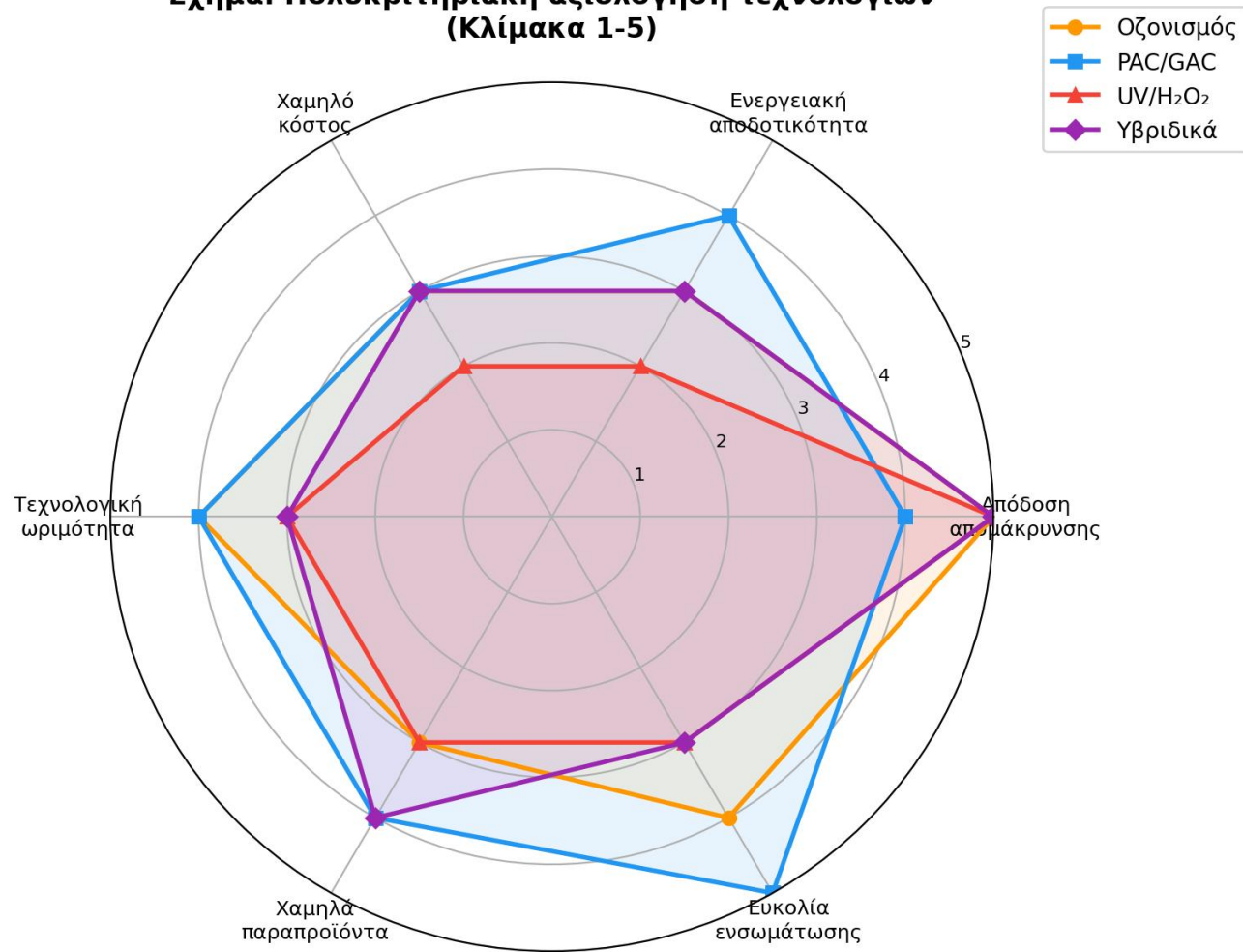
Οι τεχνολογίες UV/H₂O₂ εμφανίζουν τη σφοδρότερη μεταφορά βαρών μεταξύ όλων των εξεταζόμενων μεθόδων. Η απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία των λαμπτήρων υπεριώδους ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με την κατανάλωση υπεροξειδίου του υδρογόνου, αυξάνει τόσο τον GWP όσο και τη συνολική ανθρώπινη τοξικότητα. Η τελευταία επιβάρυνση οφείλεται εν μέρει στη βιομηχανική παραγωγή του H₂O₂ μέσω της διεργασίας ανθρακίνωσης, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση οργανικών διαλυτών και ενεργοβόρων σταδίων (Rahman et al., 2018).

Η κατανόηση αυτών των μηχανισμών μεταφοράς βαρών είναι θεμελιώδους σημασίας για τη λήψη ορθών αποφάσεων. Μια τεχνολογία που εμφανίζεται ως η βέλτιστη σε μία κατηγορία επιπτώσεων ενδέχεται να είναι η χειρότερη σε μια άλλη. Η πολυκριτηριακή ανάλυση, σε συνδυασμό με τη στάθμιση κριτηρίων ανάλογα με τις τοπικές προτεραιότητες, αποτελεί τον ενδεδειγμένο τρόπο αντιμετώπισης αυτής της πολυπλοκότητας.

Πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών

Η πολυκριτηριακή αξιολόγηση αποτελεί απαραίτητη συμπληρωματική μέθοδο στην LCA, καθώς επιτρέπει τη σύνθεση ετερογενών κριτηρίων σε ένα ενιαίο πλαίσιο σύγκρισης. Στο Σχήμα 5 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ραντάρ (spider chart) που αποτυπώνει την επίδοση τεσσάρων τεχνολογιών ως προς έξι βασικά κριτήρια, βαθμολογημένα σε κλίμακα από 1 (χαμηλή επίδοση) έως 5 (εξαιρετική επίδοση).

**Σχήμα: Πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών
(Κλίμακα 1-5)**



Γράφημα 5. Πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας (κλίμακα 1-5).

Ερμηνεία της πολυκριτηριακής ανάλυσης

Η γραφική απεικόνιση αναδεικνύει ότι καμία τεχνολογία δεν καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη επιφάνεια σε όλους τους άξονες ταυτόχρονα. Ο οξονισμός υπερτερεί σε απόδοση απομάκρυνσης και τεχνολογική ωριμότητα, αλλά υστερεί σε ενεργειακή αποδοτικότητα. Ο PAC/GAC εμφανίζει το πιο ομοιόμορφο προφίλ, με ικανοποιητικές επιδόσεις σε όλα τα κριτήρια και ιδιαίτερα υψηλή βαθμολογία στην ευκολία ενσωμάτωσης σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Η UV/H₂O₂ υπερτερεί σε απόδοση απομάκρυνσης αλλά παρουσιάζει τη χαμηλότερη συνολική βαθμολογία λόγω του υψηλού ενεργειακού και οικονομικού κόστους.

Τα υβριδικά συστήματα εμφανίζουν ενδιαφέρον προφίλ: η μέγιστη βαθμολογία στην απόδοση απομάκρυνσης και στον περιορισμό των παραπροϊόντων αντισταθμίζεται εν μέρει από τη μέτρια τεχνολογική ωριμότητα και το υψηλότερο κόστος. Παρόλα αυτά, η αυξανόμενη εφαρμογή υβριδικών σχημάτων σε πλήρη κλίμακα — ιδιαίτερα στην Ελβετία και τη Γερμανία — υποδεικνύει ότι η τεχνολογική ωριμότητα βελτιώνεται ραγδαία.

Η πολυκριτηριακή προσέγγιση καθιστά επίσης σαφές ότι η τελική επιλογή τεχνολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές προτεραιότητες. Σε μια περιοχή με υψηλή ευαισθησία σε θέματα οικοτοξικότητας (π.χ. πλησίον προστατευόμενου υδροτόπου), η βαρύτητα του κριτηρίου απομάκρυνσης μικρορύπων αυξάνεται. Αντίθετα, σε μια χώρα με φιλόδοξους στόχους μείωσης εκπομπών, η ενεργειακή αποδοτικότητα αποκτά πρωτεύοντα ρόλο. Η LCA δεν παρέχει μια μοναδική απάντηση, αλλά ένα τεκμηριωμένο πλαίσιο για τη λήψη αποφάσεων σε συγκεκριμένα πλαίσια εφαρμογής.

Η συγκριτική ανάλυση των διαθέσιμων μελετών καταδεικνύει ότι τα αποτελέσματα των εφαρμογών LCA επηρεάζονται σημαντικά από τις μεθοδολογικές επιλογές κάθε ερευνητικής ομάδας, όπως η επιλογή λειτουργικής μονάδας, οι ενεργειακές παραδοχές και το εύρος των περιβαλλοντικών δεικτών που αξιολογούνται. Ως αποτέλεσμα, παρατηρούνται συχνά διαφοροποιήσεις ακόμη και μεταξύ μελετών που εξετάζουν παρόμοιες τεχνολογίες. Επιπλέον, η πλειονότητα των διαθέσιμων ερευνών βασίζεται σε πιλοτικές εγκαταστάσεις ή σε θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης, ενώ παραμένει περιορισμένος ο αριθμός πλήρους κλίμακας εφαρμογών με μακροχρόνια λειτουργικά δεδομένα. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη ανάπτυξης περισσότερο εναρμονισμένων μεθοδολογικών προσεγγίσεων και διεύρυνσης των full-scale μελετών, ώστε να ενισχυθεί η αξιοπιστία και η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ

Η Κεντρική Ευρώπη αποτελεί σήμερα μία από τις πιο προηγμένες περιοχές παγκοσμίως όσον αφορά την εφαρμογή τεχνολογιών απομάκρυνσης μικρορύπων σε πλήρη κλίμακα. Χώρες όπως η Ελβετία, η Γερμανία και η Ολλανδία έχουν επενδύσει

σημαντικά στην αναβάθμιση των ΕΕΛ, εφαρμόζοντας τεχνολογίες τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας με στόχο τη μείωση της φαρμακευτικής ρύπανσης.

Η εμπειρία αυτών των χωρών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς παρέχει πραγματικά λειτουργικά δεδομένα σχετικά με:

- την ενεργειακή κατανάλωση,
- τη λειτουργική αξιοπιστία,
- τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις,
- την οικονομική βιωσιμότητα,
- καθώς και τη δυνατότητα εφαρμογής σε διαφορετικές κλίμακες εγκαταστάσεων.

Η θεωρητική αξιολόγηση των μεθόδων καθίσταται πρακτικά εφαρμόσιμη μέσω της εξέτασης του τεχνολογικού και θεσμικού πλαισίου πρωτοπόρων ευρωπαϊκών κρατών. Η Κεντρική Ευρώπη έχει ηγηθεί στην ανάπτυξη πολιτικών και υποδομών για την ανάσχεση των αναδυόμενων μικρορύπων, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα πλήρους κλίμακας (Viotti, 2024).

4.3.1 Παρουσίαση επιλεγμένων μονάδων (Γερμανία, Ολλανδία, Ελβετία)

Ελβετία

Η Ελβετία αποτέλεσε την πρώτη ευρωπαϊκή χώρα που υιοθέτησε υποχρεωτική αναβάθμιση ΕΕΛ για την απομάκρυνση μικρορύπων. Η εθνική στρατηγική βασίστηκε κυρίως στην εφαρμογή οζονισμού και φίλτρων ενεργού άνθρακα.

Η μονάδα Regensdorf θεωρείται χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής οζονισμού πλήρους κλίμακας. Τα αποτελέσματα έδειξαν απομάκρυνση άνω του 80% για μεγάλο αριθμό φαρμακευτικών ενώσεων, με σημαντική μείωση της οικοτοξικότητας της εκροής.

Παράλληλα, στη μονάδα Neugut εφαρμόστηκε σύστημα GAC, το οποίο εμφάνισε υψηλή σταθερότητα λειτουργίας και χαμηλότερο κίνδυνο σχηματισμού παραπροϊόντων οξείδωσης.

Επίσης, η Ελβετία αποτέλεσε το πρώτο κράτος που θεσμοθέτησε σε εθνικό επίπεδο την υποχρεωτική απομάκρυνση μικρορύπων. Εγκαταστάσεις όπως η ΜΕΛ Neugut και η ΜΕΛ Regensdorf αποτέλεσαν διεθνή σημεία αναφοράς για την εφαρμογή του οζονισμού πλήρους κλίμακας. Η επιλογή του οζονισμού στην Ελβετία υποστηρίζεται ισχυρά από το γεγονός ότι το ελβετικό ενεργειακό δίκτυο κυριαρχείται από υδροηλεκτρική και πυρηνική ενέργεια, εξασφαλίζοντας ελάχιστο αποτύπωμα άνθρακα ανά kWh.

Γερμανία

Στη Γερμανία, οι περισσότερες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν αρχικά σε πιλοτική κλίμακα και στη συνέχεια επεκτάθηκαν σε μεγάλες αστικές ΕΕΛ. Οι τεχνολογίες PAC

και οζονισμού εφαρμόζονται ευρέως, ιδιαίτερα στα κρατίδια της Βάδης-Βυρτεμβέργης και της Βόρειας Ρηνανίας-Βεστφαλίας.

Η μονάδα Ulm αποτελεί μία από τις πλέον μελετημένες περιπτώσεις εφαρμογής PAC. Η προσθήκη ενεργού άνθρακα σε μορφή σκόνης μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία οδήγησε σε σημαντική απομάκρυνση φαρμακευτικών ενώσεων και οργανικών μικρορύπων.

Στη Γερμανία, η προσέγγιση είναι διαφοροποιημένη σε περιφερειακό επίπεδο. Στο κρατίδιο της Βάδης-Βυρτεμβέργης, μονάδες όπως αυτή του Ulm έχουν επενδύσει στον PAC λόγω της ύπαρξης υφιστάμενων συστημάτων καύσης της ιλύος, γεγονός που επιλύει το πρόβλημα διαχείρισης του κορεσμένου άνθρακα χωρίς την ανάγκη εξωτερικών μεταφορών (Wöhler et al., 2022).

Ολλανδία

Η Ολλανδία έχει εστιάσει κυρίως στην ενσωμάτωση των τεχνολογιών μικρορύπων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και της επαναχρησιμοποίησης νερού. Το πιλοτικό έργο στο Lelystad διερεύνησε την εφαρμογή GAC και AOPs σε συνδυασμό με προηγμένα συστήματα παρακολούθησης.

Οι ολλανδικές μελέτες δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στη σχέση μεταξύ περιβαλλοντικής απόδοσης και ενεργειακού μείγματος, επισημαίνοντας ότι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το συνολικό περιβαλλοντικό ισοζύγιο.

Πίνακας 7. Παραδείγματα εφαρμογής τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας στην Κεντρική Ευρώπη

Χώρα	Μονάδα	Τεχνολογία	Κύριο πλεονέκτημα
Ελβετία	Regensdorf	Οζονισμός	Πολύ υψηλή απομάκρυνση
Ελβετία	Neugut	GAC	Χαμηλή δευτερογενής τοξικότητα
Γερμανία	Ulm	PAC	Υψηλή λειτουργική ευελιξία
Ολλανδία	Lelystad	GAC/AOPs	Σύνδεση με επαναχρησιμοποίηση νερού

Πηγή: LIFE PHARMADEGRADE (2020), Witteveen+Bos (2021), Wöhler et al. (2022).

4.3.2 Ανάλυση και σύγκριση δεδομένων απόδοσης

Η παραβολή των παραπάνω δεδομένων αναδεικνύει τον ρόλο της κλίμακας (economies of scale). Στις μεγάλες ΜΕΛ (>100.000 Ισοδύναμου Πληθυσμού) της Ελβετίας, ο οζονισμός παρουσιάζει σταθερότερη συμπεριφορά και μικρότερο λειτουργικό κόστος ανά m³. Αντίθετα, σε μικρότερες μονάδες, η αρχική επένδυση για γεννήτριες όζοντος καθιστά την προσθήκη PAC οικονομικά και περιβαλλοντικά ευνοϊκότερη. Είναι κρίσιμο να σημειωθεί ότι η παρουσία βρωμιούχων αλάτων στα εισερχόμενα λύματα

(συχνά λόγω βιομηχανικών απορρίψεων) σε ορισμένες γερμανικές μονάδες κατέστησε τον οξονισμό απαγορευτική, στρέφοντας τους διαχειριστές αποκλειστικά σε λύσεις GAC για την αποφυγή καρκινογόνων υποπροϊόντων.

Η ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων καταδεικνύει ότι η επιλογή τεχνολογίας επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά των λυμάτων, το μέγεθος της εγκατάστασης και τις εθνικές προτεραιότητες διαχείρισης.

Οι ελβετικές εγκαταστάσεις δίνουν έμφαση στη μέγιστη απομάκρυνση μικρορύπων, ακόμη και με αυξημένο ενεργειακό κόστος. Αντίθετα, η ολλανδική προσέγγιση εστιάζει περισσότερο στη συνολική βιωσιμότητα και στην ενσωμάτωση της επαναχρησιμοποίησης νερού.

Οι γερμανικές εφαρμογές PAC θεωρούνται περισσότερο προσαρμόσιμες σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις, καθώς απαιτούν μικρότερες επεμβάσεις στις υφιστάμενες υποδομές.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι:

- ο οξονισμός επιτυγχάνει την υψηλότερη απομάκρυνση,
- τα συστήματα PAC/GAC παρουσιάζουν χαμηλότερη ενεργειακή απαίτηση,
- οι υβριδικές τεχνολογίες εμφανίζουν την καλύτερη συνολική περιβαλλοντική ισορροπία.

Αναλυτική παρουσίαση ευρωπαϊκών εγκαταστάσεων

Η πρακτική εφαρμογή τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας σε πλήρη κλίμακα (full-scale) στην Κεντρική Ευρώπη παρέχει πολύτιμα δεδομένα για την αξιολόγηση της πραγματικής τους απόδοσης. Σε αντίθεση με τις εργαστηριακές μελέτες, οι εγκαταστάσεις πλήρους κλίμακας λειτουργούν υπό πραγματικές συνθήκες μεταβλητότητας του εισερχόμενου λύματος, εποχιακών διακυμάνσεων και μακροχρόνιων απαιτήσεων συντήρησης. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τη στερεότερη βάση για τη συγκριτική αξιολόγηση μέσω LCA.

Ελβετία: Η εγκατάσταση ARA Neugut (Dübendorf)

Η μονάδα ARA Neugut στο Dübendorf (κοντά στη Ζυρίχη) αποτελεί μία από τις πρώτες εγκαταστάσεις πλήρους κλίμακας που ενσωμάτωσε οξονισμό ως τεταρτοβάθμια βαθμίδα. Η εγκατάσταση τέθηκε σε λειτουργία το 2014, εξυπηρετώντας ισοδύναμο πληθυσμό περίπου 100.000 κατοίκων. Η δόση όζοντος ρυθμίζεται δυναμικά βάσει της συγκέντρωσης DOC στην εκροή της δευτεροβάθμιας βαθμίδας, με μέσες τιμές μεταξύ 0,5 και 0,8 g O₃/g DOC.

Τα δεδομένα λειτουργίας δείχνουν μέση απομάκρυνση δεικτικών φαρμακευτικών ενώσεων (δικλοφενάκη, καρβαμαζεπίνη, σουλφαμεθοξαζόλη) της τάξης του 80 έως 90 τοις εκατό. Η ενεργειακή κατανάλωση της βαθμίδας οζονισμού ανέρχεται σε 0,035 έως 0,050 kWh/m³, αντιστοιχώντας σε αύξηση περίπου 15 τοις εκατό στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση της εγκατάστασης. Δεδομένου ότι η Ελβετία διαθέτει ενεργειακό μείγμα με υψηλό μερίδιο υδροηλεκτρικής ενέργειας (περίπου 60 τοις εκατό), η πρόσθετη επιβάρυνση σε GWP παραμένει σχετικά χαμηλή (Wöhler et al., 2022).

Αξιοσημείωτο είναι ότι η Ελβετία αποτελεί τη μοναδική ευρωπαϊκή χώρα που έχει θεσπίσει νομοθετική υποχρέωση για τεταρτοβάθμια επεξεργασία σε επιλεγμένες εγκαταστάσεις. Ο ομοσπονδιακός νόμος περί προστασίας υδάτων (Gewässerschutzgesetz, GSchG), ο οποίος τροποποιήθηκε το 2016, προβλέπει την αναβάθμιση περίπου 100 εγκαταστάσεων (από τις 700 συνολικά) εντός χρονικού ορίζοντα 20 ετών, χρηματοδοτούμενη μέσω εθνικού τέλους λυμάτων (0,09 CHF/m³).

Γερμανία: Η εγκατάσταση Dülmen

Στη Γερμανία, η εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων του Dülmen (Βόρεια Ρηνανία-Βεστφαλία) αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής προσρόφησης σε PAC σε πλήρη κλίμακα. Η μονάδα εξυπηρετεί ισοδύναμο πληθυσμό 37.000 κατοίκων και λειτουργεί με δόση PAC μεταξύ 10 και 20 mg/L, ανάλογα με τη φόρτιση.

Η απόδοση απομάκρυνσης μικρορύπων κυμαίνεται μεταξύ 70 και 85 τοις εκατό, τιμή χαμηλότερη σε σχέση με τον οζονισμό αλλά ικανοποιητική για τη συμμόρφωση με τα αναμενόμενα ευρωπαϊκά πρότυπα. Η ιδιαιτερότητα του PAC έγκειται στην απλότητα ενσωμάτωσής του σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις: η δοσολογία πραγματοποιείται στη δεξαμενή αερισμού ή σε ξεχωριστή δεξαμενή επαφής, χωρίς ανάγκη σημαντικών υποδομών. Ωστόσο, η ετήσια κατανάλωση PAC ανέρχεται σε αρκετές δεκάδες τόνους, γεγονός που δημιουργεί σημαντικό κόστος προμήθειας και περιβαλλοντική επιβάρυνση από τη μεταφορά (Boogaard et al., 2025).

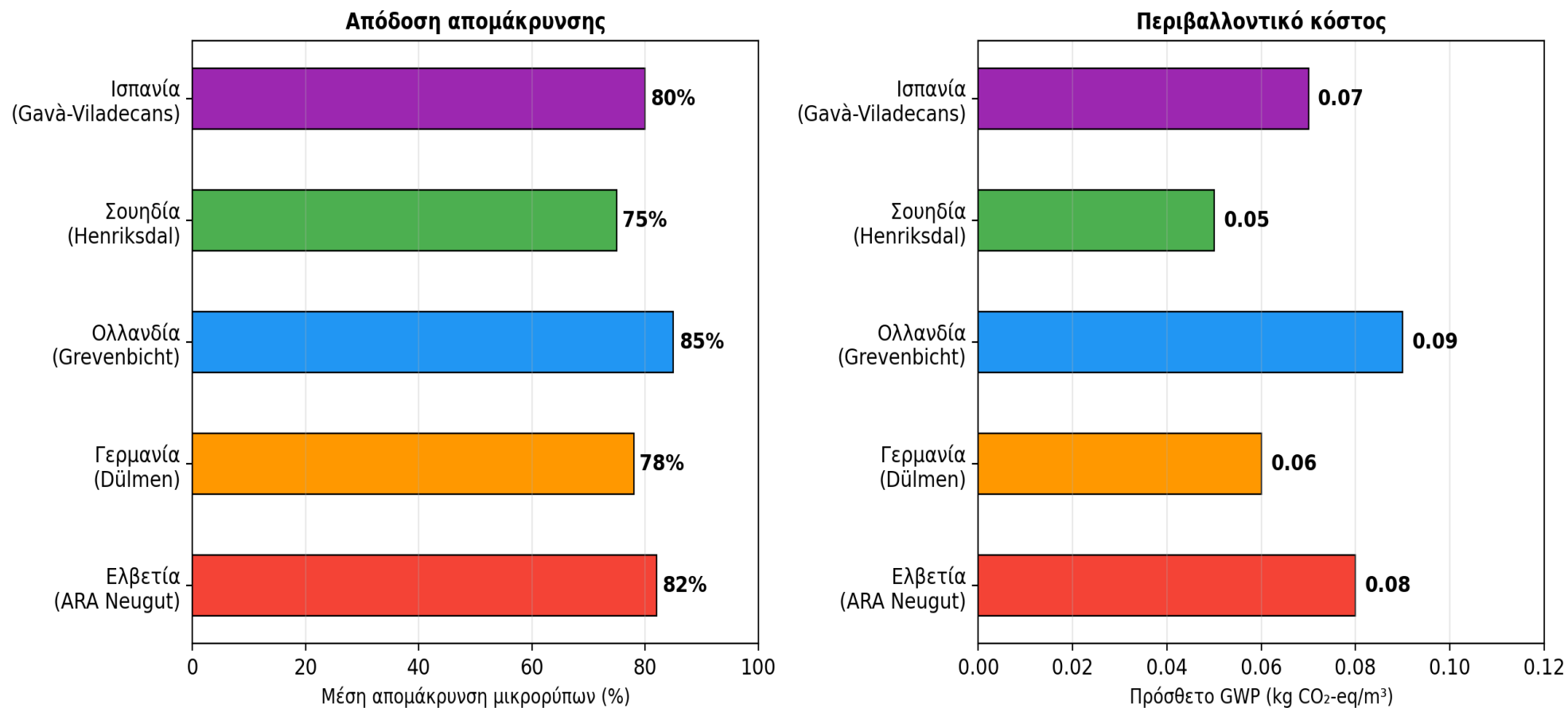
Η γερμανική πολιτεία Βόρεια Ρηνανία-Βεστφαλία αποτελεί πρωτοπόρο στη θέσπιση κανονιστικού πλαισίου για τους μικρορύπους, θέτοντας ανώτατα όρια απομάκρυνσης 80 τοις εκατό για ένα σύνολο ενώσεων δεικτών. Η εμπειρία από τη λειτουργία εγκαταστάσεων όπως αυτή του Dülmen τροφοδοτεί άμεσα τη διαμόρφωση τόσο εθνικής όσο και ευρωπαϊκής πολιτικής.

Ολλανδία: Πιλοτικά προγράμματα και υβριδικές λύσεις

Η Ολλανδία ακολουθεί μια στρατηγική βασισμένη στην πιλοτική δοκιμή πολλαπλών τεχνολογιών πριν από τη λήψη αποφάσεων πλήρους κλίμακας. Στην εγκατάσταση Grevenbicht, αξιολογήθηκαν παράλληλα τρεις τεχνολογίες: οζονισμός, GAC και ο συνδυασμός οζονισμού με BAC. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι ο συνδυασμός O₃/BAC επιτυγχάνει την υψηλότερη μέση απομάκρυνση (85 τοις εκατό) με ταυτόχρονη μείωση του κινδύνου τοξικών παραπροϊόντων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ολλανδική προσέγγιση στην αξιοποίηση βιοαερίου εντός των εγκαταστάσεων. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αναερόβια χώνευση λάσπης μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος (30 έως 50 τοις εκατό) της πρόσθετης ενεργειακής ζήτησης της τεταρτοβάθμιας βαθμίδας, μειώνοντας αντίστοιχα το ανθρακικό αποτύπωμα. Η ενσωμάτωση αυτών των τοπικών ενεργειακών λύσεων στα μοντέλα LCA αναδεικνύει σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα σε σύγκριση με την υπόθεση τροφοδοσίας αποκλειστικά από το ηλεκτρικό δίκτυο (Boogaard et al., 2025).

Σχήμα: Σύγκριση ευρωπαϊκών εγκαταστάσεων τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας



Γράφημα 6. Σύγκριση ευρωπαϊκών εγκαταστάσεων τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας

Σύνοψη ευρημάτων από τις ευρωπαϊκές εφαρμογές

Η ανάλυση των ευρωπαϊκών εγκαταστάσεων αναδεικνύει ορισμένα κοινά συμπεράσματα. Η εφαρμογή τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας σε πλήρη κλίμακα είναι τεχνικά εφικτή και μπορεί να επιτύχει σταθερά υψηλή απομάκρυνση μικρορύπων. Η πρόσθετη ενεργειακή κατανάλωση κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30 τοις εκατό επί της υφιστάμενης, τιμές που κρίνονται αποδεκτές εφόσον συνδυάζονται με μέτρα ενεργειακής βελτιστοποίησης. Ο πίνακας που ακολουθεί παρέχει μια συγκεντρωτική σύγκριση των κύριων ευρωπαϊκών εγκαταστάσεων.

Πίνακας 8. Ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας πλήρους κλίμακας

Εγκατάσταση	Χώρα	Τεχνολογία	Ισοδ. πληθ.	Απομάκρ. (%)	kWh/m ³	Ενεργ. μείγμα
ARA Neugut	Ελβετία	Οζονισμός	100.000	80–90	0,035–0,050	Υδροηλ. 60%
Dülmen	Γερμανία	PAC	37.000	70–85	0,01–0,02	Μικτό (ΑΠΕ 45%)
Grevenbicht	Ολλανδία	O ₃ /BAC	52.000	80–90	0,04–0,08	Μικτό (ΑΠΕ 35%)
Henriksdal	Σουηδία	GAC	800.000	70–80	0,01–0,03	Υδρ/Πυρ. 85%
Gavà-Vilad.	Ισπανία	O ₃ +Άμμος	450.000	75–85	0,03–0,06	Μικτό (ΑΠΕ 40%)

Οι εφαρμογές τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας στις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης αποδεικνύουν ότι η επιτυχής ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το θεσμικό πλαίσιο, τη διαθεσιμότητα χρηματοδοτικών εργαλείων και την ενεργειακή στρατηγική κάθε χώρας. Χώρες όπως η Ελβετία και η Γερμανία έχουν ήδη προχωρήσει σε εκτεταμένες αναβαθμίσεις μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, ενσωματώνοντας τεχνολογίες υψηλής ενεργειακής απαίτησης λόγω αυστηρότερων περιβαλλοντικών απαιτήσεων και μεγαλύτερης θεσμικής ωριμότητας. Ωστόσο, η μεταφορά αυτών των πρακτικών σε χώρες με διαφορετικά οικονομικά ή ενεργειακά χαρακτηριστικά δεν μπορεί να θεωρείται δεδομένη. Συνεπώς, η αξιολόγηση της

βιωσιμότητας των τεχνολογιών πρέπει να προσαρμόζεται στις τοπικές συνθήκες και στις δυνατότητες κάθε συστήματος διαχείρισης υγρών αποβλήτων.

4.4 ΑΝΑΔΕΙΞΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΕΡΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΛΟΓΩΝ

Συνάγεται, επομένως, ότι δεν υφίσταται μία μοναδική «βέλτιστη» τεχνολογία πανευρωπαϊκά. Το περιβαλλοντικό αποτέλεσμα μιας μεθόδου εξαρτάται από τον τόπο και τον τρόπο εφαρμογής της. Ο οξονισμός συνιστά τη βέλτιστη περιβαλλοντική επιλογή σε χώρες με "πράσινο" ηλεκτρικό δίκτυο και λύματα απαλλαγμένα από βρωμίδια. Η προσρόφηση με PAC/GAC πλεονεκτεί σε τοποθεσίες με διαθέσιμες υποδομές αναγέννησης/καύσης ιλύος, ενώ τα υβριδικά σχήματα αποτελούν την επιβεβλημένη οδό όταν η εκροή διατίθεται σε υπερ-ευαίσθητους αποδέκτες ή προορίζεται για άμεση επαναχρησιμοποίηση, ισορροπώντας μεταξύ βιολογικής σταθερότητας και απουσίας τοξικότητας (European Commission, 2024).

Πίνακας 9. Συγκριτική σύνοψη εμπειρίας από Κεντρική Ευρώπη (Προσαρμογή από βιβλιογραφικά δεδομένα)

Χώρα	Κυρίαρχη Τεχνολογία Τεταρτοβάθμιας	Κύρια Περιβαλλοντικά / Τεχνικά Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί / Προκλήσεις που εντοπίστηκαν
Ελβετία	Οξονισμός (συχνά με φίλτρα άμμου)	Χαμηλό GWP λόγω πράσινου ενεργειακού μίγματος. Υψηλή απομάκρυνση ευρέος φάσματος APIs.	Αυστηρή παρακολούθηση βρωμικών και ανάπτυξη συστημάτων βιολογικής ασφάλειας (post-treatment).
Γερμανία	PAC / GAC (Περιφερειακή προσέγγιση)	Απουσία TPs. Εκμετάλλευση υφιστάμενων αποτεφρωτήρων ιλύος για τον κορεσμένο άνθρακα.	Υψηλές απαιτήσεις μεταφορών και κατανάλωσης υλικών πόρων. Κόστος αναγέννησης.
Ολλανδία	Υβριδικά συστήματα / O ₃ +BAC	Εστίαση στην κυκλικότητα και στην ασφαλή παραγωγή νερού υψηλής ποιότητας για γεωργία.	Υψηλό CAPEX. Ανάγκη λεπτομερούς LCA για την αποφυγή μεταφοράς περιβαλλοντικών βαρών.

Η αξιολόγηση των διαθέσιμων βιβλιογραφικών δεδομένων καταδεικνύει ότι δεν υπάρχει μία ενιαία τεχνολογική λύση που να θεωρείται περιβαλλοντικά βέλτιστη για όλες τις περιπτώσεις. Η περιβαλλοντική επίδοση κάθε τεχνολογίας εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων, όπως:

- το ενεργειακό μείγμα της χώρας,
- η ποιότητα των εισερχόμενων λυμάτων,
- η συγκέντρωση μικρορύπων,
- το μέγεθος της εγκατάστασης,
- οι διαθέσιμες υποδομές,
- καθώς και οι απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης νερού.

Παρόλα αυτά, οι περισσότερες μελέτες συγκλίνουν στο ότι οι υβριδικές τεχνολογίες παρουσιάζουν την καλύτερη συνολική περιβαλλοντική ισορροπία. Ο συνδυασμός οζονισμού και βιολογικών φίλτρων ή ενεργού άνθρακα επιτρέπει τη σημαντική μείωση της οικοτοξικότητας, ενώ περιορίζει τον κίνδυνο σχηματισμού τοξικών παραπροϊόντων.

Οι τεχνολογίες PAC εμφανίζουν επίσης ιδιαίτερα θετικά χαρακτηριστικά, κυρίως λόγω της ευκολίας εφαρμογής τους σε υφιστάμενες ΕΕΛ και της σχετικά χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.

Αντίθετα, οι τεχνολογίες μεμβρανών, αν και παρουσιάζουν υψηλή αποτελεσματικότητα, εμφανίζουν αυξημένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω των ενεργειακών απαιτήσεων και της ανάγκης συχνής συντήρησης.

Σημαντικό ρόλο στη μελλοντική βιωσιμότητα των τεχνολογιών αναμένεται να διαδραματίσει η μετάβαση σε ενεργειακά συστήματα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να μειώσει σημαντικά το GWP ενεργοβόρων τεχνολογιών, όπως ο οζονισμός και οι AOPs.

Παράλληλα, η ανάπτυξη νέων προσροφητικών υλικών χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, όπως biochars και ανακυκλωμένα ανθρακούχα υλικά, ενδέχεται να βελτιώσει περαιτέρω τη βιωσιμότητα των διεργασιών προσρόφησης.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε τη φαρμακευτική ρύπανση ως μία από τις σημαντικότερες αναδυόμενες περιβαλλοντικές προκλήσεις στον τομέα της διαχείρισης υγρών αποβλήτων. Η συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση φαρμάκων, σε συνδυασμό με την αδυναμία πλήρους απομάκρυνσής τους από τις συμβατικές ΕΕΛ, οδηγεί στη συνεχή παρουσία φαρμακευτικών ενώσεων στα υδάτινα οικοσυστήματα.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση κατέδειξε ότι οι συμβατικές βιολογικές διεργασίες παρουσιάζουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα για πολλές ανθεκτικές ενώσεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας.

Οι Προχωρημένες Οξειδωτικές Διεργασίες, οι τεχνολογίες ενεργού άνθρακα και οι τεχνολογίες μεμβρανών μπορούν να επιτύχουν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης μικρορύπων. Ωστόσο, η περιβαλλοντική αξιολόγηση μέσω της μεθοδολογίας LCA έδειξε ότι η υψηλή απόδοση απομάκρυνσης δεν συνεπάγεται απαραίτητα και βέλτιστη περιβαλλοντική επίδοση.

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η χρήση χημικών αντιδραστηρίων και η παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων αποτελούν βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Η ανάλυση των μελετών από χώρες της Κεντρικής Ευρώπης κατέδειξε ότι οι υβριδικές τεχνολογίες εμφανίζουν συχνά την καλύτερη συνολική ισορροπία μεταξύ αποδοτικότητας και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Συμπεράσματα ανά κατηγορία τεχνολογίας

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια επιτρέπει τη διατύπωση εξειδικευμένων συμπερασμάτων για κάθε κατηγορία τεχνολογίας. Τα συμπεράσματα αυτά βασίζονται στη σύνθεση βιβλιογραφικών δεδομένων, αποτελεσμάτων LCA και πρακτικών εμπειριών από ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις πλήρους κλίμακας.

Αναφορικά με τις συμβατικές βιολογικές διεργασίες, η εργασία επιβεβαιώνει ότι παραμένουν απαραίτητες ως βάση κάθε συστήματος επεξεργασίας, καθώς εξασφαλίζουν τη μείωση του οργανικού φορτίου, τη νιτροποίηση και τη βιολογική αφαίρεση φωσφόρου. Ωστόσο, η αδυναμία τους να απομακρύνουν αποτελεσματικά ανθεκτικές φαρμακευτικές ενώσεις (ιδιαίτερα καρβαμαζεπίνη, δικλοφενάκη, σουλφαμεθοξαζόλη και αιθυνυλοιστραδιόλη) καθιστά αναγκαία τη συμπλήρωσή τους με τεταρτοβάθμια βαθμίδα σε ευαίσθητους αποδέκτες.

Ο οζονισμός αναδεικνύεται ως η πλέον τεκμηριωμένη τεχνολογία τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας, με εκτεταμένη εμπειρία πλήρους κλίμακας και υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης. Η δυναμική ρύθμιση της δόσης βάσει της ποιότητας εισερχόμενου λύματος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα τόσο για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης όσο και για τον περιορισμό του ενεργειακού κόστους. Ο κύριος προβληματισμός σχετίζεται με τον σχηματισμό παραπροϊόντων μετασχηματισμού, ο οποίος μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά μέσω της προσθήκης μεταγενέστερης βαθμίδας βιολογικού φίλτρου ή ενεργού άνθρακα.

Οι τεχνολογίες ενεργού άνθρακα (PAC και GAC) διακρίνονται για την απλότητα εφαρμογής τους και την απουσία κινδύνου σχηματισμού τοξικών παραπροϊόντων στην τελική εκροή. Η περιβαλλοντική τους αξιολόγηση μέσω LCA καταδεικνύει ότι η κύρια επιβάρυνση δεν προέρχεται από τη φάση λειτουργίας, αλλά από την αλυσίδα εφοδιασμού του προσροφητικού υλικού. Η χρήση εναλλακτικών πρώτων υλών (π.χ. βιοεξανθρακωμένα υπολείμματα αντί λιθάνθρακα) και η βελτιστοποίηση της θερμικής αναγέννησης αναμένεται να βελτιώσουν σημαντικά το περιβαλλοντικό τους προφίλ στο μέλλον.

Οι τεχνολογίες μεμβρανών (NF, RO) εξασφαλίζουν εξαιρετική ποιότητα εκροής, αλλά η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και η ανάγκη διαχείρισης του υπεραλατούχου συμπυκνώματος περιορίζουν τη χρήση τους σε ειδικές εφαρμογές, όπως η παραγωγή ανακτημένου ύδατος για επαναχρησιμοποίηση. Η LCA τεκμηριώνει ότι η περιβαλλοντική ωφέλεια των μεμβρανών εξαρτάται κρίσιμα από τον τρόπο διάθεσης του συμπυκνώματος.

Τα υβριδικά συστήματα, και ιδιαίτερα ο συνδυασμός οζονισμού με βιολογικά ενεργό άνθρακα (O₃/BAC), εμφανίζουν τη μεγαλύτερη δυναμική μεταξύ όλων των εξεταζόμενων τεχνολογιών. Η συνδυαστική τους δράση επιτυγχάνει υψηλή απομάκρυνση μικρορύπων, αποτελεσματική αφαίρεση παραπροϊόντων μετασχηματισμού και εκτεταμένη διάρκεια ζωής του προσροφητικού υλικού. Η αυξανόμενη εφαρμογή τους σε χώρες όπως η Ελβετία και η Ολλανδία επιβεβαιώνει τη βιωσιμότητά τους σε πρακτικό επίπεδο.

Προκλήσεις και ευκαιρίες για τον ελληνικό χώρο

Η εφαρμογή τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας στον ελληνικό χώρο παρουσιάζει ιδιαιτερότητες που διαφοροποιούν σημαντικά τις προϋποθέσεις εφαρμογής σε σχέση με τις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης. Οι ιδιαιτερότητες αυτές σχετίζονται τόσο με τις κλιματικές συνθήκες και τη γεωγραφική μορφολογία όσο και με τη δομή του υδατικού ισοζυγίου, τις ανάγκες επαναχρησιμοποίησης ύδατος και τις υφιστάμενες υποδομές επεξεργασίας λυμάτων.

Η Ελλάδα αντιμετωπίζει έντονο υδατικό στρες σε πολλές περιοχές, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, γεγονός που καθιστά την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων στρατηγική προτεραιότητα. Η ποιότητα του ανακτημένου ύδατος καθορίζεται πλέον από τον Κανονισμό (ΕΕ) 2020/741, ο οποίος θέτει αυστηρά κριτήρια ιδιαίτερα

για την κατηγορία A (χρήση για άρδευση χωρίς περιορισμούς). Η ενσωμάτωση τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας μπορεί να εξασφαλίσει τη συμμόρφωση με τα κριτήρια αυτά, παρέχοντας ταυτόχρονα πρόσθετη προστασία από μικρορύπους που δεν ρυθμίζονται ακόμη αλλά ενδέχεται να ρυθμιστούν στο μέλλον.

Η υψηλή διαθεσιμότητα ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα (μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας άνω των 2.500) δημιουργεί ευκαιρίες για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος τεχνολογιών υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων εντός των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) μπορεί να καλύψει σημαντικό μέρος της πρόσθετης ενεργειακής ζήτησης. Παράλληλα, τεχνολογίες όπως η Solar Photo-Fenton, που αξιοποιούν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μεσογειακές συνθήκες, παρά τους χωροταξικούς περιορισμούς που επιβάλλει η ανάγκη εκτεταμένων επιφανειών.

Η δομή των ελληνικών ΕΕΛ αποτελεί επίσης σημαντική παράμετρο. Η πλειονότητα των εγκαταστάσεων βασίζεται σε σύστημα ενεργού ιλύος (CAS) ή παραλλαγές αυτού, γεγονός που ευνοεί την ενσωμάτωση τεχνολογιών προσρόφησης (PAC) στις υφιστάμενες δεξαμενές ή την προσθήκη ξεχωριστής βαθμίδας οζονισμού ή φίλτρων GAC. Ωστόσο, οι μικρότερες εγκαταστάσεις σε νησιωτικές ή απομακρυσμένες περιοχές αντιμετωπίζουν πρόσθετες προκλήσεις εφοδιασμού με χημικά αντιδραστήρια και εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο υποστήριξης της λήψης αποφάσεων για την επιλογή των πλέον κατάλληλων τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων στην Ελλάδα. Σε αντίθεση με την αξιολόγηση που βασίζεται αποκλειστικά στην αποδοτικότητα απομάκρυνσης των φαρμακευτικών ενώσεων, η LCA επιτρέπει την ολοκληρωμένη εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κάθε τεχνολογικής επιλογής σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής της, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας, τη χρήση χημικών αντιδραστηρίων, την παραγωγή δευτερογενών αποβλήτων, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006; Wöhler et al., 2022). Η προσέγγιση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία για την Ελλάδα, όπου οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς το μέγεθος, τη δυναμικότητα, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και την ευαισθησία των υδάτινων αποδεκτών. Επιπλέον, η εφαρμογή της νέας Οδηγίας (ΕΕ) 2024/3019 για την επεξεργασία αστικών λυμάτων αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντικές επενδύσεις για την εγκατάσταση τεχνολογιών απομάκρυνσης μικρορύπων. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση της LCA μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην τεκμηριωμένη επιλογή των βέλτιστων τεχνολογικών λύσεων, εξασφαλίζοντας ότι η επίτευξη υψηλής απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων συνοδεύεται από το μικρότερο δυνατό συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και από τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων οικονομικών πόρων (Gros et al., 2018; Andersson & Karlsson, 2022; Boogaard et al., 2025).

5.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ

Η μετάβαση προς ευρύτερες εφαρμογές τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας σε ευρωπαϊκό επίπεδο επιταχύνεται δραστικά εν όψει της αναθεώρησης της Οδηγίας για τα Αστικά Υγρά Απόβλητα (European Commission, 2022). Προκειμένου αυτές οι εφαρμογές να συνάδουν με τη στρατηγική Net Zero, είναι ζωτικής σημασίας η ταυτόχρονη ενεργειακή αναβάθμιση των ΜΕΛ. Η ενσωμάτωση συστημάτων παραγωγής βιοαερίου, η αξιοποίηση φωτοβολταϊκών εντός των εγκαταστάσεων και η βελτιστοποίηση των διεργασιών μέσω Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) για τη δυναμική ρύθμιση των δόσεων χημικών (π.χ. παροχή όζοντος αναλόγως του πραγματικού φορτίου DOC) μπορούν να αμβλύνουν σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αναβάθμισης.

Για τον ελλαδικό χώρο, η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών πρέπει να αξιολογηθεί υπό το πρίσμα της μεσογειακής κλιματικής συνθήκης. Η διαθεσιμότητα ηλιακής ενέργειας καθιστά μεθόδους όπως η Solar Photo-Fenton θεωρητικά ελκυστικές (παρά τους χωροταξικούς περιορισμούς), ενώ η έντονη ανάγκη για άρδευση προσδίδει τεράστια προστιθέμενη αξία στην παραγωγή υψηλής ποιότητας ανακτημένου νερού μέσω προηγμένης επεξεργασίας, προωθώντας ενεργά την κυκλική οικονομία του ύδατος.

Η μελλοντική εφαρμογή τεχνολογιών απομάκρυνσης φαρμακευτικών ενώσεων αναμένεται να επηρεαστεί σημαντικά από την αναθεώρηση της ευρωπαϊκής νομοθεσίας για τα αστικά λύματα και την αυξανόμενη ανάγκη επαναχρησιμοποίησης νερού.

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας στις υφιστάμενες ΕΕΛ αποτελεί ρεαλιστική επιλογή για πολλές ευρωπαϊκές χώρες, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με:

- αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας,
- βελτιστοποίηση ενεργειακής κατανάλωσης,
- ανάπτυξη νέων προσροφητικών υλικών,
- εφαρμογή συστημάτων παρακολούθησης μικρορύπων σε πραγματικό χρόνο.

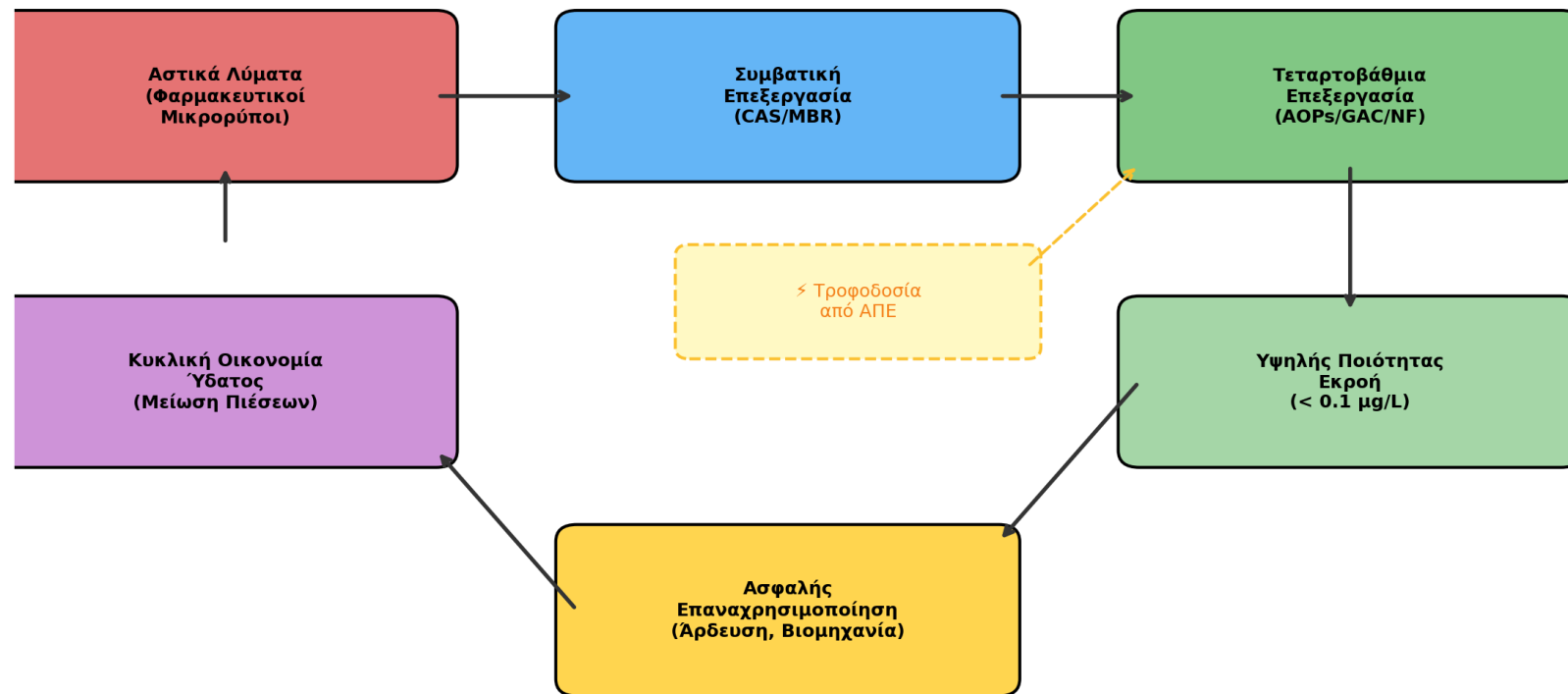
Επιπλέον, η σύνδεση της τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας με την επαναχρησιμοποίηση νερού ενισχύει σημαντικά τη συμβολή των ΕΕΛ στην κυκλική οικονομία.

Σύνδεση τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας με την κυκλική οικονομία ύδατος

Η σχέση μεταξύ τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας και κυκλικής οικονομίας ύδατος δεν είναι μονοδιάστατη. Η αφαίρεση μικρορύπων δεν αποτελεί αυτοσκοπό, αλλά προϋπόθεση για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του επεξεργασμένου ύδατος σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων — γεωργική άρδευση, βιομηχανική χρήση, εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων. Η διασύνδεση αυτή μετατρέπει τα λύματα από πρόβλημα σε πόρο, ενσωματώνοντας πλήρως τις αρχές της κυκλικότητας.

Το Σχήμα 7. που ακολουθεί αποτυπώνει γραφικά τη ροή από τα αστικά λύματα μέχρι την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση, αναδεικνύοντας τον ρόλο της τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας ως συνδετικού κρίκου μεταξύ επεξεργασίας αποβλήτων και κυκλικής οικονομίας. Η τροφοδοσία από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτυπώνεται ως επιπρόσθετη διάσταση βιωσιμότητας.

Σχήμα: Διάγραμμα ροής — Σύνδεση τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας με κυκλική οικονομία ύδατος



Γράφημα 7. Διάγραμμα ροής — Σύνδεση τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας με κυκλική οικονομία ύδατος.

Ποσοτικά οφέλη της επαναχρησιμοποίησης

Η ποσοτικοποίηση των ωφελειών της επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων μέσω LCA αναδεικνύει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Η αποφυγή άντλησης πρωτογενούς ύδατος (από υπόγειες ή επιφανειακές πηγές) μειώνει τον δείκτη υδατικού αποτυπώματος (water footprint) και τις συνδεδεμένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Σε μεσογειακές περιοχές με υψηλό υδατικό στρες, η αποφυγή αφαλάτωσης (μια εξαιρετικά ενεργοβόρος εναλλακτική) ενισχύει ακόμη περισσότερο το περιβαλλοντικό ισοζύγιο υπέρ της τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας.

Ωστόσο, η αξιολόγηση μέσω LCA πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τους κινδύνους: η μακροχρόνια εφαρμογή νερού που περιέχει μικρές συγκεντρώσεις φαρμακευτικών ενώσεων στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση στους εδαφικούς πόρους ή στη μεταφορά στα υπόγεια ύδατα. Η ισορροπία μεταξύ ωφελειών και κινδύνων πρέπει να αξιολογείται σε κάθε συγκεκριμένη περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του εδάφους, τις κλιματικές συνθήκες και τις καλλιέργειες.

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τα πιθανά σενάρια εφαρμογής για τον ελληνικό χώρο, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές ιδιαιτερότητες.

Πίνακας 10. Σενάρια εφαρμογής τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας για τον ελληνικό χώρο

Σενάριο	Τύπος ΕΕΛ	Τεχνολογία	Σκοπός	Εκτίμηση κόστους
Μεγάλες αστικές ΕΕΛ (>100.000 ι.π.)	CAS/MBR	Οζονισμός + BAC	Προστασία ποταμών	Υψηλό CAPEX, μέτριο OPEX
Μεσαίες ΕΕΛ (10.000–100.000 ι.π.)	CAS	PAC ή GAC	Συμμόρφωση ΕΕ	Μέτριο CAPEX, μέτριο OPEX
Τουριστικές περιοχές	CAS/SBR	PAC	Παράκτια ύδατα	Χαμηλό CAPEX, μεταβλητό OPEX
Νησιωτικές ΕΕΛ (<10.000 ι.π.)	Φυσικά σ/τα	Solar Photo-Fenton	Επαναχρησιμ.	Μέτριο CAPEX, χαμηλό OPEX

Αγροτικές περιοχές	Λιμνοδεξαμενές	GAC + ΦΒ	Ασφαλής άρδευση	Μέτριο CAPEX, χαμηλό OPEX
--------------------	----------------	----------	-----------------	---------------------------

5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΞΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Η πολυπλοκότητα του ζητήματος επιτάσσει μια στροφή της πολιτικής από τις λύσεις "end-of-pipe" (στο τέλος του σωλήνα) σε μια πιο προληπτική προσέγγιση (source control). Οι ερευνητικές προσπάθειες και οι πολιτικές αποφάσεις πρέπει να κινηθούν συνεργατικά, όπως υποδεικνύεται και από διεθνείς οργανισμούς (OECD, 2019). Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής πρέπει να εξελιχθεί από ένα στατικό εργαλείο σε ένα δυναμικό μοντέλο που θα λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές ημερήσιες διακυμάνσεις των ΜΕΛ και την εξέλιξη του ενεργειακού μίγματος στο βάθος εικοσαετίας.

Πίνακας 11. Σύνοψη προτάσεων προς ρυθμιστικές αρχές, διαχειριστές και ερευνητική κοινότητα

Αξονας	Προτεινόμενες Δράσεις
Χάραξη Πολιτικής	- Εφαρμογή της αρχής της Διευρυμένης Ευθύνης Παραγωγού (EPR) στη φαρμακοβιομηχανία για τη χρηματοδότηση των υποδομών. - Υποχρεωτική ένταξη της LCA στις μελέτες σκοπιμότητας νέων ΜΕΛ.
Τεχνική Εφαρμογή	- Αποκεντρωμένη επεξεργασία (pre-treatment) νοσοκομειακών λυμάτων πριν την εισροή τους στο αστικό δίκτυο. - Συνδυασμός τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας με συστήματα ΑΠΕ.
Μελλοντική Έρευνα	- Βελτίωση των μοντέλων LCIA για την ακριβέστερη ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων τοξικότητας επιμέρους φαρμάκων. - Ανάπτυξη νέων προσροφητικών (π.χ. biochar) από ανανεώσιμα υπολείμματα.

Πηγή: European Commission (2024), OECD (2019), WHO (2023).

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά ερευνητικά κενά σχετικά με:

- την τοξικότητα των προϊόντων μετασχηματισμού,

- τη συμπεριφορά νέων φαρμακευτικών ενώσεων,
- τη μακροχρόνια σταθερότητα των υβριδικών συστημάτων,
- καθώς και την τυποποίηση των μεθοδολογιών LCA.

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη τεχνολογιών χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης και στην αξιοποίηση υλικών χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η ανάγκη δημιουργίας εναρμονισμένων ευρωπαϊκών πρωτοκόλλων για την αξιολόγηση μικρορύπων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεχνολογιών επεξεργασίας.

Σε επίπεδο πολιτικής, η εφαρμογή της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» αναμένεται να αποτελέσει βασικό εργαλείο χρηματοδότησης των απαραίτητων αναβαθμίσεων των ΕΕΛ. Η συνεργασία μεταξύ δημόσιων αρχών, ερευνητικών φορέων και βιομηχανίας θεωρείται απαραίτητη για τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο μοντέλο διαχείρισης υδάτων.

Συμπερασματικά, η προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων και της δημόσιας υγείας από τις φαρμακευτικές ενώσεις απαιτεί τεχνολογικές υπερβάσεις που το σύγχρονο μηχανικό και περιβαλλοντικό δυναμικό είναι σε θέση να παρέχει. Ωστόσο, η υιοθέτηση αυτών των προηγμένων διεργασιών οφείλει να διέπεται από τις αρχές της βιωσιμότητας και της κυκλικότητας. Η ενσωμάτωση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στη διαδικασία λήψης αποφάσεων διασφαλίζει ότι η προσπάθεια εξυγίανσης των υδάτινων πόρων δεν θα επιτευχθεί εις βάρος του ευρύτερου φυσικού περιβάλλοντος και του κλίματος, αλλά θα αποτελέσει έναν ουσιαστικό πυλώνα της συνολικής περιβαλλοντικής μετάβασης.

Εξειδικευμένες κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ανέδειξε σημαντικά ερευνητικά κενά που πρέπει να καλυφθούν προκειμένου να τεκμηριωθεί πλήρως η βιωσιμότητα των τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συγκεκριμένες προτάσεις ερευνητικών κατευθύνσεων, οργανωμένες θεματικά.

Στον τομέα της μεθοδολογίας LCA, η κύρια ανάγκη αφορά την τυποποίηση των ορίων του συστήματος (system boundaries) και των λειτουργικών μονάδων. Η ανομοιογένεια που εντοπίστηκε στις δημοσιευμένες μελέτες — μεταξύ λειτουργικών μονάδων εκφρασμένων σε κυβικά μέτρα, ισοδύναμους κατοίκους ή γραμμάρια ρύπου — δυσχεραίνει σημαντικά τις συγκρίσεις και μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα. Η ανάπτυξη ενός ενιαίου ευρωπαϊκού πρωτοκόλλου LCA για τεχνολογίες επεξεργασίας μικρορύπων, ανάλογου με τις κατευθυντήριες οδηγίες του JRC (Joint Research Centre) για άλλους τομείς, αποτελεί αναγκαιότητα.

Στον τομέα της τοξικολογίας, η κατανόηση της μακροχρόνιας δράσης των παραπροϊόντων μετασχηματισμού (TPs) παραμένει ελλιπής. Η πλειονότητα των μελετών LCA εστιάζει στη μείωση της συγκέντρωσης των μητρικών ενώσεων, χωρίς να λαμβάνει πλήρως υπόψη ότι τα TPs μπορεί να εμφανίζουν ίδια ή και μεγαλύτερη

τοξικότητα. Η ενσωμάτωση τοξικολογικών δεδομένων μίγματος (mixture toxicity) στα μοντέλα LCIA αποτελεί κρίσιμη ερευνητική πρόκληση.

Αναφορικά με τα προσροφητικά υλικά, η έρευνα κατευθύνεται ολοένα περισσότερο προς εναλλακτικές πρώτες ύλες χαμηλότερου περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Τα βιοεξανθρακωμένα υλικά (biochar), που παράγονται από γεωργικά υπολείμματα ή λάσπη βιολογικού καθαρισμού μέσω πυρόλυσης, αποτελούν μια ελπιδοφόρα εναλλακτική. Η ιδέα της αξιοποίησης αποβλήτων για την παραγωγή προσροφητικών υλικών ενσωματώνει πλήρως τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, καθώς μετατρέπει ένα πρόβλημα διαχείρισης σε πρώτη ύλη υψηλής αξίας.

Στον τομέα της ψηφιοποίησης, η εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (machine learning) για τη δυναμική βελτιστοποίηση της λειτουργίας τεταρτοβάθμιων βαθμίδων αναμένεται να συμβάλει σημαντικά στη μείωση τόσο του ενεργειακού κόστους όσο και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η πρόβλεψη της ποιότητας εισερχόμενου λύματος σε πραγματικό χρόνο και η ανάλογη προσαρμογή της δόσης όζοντος ή PAC μπορεί να μειώσει την κατανάλωση χημικών κατά 15 έως 25 τοις εκατό, βάσει πρώιμων ερευνητικών αποτελεσμάτων.

Οδικός χάρτης για τη μετάβαση σε βιώσιμη τεταρτοβάθμια επεξεργασία

Η μετάβαση από τη θεωρητική αξιολόγηση στην πρακτική εφαρμογή τεχνολογιών τεταρτοβάθμιας επεξεργασίας απαιτεί έναν συντονισμένο οδικό χάρτη που να καλύπτει τρία αλληλένδετα πεδία: τη θεσμική-κανονιστική ρύθμιση, την τεχνολογική ανάπτυξη και τη χρηματοδότηση. Η ανάλυση των ευρωπαϊκών εμπειριών αναδεικνύει ότι η επιτυχής εφαρμογή προϋποθέτει τη σύγκλιση και των τριών πεδίων.

Σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα (2025 έως 2030), η προτεραιότητα αφορά τη μεταφορά της αναθεωρημένης Οδηγίας για τα Αστικά Υγρά Απόβλητα στο εθνικό δίκαιο και τον προσδιορισμό των εγκαταστάσεων που θα αναβαθμιστούν κατά προτεραιότητα. Παράλληλα, πρέπει να ολοκληρωθούν μελέτες LCA σε πιλοτική κλίμακα που να λαμβάνουν υπόψη τις τοπικές συνθήκες (ενεργειακό μείγμα, κλίμα, τύπο ΕΕΛ). Η εφαρμογή της αρχής της Διευρυμένης Ευθύνης Παραγωγού (Extended Producer Responsibility, EPR) στον φαρμακευτικό τομέα αποτελεί βασικό εργαλείο χρηματοδότησης, όπως προβλέπεται ήδη στο σχέδιο αναθεώρησης της Οδηγίας.

Σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα (2030 έως 2040), η υλοποίηση των αναβαθμίσεων πρέπει να συνοδεύεται από ενεργειακή αυτάρκεια των εγκαταστάσεων μέσω φωτοβολταϊκών, βιοαερίου και ενεργειακής βελτιστοποίησης. Η σταδιακή ενσωμάτωση συστημάτων παρακολούθησης μικρορύπων σε πραγματικό χρόνο (online monitoring) θα επιτρέψει τη δυναμική ρύθμιση της λειτουργίας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα (2040 και μετά), η πλήρης ενσωμάτωση της κυκλικής οικονομίας ύδατος αναμένεται να μετασχηματίσει τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων από κέντρα κόστους σε κέντρα ανάκτησης πόρων — νερού, ενέργειας, θρεπτικών ουσιών. Η LCA θα πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο εργαλείο σε κάθε στάδιο του σχεδιασμού και της λήψης αποφάσεων, διασφαλίζοντας ότι η περιβαλλοντική μετάβαση θα είναι πραγματικά βιώσιμη και όχι απλώς μια μεταφορά προβλημάτων μεταξύ περιβαλλοντικών μέσων.

- Al Miad, A. A., et al. (2024). *Metal oxide-based photocatalysts for the efficient removal of organic pollutants (including pharmaceuticals): A review*. **Catalysts**, 14.
- Amaya-Santos, G., Boelee, N., Paulillo, A., & Lettieri, P. (2025). *Life cycle assessment and life cycle costing of full-scale ozonation for micropollutants removal from wastewater: Case study in the Netherlands*. **Science of the Total Environment**, 912.
- Andersson, S., & Karlsson, M. (2022). *A comparative life cycle assessment of advanced processes for the removal of pharmaceutical residues in wastewater*. Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- Aziz, K. H. H. (2025). *Advanced oxidation processes as efficient treatment approaches for pharmaceutical residues: Critical evaluation of recent AOP methods*. **Materials Advances**, 6.
- Boogaard, J., et al. (2025). *Life cycle assessment and life cycle costing of full-scale ozonation for micropollutants removal from wastewater: Case study in the Netherlands*. **Science of the Total Environment**, 912.
- Corominas, L., Foley, J., Guest, J.S., Hospido, A., Larsen, H.F., Morera, S. and Shaw, A. (2013) 'Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art', *Water Research*, 47(15), pp. 5480–5492.
- Foteinis, S., Monteagudo, J. M., Durán, A., et al. (2018). *Environmental sustainability of the solar photo-Fenton process for wastewater treatment and pharmaceuticals mineralization at semi-industrial scale*. **Science of the Total Environment**, 612, 605–612.
- Gros, M., Rodríguez-Mozaz, S., & Barceló, D. (2018). *Life cycle environmental impacts of advanced wastewater treatment techniques for removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs)*. **Journal of Cleaner Production**, 171, 885–896.
- Hansen, K. M. S., Spiliotopoulou, A., Chhetri, R. K., et al. (2016). *Ozonation for source treatment of pharmaceuticals in hospital wastewater: Ozone lifetime and required ozone dose*. **Chemical Engineering Journal**, 290, 507–514.
- Igos, E. (2018). *Life cycle assessment of wastewater treatment solutions: How to consider pollutants removal benefits?* PhD Thesis Summary, University of Trier, Germany.
- Igos, E., Benetto, E., Venditti, S., Kohler, C. and Cornelissen, A. (2021) 'Life cycle assessment of powder and micro-grain activated carbon in a fluidized bed to remove micropollutants from wastewater and their comparison with ozonation', *Journal of Cleaner Production*, 287, 125561.
- Ikehata, K., Jodeiri Naghashkar, N., et al. (2006). *Degradation of aqueous pharmaceuticals by ozonation and advanced oxidation processes: A review*. **Ozone: Science & Engineering**, 28(6), 353–414.
- Ismail, O. (2025). *Comparative experimental evaluation of four advanced oxidation processes (UV, UV/H₂O₂, Photo-Fenton, Photo-Fenton-like)*. **Scientific Reports**, 15.
- Kabir, L. (2024). *Photocatalytic removal of pharmaceutical antibiotics using novel MXene-based materials: Review and performance metrics*. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, 22.

- Kanakaraju, D., Glass, B. D., & Oelgemöller, M. (2014). *Titanium dioxide photocatalysis for pharmaceutical wastewater treatment*. **Environmental Chemistry Letters**, 12, 27–47.
- Li, Y., Zhang, S., Zhang, W., & Xiong, W. (2019). *Life cycle assessment of advanced wastewater treatment processes involving 126 pharmaceuticals and personal care products*. **Journal of Environmental Management**, 238, 442–450.
- Licona, K. P. M., Geaquinto, L. R. O., Nicolini, J. V., et al. (2018). *Assessing the potential of nanofiltration and reverse osmosis for removal of toxic pharmaceuticals from water*. **Journal of Water Process Engineering**, 25, 195–204.
- LIFE PHARMADEGRADE Project. (2020). *Treatment upgrades in Switzerland, Germany and the Netherlands: Overview of 4th level treatment processes*. EU LIFE Programme.
- OECD. (2019). *Pharmaceutical residues in freshwater: Hazards and policy responses*. OECD Studies on Water, Paris.
- Radjenović, J., Petrović, M., Ventura, F., & Barceló, D. (2008). *Rejection of pharmaceuticals in nanofiltration and reverse osmosis membrane drinking water treatment*. **Water Research**, 42(14), 3601–3610.
- Rahman, S.M., Eckelman, M.J., Onnis-Hayden, A. and Gu, A.Z. (2018) 'Comparative Life Cycle Assessment of Advanced Wastewater Treatment Processes for Removal of Chemicals of Emerging Concern', *Environmental Science & Technology*, 52(13), pp. 7638–7648.
- Remy, C., & Jekel, M. (2012). *Is it better to remove pharmaceuticals in decentralized or conventional wastewater treatment plants? A life cycle assessment comparison*. **Water Science & Technology**, 66(5), 1137–1144.
- Renou, S., Thomas, J.S., Aoustin, E. and Pons, M.N. (2008) 'Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA', *Journal of Cleaner Production*, 16(10), pp. 1098–1105.
- Rodríguez-Chueca, J., et al. (2024). *Life cycle assessment of heterogeneous versus homogeneous Fenton processes for pharmaceutical wastewater treatment*. **Science of the Total Environment**, 907.
- Rosal, R., Rodríguez, A., Perdígón-Melón, J. A., et al. (2010). *Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation*. **Water Research**, 44(2), 578–588.
- Rybaczewska-Błazejowska, M. (2024) 'Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29, pp. 1327–1346.
- Sirtori, C., Zapata, A., Oller, I., Gernjak, W., & Agüera, A. (2009). *Decontamination of industrial pharmaceutical wastewater by combining solar photo-Fenton and biological treatment*. **Water Research**, 43(3), 661–668.
- Tarpani, R.R.Z. and Azapagic, A. (2018) 'Life cycle environmental impacts of advanced wastewater treatment techniques for removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs)', *Journal of Environmental Management*, 215, pp. 258–272.
- Tsangas, M. (2023). *Life cycle assessment of municipal wastewater treatment: Comprehensive framework and impact categories*. **Journal of Cleaner Production**, 384.

- VITO. (2025). *Cleaner waterways through ozonation and granular activated carbon: Pilot implementation in the Benelux region*. Flemish Institute for Technological Research.
- Witteveen+Bos. (2021). *Successful pilot to sustainably remove pharmaceutical residues from wastewater (Lelystad, Netherlands)*.
- Wöhler, M., Baresel, C., et al. (2022). *Adaptable process design as a key for sustainability upgrades in wastewater treatment*. **Sustainability**, 14(18), 11605.
- Yang, H., Li, G., An, T., Gao, Y., & Fu, J. (2010). *Photocatalytic degradation kinetics and mechanism of pharmaceuticals in TiO₂ suspensions*. **Catalysis Today**, 153(3–4), 200–207.

7 ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- <https://www.enve-lab.eu/wp-content/uploads/2015/03/Lecture-7.pdf>
- <https://mesogeos.gr/%CE%B7-%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CF%83-%CE%BC%CE%B5%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%83-m-b-r/>
- <https://waterfiltersystem.en.made-in-china.com/product/MaPYTLJzofkG/China-Water-Filter-Membrane-Bio-Filter-Mbr.html>
- <https://kenkidryer.com/2020/03/16/extended-aeration-process/>
- <https://enerchem.gr/WaterSystems/Ozonation/Ozonation.php>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1572665725006447>
- <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/484c2eae-2b81-49f3-9be3-c6e297a52eeb/content>