



**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ο ρόλος των μικροοργανισμών στην επεξεργασία λυμάτων σε
τεχνητούς υγροτόπους**

ΖΗΝΟΒΙΑ ΑΚΡΙΤΙΔΟΥ

ΑΕΜ: 160585

Επιβλέπων Καθηγητής: Κόκκινος Πέτρος
Β' Επιβλέπων Καθηγητής : Μαναριώτης Ιωάννης

Πάτρα, Μάϊος 2025

© ΕΑΠ, 2025 Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή/της φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο/η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο/Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή , Κόκκινο Πέτρο για την άμεση ανταπόκριση σε κάθε απορία που προέκυπτε , την καθοδήγηση και τις εύστοχες παρατηρήσεις και διορθώσεις καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της γραπτής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον σύντροφο μου, Σάββα, για την στήριξη και ενθάρρυνση που μου έδωσε σε όλο το χρονικό διάστημα φοίτησης μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα Διαχείριση Αποβλήτων στο Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα Εικόνων	4
Περιεχόμενα πινάκων	5
Περίληψη	6
Abstract	7
1.Εισαγωγή	8
2.Τεχνητοί Υγρότοποι Ως Μέθοδος Επεξεργασίας Υδάτων	9
3.Τεχνητοί Υγρότοποι Ως Πράσινη Υποδομή	12
4.Ιστορική Αναδρομή στην Ανάπτυξη & Εξέλιξη των Τεχνητών Υγροτόπων.....	15
5.Τύποι Τεχνητών Υγροτόπων	18
5.1.Τεχνητοί Υγρότοποι Επιφανειακής Ροής	18
5.2.Τεχνητοί Υγρότοποι Υποεπιφανειακής Ροής	19
5.2.1.Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής.....	19
5.2.2 Κάθετης Υποεπιφανειακής Ροής.....	21
5.3.Υβριδικοί Τεχνητοί Υγρότοποι.....	24
5.4.Επιπλέοντες Τεχνητοί Υγρότοποι.....	26
5.5.Σύγχρονες Τάσεις στην Τεχνολογία Τεχνητών Υγροτόπων	28
6.Οι Μικροοργανισμοί στην επεξεργασία λυμάτων στους ΤΥ	30
6.1.Μοριακές Τεχνικές Ανάλυσης Μικροβιακής Ποικιλότητας	32
6.2.Ποικιλομορφία Μικροβιακών Κοινοτήτων & Παράγοντες Επιρροής	35
7.Απομάκρυνση του Αζώτου	43
7.1.Αμμωνιοποίηση	45
7.2.Νιτροποίηση	46
7.3.Comammox.....	48
7.4.Απονιτροποίηση.....	49
Ετερότροφοι απονιτροποιητές	50
Αυτότροφοι απονιτροποιητές	52
7.5.Ανομοιογενής Αναγωγή Νιτρικών Σε Αμμώνιο (DNRA)	53
7.6.Anammox.....	55
7.7.Απονιτροποιητική αναερόβια οξείδωση μεθανίου (DAMO)	57
7.8.Ετερότροφα νιτροποιητικά βακτήρια και αερόβιοι απονιτροποιητές (HN-AD)	58
8.Απομάκρυνση Φωσφόρου	60
8.1.Οργανισμοί συσσώρευσης φωσφόρου PAO	63

8.2. Αναερόβιοι Απονιτροποιητές PAO (D-PAO).....	65
8.2. Αερόβιοι Απονιτροποιητές PAO AD-PAO.....	67
8.3.S-PAO	68
8.4.Βακτήρια διαλυτοποίησης φωσφόρου (PSB)	69
9.Απομάκρυνση Βαρέων Μετάλλων	71
9.1.Βιοπροσρόφηση Βαρέων Μετάλλων.....	73
9.2.Βιοσυσώρευση βαρέων μετάλλων.....	74
9.3. Κατακρήμνιση βαρέων μετάλλων από θειοαναγωγικά βακτήρια	76
9.4. Μικροβιακές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις	78
9.5.Αλληλεπιδράσεις μικροοργανισμών-φυτών	79
10.Απομάκρυνση Αντιβιοτικών- Γονιδίων Ανθεκτικών στα Αντιβιοτικά (Args)	81
10.1.Βιοπροσρόφηση	85
10.2. Βιοσυσώρευση.....	86
10.3.Βιοαποικοδόμηση	87
10.4.Παράγοντες που επηρεάζουν την βιοαποικοδόμηση των αντιβιοτικών	90
10.5. Ανθεκτικά Βακτήρια- Γονίδια ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά	92
10. Μικροβιακή Αποικοδόμηση Οργανικής Ύλης & Μεθανογένεση	95
10.1.Μεθανογένεση	97
10.2.Οξείδωση του μεθανίου	98
11.Συμπεράσματα	100
Βιβλιογραφία	102

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Ένα παράδειγμα Sponge City.....	15
Εικόνα 2. Ιστορική αναδρομή εξέλιξης των τεχνητών υγροτόπων.	17
Εικόνα 3.ΤΥ Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής	21
Εικόνα 4. ΤΥ Κάθετης Υποεπιφανειακής Ροής	24
Εικόνα 5. Επιπλέον ΤΥ	27
Εικόνα 6. Μοριακές τεχνικές.....	34
Εικόνα 7.Παράγοντες που επηρεάζουν την ποικιλομορφία των μικροβιακών κοινοτήτων στους ΤΥ.....	42
Εικόνα 8. Κύκλος του Αζώτου με τη συμμετοχή μικροοργανισμών στην επεξεργασία λυμάτων	45
Εικόνα 9. Νιτροποίηση Τα στάδια της οξείδωσης της αμμωνίας και των νιτρωδών. .	48

Εικόνα 10. Ο ρόλος της απονιτροποίησης στον κύκλο του αζώτου.	51
Εικόνα 11. Οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν και οι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία DNRA στους ΤΥ.....	54
Εικόνα 12. Μεταβολικές οδοί DAMO μικροοργανισμών	57
Εικόνα 13. Μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στον κύκλο του Αζώτου.	60
Εικόνα 14. Μεταβολικές οδοί των ΡΑΟ υπό αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες.	64
Εικόνα 15. Μηχανισμοί απομάκρυνσης φωσφόρου από PSB βακτήρια σε συνεργασία φυτών τεχνητών υγροτόπων.	70
Εικόνα 16. Μηχανισμοί ενισχυμένης απομάκρυνσης των ΒΜ από μικροοργανισμούς σε ΤΥ.....	76
Εικόνα 17. Κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων και μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στους τεχνητούς υγροτόπους.	81
Εικόνα 18. Μηχανισμός δράσης του βακτηριακού μεταβολισμού των αντιβιοτικών.	89
Εικόνα 19. Οι κύριοι μηχανισμοί οριζόντιας μεταφοράς γονιδίων στα βακτήρια.....	93
Εικόνα 20. Διεργασίες παραγωγής, μεταφοράς και οξείδωσης CH ₄ σε ΤΥ	100

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1..Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Τύπων Τεχνητών Υγροτόπων	25
Πίνακας 2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μοριακών Τεχνικών Ανάλυσης Μικροβιακών Κοινοτήτων.....	34
Πίνακας 3. Παράμετροι που επηρεάζουν την δραστηριότητα και ποικιλομορφία των μικροβιακών κοινοτήτων	38
Πίνακας 4. Μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στην απομάκρυνση φωσφόρου στους ΤΥ	71
Πίνακας 5. Αντιπροσωπευτικά είδη αντιβιοτικών σε λύματα	85

Περίληψη

Οι τεχνητοί υγροτόποι (ΤΥ) είναι από τη φύση εμπνευσμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων που αξιοποιούν τη συνεργασία μικροοργανισμών, φυτών και υποστρωμάτων για την απομάκρυνση ρύπων και την αποκατάσταση υδάτινων οικοσυστημάτων. Αποτελούν μια οικονομική, αποτελεσματική και περιβαλλοντικά φιλική λύση για την επεξεργασία υδάτων και ως πράσινη υποδομή συμβάλλουν στη βιοποικιλότητα, τη διατήρηση του υδρολογικού κύκλου αλλά και για τη διαχείριση των όμβριων υδάτων, αποτελώντας βασικό στοιχείο των "Πόλεων Σφουγγαριών". Αν και εμφανίστηκαν στις αρχές του 20ού αιώνα, ο 21^ο αιώνας σηματοδοτεί σημαντική πρόοδο μέσω υβριδικών σχεδιασμών, αερισμού, βιοενίσχυσης και έξυπνων τεχνολογιών. Οι μικροβιακές κοινότητες είναι ζωτικής σημασίας για την απομάκρυνση ρύπων και την επεξεργασία λυμάτων των ΤΥ. Η έρευνα στους ΤΥ έχει εξελιχθεί με τη χρήση προηγμένων μοριακών τεχνικών και τεχνολογιών -omics, που προσφέρουν βαθύτερη κατανόηση της μικροβιακής ποικιλομορφίας και των λειτουργιών τους. Οι μικροοργανισμοί στους ΤΥ δρουν σε διαφορετικές οξειδοαναγωγικές ζώνες με κυρίαρχα τα *Proteobacteria* και με σημαντική συμμετοχή των *Bacteroidetes*, *Firmicutes* και *Actinobacteria*. Αυτή η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στους λειτουργικούς μικροοργανισμούς των υγροτόπων επεξεργασίας λυμάτων που συμμετέχοντας στο κύκλο αζώτου, φωσφόρου, θείου και επιδρώντας με βαρέα μέταλλα, αντιβιοτικά και γονίδια ανθεκτικά σε αντιβιοτικά, απομακρύνουν τους αντίστοιχους ρύπους με διεργασίες όπως κατάλυση χημικών αντιδράσεων, βιοαποικοδόμηση, βιοπροσρόφηση κ.λπ. αλλά και με αλληλεπιδράσεις με τα φυτά των υγροτόπων. Επίσης, καταδεικνύονται οι παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το οξυγόνο, το υπόστρωμα, όπως και τεχνικά χαρακτηριστικά των ΤΥ που επηρεάζουν τη σύνθεση και τη λειτουργία των μικροβιακών κοινοτήτων, καθορίζοντας την απόδοση των συστημάτων αυτών. Τέλος, γίνεται αναφορά στην συμβολή των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω της μεθανογένεσης των βακτηρίων των ΤΥ, αλλά και την μείωση αυτού του φαινομένου με την οξείδωση του μεθανίου μέσω μεθανοτροφικών βακτηρίων. Η εργασία αυτή με μελέτη αρθρογραφίας κατά 80% των τελευταίων 5 ετών, είναι μια προσπάθεια για μια σύγχρονη επισκόπηση της ποικιλομορφίας, του ρόλου και της εμπλοκής των μικροβιακών κοινοτήτων στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων στους τεχνητούς υγροτόπους.

Λέξεις – Κλειδιά : Τεχνητοί Υγρότοποι, Μικροβιακές κοινότητες, Απομάκρυνση N, P, BM, Αντιβιοτικών, Μεθανογένεση -Οξείδωση Μεθανίου

Abstract

Constructed wetlands (CWs) are naturally inspired wastewater treatment systems that utilize the collaboration of microorganisms, plants and substrates for the removal of pollutants and the restoration of aquatic ecosystems. They are an economical, efficient and environmentally friendly solution for water treatment and as a green infrastructure they contribute to biodiversity, the preservation of the hydrological cycle and for the management of rainwater, constituting a key element of the "Sponge Cities". Although they emerged in the early 20th century, the 21st century marks significant progress through hybrid designs, ventilation, bioamplification, and smart technologies. Microbial communities are crucial for the removal of pollutants and wastewater treatment of CW. Research in CWs has evolved with the use of advanced molecular techniques and technologies -omics, which offer a deeper understanding of microbial diversity and their functions. Microorganisms in CWs act in different redox zones with *Proteobacteria* predominating and the significant participation of *Bacteroidetes*, *Firmicutes* and *Actinobacteria*.

This dissertation focuses on the functional microorganisms of wastewater treatment wetlands that by participating in the nitrogen, phosphorus, sulphur cycle and acting on heavy metals, antibiotics and antibiotic-resistant genes, remove the corresponding pollutants by processes such as chemical reaction breakdown, biodegradation, biosorption, etc. but also with interactions with wetland plants. It also demonstrates the factors such as temperature, oxygen, substrate, as well as technical characteristics of CW that affect the composition and function of microbial communities, determining the performance of these systems. Finally, reference is made to the contribution of greenhouse gas emissions through the methanogenesis of CW bacteria, but also to the reduction of this phenomenon by the oxidation of methane through methanotrophic bacteria. This paper with a study of 80% of the articles of the last 5 years is an attempt for a contemporary overview of the diversity, role and involvement of microbial communities in the treatment of wastewater in constructed wetlands.

Key words : Constructed wetlands, Microbial communities, Removal of N, P, HM, Antibiotics, Methanogenesis – Methane Oxidation

1.Εισαγωγή

Οι τεχνητοί υγροτόποι είναι μια προσομοίωση της δομής και λειτουργίας των φυσικών υγροτόπων με ελεγχόμενες συνθήκες όπου τα λύματα εκχύνονται σε ένα οικοσύστημα αποτελούμενο από το υπόστρωμα (έδαφος, αδρανή υλικά), τη βλάστηση και τους μικροοργανισμούς. Τα συστήματα των τεχνητών υγροτόπων ανήκουν στις οικολογικές και βιώσιμες τεχνικές, καθώς απαιτούν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, περιορισμένο κόστος λειτουργίας και συντήρησης και προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, όπως δημιουργία οικοτόπων προς όφελος της βιοποικιλότητας για την άγρια ζωή, έλεγχο πλημμυρών, καθώς και ενίσχυση της αισθητικής του τοπίου. Αποτελούν αξιόλογες εναλλακτικές λύσεις έναντι των παραδοσιακών μεθόδων επεξεργασίας, ιδιαίτερα για μικρές κοινότητες, απομακρυσμένες ή αποκεντρωμένες περιοχές.

Στους τεχνητούς υγροτόπους προωθούνται οι βιογεωχημικές διεργασίες για την απομάκρυνση διαφόρων ρύπων και τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων. Οι πρωτογενείς μικροοργανισμοί που εμπλέκονται στα συστήματα υγροτόπων περιλαμβάνουν κυρίως βακτήρια αλλά και πρωτόζωα, ιούς, μύκητες και φύκη. Αυτοί οι μικροοργανισμοί είναι ζωτικής σημασίας για τη διάσπαση ενός ευρέος φάσματος ρύπων στα λύματα σε αδιάλυτες ή μη τοξικές ουσίες. Οι μικροβιακές κοινότητες αναπτύσσονται συνήθως ως βιοφίλμ προσκολλημένα σε διάφορες επιφάνειες, όπως το υπόστρωμα ή τις ρίζες φυτών. Αυτά τα βιοφίλμ, που σχηματίζονται μέσω αλληλεπιδράσεων με τα λύματα, διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην αποικοδόμηση των ρύπων και στην ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας των τεχνητών υγροτόπων. Πολυάριθμες μελέτες, τα τελευταία 10 χρόνια, έχουν διερευνήσει και χαρακτηρίσει μικροβιακές κοινότητες τόσο σε πλήρους κλίμακας όσο και σε εργαστηριακής κλίμακας τεχνητούς υγροτόπους υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Η εξέλιξη στην μοριακή βιολογία έχει βοηθήσει στην κατανόηση των βιολογικών διεργασιών που συμβαίνουν εντός των τεχνητών υγροτόπων. Οι νεότερες πληροφορίες σχετικά με αυτές τις μικροβιακές δομές και την μικροβιακή δραστηριότητα κατά την διάσπαση των ρύπων συνέβαλλαν ώστε να επιτευχθούν προσεκτικές βελτιώσεις στο

σχεδιασμό των συστημάτων των τεχνητών υγροτόπων με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης και της επιλεκτικής απομάκρυνσης ρύπων από τα λύματα.

Παράγοντες όπως το pH, το διαλυμένο οξυγόνο (DO) και η θερμοκρασία αποτελούν βασικά κριτήρια ελέγχου, ενώ επιπλέον παράμετροι, όπως οι υδραυλικοί ρυθμοί φόρτισης (HLR), ο χρόνος υδραυλικής παραμονής (HRT), η ποικιλία των μακροφύτων, το είδος των υποστρωμάτων και το βάθος του νερού, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

2. Τεχνητοί Υγρότοποι Ως Μέθοδος Επεξεργασίας Υδάτων

Οι τεχνητοί υγρότοποι που έχουν σχεδιαστεί για την επεξεργασία λυμάτων, είναι συστήματα που έχουν κατασκευαστεί για να αξιοποιούν τις φυσικές διεργασίες των φυσικών υγροτόπων που εμπλέκονται στη μετατροπή και την απομάκρυνση ρύπων, αλλά υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Οι τεχνητοί υγρότοποι σχεδιάζονται με σκοπό το μεγαλύτερο βαθμό ελέγχου λειτουργίας σε σχέση με τα φυσικά συστήματα, ώστε να προσδιορίζονται σαφώς διάφοροι παράμετροι κατά την κατασκευή τους, όπως η καθορισμένη σύνθεση υποστρωμάτων, ο τύπος βλάστησης, ο τύπος ροής των υδάτων. Επιπλέον, κατά την κατασκευή των τεχνητών υγροτόπων προστίθενται αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τους φυσικούς υγροτόπους, όπως η επιλογή της τοποθεσίας, η ευελιξία στο μέγεθος τους και στον αριθμό τους, ο έλεγχος των υδραυλικών οδών και του χρόνου κατακράτησης, η επιλογή των φυτών, η ελεγχόμενη παροχή οξυγόνου σε διαφορετικά υποστρώματα, ελεγχόμενες συνθήκες για συνέργεια μικροοργανισμών στην αποδόμηση θρεπτικών συστατικών. (Vymazal, 2022)

Οι τεχνητοί υγρότοποι είναι μια αποτελεσματική, αποδοτική και φιλική στο περιβάλλον λύση για την επεξεργασία λυμάτων. Τα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων (TY) σε σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, είναι το χαμηλότερο κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης. Πιο συγκεκριμένα, η αρχική επένδυση έχει χαμηλότερο κόστος, γιατί υπάρχει ελάχιστη χρήση ακριβών υλικών (π.χ. σκυρόδεμα, χάλυβας) και εργατικό κόστος. Επιπρόσθετα το λειτουργικό κόστος είναι χαμηλό γιατί από τη φύση του έργου έχει ελάχιστες ενεργειακές ανάγκες και όταν υπάρχουν, υπάρχει δυνατότητα να καλυφθούν από ανανεώσιμες πηγές (ηλιακή, αιολική). Η συντήρηση της υποδομής είναι απλή, λόγω του σχεδιασμού, της μειωμένης χρήσης αντλιών, αφού το νερό τροφοδοτείται με τη βαρύτητα αλλά ταιριάζει και σε διάφορες συνθήκες τοποθεσίας. Επίσης, ενώ η ανάγκη

για εξειδικευμένο προσωπικό είναι αυξημένη στην περίπτωση των συμβατικών μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, στους ΤΥ απαιτούνται μόνο περιοδικές επισκέψεις για παρατήρηση και συντήρηση. (Α. Stefanakis et al., 2014, M.M. Waly et al., 2022, Biswal et al., 2022, Parde et al., 2022)

Βάση του άρθρου (Akyürek et al., 2024), που συγκρίνει το κόστος εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων ΤΥ και SBR , καταδεικνύει το ακριβότερο αρχικό κόστος κατασκευής ΤΥ που είναι υψηλότερο κατά 30%. Ωστόσο, σε κύκλο 20 ετών το συνολικό κόστος επενδύσεων και λειτουργικών δαπανών για τους ΤΥ μειώνεται σε 40% σε σχέση με το SBR . Το μοναδιαίο κόστος επεξεργασίας για ένα κυβικό μέτρο με αποτελεσματικότητα αφαίρεσης COD είναι περίπου 87%. Επίσης, σε αυτή τη μελέτη υπολογίζεται για τους ΤΥ τουλάχιστον 40% λιγότερο σε σχέση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων με SBR αντίστοιχα, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας θεωρείται μηδαμινή. Σύμφωνα με την μελέτη (Lopsik, 2013) υπολογίζεται ότι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στους τεχνητούς υγροτόπους είναι ελάχιστη και 99,3% λιγότερη από μια συμβατική μονάδα.

Το κόστος χρήσης και εφαρμογής των τεχνητών υγροτόπων μπορεί να μειωθεί περαιτέρω, αν αξιοποιηθούν τα φυτά υγροτόπων , τα οποία προσφέρουν πρόσθετα οφέλη, όπως η παραγωγή βιομάζας, η παραγωγή ενέργειας και η ανάκτηση υλικών. Μόνο στην Κίνα, τα ΤΥ εκτείνονται σε 6,75 εκατομμύρια εκτάρια, παράγοντας 107 εκατομμύρια τόνους φυτικής βιομάζας υγροτόπων ετησίως και η απόρριψη των συγκομιζόμενων φυτών οδηγεί σε ρύπανση και σπατάλη πόρων. Τα φυτά υγροτόπων μπορούν να μετατραπούν σε βιοξυλάνθρακα ή ενεργό άνθρακα για αποθήκευση ενέργειας και περιβαλλοντική αποκατάσταση. Επίσης, τα φυτά πλούσια σε λιγνοκυτταρίνη, αποτελούν υποστρώματα για την παραγωγή βιοαιθανόλης και βιοαερίου, αντιμετωπίζοντας ενεργειακές κρίσεις. Τέλος, μπορεί να γίνει βιομηχανική και γεωργική χρήση των φυτών με εφαρμογές που περιλαμβάνουν την παραγωγή χαρτιού, τη δημιουργία βιολιπασμάτων και τις ζωοτροφές. Η χρήση φυτών για την παραγωγή βιολιπασμάτων θα μπορούσε να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεχνητών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων υγροτόπων έως και 85 % και το κόστος κατά 65%. (Zhou et al., 2024)

Ο κύριος περιορισμός των Τεχνητών Υγροτόπων είναι η ανάγκη για μεγάλη έκταση σε σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, γεγονός που τους καθιστά ακατάλληλους για περιοχές με υψηλή πυκνότητα πληθυσμού, όπως οι μεγάλες πόλεις, λόγω περιορισμένου διαθέσιμου χώρου και υψηλού κόστους γης. Επομένως, οι ΤΥ δεν

μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τις συμβατικές εγκαταστάσεις, αλλά είναι πιο κατάλληλοι για εγκαταστάσεις μικρής και μεσαίας κλίμακας.

Οι ΤΥ προωθούν την αποκεντρωμένη επεξεργασία λυμάτων, συμβάλλοντας πιθανώς στη μείωση της ανάγκης για κεντρικές εγκαταστάσεις και ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο, η απόδοσή τους επηρεάζεται από το κλίμα, με καλύτερη απόδοση σε θερμά κλίματα και μειωμένη απόδοση σε ψυχρά, η οποία μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση της επιφάνειας. Οι ΤΥ απαιτούν μια περίοδο προσαρμογής που διαρκεί από μερικούς μήνες έως δύο χρόνια για να φτάσουν στη βέλτιστη απόδοση. Ο σχεδιασμός τους πρέπει να λαμβάνει υπόψη πιθανά προβλήματα με κουνούπια, να αποφεύγει απότομες τοπογραφίες και να προλαμβάνει τη διαρροή λυμάτων σε περιοχές με υψηλό υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. (A. Stefanakis et al., 2014)

Μια σημαντική πρόκληση έγκειται στη μεταβλητότητα της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης ρύπων σε διαφορετικές μελέτες και περιοχές. Κατά συνέπεια, οι ΤΥ μερικές φορές θεωρούνται ως «μαύρα κουτιά», με την απόδοσή τους να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από παράγοντες όπως οι κλιματικές συνθήκες, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά (συμπεριλαμβανομένων των προτύπων ροής και των χρόνων κατακράτησης), βιολογικοί παράγοντες (όπως η σύνθεση των ειδών και η μικροβιακή δραστηριότητα) και οι φυσικοχημικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υποστρωμάτων. (Wu et al., 2023)

Επιπλέον, οι περισσότερες εφαρμογές παραμένουν πειραματικές και απαιτούν περαιτέρω ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεών τους με τη χρήση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ). Η AKZ είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την κατάρτιση και αξιολόγηση των εισροών, των εκροών και των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ένα προϊόν ή μια υπηρεσία καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Η AKZ παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός προϊόντος ή συστήματος, προσφέροντας μια ποσοτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεών του. Προσδιορίζει επίσης τους παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τις περιβαλλοντικές επιδόσεις. Ωστόσο, όπως και άλλα εργαλεία ανάλυσης συστήματος, η AKZ απλοποιεί την πολυπλοκότητα της πραγματικότητας. Έρχεται με ορισμένους περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένων των προκλήσεων στην πρόβλεψη μελλοντικών σεναρίων, στην κατανόηση περίπλοκων διαδικασιών και στην αντιμετώπιση συγκεκριμένων συνθηκών. (Lopsik 2013)

3. Τεχνητοί Υγρότοποι Ως Πράσινη Υποδομή

Η Ευρωπαϊκή Ένωση τάσσεται υπέρ της υιοθέτησης πράσινων και γαλάζιων υποδομών, καθώς και λύσεων που βασίζονται στη φύση, προς όφελος τόσο των πολιτών της ΕΕ όσο και της βιοποικιλότητας. Η στρατηγική της ΕΕ για τη βιοποικιλότητα με ορίζοντα το 2030 δίνει βάρος σε επενδύσεις σε πράσινες και γαλάζιες υποδομές και της συστηματικής ενσωμάτωσης και δημιουργίας υγιών οικοσυστημάτων, πράσινων υποδομών και λύσεων που βασίζονται στη φύση στον πολεοδομικό σχεδιασμό. (ΕΥ, 2019)

Οι πράσινες υποδομές διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη σύγχρονη διαχείριση των υδάτων, ιδίως όσον αφορά την αντιμετώπιση των προκλήσεων των όμβριων υδάτων και των λυμάτων. Στις αστικές περιοχές, τα όμβρια ύδατα συμβάλλουν συχνά στη συνδυασμένη υπερχειλίση λυμάτων (CSO), όπου τα οικιακά και αστικά λύματα αναμιγνύονται με τα όμβρια ύδατα, υπερβαίνοντας τη χωρητικότητα των κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Αυτό οδηγεί στην απόρριψη μη επεξεργασμένου νερού σε επιφανειακά σώματα, προκαλώντας ζημιές στο οικοσύστημα και αστικές πλημμύρες, με σημαντικά φορτία ρύπων από δρόμους, υπονόμους και συστήματα υγιεινής.

Οι παραδοσιακές κεντρικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, αν και κοινές, δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον λόγω της εξάρτησής τους από μη ανανεώσιμα υλικά, της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και χημικών, καθώς επίσης και του μειονεκτήματος της αισθητικής των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων που παίζει κυρίαρχο ρόλο στην υποβάθμιση της ποιότητας και αξίας των κατοικιών και υποδομών πλησίον αυτών. Με αυτή τη προσέγγιση, καταδεικνύεται η ανάγκη για βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις που παρέχουν αποτελεσματική επεξεργασία των λυμάτων, ενισχύοντας παράλληλα τους αστικούς χώρους πρασίνου.

Οι τεχνητοί υγρότοποι θεωρούνται στοιχείο των "Πράσινων υποδομών (ΓΕ)". Οι ΤΥ όχι μόνο καλύπτουν τις ανάγκες επεξεργασίας νερού και αποχέτευσης, αλλά συμβάλλουν επίσης στο αστικό πράσινο, υποστηρίζουν τις λειτουργίες του οικοσυστήματος και την βιοποικιλότητα και προωθούν το κύκλο του νερού με φυσικό τρόπο. Αυτά τα συστήματα είναι ιδανικά για την ενσωμάτωση αποτελεσματικής επεξεργασίας λυμάτων με οικολογικά και κοινωνικά οφέλη σε αστικά και περιαστικά περιβάλλοντα. (Stefanakis, 2019; Y. Zhao et al., 2020)

Η εξέλιξη και ο συνδυασμός πράσινων και μπλε υποδομών είναι οι Πόλεις Σφουγγάρια (Sponge Cities), μια ιδέα που ξεκίνησε και εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια στην Κίνα όπου οι ΤΥ παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των αστικών λυμάτων αυξάνοντας την ικανότητα αποθήκευσης βρόχινου νερού και την διείσδυση με υπόγεια κατεύθυνση, με παράλληλη μείωση της ποσότητας των λυμάτων που φθάνουν στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. (Wu et al., 2023)

Πόλεις Σφουγγάρια

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι αστικές περιοχές είναι όλο και πιο ευάλωτες στις πλημμύρες, όπως τεκμηριώνεται στην πέμπτη έκθεση αξιολόγησης της IPCC, η οποία επισημαίνει τους αυξανόμενους κινδύνους και τις εκτεταμένες επιπτώσεις των πλημμυρών που σχετίζονται με το κλίμα στις πόλεις. Ακόμη και με την υπερθέρμανση του πλανήτη να περιορίζεται στους +1,5°C, οι κίνδυνοι από πλημμύρα προβλέπεται να αυξηθούν σε ορισμένες περιοχές. Οι αστικές πλημμύρες, που οφείλονται σε ακραία φαινόμενα βροχοπτώσεων, αναμένεται να αυξηθούν παράλληλα με τις παράκτιες και ποτάμιες πλημμύρες. Αυτός ο αυξημένος κίνδυνος επιδεινώνεται από την αστικοποίηση, η οποία εκθέτει περισσότερους ανθρώπους και περιουσιακά στοιχεία σε κινδύνους πλημμύρας. Η αντιμετώπιση των αστικών πλημμυρών είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, καθώς τα μέτρα αποκατάστασης μπορεί να έρχονται σε σύγκρουση με χαρακτηριστικά ουσιώδη για την οικονομική ζωτικότητα, όπως η υψηλή πυκνότητα πληθυσμού, η συγκεντρωμένη ανάπτυξη και η αποδοτική χρήση της γης. (T Zhou et al., 2021)

Η Κίνα, αντιμετωπίζει τα τελευταία χρόνια σοβαρή έλλειψη νερού λόγω της ταχείας οικονομικής ανάπτυξης, της αύξησης του πληθυσμού και της χαμηλής ικανότητας διείσδυσης των αστικών επιφανειών, που εμποδίζουν την αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων και επιδεινώνουν την αστική υπερχείλιση. Η απορροή που είναι επιβαρυνόμενη με ρύπους, επιδεινώνει περαιτέρω την κρίση των υδάτων, δημιουργώντας προκλήσεις τόσο στην ποσότητα όσο και στην ποιότητα του νερού. (Zheng et al., 2021)

Η ιδέα των Πόλεων Σφουγγαριών ξεκίνησε στην Κίνα το 2013, μετά από μια καταστροφική πλημμύρα τον Ιούλιο του 2012 στο Πεκίνο που στοίχισε 79 ανθρώπινες ζωές και 1,6 δισεκατομμύρια δολάρια σε ζημιές (T Zhou et al., 2021), με στόχο τον μετριασμό των προβλημάτων διαχείρισης των αστικών λυμάτων μέσω νέων εφαρμογών της διαχείρισης των όμβριων υδάτων χρησιμοποιώντας στρατηγικές ανάπτυξης χαμηλού αντίκτυπου (LID). Αυτές οι στρατηγικές επικεντρώνονται στην

αποκατάσταση των φυσικών υδρολογικών κύκλων μέσω πράσινων υποδομών που απορροφούν, αποθηκεύουν, διεισδύουν και καθαρίζουν το νερό της βροχής. Μεγιστοποιώντας τη συγκράτηση βρόχινου νερού, τη διείσδυση και τον καθαρισμό, οι Πόλεις Σφουγγάρια μειώνουν την υπερχειλίση και ενισχύουν την επαναχρησιμοποίηση του βρόχινου νερού. (Zheng et al., 2021) Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί στην εφαρμογή των Πόλεων Σφουγγαριών τη δεδομένη στιγμή, όπως η έλλειψη λεπτομερών τοπικών δεδομένων για τη λειτουργία και τη συντήρηση και η ανεπαρκής αναθεώρηση των πολιτικών και των κανονισμών. Επίσης, δημιουργείται και η ανάγκη για μελλοντική έρευνα, όπως η ανάγκη διερεύνησης της ενσωμάτωσης αυτής της υποδομής με συστήματα έξυπνων πόλεων (π.χ. έξυπνες πλατφόρμες διαχείρισης για παρακολούθηση, λειτουργία, συντήρηση και έγκαιρες προειδοποιήσεις). (Yin et al., 2021)

Οι τεχνητοί υγροτόποι αποτελούν πλέον αναπόσπαστο μέρος των Πόλεων Σφουγγαριών και λόγω των προδιαγραφών τους, έχουν την ικανότητα να μειώνουν τα ακραία φαινόμενα των πλημμυρών και τις επιπτώσεις των όμβριων υδάτων και απομακρύνοντας τους ρύπους, βελτιώνουν παράλληλα έτσι την ποιότητα των υδάτων, αλλά και ενισχύουν παράλληλα την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του βρόχινου νερού. (T Zhou et al., 2021; Zheng et al., 2021) Όσον αφορά την διαχείριση των αστικών πλημμυρών μια μελέτη (T Zhou et al., 2021) στο Yangzhou (Κίνα), με μοντελοποίηση με χρήση λογισμικού, έδειξε οι ΤΥ μπορούν να αποθηκεύσουν υπερβολικό νερό από την επιφανειακή απορροή και την απόρριψη όμβριων των υπονόμων, αλλά κυρίως για λιγότερο ακραία καιρικά φαινόμενα. Για να είναι επαρκείς θα πρέπει οι ΤΥ να είναι μεγαλύτεροι, εγείροντας ανησυχίες σχετικά με την εξεύρεση επαρκούς αστικού χώρου αλλά και την οικονομική βιωσιμότητάς τους λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής και συντήρησης.

Ωστόσο, υπάρχει θετικό πρόσημο όσον αφορά την απορρύπανση όμβριων υδάτων από ότι έδειξε μια μελέτη στο Zhengzhou, (Zheng et al., 2021) στην επαρχία Henan της Κίνας που ανέλυσε την ποιότητα των όμβριων υδάτων και αξιολόγησε την αποτελεσματικότητα των υγροτόπων όμβριων υδάτων. Η έρευνα κατέδειξε τους υγροτόπους με υψηλά επίπεδα απορρύπανσης με την απόδοση αφαίρεσης COD, TN, NO_3^- -N και NH_3 -N είναι 86,54%, 89,46%, 95,87% και 80,88%, ενώ το ποσοστό απομάκρυνσης του NH_3 -N είναι 46,58% υψηλότερο από άλλα συστήματα, παρέχοντας ταυτόχρονα πολύτιμες πληροφορίες για την προώθηση των πόλεων σφουγγαριών και την εφαρμογή υγροτόπων για απορρύπανσης όμβριων υδάτων στη βόρεια Κίνα. Αυτό

υπογραμμίζει το μακροπρόθεσμο δυναμικό των υγροτόπων στη βιώσιμη διαχείριση των αστικών υδάτων.



Εικόνα 1. Ένα παράδειγμα *Sponge City*

Qunli Stormwater Park, Haerbin City, Επαρχία Χειλונγκτζιάνγκ, Κίνα. Το πάρκο είναι σχεδιασμένο να επεξεργάζεται 500.000 m³ όμβριων υδάτων. Αμερικανική Εταιρεία Αρχιτεκτόνων Τοπίου, Βραβείο Αριστείας 2012, Turenscape (Αρχιτεκτονική Εταιρεία) και Πανεπιστήμιο του Πεκίνου. (Stefanakis 2019)

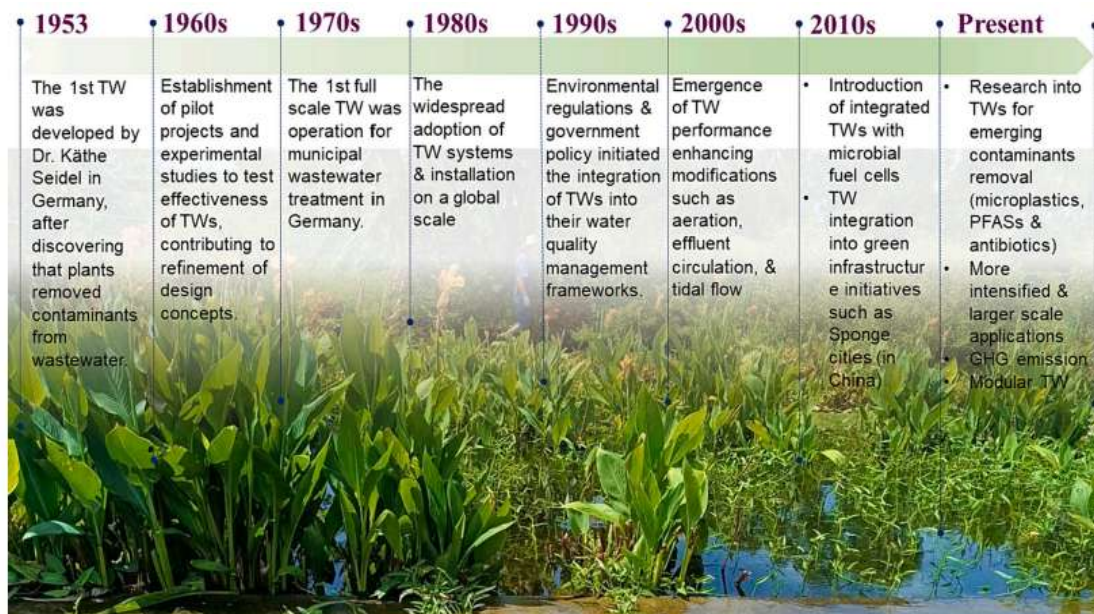
4. Ιστορική Αναδρομή στην Ανάπτυξη & Εξέλιξη των Τεχνητών Υγροτόπων

Ένας από τους πρώτους τεκμηριωμένους τεχνητούς υγροτόπους κατασκευάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1903 (Wu et al., 2023) αν και άλλη πηγή (Vymazal, 2022) αναφέρει ότι το πρώτο μηχανικό σύστημα υγροτόπων επεξεργασίας κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1901. Το σίγουρο είναι ότι η τεχνολογία τεχνητών υγροτόπων αναβίωσε στη Γερμανία τη δεκαετία του 1950 από τον K. Seidel με τη χρήση υδρόφυτων. Τις δεκαετίες 1960 και 1970 υπήρξε ιδιαίτερη πειραματική ανάπτυξη, όπου οι ΤΥ ελεύθερης επιφανειακής ροής κατασκευάστηκαν στο Lelystad (Κάτω Χώρες) και η πρώτη πλήρους κλίμακας οριζόντια ροή (HF) ΤΥ ιδρύθηκε το 1974 στο Liebenburg-Othfresen της Γερμανίας. Οι δεκαετίες του 1980 και του 1990 σηματοδότησαν μια σημαντική παγκόσμια επέκταση της τεχνολογίας ΤΥ, συνοδευόμενη από εκτεταμένη έρευνα, τεχνολογικές βελτιώσεις και την ανάπτυξη εθνικών και διεθνών κατευθυντήριων γραμμών. Η τεχνολογία ΤΥ είχε επεκταθεί σημαντικά, με τα συστήματα ελεύθερου επιφανειακού νερού να κυριαρχούν στη Βόρεια Αμερική και τους ΤΥ υπόγειας ροής να χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ευρώπη

και την Αυστραλία, κυρίως για την επεξεργασία τριτογενών και δευτερογενών οικιακών και αστικών λυμάτων. Για παράδειγμα, η Δανία εισήγαγε τα HF TY τύπου Kickuth το 1983, κατασκευάζοντας περίπου 80 συστήματα για διαχείριση αστικών λυμάτων. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας TY προήλθε από πλήρως λειτουργικά συστήματα σε πραγματικό πεδίο. Διάφορες επίσημες κατευθυντήριες γραμμές και εγχειρίδια σχετικά με το σχεδιασμό και τη λειτουργία των TY για την επεξεργασία λυμάτων δημοσιεύθηκαν σε διάφορες χώρες, συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών, της Γερμανίας, της Αυστρίας, της Δανίας και της Αυστραλίας. (Vymazal 2022; Wu et al., 2023)

Οι τεχνητοί υγρότοποι ή αλλιώς Υγρότοποι επεξεργασίας (προκειμένου να τονιστεί ο κύριος σκοπός της λειτουργία επεξεργασίας λυμάτων του δομημένου υγροτόπου) έχουν καταστεί μια αναγνωρισμένη μέθοδος επεξεργασίας λυμάτων σε πολλές χώρες τον 21ο αιώνα, με σημαντική υιοθέτηση στην Κίνα, όπου ο αριθμός υπερβαίνει τις 100.000 και συνεχίζει να αυξάνεται. Στη Νότια Αμερική, ιδιαίτερα στη Κολομβία, στην Αργεντινή και η Χιλή, υπάρχει επίσης αύξηση των εγκαταστάσεων TY. Ωστόσο, η τεχνολογία δεν έχει εξαπλωθεί τόσο ευρέως στην Αφρική, παρά τις δυνατότητές της, με εξαίρεση την Αίγυπτο και το Μαρόκο (Addo-Bankas et al., 2024). Η έρευνα στις αρχές του 21ου αιώνα επικεντρώθηκε στην ενίσχυση της απομάκρυνσης ρύπων με αποτέλεσμα τη δημιουργία υβριδικών TY υψηλής έντασης, με εφαρμογή διαφόρων σχεδιαστικών και επιχειρησιακών στρατηγικών, όπως ο αερισμός, οι μικροβιακές κυψέλες καυσίμου, η βιοενίσχυση, η χρήση δοτών ηλεκτρονίων, η επιλογή υλικών φίλτρου με υψηλότερη ικανότητα ρόφησης, η κατανόηση του ρόλου των ομάδων βακτηρίων, η επιλογή αποτελεσματικών μακροφύτων, η εξέταση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η αξιολόγηση της απομάκρυνσης φαρμακευτικών προϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας. (Vymazal, 2022; Addo-Bankas et al., 2024) Οι TY είναι τώρα μεγαλύτεροι σε κλίμακα, ξεπερνώντας συχνά τα 1.000 τετραγωνικά μέτρα και μια βιβλιογραφία (περιόδου 2000-2021) προσδιορίζει 335 TY σε πραγματικό πεδίο που έχουν σχεδιαστεί για τη βελτίωση της ποιότητας του νερού. Αυτά τα συστήματα κατανέμονται σε περισσότερες από 50 χώρες, με την πλειοψηφία να βρίσκεται στην Ευρώπη (38,8%) και την Ασία (32,8%), ακολουθούμενη από τη Βόρεια Αμερική (14,0%) και την Αφρική (8,1%). Χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία ενός ευρέος φάσματος τύπων λυμάτων, συμπεριλαμβανομένων των αστικών, γεωργικών και βιομηχανικών λυμάτων, των στραγγισμάτων χώρων υγειονομικής ταφής, των δευτερογενών λυμάτων, των μολυσμένων υπόγειων υδάτων,

των μολυσμένων υδάτων ποταμών και της απορροής όμβριων υδάτων. (Wu et al., 2023) Μια μελέτη στην Τσεχία (Vymazal, 2023) κατέγραψε την ευρεία χρήση ΤΥ τα τελευταία 30 χρόνια με πιο διαδεδομένη πλέον τη κάθετη ροή και τα υβριδικά ΤΥ. Σήμερα, λειτουργούν περίπου 210 ΤΥ για την επεξεργασία λυμάτων από μικρούς δήμους της Τσεχικής Δημοκρατίας. Αυτά τα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για μέσο ισοδύναμο πληθυσμού 235, με μέση επιφάνεια 1132 m². Τα δεδομένα από τους υπάρχοντες ΤΥ στην Τσεχική Δημοκρατία δείχνουν εξαιρετική αποτελεσματικότητα επεξεργασίας για οργανική ύλη και αιωρούμενα στερεά, ενώ τα ποσοστά απομάκρυνσης αμμωνίας και φωσφόρου είναι περίπου 40%. Η μελέτη αυτή καταδεικνύει τους ΤΥ μια αποτελεσματική λύση επεξεργασίας λυμάτων για μικρούς δήμους στην Τσεχική Δημοκρατία. Τέλος, οι ΤΥ κερδίζουν την προσοχή στη βιώσιμη διαχείριση των αστικών υδάτων, ευθυγραμμιζόμενοι με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και τις ιδέες των πόλεων σφουγγαριών.



Εικόνα 2. Ιστορική αναδρομή εξέλιξης των τεχνητών υγροτόπων.
(Addo-Bankas et al., 2024)

5. Τύποι Τεχνητών Υγροτόπων

Οι ΤΥ σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας ή μεθόδους με βάση τον όγκο, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τον υδραυλικό χρόνο κατακράτησης για τη βελτιστοποίηση της απομάκρυνσης ρύπων, ή μεθόδους με βάση την περιοχή, οι οποίες αξιολογούν τη μείωση των ρύπων κατά τη συνολική έκταση του υγροτόπου. Ο επιλεγμένος σχεδιασμός εξαρτάται από παράγοντες όπως οι διαθέσιμοι πόροι, το μέγεθος, το κόστος, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η ποιότητα των λυμάτων, το επίπεδο επεξεργασίας και ο σκοπός επεξεργασίας. Οι τύποι ΤΥ ταξινομούνται ανάλογα με την κατεύθυνση ροής της υδρολογίας τους και η επιλογή εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, το κόστος και την απόδοση απομάκρυνσης ρύπων. Η καλύτερη κατανόηση των διαμορφώσεων των υγροτόπων θα οδηγήσει σε πιο προηγμένα, αξιόπιστα και ευρέως υιοθετημένα συστήματα επεξεργασίας. (Α. Stefanakis et al., 2014)

5.1. Τεχνητοί Υγρότοποι Επιφανειακής Ροής

Ένας τεχνητός υγρότοπος επιφανειακής ροής (FWS) προσομοιάζει φυσικό υγρότοπο και αποτελείται από ρηχή λεκάνη με βλάστηση και σύστημα ελέγχου νερού. Η στάθμη του νερού διατηρείται σταθερή μεταξύ 0,3-0,6 μέτρων, τύπου αντιδραστήρες εμβολικής ροής (Plug Flow Reactor). Το νερό διασχίζει τον υγρότοπο από την είσοδο έως την έξοδο, εξασφαλίζοντας κατάλληλο χρόνο υδραυλικής συγκράτησης (HRT). Για την αποτελεσματική λειτουργία του απαιτείται μεγάλη επιφάνεια γης.

Οι τεχνητοί υγρότοποι επιφανειακής ροής (FWS) λειτουργούν ως βιολογικά συστήματα επεξεργασίας, όπου το νερό επιβραδύνεται, επιτρέποντας την καθίζηση σωματιδίων και τη μικροβιακή απομάκρυνση ρύπων. Απομακρύνουν BOD, COD, παθογόνους οργανισμούς, αιωρούμενα στερεά, θρεπτικά συστατικά και βαρέα μέταλλα. Το άζωτο αφαιρείται μέσω νιτροποίησης και απονιτροποίησης, ενώ η απομάκρυνση του φωσφόρου είναι περιορισμένη. Χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για την επεξεργασία οικιακών, αστικών, βιομηχανικών λυμάτων και στραγγισμάτων ορυχείων.

Οι FWS ΤΥ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τύπο βλάστησης που χρησιμοποιείται. Τα αναδυόμενα συστήματα βλάστησης είναι τα πιο κοινά FWS ΤΥ, με είδη όπως *Phragmites australis*, *Typha spp.* και *Scirpus spp.* Άλλοι τύποι φυτών

περιλαμβάνουν ελεύθερα πλωτά (π.χ. *Eichhornia crassipes*), πλωτά φύλλα (π.χ. *Nuphar lutea*), βυθισμένα (π.χ. *Ceratophyllum demersum*) και πλωτά στρώματα (π.χ. *Cyperus papyrus*). Τα περισσότερα συστήματα FWS χρησιμοποιούν είτε ένα μόνο είδος φυτού είτε έναν συνδυασμό επιφανειακών και βυθισμένων ειδών. (Vymazal, 2019; Gorgoglione et al., 2018)

Οι FWS TY είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση οργανικών και αιωρούμενων στερεών, αλλά προσφέρουν μέτρια απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών λόγω περιορισμένης επαφής με το έδαφος. Αυτοί οι υγρότοποι παρέχουν επίσης αερόβιες και αναερόβιες ζώνες, συμβάλλοντας στην απομάκρυνση των εντερικών βακτηρίων, συχνά κατά μία έως δύο τάξεις μεγέθους, αν και αυτό ποικίλλει λόγω της αλληλεπίδρασης φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, όπως η προσκόλληση μικροοργανισμών στα ιζήματα και η υπεριώδης ακτινοβολία. Επίσης, τα FWS TY παρέχουν κάποιο αερισμό μέσω επιφανειακής έκθεσης, αλλά ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου τους είναι χαμηλότερος από τα συστήματα με συνεχή αερισμό, όπως τα TY υποεπιφανειακής ροής. Αυτός ο περιορισμός επηρεάζει τη δραστηριότητα των αερόβιων μικροοργανισμών που απαιτούνται για την υποβάθμιση των φαρμακευτικών προϊόντων και των προϊόντων προσωπικής φροντίδας (PCP). Οι πολύπλοκες δομές των αντιβιοτικών και των PCPs απαιτούν συχνά ειδικές συνθήκες ή μικροβιακές κοινότητες για αποτελεσματική αποικοδόμηση, τις οποίες οι FWS TY δεν μπορούν να υποστηρίξουν επαρκώς. (Gaballah et al., 2024)

5.2.Τεχνητοί Υγρότοποι Υποεπιφανειακής Ροής

5.2.1.Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής

Οι οριζόντιοι τεχνητοί υγρότοποι υποεπιφανειακής ροής (HSSF TY) είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα των τεχνητών υγροτόπων υποεπιφανειακής ροής SSF. Αποτελούνται από αδιαπέραστη μεμβράνη, πορώδεις μέσο διήθησης και μακρόφυτα. Τα προεπεξεργασμένα λύματα κινούνται αργά οριζόντια κάτω από την επιφάνεια μέχρι την έξοδο. Οι HSSF TY απαιτούν αποτελεσματική μηχανική προεπεξεργασία για τη στόχευση αιωρούμενων στερεών, καθώς τα υπερβολικά στερεά μπορούν να φράξουν την κλίνη διήθησης, οδηγώντας σε επιφανειακή ροή. Η αποτελεσματική προεπεξεργασία είναι απαραίτητη για την πρόληψη της απόφραξης από συσσωρευμένα

στερεά. Οι HSSF TY διαθέτουν πλαστικές επενδύσεις (HDPE, LDPE, PVC) για την αποφυγή διαρροών, προστατευόμενες από γεωυφάσματα.

Το βάθος των φυτικών κλινών στους HSSF TY καθορίζεται κυρίως από την ικανότητα των ριζών των φυτών και των ριζωμάτων να διεισδύσουν σε ολόκληρη την κλίνη, ελαχιστοποιώντας τις αναερόβιες ζώνες. Συνήθως χρησιμοποιείται κοινό καλάμι (*Phragmites australis*), το οποίο μπορεί να φτάσει αποτελεσματικά σε βάθη περίπου 0,6 μέτρων, ρυθμίζοντας το συνιστώμενο βάθος κλίνης στα 0,6 έως 0,8 μέτρα. Η μεταφορά οξυγόνου από τις ρίζες των φυτών φτάνει σε ένα λεπτό στρώμα υποστρώματος δίπλα στις ρίζες. Για αυτό το λόγο και το βάθος της κλίνης είναι συνήθως περιορισμένο. Τα μακρόφυτα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο, κυρίως μέσω φυσικών επιδράσεων όπως η επιφανειακή μόνωση σε κρύο καιρό και η παροχή επιφανειών για μικροβιακή προσκόλληση. Οι μεταβολικές τους λειτουργίες, όπως η πρόσληψη θρεπτικών ουσιών, είναι λιγότερο σημαντικές.

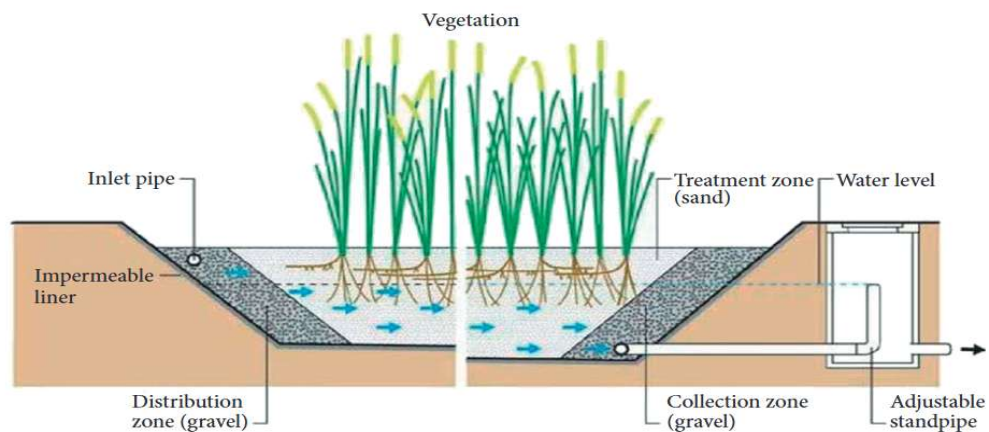
Τα συστήματα HSSF δημιουργούν ένα δίκτυο αερόβιων, ανοξικών και αναερόβιων ζωνών με ένα κυρίως ανοξικό περιβάλλον με αερόβιες μικροθέσεις κοντά στις ρίζες των φυτών, που μεταφέρουν οξυγόνο στην κλίνη φίλτρου. Η παρουσία αερόβιων, ανοξικών και αναερόβιων ζωνών ενισχύει την αποτελεσματικότητα επεξεργασίας, επιτρέποντας την ανάπτυξη μικροβιακών κοινοτήτων και τη μείωση παθογόνων. Οι συνθήκες οξειδοαναγωγής καθιστούν το σύστημα ευέλικτο για διάφορους τύπους λυμάτων και ρύπων.

Το διαλυμένο οξυγόνο περιορίζεται στους HSSF TY, οδηγώντας στην κυριαρχία των ανοξικών και αναερόβιων διεργασιών. Ενώ η αερόβια αποδόμηση περιορίζεται σε στενές ζώνες κοντά στις ρίζες, οι HSSF TY επιτυγχάνουν υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης οργανικών ουσιών (BOD₅, COD) και αιωρούμενων στερεών (>90%), με τα τελευταία να φιλτράρονται κυρίως στην προεπεξεργασία. Οι οργανικές ενώσεις σε αυτούς τους υγροτόπους αποικοδομούνται από βακτήρια τόσο υπό αερόβιες όσο και υπό αναερόβιες συνθήκες. Ωστόσο, επειδή η απομάκρυνση των ρύπων στα HSSF TY συμβαίνει κυρίως μέσω αναερόβιων διεργασιών, γεγονός που περιορίζει την ικανότητά τους να απομακρύνουν την αμμωνία-N, αλλά ενισχύει την αποτελεσματικότητά τους στη διαδικασία απονιτροποίησης. Επιπλέον, λόγω της περιορισμένης οξυγόνωσης στη ριζόσφαιρα, η ατελής νιτροποίηση αποτελεί πρόκληση και η συνολική απομάκρυνση αζώτου από τα λύματα είναι συνήθως κάτω από 50%. Η απομάκρυνση του φωσφόρου γίνεται κυρίως μέσω προσρόφησης και καθίζησης, με γενικά χαμηλά ποσοστά απομάκρυνσης (<40%) λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας των κοινών μέσων

διήθησης. Οι HSSF TY είναι αποτελεσματικά βιοφίλτρα για μικροβιολογικούς ρύπους, μειώνοντας τα βακτηριακά φορτία μέσω συνδυασμένων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών.

Τα συστήματα HSSF είναι λιγότερο αποτελεσματικά σε ψυχρά κλίματα, όπου η απόδοσή τους μειώνεται. Η μόνωση, όπως το νεκρό φυτικό υλικό, βοηθά στη διατήρηση της μικροβιακής δραστηριότητας διατηρώντας ζεστό το εισερχόμενο υλικό. Σε πολύ κρύες περιοχές, η στάθμη του νερού μειώνεται για να αποφευχθεί το πάγωμα. (M.M. Waly et al., 2023; Vymazal 2019; Gorgoglione et al., 2018; Gaballah et al., 2024)

Αυτά τα συστήματα είναι ευέλικτα, επεξεργάζονται διάφορα λύματα, συμπεριλαμβανομένων των αστικών, οικιακών, βιομηχανικών, γεωργικών, όμβριων υδάτων και στραγγισμάτων υγειονομικής ταφής.



Εικόνα 3. TY Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής
(Makorondo et al., 2020)

5.2.2 Κάθετης Υποεπιφανειακής Ροής

Οι τεχνητοί υγρότοποι κάθετης υποεπιφανειακής ροής (VF ή VSSF TY) αποτελούνται από μια επίπεδη κοίτη χονδροειδούς άμμου ή χαλικιού φυτεμένη με μακρόφυτα. Ο σχεδιασμός επικεντρώνεται στη δημιουργία μιας μήτρας στρώματος που επιτρέπει στα λύματα να περνούν αποτελεσματικά, διατηρώντας παράλληλα επαρκή χρόνο επαφής για βακτηριακή επεξεργασία και εξασφαλίζοντας μεταφορά οξυγόνου για βακτηριακή ανάπτυξη.

Τα συστήματα VSSF λειτουργούν με διαλείπουσα κάθετη ροή λυμάτων, μετατρέποντάς τα σε αντιδραστήρες "παρτίδων". Απαιτούν τουλάχιστον δύο εναλλάξ

λειτουργούσες δεξαμενές για προσαρμογή της επανοξυγόνωσης. Η ταχεία κάλυψη νερού παγιδεύει αέρα, ενώ ειδικό στρώμα άμμου διευκολύνει τη σταδιακή διαρροή. Η διανομή στα περισσότερα αυτού του τύπου συστήματα, γίνεται μέσω σωλήνων με μικρές οπές, προστατευμένων από ροκανίδια ή κοχύλια, ενώ η εκκένωση προλαμβάνει τη διάβρωση με τη χρήση πλακόστρωτων υλικών. (Tsihrintzis, 2017)

Τα συστήματα VSSF χρησιμοποιούν λεπτότερα αδρανή από τα HSSF, επιτρέποντας αργή και ομοιόμορφη διήθηση. Το μέσο υποστηρίζει τη βλάστηση, αποτρέπει την απόφραξη, παρέχει επιφάνεια για βιοφίλμ και συμβάλλει στην απορρύπανση, κυρίως στην απομάκρυνση φωσφόρου. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει έως τέσσερα στρώματα υλικών (άμμος, χαλίκι διαφορετικών μεγεθών), τα οποία μπορεί να είναι (π.χ. πυριγενή, ανθρακικά, δολομίτης, ζεόλιθος, βωξίτης κ.λπ.), τεχνητά υλικά (π.χ. συνθετικός ζεόλιθος, ασβεστίτης, ενεργός άνθρακας κ.λπ.) ή επαναχρησιμοποιούμενα βιομηχανικά υποπροϊόντα (π.χ. σκωρία, ιπτάμενη τέφρα, σιδηρομετάλλευμα, ξυλάνθρακας κ.λπ. (Tsihrintzis, 2017).

Η διαλείπουσα παροχή λυμάτων, σε συνδυασμό με ένα μέσο διαφόρων μεγεθών σωματιδίων, ενισχύει την αποστράγγιση και εναλλάσσει τις συνθήκες μεταξύ ανεπάρκειας οξυγόνου και περίσσειας, αυξάνοντας έτσι τον αερισμό. Αυτός ο αυξημένος αερισμός ενισχύει τις αερόβιες διεργασίες όπως η απομάκρυνση της οργανικής ύλης και η νιτροποίηση.

Η επιλογή φυτών στα συστήματα VSSF ποικίλλει ανάλογα με το κλίμα, με κοινές επιλογές όπως *Phragmites australis* (καλάμι), είδη *Typha* (cattails) και *Echinochloa pyramidalis*. Τα φυτά, ειδικά το *Phragmites australis*, παίζουν κρίσιμο ρόλο στα VF TY σταθεροποιώντας το στρώμα, ενισχύοντας την υδραυλική αγωγιμότητα και παρέχοντας υποστρώματα για την ανάπτυξη βακτηρίων. Οι ρίζες τους δημιουργούν μικροζώνες για αερόβια βακτήρια, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότητα του συστήματος στην απομάκρυνση οργανικών, αιωρούμενων στερεών και αμμωνίας μέσω τακτικής οξυγόνωσης. Όσον αφορά την απομάκρυνση του αζώτου, τα αυξημένα επίπεδα οξυγόνου προάγουν τη διαδικασία νιτροποίησης, μειώνοντας τα επίπεδα αζώτου ή μετατρέποντάς το κυρίως σε αμμωνιακό άζωτο. Ωστόσο, η απονιτροποίηση είναι περιορισμένη λόγω των αερόβιων συνθηκών στο στρώμα. (Vymazal 2019, Gorgoglione et al., 2018; Tsihrintzis 2017)

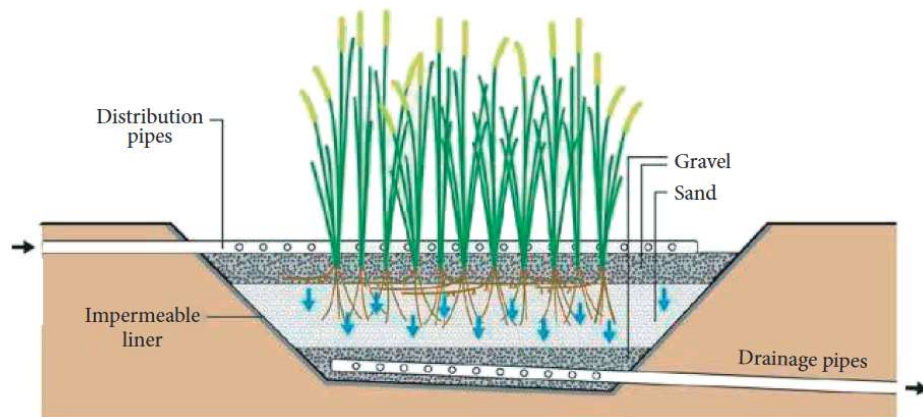
Η σωματιδιακή οργανική ύλη απομακρύνεται μέσω διήθησης και καθίζησης στους πόρους του υποστρώματος. Η διαλυτή οργανική ύλη υφίσταται αερόβια και αναερόβια βακτηριακή αποσύνθεση, με την αερόβια αποδόμηση να κυριαρχεί λόγω του άφθονου

οξυγόνου. Τα συστήματα VF TY επιτυγχάνουν συνήθως υψηλά ποσοστά αφαίρεσης βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου (BOD) και χημικής ζήτησης οξυγόνου (COD), υπερβαίνοντας συχνά το 90%. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) απομακρύνονται κυρίως με διήθηση και καθίζηση, με τα περισσότερα στερεά να σχηματίζουν λάσπη στην επιφάνεια της κλίνης VF TY. Μερικά στερεά διεισδύουν στο μέσο και οξειδώνονται. Τα συστήματα VF TY επιδεικνύουν υψηλή απόδοση αφαίρεσης TSS, συνήθως πάνω από 90% και φτάνοντας έως και 95%.

Στους τεχνητούς υγροτόπους κάθετης ροής (VF TY), η απομάκρυνση του αζώτου επιτυγχάνεται μέσω αμμωνιοποίησης, νιτροποίησης και απονιτροποίησης, με τις μικροβιακές κοινότητες να διαδραματίζουν πρωταρχικό ρόλο. Η απονιτροποίηση ενισχύεται με υβριδικά συστήματα HSSF, ενώ τα φυτά συμβάλλουν μέσω πρόσληψης (4-5%). Η προσρόφηση αμμωνίας στο πορώδες μέσο, ιδιαίτερα με τη χρήση ζεόλιθου, βελτιώνει την απορρόπηση. Τα καλά σχεδιασμένα VF TY επιτυγχάνουν αποδόσεις απομάκρυνσης αζώτου άνω του 80%, με TKN έως 89% και $\text{NH}_4^+\text{-N}$ έως 91%. (Tsihrintzis, 2017)

Η απομάκρυνση του φωσφόρου στους VF TY πραγματοποιείται μέσω μικροβιακής πρόσληψης, χημικής κατακρήμνισης με κατιόντα (Al, Fe, Ca, Mg), φυτικής πρόσληψης (ενισχυόμενης από συγκομιδή) και προσρόφησης στο υπόστρωμα. Υλικά όπως ζεόλιθος και βωξίτης βελτιώνουν την προσρόφηση. Οι αποδόσεις απομάκρυνσης κυμαίνονται από 30% έως 60%, μειούμενες σταδιακά λόγω κορεσμού του υποστρώματος.

Οι TY κάθετης υποεπιφανειακής ροής είναι αποδοτικοί και οικονομικοί στην απομάκρυνση παθογόνων μέσω διήθησης, καθίζησης, οξείδωσης, UV ακτινοβολίας, προσρόφησης και βιολογικής αποικοδόμησης. Η μείωση κολοβακτηριδίων ξεπερνά το 99,9%, αν και συχνά απαιτείται επιπλέον απολύμανση. Οι VF TY αποικοδομούν οργανικούς μικρορρύπους όπως φαινόλες και φαρμακευτικά προϊόντα μέσω αερόβιων/αναερόβιων βακτηρίων, φυτικής πρόσληψης και προσρόφησης. Είναι πιο αποτελεσματικοί από τους HSSF TY λόγω βελτιωμένου αερισμού του υποστρώματος. (Tsihrintzis, 2017)



Εικόνα 4. ΤΥ Κάθετης Υποεπιφανειακής Ροής
(Makorondo et al., 2020)

5.3. Υβριδικοί Τεχνητοί Υγρότοποι

Οι υβριδικοί τεχνητοί υγρότοποι συνδυάζουν διαφορετικούς τύπους ΤΥ, κυρίως κάθετους τεχνητούς υγροτόπους με υπόγεια ροή και οριζόντιους υπόγειους ΤΥ, για να ενισχύσουν τη συνολική αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας εξισορροπώντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε συστήματος. Οι κάθετοι ΤΥ υπόγειας, με μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου (OTC), υπερέχουν στη νιτροποίηση, ενώ τα συστήματα HSF προσφέρουν ευνοϊκές συνθήκες για απονιτροποίηση. Αυτός ο συμπληρωματικός χαρακτήρας επιτρέπει στα υβριδικά συστήματα να χειρίζονται αποτελεσματικότερα ένα ευρύτερο φάσμα αναγκών επεξεργασίας λυμάτων.

Γενικά, υπάρχουν δύο κοινές διαμορφώσεις υβριδικών συστημάτων:

Σύστημα VF → HSF: Τα VFTY τοποθετούνται πρώτα για την απομάκρυνση οργανικής ύλης (OM) και αιωρούμενων στερεών (SS) ενώ προωθούν τη νιτροποίηση λόγω του υψηλότερου OTC τους. Το επόμενο στάδιο HSF ενισχύει την απονιτροποίηση και απομακρύνει περαιτέρω τις OM και SS. Σε αυτή τη διαμόρφωση, η νιτροποίηση, ή η οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά, συνέβη στο στάδιο VF, ενώ η απονιτροποίηση, η αναγωγή των νιτρικών σε υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και αέριο άζωτο (N_2), έλαβε χώρα στο στάδιο HSF. Η διαλείπουσα φόρτιση των κλινών VF είχε ως αποτέλεσμα υψηλά ποσοστά οξείδωσης αμμωνίας, αλλά η οργανική συγκέντρωση στο επόμενο στάδιο HSF ήταν συχνά ανεπαρκής για να υποστηρίξει πλήρως την απονιτροποίηση.

HSF → VF : Αυτή η διαμόρφωση ξεκινά με μια κλίνη HSF για την αφαίρεση OM, SS και την παροχή απονιτροποίησης. Ακολουθείται από ένα σύστημα VF που βελτιώνει τη νιτροποίηση και συνεχίζει να απομακρύνει το OM και το SS. Λόγω της αυξημένης

συγκέντρωσης νιτρικών από την οξείδωση αμμωνίας, τα λύματα συχνά ανακυκλοφορούν πίσω στο στάδιο HSF ή στην προεπεξεργασία για την ενίσχυση της απομάκρυνσης ολικού αζώτου (TN)

Το σύστημα VF → HSF είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σήμερα, προσφέροντας ισορροπία μεταξύ των δυνατοτήτων νιτροποίησης των VF TY και των αντοχών απονιτροποίησης των HSF TY, παρέχοντας έτσι μια ισχυρή λύση κυρίως για την επεξεργασία οικιακών ή αστικών λυμάτων όπου ήταν απαραίτητα τα νιτροποιημένα λύματα, αν και εφαρμόστηκαν και σε άλλους τύπους λυμάτων. (Vymazal, 2019; Stefanakis et al., 2014b)

Πίνακας 1..Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Τύπων Τεχνητών Υγροτόπων
(Biswal et al., 2022, Wu et al., 2023, Gorgoglione et al., 2018, Garibay et al., 2022)

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
FWS TY	
Προσθήκη στον "χώρο πρασίνου" σε μια κοινότητα	Υψηλότερη απαίτηση περιοχής
Αφαίρεση BOD, TSS, COD, μετάλλων και οργανικών υλικών σε ένα λογικό χρόνο κράτησης	Ανοξικό περιβάλλον—κακή νιτροποίηση
N και P απομάκρυνση σε σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο κράτησης	Πολλαπλασιασμός κουνουπιών
Ελαχιστοποίηση μηχανολογικού εξοπλισμού, ενέργειας και απαιτήσεις ειδικευμένου χειριστή	Δυσάρεστες οσμές
Αποφεύγεται το φράξιμο στην είσοδο και την έξοδο	
Μπορεί να ανεχθεί αύξηση της ροής λόγω όμβριων υδάτων χωρίς τον κίνδυνο καταστροφής των φυτών	
HSSF TY	
Μεγάλες αποστάσεις ροής καθίστανται δυνατές. Διαβαθμίσεις απομάκρυνσης θρεπτικών ουσιών	Υψηλότερη απαίτηση περιοχής και εμπειρίας
Δυνατότητα νιτροποίησης και απονιτροποίησης	Προσεκτικός υπολογισμός των υδραυλικών συστημάτων απαιτούνται για βέλτιστη παροχή O ₂
Σχηματισμός χουμικών οξέων για απομάκρυνση N και P	Ίση παροχή λυμάτων είναι περίπλοκη
Μεγαλύτερος κύκλος ζωής	
Κατάλληλο να επιτύχει την απομάκρυνση των αναδυόμενων, φαρμακευτικών συστατικών των λυμάτων ως δευτεροβάθμια ή τριτοβάθμια επεξεργασία	
VSSF TY	
Ζήτηση μικρότερης έκτασης	Μικρές αποστάσεις ροής
Καλή παροχή οξυγόνου - καλή νιτροποίηση	Κακή απονιτροποίηση
Απλό υδραυλικό σύστημα	Υψηλότερες τεχνικές απαιτήσεις
Υψηλή απόδοση απορρύπανσης από την αρχή	Απώλεια απόδοσης, ιδίως στην αφαίρεση P (κορεσμός)
Υψηλή μείωση αιωρούμενων στερεών, παθογόνων και BOD	
HYBRID TY	
Αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης ρύπων (οργανική ύλη και αιωρούμενα στερεά)	Στη διάταξη HFTY-VFTY, μερικές φορές καθίσταται απαραίτητη η ανακυκλοφορία των λυμάτων για την απομάκρυνση των νιτρικών αλάτων

Ενίσχυση της ολικής απομάκρυνσης αζώτου λόγω συνθηκών νιτροποίησης και απονιτροποίησης	Υψηλότερο κόστος επένδυσης και λειτουργίας
Στη διάταξη VFTY-HFTY, η απονιτροποίηση μπορεί να επηρεαστεί από τη διαθεσιμότητα οργανικής ύλης στην τελευταία	Πολύπλοκη συντήρηση
Καλύτερη αντοχή στο κρύο κλίμα	

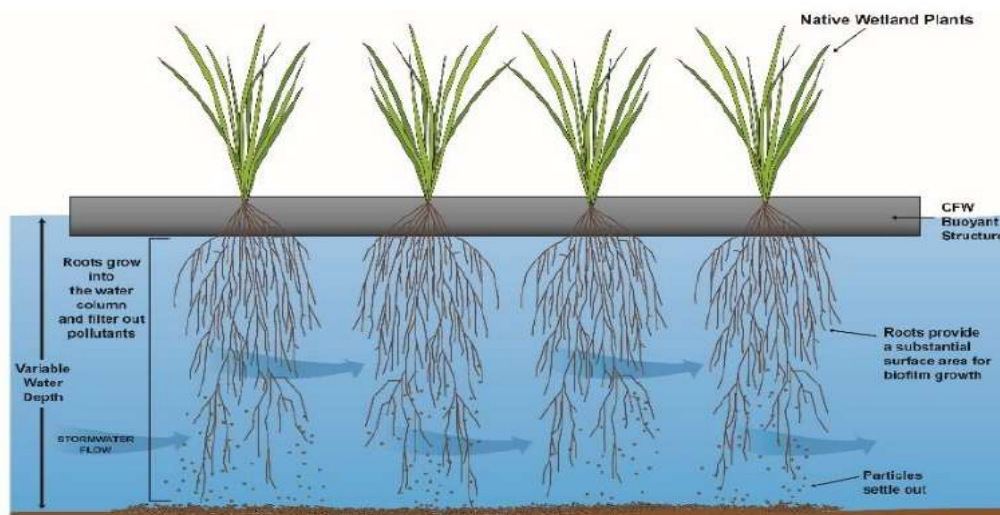
5.4.Επιπλέοντες Τεχνητοί Υγρότοποι

Οι επιπλέοντες τεχνητοί υγρότοποι (FTW- Floating Treatment Wetlands) έχουν κερδίσει δημοτικότητα τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, ιδιαίτερα για την επεξεργασία αστικών όμβριων υδάτων, όπου οι συμβατικοί τεχνητοί υγρότοποι ΤΥ μπορεί να μην είναι κατάλληλοι. Οι FTW τοποθετούνται μεταξύ συστημάτων ΤΥ και λιμνών σε τεχνολογίες φυσικής επεξεργασίας. Σε αντίθεση με τις λίμνες, οι οποίες κυριαρχούνται από φυτοπλαγκτόν, και τους ΤΥ, τα οποία περιλαμβάνουν μακρόφυτα που τοποθετούνται σε πορώδη στοιχεία ή έδαφος, οι FTW χρησιμοποιούν μεγαλύτερα, αναδυόμενα φυτά ενσωματωμένα σε πλωτά αδρανή στοιχεία. Οι FTW προσφέρουν ακόμα πιο οικονομική και προσαρμοστική εναλλακτική λύση σε σχέση με του τεχνητούς υγροτόπους, σχεδιασμένοι να επιπλέουν και να προσαρμόζονται με αλλαγές της στάθμης του νερού, που μοιάζει με υδροπονικά συστήματα. Αρχικά ονομάστηκαν "πλωτοί αναδυόμενοι υγρότοποι επεξεργασίας μακροφύτων", αργότερα συντομεύτηκαν σε FTW για πρακτική χρήση.

Αν και οι επιπλέοντες υγρότοποι επεξεργασίας όπως και γενικότερα οι ΤΥ είναι απλοί στην κατασκευή και τη λειτουργία, περιλαμβάνουν πολύπλοκες διαδικασίες που επηρεάζουν την απόδοση και την απομάκρυνση ρύπων, όπως συγκεντρώσεις ρύπων, υδραυλικό φορτίο, pH, μικροοργανισμούς, οξειδοαναγωγικές συνθήκες και θερμοκρασία. Στους FTW, οι ρίζες των φυτών παραμένουν σε συνεχή επαφή με το νερό, επιτρέποντας στα μακρόφυτα να απορροφούν άμεσα τα θρεπτικά συστατικά. Αυτές οι ρίζες παρέχουν μια μεγάλη επιφάνεια για την ανάπτυξη βιοφίλμ, η οποία υποστηρίζει κοινότητες βακτηρίων απαραίτητες για τη δέσμευση θρεπτικών ουσιών και άλλες βιοχημικές διεργασίες όπως η νιτροποίηση, η απονιτροποίηση και η προσρόφηση φωσφόρου. Εκτός από την προσφορά μιας εκτεταμένης επιφάνειας για την ανάπτυξη βιοφίλμ, τα φυτά απελευθερώνουν οξυγόνο μέσω των ριζών τους, κυρίως κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της φωτοσύνθεσης. Αυτή η απελευθέρωση οξυγόνου επηρεάζει άμεσα το οξειδοαναγωγικό δυναμικό στη στήλη νερού,

επηρεάζοντας τους μετασχηματισμούς αζώτου, την οξείδωση συγκεκριμένων φυτοτοξινών και την αερόβια αποικοδόμηση οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς. Μαζί με το οξυγόνο, τα φυτά απελευθερώνουν επίσης διάφορες οργανικές ενώσεις, γνωστές ως εξιδρώματα ρίζας, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά βιολογικές διεργασίες όπως η απονιτροποίηση.

Οι FTW έχουν πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων τύπων ΤΥ, συμπεριλαμβανομένης της συνεχούς επαφής ρίζας-νερού, της μη ανάγκης για μέσα όπως άμμο ή χαλίκι (μείωση του κόστους και του κινδύνου απόφραξης) και της χρήσης μεγαλύτερων μονάδων που απαιτούν λιγότερο συχνή απομάκρυνση βιομάζας. Η καθίζηση παίζει επίσης ρόλο στη μείωση των ρύπων όπως το οξυγόνο, το άζωτο και ο φώσφορος, αν και οι μεγάλοι χρόνοι κατακράτησης μπορούν να οδηγήσουν σε απελευθέρωση φωσφόρου πίσω στο νερό. Τέλος, τα FTW έχουν επιδείξει υψηλή αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών και βαρέων μετάλλων, με μελέτες που δείχνουν σημαντικές μειώσεις σε ρύπους όπως Cd, Cu, Zn, COD, BOD₅ και ολικά διαλυμένα στερεά. Για παράδειγμα, ένα μεγάλης κλίμακας FTW στο Πακιστάν αφαίρεσε έως και το 79% του COD και το 88% του BOD₅. Σε μια άλλη εφαρμογή για την αποκατάσταση του νερού που έχει ρυπανθεί με αργό πετρέλαιο, τα FTW πέτυχαν σχεδόν πλήρη αποτοξίνωση και υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης για βαρέα μέταλλα όπως Fe, Cu, Cr, Cd και Ni. (Colares et al., 2020)



Εικόνα 5. Επιπλέον ΤΥ
(Sanicola et al., 2019)

5.5. Σύγχρονες Τάσεις στην Τεχνολογία Τεχνητών Υγροτόπων

Αεριζόμενοι ΤΥ

Ο αερισμός είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και εξαιρετικά αποτελεσματική μέθοδος για την ενίσχυση της βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων και η εφαρμογή της σε τεχνητούς υγροτόπους έχει γίνει όλο και πιο σημαντική την τελευταία δεκαετία. Τα αεριζόμενα ΤΥ περιλαμβάνουν την εισαγωγή αέρα στον πυθμένα του υγροτόπου, όπου φυσαλίδες ανεβαίνουν μέσω της στήλης νερού, μεταφέροντας οξυγόνο από τον αέρα στο νερό. Αυτή η διαδικασία αυξάνει τον ρυθμό μεταφοράς οξυγόνου (OTR) και ενισχύει τη βιολογική δραστηριότητα, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων όπως το BOD, το COD και το άζωτο.

Οι αεριζόμενοι υγρότοποι κάθετης ροής είναι έως και δέκα φορές πιο αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση αζώτου σε σύγκριση με τους παθητικούς ΤΥ, γεγονός που μειώνει σημαντικά την έκταση γης που απαιτείται για επεξεργασία, καθιστώντας τα συμπαγή συστήματα. Αυτή η αποτελεσματικότητα τοποθετεί τα αεριζόμενα ΤΥ ως ανταγωνιστικά με τις διεργασίες ενεργοποιημένης ιλύος όσον αφορά τη ζήτηση περιοχής, καθιστώντας τα κατάλληλα για προαστιακές και αστικές περιοχές.

Ένα επιτυχημένο παράδειγμα είναι ο αεριζόμενος υγρότοπος κάθετης ροής στο Petersfield, Hampshire, Ηνωμένου Βασιλείου, το οποίο επεξεργάζεται 1.250 m³ / ημέρα, εξυπηρετώντας 20.000 άτομα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπάρχουν περίπου 500 αεριζόμενοι υγρότοποι πλήρους κλίμακας σε λειτουργία, με αξιοσημείωτες εφαρμογές στις ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Δανία. Πρόσφατες ανασκοπήσεις έχουν συζητήσει το σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη διαχείριση αυτών των συστημάτων, τονίζοντας την πρακτική αποτελεσματικότητα αερισμού τους. (Y. Zhao et al., 2020)

ΤΥ με λάσπη στυπτηρίας (alum sludge)

Οι τεχνητοί υγρότοποι με βάση τη λάσπη στυπτηρίας αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία ΤΥ, χρησιμοποιώντας βιομηχανικά απόβλητα - συγκεκριμένα, αφυδατωμένη λάσπη στυπτηρίας από μονάδες επεξεργασίας πόσιμου νερού - ως κύριο υπόστρωμα. Η ιλύς στυπτηρίας, ένα υποπροϊόν της πήξης αλουμινίου-αλατιού, παραδοσιακά απορρίπτεται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ωστόσο, πρόσφατη έρευνα, ιδιαίτερα στο University College του Δουβλίνου, έχει διερευνήσει την επαναχρησιμοποίησή του σε ΤΥ κατά την τελευταία δεκαετία. Το υπόστρωμα στους ΤΥ εξυπηρετεί πολλαπλές λειτουργίες, όπως η υποστήριξη της ανάπτυξης βιοφίλμ, η

παροχή μέσων για την ανάπτυξη των φυτών και η προσρόφηση ρύπων. Η ιλύς στυπτηρίας, όντας μη τοξική και πλούσια σε αλουμίνιο, έχει ισχυρή ικανότητα προσρόφησης φωσφόρου και άλλων ρύπων, καθιστώντας την πολύτιμο, χαμηλού κόστους προσροφητικό για την επεξεργασία λυμάτων. Η πρώτη μεγάλης κλίμακας δοκιμή TY με βάση τη λάσπη στυπτηρίας πραγματοποιήθηκε στην Ιρλανδία, όπου επεξεργάστηκαν λύματα αγροκτημάτων για δύο χρόνια, δείχνοντας αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης BOD₅, COD, ολικού αζώτου, αμμωνιακού αζώτου, ολικού φωσφόρου και αιωρούμενων στερεών που κυμαίνονταν από 36% έως 97%. (Y. Zhao et al., 2020)

TY με Μικροβιακές Κυψέλες Καυσίμου (Microbial Fuel Cells)

Πρόσφατες μελέτες σε τεχνητούς υγροτόπους επικεντρώνονται στην ανάκτηση ενέργειας, ιδιαίτερα μέσω της ενσωμάτωσης μικροβιακών κυψελών καυσίμου (MFC), σχηματίζοντας MFC-TY. Αυτά τα συστήματα αξιοποιούν τις φυσικές αναερόβιες και αερόβιες ζώνες εντός των TY για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά την επεξεργασία λυμάτων. Η προσέγγιση MFC-TY ενισχύει τη βιωσιμότητα και τη φιλικότητα των TY προς το περιβάλλον, επιτρέποντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράλληλα με τη βελτιωμένη επεξεργασία λυμάτων. Παρά το πρώιμο στάδιο ανάπτυξής του, οι προκλήσεις περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης του συστήματος, της λειτουργίας, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των υλικών ηλεκτροδίων και της κατανόησης του ρόλου των φυτών και των ηλεκτροδραστικών βακτηρίων.

Τα MFC-TY έχουν δείξει βελτιωμένη απόδοση επεξεργασίας λυμάτων, όπως αυξημένα ποσοστά απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου (NH₄-N) και χημικής ζήτησης οξυγόνου (COD) (22% και 5% αντίστοιχα) σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα TY. Η τεχνολογία προωθεί επίσης τον εμπλουτισμό ηλεκτροχημικά ενεργών βακτηρίων, γεγονός που ενισχύει τον μικροβιακό μεταβολισμό και την ειδική αποικοδόμηση ενώσεων. Αν και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ήσσονος σημασίας, οι μελλοντικές εξελίξεις στους βιοαισθητήρες για τη διαχείριση της online λειτουργίας θα μπορούσαν να προωθήσουν σημαντικά αυτή την τεχνολογία. (Y. Zhao et al., 2020)

Παλιρροϊκής ροής ΤΥ

Οι τεχνητοί υγρότοποι παλιρροϊκής ροής (TF TY) αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πρόοδο στους ΤΥ κατά την τελευταία δεκαετία, βελτιώνοντας αποτελεσματικά την μείωση της βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου (BOD) και του αμμωνιακού αζώτου αντιμετωπίζοντας τους περιορισμούς οξυγόνου των παραδοσιακών ΤΥ. Η ουσία της παλιρροϊκής ροής έγκειται στις εναλλασσόμενες ταχείες διαδικασίες "πλήρωσης" και "αποστράγγισης" που δημιουργούν τεχνητές "παλιρροϊκές" συνθήκες. Αυτός ο γρήγορος κύκλος αντλεί ατμοσφαιρικό αέρα στον υγρότοπο, διευκολύνοντας τη μεταφορά οξυγόνου που είναι απαραίτητη για τη βιοαποδόμηση των λυμάτων. Η λειτουργία παλιρροϊκής ροής περιλαμβάνει τέσσερα βασικά βήματα: πλήρωση, επαφή, αποστράγγιση και ανάπαυση. Κατά τη διάρκεια της φάσης πλήρωσης τα λύματα γεμίζουν την μονάδα ,οδηγώντας στην προσρόφηση ιόντων αμμωνίας-αζώτου (NH_4^+-N) στο μέσο ή το υπόστρωμα, συμβαίνει η μέγιστη επαφή μεταξύ ρύπων και βιοφίλμ δίνοντας προτεραιότητα στην παροχή οξυγόνου για τη νιτροποίηση της προσροφημένης αμμωνίας. Στη φάση αποστράγγισης τα νιτρικά και νιτρώδη απελευθερώνονται στο νερό και ταυτόχρονα αντλείται αέρας στον υγρότοπο για την αναπλήρωση του οξυγόνου. Οι εναλλασσόμενοι «υγροί» και «ξηροί» κύκλοι λειτουργούν ως παθητική αντλία, ωθώντας και τραβώντας οξυγόνο στον υγρότοπο, ενισχύοντας έτσι την αερόβια μικροβιακή αποσύνθεση και βελτιώνοντας την αλληλεπίδραση ρύπου-βιοφίλμ. Πολυάριθμες μελέτες έχουν επιβεβαιώσει την αποτελεσματικότητα των ΤΥ παλιρροϊκής ροής στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας λυμάτων. (Y. Zhao et al., 2020; Muduli et al., 2024)

6.Οι Μικροοργανισμοί στην επεξεργασία λυμάτων στους ΤΥ

Οι μικροβιακές κοινότητες είναι θεμελιώδεις για τη λειτουργία των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων και ειδικότερα των υγροτόπων, διαδραματίζοντας κρίσιμο ρόλο τόσο στην απομάκρυνση των ρύπων .Συνεπώς οι μικροοργανισμοί είναι απαραίτητος παράγοντας για την αποτελεσματική λειτουργία των υγροτόπων επεξεργασίας, καθιστώντας τη μικροβιολογική έρευνα προτεραιότητα για τους ερευνητές . Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, υπάρχει μια αυξανόμενη κατανόηση της σημασίας των μικροβιακών κοινοτήτων σε αυτά τα συστήματα. Η πρώιμη έρευνα επικεντρώθηκε

κυρίως στην καταμέτρηση των μικροβίων ή στη μέτρηση της δραστηριότητάς τους. Ωστόσο, οι εξελίξεις στις μεθόδους και τον εξοπλισμό για λειτουργικό και δομικό χαρακτηρισμό έχουν βελτιώσει αυτές τις τεχνικές για εφαρμογή σε υγροτόπους επεξεργασίας. Τα τελευταία χρόνια και πολυάριθμες μελέτες έχουν αναδείξει τον κρίσιμο ρόλο των μικροοργανισμών στους τεχνητούς υγροτόπους, όπου πολλές διεργασίες και αντιδράσεις εξαρτώνται από τη συντονισμένη δραστηριότητά τους. Οι μικροοργανισμοί, έχει αποδειχθεί ότι είναι απαραίτητοι για τον κύκλο του άνθρακα, του αζώτου και του θείου, την αποικοδόμηση των οργανικών ρύπων την απομάκρυνση του αζώτου, φωσφόρου, την βιοσυσσώρευση των μετάλλων, την οξείδωση του σουλφιδίου. Οι μικροοργανισμοί με μορφή βιοφίλμ, που συνήθως βρίσκονται σε ρίζες φυτών ή στα υλικά διηθητικής κλίνης, είναι κεντρικής σημασίας για την απόδοση αποδόμησης των ρύπων στους ΤΥ. Η ριζόσφαιρα για παράδειγμα είναι ιδιαιτέρως σημαντική, χρησιμεύοντας ως κόμβος για τον μετασχηματισμό οργανικών ενώσεων από μικροοργανισμούς, που στην συνέχεια οδηγεί στην απελευθέρωση οξυγόνου και οργανικών ριζικών εκκριμάτων (εξιδρωμάτων) από τα φυτά, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την μικροβιακή δραστηριότητα.

Η κατανόηση της ποικιλομορφίας των μικροβιακών κοινοτήτων και της αλληλεπίδρασής τους με περιβαλλοντικούς παράγοντες είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της λειτουργίας αυτών των συστημάτων. Τον προηγούμενο αιώνα, η τεχνολογία των τεχνητών υγροτόπων εξαρτιόταν από μεθόδους που βασίζονταν στην καλλιέργεια καθιστώντας δύσκολο τον προσδιορισμό του ρόλου του βασικού παράγοντα των μικροοργανισμών στην επεξεργασία λυμάτων. Τις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση μοριακών τεχνικών προσδιορισμού αυτών των μικροβιακών κοινοτήτων και πιο πρόσφατα, η εφαρμογή των εργαλείων –omics, έχει αρχίσει και διευρύνει όλο και περισσότερο την εικόνα μας μικροβιακής ποικιλότητας και λειτουργίας στη μικροβιολογία των υγρών αποβλήτων γενικότερα, επιτρέποντας πιο ολοκληρωμένες αναλύσεις. Έτσι στη σημερινή εποχή των -omics, η έρευνα στη μικροβιακή ποικιλομορφία και στους μηχανισμούς αυτής στα ΤΥ, βοηθάει στην καλύτερη εφαρμογή και απόδοση αυτών των συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. (Sánchez, 2016; Weber, 2014)

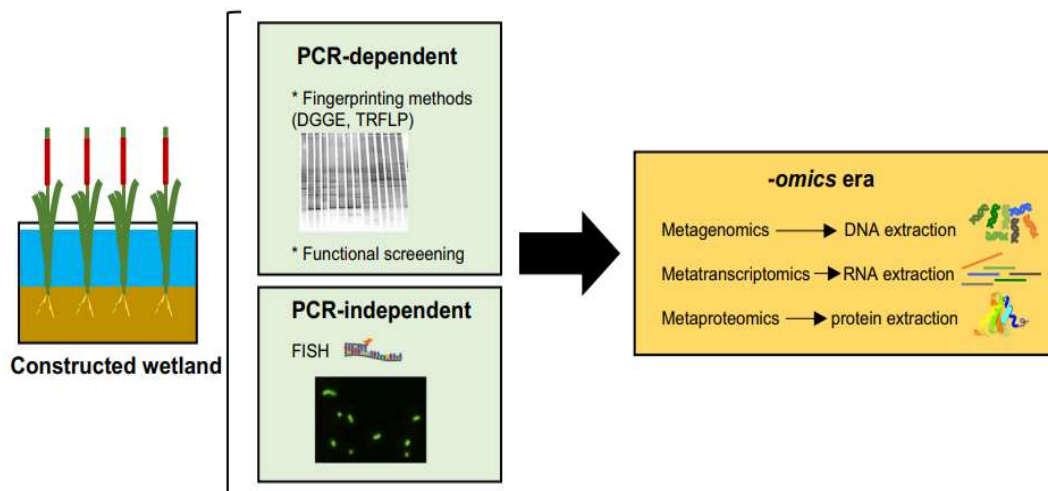
6.1.Μοριακές Τεχνικές Ανάλυσης Μικροβιακής Ποικιλότητας

Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μικροβιακές τεχνικές για να διερευνηθούν οι σχέσεις μεταξύ μικροοργανισμών που εμπλέκονται στην απομάκρυνση ρύπων από τα λύματα. Αρχικά, οι έρευνες σχετικά με τη σύνθεση των μικροβιακών κοινοτήτων στα λύματα βασίστηκαν σε καλλιεργητικές τεχνικές. Αυτές οι μέθοδοι εντόπισαν μικρόβια εξετάζοντας διαφορές στη μορφολογία, την ανάπτυξη, την ενζυματική δραστηριότητα και το μεταβολισμό για να τα ταξινομήσουν σε γένη και είδη. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις περιλάμβαναν την απομόνωση και τον χαρακτηρισμό μικροοργανισμών χρησιμοποιώντας μέσα ανάπτυξης όπως Luria-Broth, Nutrient Agar και Tryptic Soy Agar. Ωστόσο, επειδή τα περισσότερα βακτήρια δεν είναι ιδανικά για καλλιέργεια, αυτές οι τεχνικές τείνουν να επιλέγουν τους ταχέως αναπτυσσόμενους ετερότροφους μικροοργανισμούς που προσαρμόζονται καλά στις εργαστηριακές συνθήκες, πράγμα που σημαίνει ότι τα καλλιεργημένα στελέχη δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως τη φυσική μικροβιακή ποικιλομορφία. Για παράδειγμα, στα λύματα χαρτοπολτού και χαρτιού, μικροσκοπικά ο συνολικός αριθμός βακτηρίων υπολογίστηκε κατά μέσο όρο 10^{10} κύτταρα/mL, ενώ ο αριθμός των καλλιεργήσιμων κυμαινόταν μεταξύ 10^7 και 10^8 κύτταρα/mL. Τις τελευταίες δεκαετίες, μελέτες σχετικά με τις μικροβιακές δομές σε διάφορα συστήματα επεξεργασίας έχουν χρησιμοποιήσει όλο και περισσότερο τεχνικές ανεξάρτητες από την καλλιέργεια, όπως η DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis), T-RFLP (Terminal fragment length polymorphism), η ανάλυση πολυμορφισμού μήκους των θραυσμάτων περιορισμού, ενισχυμένου με PCR θραυσμάτων γονιδίων 16S ριβοσωμικού RNA (rRNA), οι οποίες επέτρεψαν να ληφθεί ένα συνολικό πρότυπο της μικροβιακής κοινότητας από διαφορετικά δείγματα. Αυτές οι μοριακές μέθοδοι έχουν αποκαλύψει την κυριαρχία του φύλου *Proteobacteria*, ακολουθούμενο από *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Actinobacteria*, *Planctomycetes* και *Firmicutes* στην ενεργοποιημένη ιλύ, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την επεξεργασία λυμάτων.

Η DGGE επιτρέπει την αξιολόγηση της πληθυσμιακής ποικιλότητας με ζώνες αλληλούχησης και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες για την αξιολόγηση της μικροβιακής ποικιλότητας σε τεχνητούς υγροτόπους. Παρά τη δημοτικότητά της, η DGGE έχει περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένης της μεροληψίας ενίσχυσης PCR (amplification bias- το τελικό προϊόν δεν αποδίδει πιστά το αρχικό DNA) και περιορισμένου αριθμού αναγνώσεων σε σύγκριση με πιο προηγμένες

τεχνικές όπως η αλληλούχηση γονιδίων 16S rRNA. Αυτοί οι περιορισμοί εμποδίζουν τις δυνατότητές της ως μελλοντικής μοριακής μεθόδου στα σύγχρονα εργαστήρια μικροβιολογίας της επιστήμης περιβάλλοντος. Ωστόσο, η PCR εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κατανομής συγκεκριμένων λειτουργικών γονιδίων και την κατανόηση βασικών μικροβιακών διεργασιών, όπως ο κύκλος του αζώτου. Αντίθετα, ο υβριδισμός φθορισμού *in situ* (FISH) με συγκεκριμένους ανιχνευτές αντιμετωπίζει την μεροληψίας ενίσχυσης PCR, αλλά περιορίζεται από την τρέχουσα διαθεσιμότητα ανιχνευτών.

Στην άνοδο της εποχής -omics εντοπίστηκαν μικροβιακές ομάδες που οι παραδοσιακές μέθοδοι παρέλειψαν στα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων με τις μεθόδους αλληλούχησης υψηλής απόδοσης (HTS), όπως το Illumina και το 454-pyrosequencing να έχουν γίνει ανεκτίμητες, παρέχοντας εκατομμύρια αναγνώσεις αλληλουχίας εύκολα και οικονομικά αποδοτικά, επιτρέποντας μεγάλης κλίμακας ανάλυση μικροβιακών κοινοτήτων. Ο μεταγονιδιωματικός χαρακτηρισμός σε τεχνητούς υγροτόπους προσφέρει πληροφορίες σχετικά με τη φυλογενετική ποικιλότητα και το γονιδιωματικό δυναμικό, παρακάμπτοντας την ανάγκη απομόνωσης μικροοργανισμών και PCR. Μεταγονιδιωματικές μελέτες έχουν επίσης επισημάνει την επικράτηση λειτουργικών κατηγοριών που σχετίζονται με το μεταβολισμό υδατανθράκων, πρωτεϊνών, παραγώγων αμινοξέων και αρωματικών ενώσεων. Επιπλέον, η RNA αλληλούχηση αξιολογεί τη γονιδιακή έκφραση, ενώ η μεταπρωτεωμική αναλύει τις πρωτεΐνες και τις σχετικές διεργασίες τους, διευκολύνοντας την ανακατασκευή των μεταβολικών οδών. Αξιοσημείωτα παραδείγματα περιλαμβάνουν τις μελέτες που χρησιμοποίησαν τη μεταγονιδιωματική για να εντοπίσουν οδούς βιοαποικοδόμησης και γονίδια που εμπλέκονται στον κύκλο του αζώτου στους ΤΥ ή εξέτασαν τη σύνθεση της βακτηριακής κοινότητας σε ΤΥ οριζόντια υποεπιφανειακής ροής, επισημαίνοντας σημαντικές διεργασίες του κύκλου του αζώτου και του θείου. Μεταπρωτεωμική προσέγγιση για παράδειγμα, χρησιμοποιήθηκε για να μελετηθούν οι μικροβιακές διεργασίες στη ριζόσφαιρα ενός ΤΥ που επεξεργάζεται νερό ρυπασμένο με τολουόλιο, αναδεικνύοντας τον ρόλο των βακτηρίων *Burkholderiales* στον αερόβιο μεταβολισμό του τολουολίου και την αυξημένη σύνθεση πολυδροξυαλκανοϊκών κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, παρά τις δυνατότητές τους, οι μελέτες που χρησιμοποιούν -omics σε ΤΥ παραμένουν περιορισμένες. (Sánchez, 2016; Valencia et al., 2020)



Εικόνα 6. Μοριακές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες για την μελέτη της μικροβιακής ποικιλότητας στους ΤΥ. Προοπτική για τη μελέτη της διαφορετικότητας και λειτουργίας των μ.ο. λόγω της παραγωγής εκατομμυρίων ακολουθία DNA. (Sánchez 2016)

Πίνακας 2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μοριακών Τεχνικών Ανάλυσης Μικροβιακών Κοινοτήτων
(Sánchez 2016, Valencia et al., 2020, R Sasi et al., 2023, Engida et al., 2021)

Μέθοδος ανίχνευσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
DGGE	<ul style="list-style-type: none"> • Ταυτόχρονη ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού δειγμάτων • Ταχεία, αξιόπιστη και αναπαραξιμη • Οι ζώνες DNA μπορούν να αφαιρεθούν από πηκτώματα για ενίσχυση και αλληλούχηση για ταυτοποίηση • Ευαίσθητο στη διακύμανση της αλληλουχίας DNA 	<ul style="list-style-type: none"> • PCR εξαρτώμενο • Εξαρτάται από τη λύση του DNA και την αποτελεσματικότητα της εκχύλισης • Ανόμοιες αλληλουχίες DNA από διακριτά βακτηριακά είδη μπορεί να εμφανίζουν το ίδιο διαχωρισμό λόγω ίσου περιεχομένου GC • Χρονοβόρα • Χρησιμοποιείται μόνο για μικρά θραύσματα DNA • Πολλαπλές ζώνες DNA για ένα μόνο είδος-επομένως πολύπλοκο για ταυτοποίηση κοινότητας • Δύσκολο να αναπαραχθεί (παραλλαγή πήκτωμα σε πήκτωμα)
ARDRA	<ul style="list-style-type: none"> • Ιδιαίτερα χρήσιμο για ανίχνευση των διαρθρωτικών αλλαγών για απλές μικροβιακές κοινότητες • Δεν απαιτείται μεμονωμένος εξοπλισμός • Είναι μια απλή και ακριβής μέθοδος • Ταχεία και οικονομική • Συμβατή με άλλες τεχνικές, όπως η PCR 	<ul style="list-style-type: none"> • Πιο εφαρμόσιμο σε περιβάλλοντα με χαμηλή περιπλοκότητα • Υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί για επαρκή ανάλυση • Εντατική διαδικασία και χρονοβόρα σε σύγκριση με άλλες fingerprinting τεχνικές, είναι ασθενέστερη στο να διακρίνει τα είδη
T-RFLP	<ul style="list-style-type: none"> • Ικανότητα ανάλυσης ευρείας κλίμακας μικροβίων • Εξαιρετικά αναπαραράξιμη, ευαίσθητη και αξιόπιστη μέθοδος 	<ul style="list-style-type: none"> • PCR εξαρτώμενο • Εξαρτάται από τη λύση του DNA και την αποτελεσματικότητα της εκχύλισης • Ο προσδιορισμός διαφορετικών βακτηρίων εξαρτάται από τα περιοριστικά ένζυμα που χρησιμοποιούνται

	<ul style="list-style-type: none"> • Βολικός τρόπος αποθήκευσης δεδομένων και σύγκριση μεταξύ σύνθετων δειγμάτων • Το σύστημα ανίχνευσης που βασίζεται σε φθορόχρωμα και παρέχει ακρίβεια 	<ul style="list-style-type: none"> • Ενδέχεται να εμφανιστούν ψευδείς κορυφές • Αδυναμία ανάκτησης • Περιορισμένη ταξινομική ανάλυση • Έλλειψη πληροφοριών ακολουθίας DNA • Περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με τις λειτουργικές δυνατότητες
FISH	<ul style="list-style-type: none"> • Μέθοδος μη εξαρτώμενη από PCR • Γρήγορη και αξιόπιστη αναγνώριση και ποσοτικοποίηση των μικροβιακών ομάδων σε περιβαλλοντικά δείγματα • Εύκολη ανίχνευση και ανάλυση • Επιτρέπει την ανίχνευση και την ειδική διανομή περισσότερων από ένα δείγμα ταυτόχρονα • Δεν απαιτεί ειδική εκπαίδευση. 	<ul style="list-style-type: none"> • Επίπονη και χρονοβόρα μέθοδος • Περιορισμοί από τον αριθμό των διαθέσιμων ανιχνευτών • Δεν μπορούν όλα τα βακτηριακά και αρχαία κύτταρα να είναι διαπερατά • Δυσκολία εντοπισμού στόχων που έχουν χαμηλά αντίγραφα DNA • Αυτοφθορισμός Μικροοργανισμών • Χρώση μόνο βακτηρίων με άθικτη μεμβράνη • Η ακρίβεια και η αξιοπιστία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ειδικότητα του probe
Tag sequencing (16S rRNA gene)	<ul style="list-style-type: none"> • Παραγωγή μεγάλου αριθμού ακολουθιών που διαβάζονται με χαμηλό κόστος • Επιτρέπει την αναγνώριση σε άφθονα και σπάνια είδη • Ταχεία μέθοδος αξιολόγησης βιοποικιλότητας και αφθονία σε πολλά είδη (OTU) ταυτόχρονα και στο σημαντικό βάθος σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μεθόδους 	<ul style="list-style-type: none"> • PCR εξαρτώμενο • Εξαρτάται από τη λύση του DNA και την αποτελεσματικότητα της εκχύλισης • Σχετικά ακριβή μέθοδος • Αναπαραγωγή και στατιστική ανάλυση είναι απαραίτητη • Πρόκληση όσον αφορά την αποδοτικότητα της ανάλυσης των δεδομένων
qRT PCR	<ul style="list-style-type: none"> • Επιτρέπει την παρακολούθηση της αναπαραγωγής των αντίτυπων DNA σε πραγματικό χρόνο • Ταυτόχρονα αναπαράγει & ποσοτικοποιεί τη ζητούμενη ακολουθία DNA 	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν καθορίζει τον αριθμό των κυττάρων, αλλά υπολογίζει τον αριθμό των γονιδιακών αντιγράφων του επισημασμένου γονιδίου
Metagenomics	<ul style="list-style-type: none"> • Μη εξαρτώμενη Μέθοδος από PCR • Μαζική αλληλούχηση DNA όλων των γονιδιωμάτων που υπάρχουν σε μια μικροβιακή κοινότητα • Η βιοποικιλότητα μπορεί να μελετηθεί αναλυτικότερα • Αποκαλύπτει την παρουσία χιλιάδων μικροβιακών γονιδιωμάτων • Παροχή πληροφοριών σχετικά με τις λειτουργίες των μικροβιακών κοινοτήτων σε ένα δεδομένο περιβάλλον 	<ul style="list-style-type: none"> • Εξαρτάται από τη λύση του DNA και την αποτελεσματικότητα της εκχύλισης • Έλλειψη τυποποίησης στην επεξεργασία δεδομένων • Απαιτούνται μεταγενέστερες αναλύσεις βιοπληροφορικής για να καταργηθούν σφάλματα αλληλουχίας και δεδομένα επεξεργασίας • Εξειδικευμένες υπολογιστικές εγκατ/σεις και ειδικοί ερευνητές βιοπληροφορικής • Υψηλό κόστος • Η ανάλυση δεδομένων αποτελεί πρόκληση και είναι χρονοβόρα • Δύσκολο στη χρήση

6.2.Ποικιλομορφία Μικροβιακών Κοινοτήτων & Παράγοντες Επιρροής

Ένα ευρύ φάσμα μικροοργανισμών, συμπεριλαμβανομένων βακτηρίων, ιών, πρωτόζωων, μυκήτων, φυκών και άλλων μικροσκοπικών οργανισμών έχει ταυτοποιηθεί στους τεχνητούς υγροτόπους. Ο όρος «δυναμική της μικροβιακής

κοινότητας», αναφέρεται συγκεκριμένα στην κοινοπραξία βακτηριακών κυρίως πληθυσμών στους ΤΥ. Η σύνθεση, ο τύπος, το μέγεθος και η δυναμική αυτών των μικροβιακών κοινοτήτων είναι κρίσιμοι παράγοντες για τη διασφάλιση αποτελεσματικής επεξεργασίας λυμάτων σε συστήματα ΤΥ. Οι μικροβιακές κοινότητες βρίσκονται σε τρεις κύριες περιοχές εμφάνισης: (i) προσκολλημένες ή πολύ κοντά στις ρίζες των φυτών (ριζόσφαιρα), (ii) εντός βιοφίλμ που περιβάλλουν τα διηθητικά μέσα υποστρώματος και (iii) στο ελεύθερο ή ενδιάμεσο νερό. Τα ποικίλα περιβάλλοντα εντός των ΤΥ διαδραματίζουν βασικό ρόλο στη διαμόρφωση των λειτουργικών δραστηριοτήτων των μικροβιακών κοινοτήτων. (Seth et al., 2024)

Τα εισρέοντα λύματα που ρέουν μέσω διάφορων υποστρωμάτων όπως χαλίκι, ρίζες και έδαφος, στους τεχνητούς υγροτόπους μεταφέρουν μαζί τους μικροβιακά είδη. Μερικοί από αυτούς τους μικροοργανισμούς προσκολλώνται στα υποστρώματα και σχηματίζουν βιοφίλμ, τα οποία ποικίλλουν σε βιολογική και χημική σύνθεση ανάλογα με τον τύπο των λυμάτων που υποβάλλονται σε επεξεργασία, το σχεδιασμό του ΤΥ και τα φυτικά είδη που υπάρχουν. Τα φυτικά είδη, η ανάπτυξή τους, η πρόσληψη οξυγόνου και η μορφολογία των ριζών είναι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις αλληλεπιδράσεις μικροβίων-φυτών, καθώς και τον πληθυσμό και την πυκνότητα των βιοφίλμ. Οι μικροοργανισμοί που κατοικούν στα βιοφίλμ (όπως οι ρίζες φυτών και τα στερεά υλικά) είναι σημαντικοί για τη διάσπαση των ρύπων.

Η μικροβιακή κοινότητα στους ΤΥ δραστηριοποιείται σε διαφορετικές οξειδοαναγωγικές ζώνες, όπως οι αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες, όπου το οξυγόνο μειώνεται ανάλογα με το βάθος και οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται στις ζώνες αυτές περιλαμβάνουν απονιτροποιητικά βακτήρια, βακτήρια που μειώνουν το σίδηρο, θειικά και μεθανογόνα μικρόβια, τα οποία συμβάλλουν στη μείωση της βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου (BOD) μέσω παραγωγής μεθανίου (CH₄). Τα μεθανογόνα μικρόβια είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την αποδόμηση οργανικών ουσιών και την απομάκρυνση ρύπων.

Η δυναμική των μικροβιακών κοινοτήτων στα συστήματα ΤΥ εξαρτάται από τις αλλαγές στις οξειδοαναγωγικές συνθήκες, τη διαθέσιμη τροφή και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το pH και τα επίπεδα οξυγόνου. Κατά συνέπεια το βάθος των υγροτόπων επηρεάζει τη δομή των μικροβιακών κοινοτήτων στα βιοφίλμ, ιδιαίτερα εκείνων που περιλαμβάνουν βακτήρια οξειδωτικά αμμωνίας και Αρχαία (Archaea). Μελέτη έδειξε ότι οι μικροβιακές κοινότητες είναι

πιο πυκνές και δραστήριες κοντά στα φίλτρα της κάθετης ροής ΤΥ, όπου η παροχή οξυγόνου και η διαθεσιμότητα θρεπτικών είναι υψηλότερη. (Engida et al., 2021)

Μια άλλη μελέτη (Shahid et al., 2020) έδειξε ότι τα βιοφίλμ που σχηματίζονται στις ρίζες φιλοξενούν ποικιλόμορφες βακτηριακές κοινότητες, οι οποίες επηρεάζονται από παράγοντες όπως η ροή του νερού, η πρόσβαση στο φως, η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών, οι φυσικοχημικές ιδιότητες των ιζημάτων και η παρουσία υδρόβιων οργανισμών. Η βακτηριακή ποικιλομορφία είναι μεγαλύτερη στις ρίζες συγκριτικά με τους μίσχους ή τα φύλλα, καθώς και στα φυτικά ιζήματα σε σύγκριση με τα μη φυτικά. Οι ρίζες των φυτών διαμορφώνουν τις μικροβιακές κοινότητες μέσω της τροποποίησης της συσσώρευσης οργανικής ύλης, της σύνθεσης των εξιδρωμάτων και των επιπέδων οξυγόνου, δημιουργώντας έτσι μοναδικά μικροπεριβάλλοντα.

Μελέτες τελευταίων ετών που αναλύουν τα βακτηριακά φύλα σε τεχνητούς υγροτόπους που επεξεργάζονται λύματα αναδεικνύουν τα *Proteobacteria* να κυριαρχούν, αν και σε κάποιες περιπτώσεις άλλα φύλα, όπως τα *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Firmicutes* εμφανίζονται σε υψηλότερη αφθονία, αλλά και άλλα φύλα όπως *Spirochaetota*, *Desulfobactota*, *Chloroflexi* και *Cyanobacteria*. Μελέτες δείχνουν ότι τα *Proteobacteria* παίζουν βασικό ρόλο σε διαδικασίες όπως η αποδόμηση οργανικής ύλης και ο κύκλος του αζώτου και του θείου. Η χρήση του γονιδίου 16S rRNA για την ανάλυση μικροβιακών κοινών υποδεικνύει ότι τα *Proteobacteria* είναι τα πιο άφθονα σε διάφορους υγροτόπους, ανεξάρτητα από τη μέθοδο ανίχνευσης. Επιπλέον, τα *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Patescibacteria*, *Firmicutes* και *Actinobacteria* διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αποτελεσματική εξάλειψη των ρύπων στα συστήματα υγροτόπων και αναγνωρίζονται ευρέως ως πολυμερείς οργανικοί αποικοδομητές. Τα *Firmicutes* και *Chloroflexi* έχουν επιδείξει σημαντική αποτελεσματικότητα στην αποικοδόμηση μικροβιακών εξωκυτταρικών πολυμερών ενώσεων και διαλυτών μικροβιακών ουσιών. Αρκετές μελέτες δείχνουν ότι τα *Patescibacteria* είναι ένα προεξέχον βακτηριακό φύλο μετά την έναρξη του ANAMMOX και την απονιτροποίηση.

Παράγοντες όπως το είδος των λυμάτων, οι χημικές αλλαγές και η ανθρώπινη δραστηριότητα επηρεάζουν την αφθονία αυτών των φύλων. Η θερμοκρασία επηρεάζει επίσης την αφθονία των μικροοργανισμών. Για παράδειγμα τα *Firmicutes* σε εργαστηριακές δοκιμές κυριάρχησαν στους 45 ° C, ενώ τα *Proteobacteria*, αν και έχουν καλύτερη ανοχή και αυτά σε θερμά κλίματα, είναι πιο άφθονα σε ψυχρότερα περιβάλλοντα σε σχέση με τα *Firmicutes*. (Engida et al., 2021; Seth et al., 2024; Shahid

et al.; 2020, Mellado et al., 2021; Ali et al., 2024; Baddar et al., 2024; Garibay et al., 2022)

Η μελέτη (Choi et al., 2022) που διερεύνησε τη σχέση μεταξύ φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του εδάφους και του νερού και της βακτηριακής κοινότητας σε ΤΥ που επεξεργάζονται λύματα επιβεβαιώνει, ότι τα *Proteobacteria* ήταν το πιο κυρίαρχο φύλο σε όλα τα δείγματα εδάφους και νερού. Η ίδια μελέτη καταδεικνύει η συμβιωτική σχέση μεταξύ βακτηριακών φύλων και ότι το διαλυμένο οξυγόνο (DO) και το pH, επηρεάζουν την επιβίωση αερόβιων και αναερόβιων βακτηρίων.

Συνοπτικά, παράγοντες όπως η ποιότητα του εδάφους και του εισρέοντος νερού, τα επίπεδα ρύπων, η θερμοκρασία, το pH, και ο ρόλος των φυτών επηρεάζουν σημαντικά την αφθονία και την ποικιλομορφία των μικροοργανισμών στα ΤΥ. Επίσης, ο τύπος τεχνητού υγροτόπου και ο χειρισμός του εσωτερικού περιβάλλοντος του, ιδιαίτερα μέσω της αλλαγής των οξειδοαναγωγικών συνθηκών, των διαφορετικών χρόνων υδραυλικής κατακράτησης αλλά και το είδος υποστρώματος, ευνοούν διαφορετικούς μικροβιακούς πληθυσμούς, με αποτέλεσμα να μπορεί να μετατοπιστεί η κυριαρχία ορισμένων μικροβιακών λειτουργικών ομάδων.

Πίνακας 3. Παράμετροι που επηρεάζουν την δραστηριότητα και ποικιλομορφία των μικροβιακών κοινοτήτων

(Garibay et al., 2022, Bhuiyan et al., 2023, Rani et al., 2024, Rajan et al., 2019)

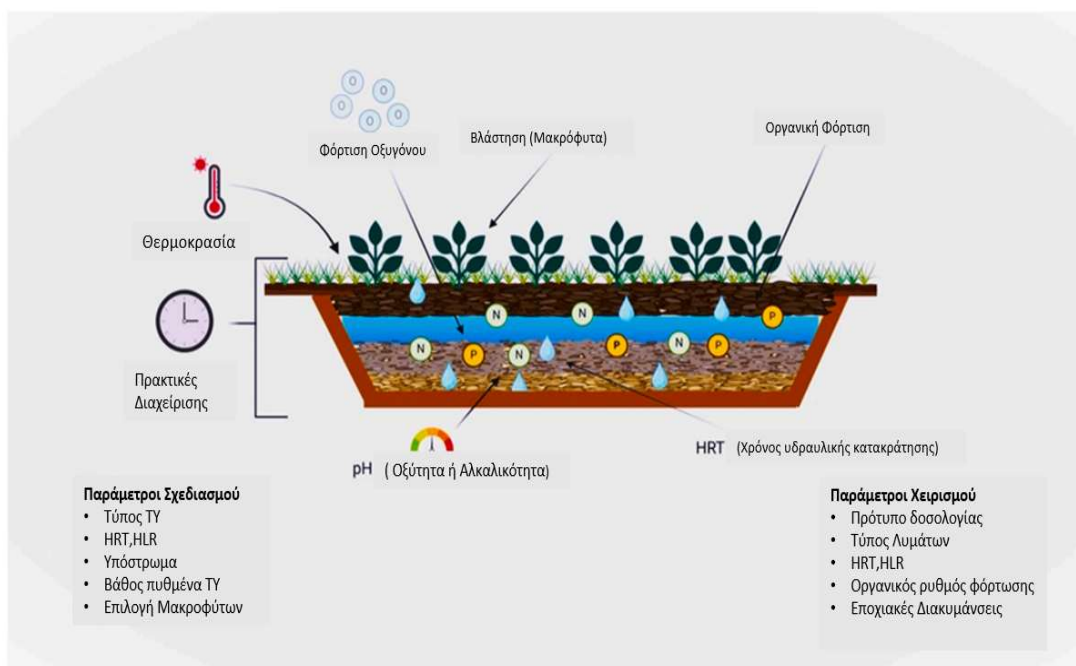
Παράμετροι που επηρεάζουν τη δραστηριότητα και ποικιλομορφία των μικροβιακών κοινοτήτων	
Φυτική βλάστηση	<p>Παροχή Οξυγόνου: Ενισχύει τη μικροβιακή ποικιλομορφία και δραστηριότητα.</p> <p>Ανάπτυξη Ριζωμάτων: Αυξάνει την πορώδη δομή των ΤΥs, βελτιώνοντας τη μεταφορά οξυγόνου για τη μικροβιακή δραστηριότητα και τις διαδικασίες νιτροποίησης από βακτήρια νιτροποίησης.</p> <p>-Δημιουργία Αερόβιων/ αναερόβιων Ζωνών: Υποστηρίζουν μικροβιακές διαδικασίες.</p> <p>Αερόβιες Ζώνες: Δημιουργούνται κοντά στις ρίζες των φυτών καθώς απελευθερώνουν οξυγόνο στο υπόστρωμα και υποστηρίζουν αερόβια βακτήρια όπως τα <i>Methanotrophs</i>, <i>Nitrosomonas</i> και <i>Pseudomonas aeruginosa</i>.</p> <p>Αναερόβιες Ζώνες: Δημιουργούνται μακριά από τις ρίζες, κυριαρχούμενες από μεθανογόνα και βακτήρια που μειώνουν το θείο.</p> <p>Παροχή Οργανικής Ύλης: Πηγή Άνθρακα για Μικρόβια μέσω αποσυντιθέμενης φυτικής ύλης και εκκρίσεων ριζών : Οι ρίζες των φυτών παρέχουν άνθρακα για τα ετερότροφα βακτήρια απονιτροποίησης (π.χ. <i>Comamonadaceae</i> και <i>Gemmatimonadaceae</i>).</p> <p>Επιφάνειες για την προσκόλληση βιοφίλμ</p> <p>Ρύθμιση Θερμοκρασίας Νερού: Η σκίαση μειώνει τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.</p>

	<p>Ποικιλομορφία και Ανάπτυξη Φυτών: οδηγεί σε υψηλότερη παραγωγή βιομάζας που επηρεάζει θετικά τα πρότυπα της μικροβιακής κοινότητας</p> <p>Επίδραση Ειδικών Φυτών στις Μικροβιακές Κοινότητες: Κοινά καλάμια (π.χ. <i>Phragmites australis</i>, <i>Cyperus malaccensis</i>): Επηρεάζουν τις κοινότητες βακτηρίων που οξειδώνουν την αμμωνία (AOB), αν και η επίδραση στα βακτήρια <i>anammox</i> είναι περιορισμένη. <i>Thypha latifolia</i>: Αυξάνει την αφθονία των Actinobacteria μέσω της μεταφοράς οξυγόνου στο μικροπεριβάλλον της ριζόσφαιρας</p>
Υποστρώματα	<p>Σταθερότητα και θρεπτική σύνθεση που υποστηρίζει στοχευμένα μικροβιακές κοινότητες</p> <p>Φυσικά Υλικά: τύρφη, έδαφος, θρυμματισμένο μπαμπού, άμμο, άχυρο ρυζιού, κομπόστ.</p> <p>Εξειδικευμένα & Τεχνητά Υλικά: Κεραμισίτης, ζεόλιθος, καολινίτης,, βιοάνθρακας (biochar), ηφαιστειακό πέτρωμα (tezontle).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Κεραμισίτης: Υπερέχει του χαλικιού και της σκωρίας λόγω της σύνθεσής του (χαλαζίας, Al, Fe, Mg) και της μικροπορώδους δομής του, που επιτρέπει την αποτελεσματική δέσμευση φωσφόρου και υποστηρίζει μεγαλύτερη μικροβιακή βιοποικιλότητα, όπως τις οικογένειες Comamonadaceae, οι οποίες απομακρύνουν τον φώσφορο μέσω σχηματισμού πολυφωσφορικών ενώσεων. - Ζεόλιθος: Αποτελεσματικός για την απομάκρυνση αμμωνίου και επηρεάζει τη δομή μικροβιακών κοινοτήτων, όπως Cyanobacteria επηρεάζει τη χωρική κατανομή των Proteobacteria - Άχυρο Ρυζιού: Βελτιώνει την απομάκρυνση του αζώτου χάρη στη σύνθεσή του (κυτταρίνη και λιγνίνη), υποστηρίζοντας την ανάπτυξη παχύτερων βιοφιλμ και παρέχοντας πηγή άνθρακα - Biochar : Πλούσιο σε άνθρακα υπόστρωμα με μεγάλη επιφάνεια και υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων αυξάνοντας τον πλούτο και τη βιοποικιλότητα ειδών Υποστηρίζει απονιτροποιητικά βακτήρια (<i>Thauera</i>, <i>Candidatus competibacter</i>, <i>Dechloromonas</i>, <i>Desulfobulbus</i>, <i>Chlorobium</i>, <i>Thiobacillus</i>), σημαντικά για την απομάκρυνση του αζώτου. - Υποστρώματα Εμπλουτισμένα με Fe²⁺: Ενισχύουν τις διεργασίες νιτροποίησης, απονιτροποίησης και <i>anammox</i>, αυξάνοντας τη μικροβιακή δραστηριότητα και βιοποικιλότητα. Το Fe²⁺ ενισχύει τη νιτροποίηση και την αφθονία των <i>Nitrospira</i> μέσω της βελτίωσης της ενζυμικής δραστηριότητας. - Tezontle: Το ουδέτερο pH, το υψηλό πορώδες και η φυσική σταθερότητα το καθιστούν ιδανικό για μικροβιακή ανάπτυξη. Περιέχει Ca, Fe, Zn και στερείται θρεπτικών συστατικών, υποστηρίζοντας ποικίλες μικροβιακές κοινότητες. - Χαλίκι και Άμμος: Προωθούν την αφθονία του <i>Chloroflexi</i> στα VFTY
Βάθος	<p>Η μικροβιακή ποικιλότητα είναι υψηλότερη στην κορυφή του υποστρώματος και μειώνεται με το βάθος λόγω των διακυμάνσεων της οργανικής ύλης, των συγκεντρώσεων θρεπτικών ουσιών και των περιβαλλοντικών συνθηκών .</p> <ul style="list-style-type: none"> - Απονιτροποίηση και αναερόβιες ζώνες: Οι (SSFTYs) έχουν μεγαλύτερη αφθονία απονιτροποιητών από τους (VFTYs) . Βάθος 1,6 m σε SSFTYs δημιουργεί ένα αναερόβιο περιβάλλον, διεγείροντας την ανάπτυξη των απονιτροποιητών και την παρουσία <i>Chloroflexi</i>, τα οποία παρέχουν ενέργεια για αυτά τα βακτήρια

	<ul style="list-style-type: none"> - Κατανομή διαλυμένου οξυγόνου (DO): Η συγκέντρωση DO είναι χαμηλότερη στην είσοδο και σε βαθύτερες ζώνες, αλλά υψηλότερη στα ανώτερα στρώματα και την έξοδο. Η νιτροποίηση απαιτεί ~ 1,50 mg / L DO, ενώ η απονιτροποίηση συμβαίνει κάτω από 0,50 mg / L DO - Αερόβιες vs. Αναερόβιες ζώνες: Οι ρηχές ζώνες στα ΤΥ είναι κυρίως αερόβιες, ενώ οι αναερόβιες ζώνες εμφανίζονται σε μεγαλύτερα βάθη. Ο αερόβιος βακτηριακός μεταβολισμός είναι ταχύτερος, επιτρέποντας την υψηλότερη απομάκρυνση ρύπων σε μικρότερους χρόνους.
Υδραυλικός χρόνος κατακράτησης (HRT)	<ul style="list-style-type: none"> - Οι μεγαλύτεροι HRT παρέχουν περισσότερο χρόνο για μικροβιακές διεργασίες, όπως η απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών και η αποδόμηση οργανικής ύλης, επιτρέποντας στη μικροβιακή κοινότητα να αξιοποιήσει πλήρως τους διαθέσιμους πόρους. - Οι βραχύτεροι HRT περιορίζουν την αποτελεσματικότητα του μικροβιακού μετασχηματισμού, αλλά μπορεί να είναι κατάλληλες για συστήματα που απαιτούν υψηλή απόδοση. <p>Η υδραυλική διαμόρφωση καθορίζει την ισορροπία μεταξύ αερόβιων και αναερόβιων μικροβιακών κοινοτήτων, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την ικανότητα του υγροτόπου να εκτελεί λειτουργίες όπως η νιτροποίηση, η απονιτροποίηση και η αποικοδόμηση της οργανικής ύλης</p>
pH	<p>Το pH είναι ένας κρίσιμος παράγοντας ελέγχου για τη δημιουργία και τη δραστηριότητα των μικροβιακών κοινοτήτων απονιτροποίησης, νιτροποίησης, comammox και anammox σε υποστρώματα ΤΥ</p> <p>Προτιμήσεις pH μικροβιακής κοινότητας:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Οξειδωτικά βακτήρια αμμωνίας (AOB): Η βέλτιστη ανάπτυξη συμβαίνει σε pH 7,8-8,5 - Οξειδωτικά βακτήρια νιτρώδων (NOB): Αναστέλλονται σε τιμές pH άνω του 9,5 - Βακτήρια Comammox: Προτιμούν αλκαλικά περιβάλλοντα, με βέλτιστο εύρος pH 7-8 - Απονιτροποιητικά βακτήρια: Υψηλότεροι ρυθμοί ανάπτυξης σε pH 7,0-7,5, με τη δραστηριότητα να επηρεάζεται αρνητικά κάτω από το pH 6,0 και πάνω από το pH 8,0 - Βακτήρια Anammox: Βέλτιστο pH μεταξύ 7,5-8,0; Τα υψηλότερα επίπεδα pH μπορούν να αυξήσουν τις συγκεντρώσεις αμμωνίας, ενδεχομένως αναστέλλοντας τη διαδικασία anammox <p>Οι μικροοργανισμοί που εμπλέκονται στην απομάκρυνση αζώτου και οργανικής ύλης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις διακυμάνσεις του pH, ειδικά κοντά στην είσοδο του ΤΥ</p> <p>Προκλήσεις στη διατήρηση σταθερού pH στο ΤΥ:</p> <p>Το pH επηρεάζεται από παράγοντες όπως η σύνθεση των λυμάτων, οι βροχοπτώσεις, το κλίμα, τα μέσα υποστρώματος και τα υποπροϊόντα του μικροβιακού μεταβολισμού.</p>
Τύπος ΤΥ	<p>HFTY & VFTY:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Τα βακτήρια κυριαρχούν σε σχέση με τα αρχαία, με σχετική αφθονία ~92% και 8%, αντίστοιχα. Τα <i>Proteobacteria</i> και τα <i>Nitrospira</i> είναι τα πιο άφθονα φύλα. - VFTY λόγω κορεσμού οξυγόνου: υψηλότερη αφθονία αερόβιων όπως τα <i>Firmicutes</i> και τα <i>Acinetobacter</i>. Τα <i>Firmicutes</i> απουσιάζουν σε ορισμένα συστήματα VFTY <p>Ελεύθερης επιφανειακής ροής ΤΥ:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> - Τα Αρχαία παρουσιάζουν υψηλότερη σχετική αφθονία (18,9-36,4%) σε σύγκριση με τα HFTY και VFTY. - Κυριαρχείται από <i>Proteobacteria</i> και <i>Cyanobacteria</i>. - Τα Betaproteobacteria και τα Gammaproteobacteria είναι άφθονα στη ριζόσφαιρα, ενώ τα Deltaproteobacteria κυριαρχούν στο ίζημα - Το Firmicutes και τα Euryarchaeota είναι πιο άφθονα στο SFTY από ό,τι στο HFTY. <p>Κοινά μικροβιακά φύλα σε όλους τους τύπους SFTY, HFTY, και VFTY :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Τα Proteobacteria παραμένουν το κυρίαρχο φύλο. Ακολουθούν Firmicutes, Bacteroidetes, και Chloroflexi. - Η κυριαρχία ποικίλλει ανάλογα με το σχεδιασμό του συστήματος και τις ιδιότητες μεταφοράς οξυγόνου: <p>Τα αερόβια φύλα κυριαρχούν στο VFTY. Τα αναερόβια φύλα είναι πιο άφθονα σε HFTY και SFTY.</p> <p>VFTY: Απαιτούν προσεκτική επιλογή υλικών (π.χ. κεραμίστις, Fe-εμπλουτισμένα υποστρώματα) για βελτιστοποίηση πορώδους και μεταφοράς οξυγόνου.</p> <p>HFTY: Παράγοντες όπως το μέγεθος υλικών, το βάθος και η ταχύτητα ροής είναι σημαντικοί.</p> <p>Οι υβριδικές διαμορφώσεις (που συνδυάζουν VFTY, SFTY και HFTY) συνιστώνται για την εξισορρόπηση της αερόβιας και αναερόβιας μικροβιακής δραστηριότητας, μεγιστοποιώντας την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας με βάση τη σύνθεση των λυμάτων.</p>
<p>Θερμοκρασία & Εποχικότητα</p>	<p>Επίδραση της θερμοκρασίας στη μικροβιακή αναπνοή</p> <ul style="list-style-type: none"> - Οι υψηλότερες θερμοκρασίες το καλοκαίρι οδηγούν σε υποξικές ή ανοξικές συνθήκες λόγω μειωμένου διαλυμένου οξυγόνου, ενώ το χειμώνα υπάρχουν αυξημένες συγκεντρώσεις οξυγόνου - Η μικροβιακή αφθονία μειώνεται από το καλοκαίρι στο χειμώνα <p>Επιδράσεις θερμοκρασίας στην απονιτροποίηση</p> <ul style="list-style-type: none"> - Τα ποσοστά απονιτροποίησης στα επιφανειακής ροής TY είναι υψηλότερα το καλοκαίρι και χαμηλότερα κατά τους ψυχρότερους μήνες <p>Επιδράσεις θερμοκρασίας στην απονιτροποίηση:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Το <i>Pseudomonas</i>, ένα αερόβιο απονιτροποιητικό βακτήριο, είναι πιο δραστήριο το καλοκαίρι παρά το χειμώνα. Η απονιτροποίηση μπορεί να συμβεί τόσο υπό αναερόβιες όσο και υπό αερόβιες συνθήκες, με την <i>Pseudomonas</i> να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε αερόβια περιβάλλοντα. <p>Βακτήρια Comammox και διακυμάνσεις θερμοκρασίας:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Η αναλογία των βακτηρίων Comammox προς τα οξειδωτικά βακτήρια αμμωνίας (AOB) είναι υψηλότερη την άνοιξη και χαμηλότερη το χειμώνα. Τα βακτήρια Comammox όπως το <i>Nitrospira</i> ευδοκούν σε περιβάλλοντα χαμηλού οξυγόνου. <p>Εποχιακές διακυμάνσεις στις μικροβιακές κοινότητες:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Η αφθονία των πρωτεοβακτηρίων συσχετίζεται θετικά με τη θερμοκρασία, παρουσιάζοντας υψηλότερα επίπεδα το καλοκαίρι (25,6 °C) από ό,τι το χειμώνα (9,2 °C) - Οι υψηλότερες θερμοκρασίες προάγουν τη φωτοσύνθεση των μακροφύτων, αυξάνοντας τα εκκρίματα ιζημάτων, τα οποία υποστηρίζουν μεθανογενείς βακτηριακές κοινότητες <p>Επιπτώσεις των χαμηλών θερμοκρασιών:</p>

	<ul style="list-style-type: none">- Θερμοκρασίες κάτω των 10°C αναστέλλουν την οξείδωση του αμμωνίου λόγω της μειωμένης ανάπτυξης των φυτών και της κακής μεταφοράς οξυγόνου στους HFTY- Βακτήρια προσαρμοσμένα στο κρύο, όπως τα <i>Nitrosomonas cryotolerans</i>, μπορούν να αζωτοποιήσουν (nitrify) στους -5°C, αλλά να αποδώσουν βέλτιστα στους 22-30°C. <p>Γεωγραφική επίδραση στην αποδοτικότητα του ΤΥ:</p> <ul style="list-style-type: none">- Οι ΤΥ σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές επιτυγχάνουν υψηλότερους ρυθμούς μικροβιακού μεταβολισμού λόγω σταθερών, θερμών θερμοκρασιών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους- Οι ΤΥ σε εύκρατα κλίματα αντιμετωπίζουν μειωμένη απόδοση λόγω των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας που αποσταθεροποιούν τις βακτηριακές κοινότητες <p>Οι εποχιακές αλλαγές θερμοκρασίας και η δραστηριότητα των φυτών διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη δυναμική της μικροβιακής κοινότητας. Με βέλτιστη μικροβιακή δραστηριότητα τους θερμότερους μήνες, υπογραμμίζεται τη σημασία του σχεδιασμού του συστήματος για την αντιμετώπιση των εποχιακών διακυμάνσεων.</p>
--	---



Εικόνα 7. Παράγοντες που επηρεάζουν την ποικιλομορφία των μικροβιακών κοινοτήτων στους ΤΥ.

(Rani et al., 2024)

7.Απομάκρυνση του Αζώτου

Η απομάκρυνση του αζώτου αποτελεί βασική διεργασία στην απορρύπανση λυμάτων λόγω των επιπτώσεών του στα υδάτινα οικοσυστήματα. Οι τεχνητοί υγρότοποι έχουν αναδειχθεί ως οικονομική και φιλική στο περιβάλλον λύση για την απομάκρυνση του αζώτου με υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης δεικτών αζώτου με μέγιστες τιμές που έχουν σημειωθεί σε διάφορες έρευνες TN (67%), NO₃-N (74.90%), NH₄⁺-N (83.93%). (Wang et al., 2023; Shirdashtzadeh et al., 2023) Ωστόσο, η απομάκρυνση του αζώτου στα ΤΥ παραμένει σε κάποιες περιπτώσεις ασυνεπής, με πολλά συστήματα να αποτυγχάνουν να επιτύχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα απομάκρυνσης με ποσοστά επιτυχίας μόνο 35% .

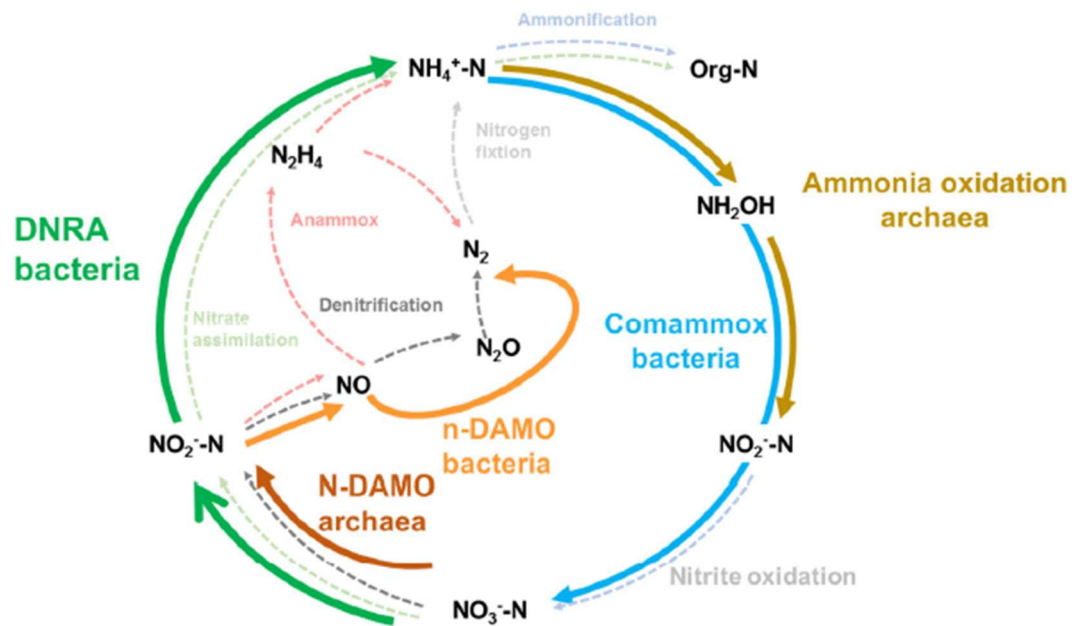
Ενώ τα φυτά συμβάλλουν στην απομάκρυνση του αζώτου, ο ρόλος τους είναι σχετικά μικρός, αντιπροσωπεύοντας λιγότερο από το 10% σε ΤΥ πιλοτικής κλίμακας και σπάνια υπερβαίνει το 15% . Οι μικροοργανισμοί συνεισφέρουν συνήθως στο 90% και υπό βέλτιστες συνθήκες σε ΤΥ με ασθενή μικροβιακή δραστηριότητα, η συνδυασμένη συμβολή φυτών και υποστρωμάτων φτάνει μόνο το 20% περίπου. (Cui et al., 2019; Tang et al., 2020; Fernández del Castillo et al., 2025). Ο μικροβιακός μετασχηματισμός αζώτου λοιπόν, είναι ο πρωταρχικός μηχανισμός που οδηγεί στην απομάκρυνση του αζώτου στα ΤΥ. Αυτοί οι μικροοργανισμοί δεν δρουν ανεξάρτητα, αλλά αλληλοεπιδρούν με φυτά, υποστρώματα και άλλα μικρόβια. Καθώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η τεχνολογία των ΤΥ αλλάζουν, εμφανίζονται διαφορετικοί μηχανισμοί σύζευξης και οι ερευνητές αναπτύσσουν στοχευμένες έρευνες για τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης αζώτου. Ακόλουθα, διάφορες εφαρμογές ενισχύουν την απομάκρυνση αζώτου από μικροβιακές κοινότητες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συμπεριλαμβανομένων υποστρωμάτων πλούσιων σε άνθρακα σιδηροπυρίτη, σίδηρο αλλά και ηλεκτρο-υποβοηθούμενες μέθοδοι που παρέχουν ηλεκτρόνια για απονιτροποίηση, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης. Αν και τα φυτά αυτόνομα προσφέρουν μικρό ποσοστό στην απομάκρυνση του αζώτου, η επιλογή τους είναι κομβική, διότι η κύρια μικροβιακή δραστηριότητα γίνεται κοντά σε αυτά, αφού παρέχουν επιφάνειες για μικροβιακή προσκόλληση και επηρεάζουν τους μικροβιακούς νιτροποιητές και τους

απονιτροποιητές μέσω οξυγόνου και εξιδρωμάτων που εκκρίνονται από ρίζες. (Tang et al., 2020; Bhuiyan et al., 2023)

Επιπλέον, ο κύκλος του αζώτου στους ΤΥ συνδέεται στενά με τον κύκλο άλλων ανόργανων στοιχείων όπως τα Fe, S και H που χρησιμεύουν ως δότες ηλεκτρονίων, οδηγώντας σε αυτοτροφική απονιτροποίηση και ενισχύοντας την επεξεργασία λυμάτων χαμηλής αναλογίας C/N. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να αλλάξουν τις μικροβιακές κοινότητες, να προωθήσουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτοτροφικής και ετερότροφης απονιτροποίησης και τελικά να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης αζώτου. (Fernández del Castillo et al., 2025)

Ο μετασχηματισμός του αζώτου που πραγματοποιείται στους ΤΥ μέσω μικροβιακών διεργασιών περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Αμμωνιοποίηση: Οι ρύποι με τη μορφή οργανικού αζώτου μετατρέπονται σε ανόργανη αμμωνία ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) τόσο σε αερόβιες όσο και σε αναερόβιες συνθήκες.
 - Νιτροποίηση: περιλαμβάνει την οξείδωση του αμμωνίου ($\text{NH}_3\text{-N}$) σε νιτρικά άλατα (NO_3^-), με νιτρώδη άλατα (NO_2^-) ως ενδιάμεσο, που διευκολύνεται από μικροοργανισμούς νιτροποίησης.
 - Απονιτροποίηση: μετατρέπει τα νιτρικά άλατα (NO_3^-) σε αέριο άζωτο (N_2) μέσω ενδιάμεσων ενώσεων όπως τα νιτρώδη άλατα (NO_2^-), το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) μέσω απονιτροποιητικών βακτηρίων
 - Anammox: Η αναερόβια οξείδωση του αμμωνίου, που εκτελείται από βακτήρια anammox, παίζει επίσης ρόλο στην απομάκρυνση του αζώτου χωρίς την ανάγκη εξωτερικών πηγών άνθρακα.
 - Comammox: Τα βακτήρια μπορούν να μετατρέψουν άμεσα το αμμώνιο και τα νιτρώδη άλατα σε νιτρικά άλατα χωρίς παραγωγή υποξειδίου του αζώτου, αν και ο ρόλος του στους ΤΥ απαιτεί περαιτέρω μελέτη.
 - DNRA: τα νιτρικά μετατρέπονται σε αμμώνιο, το οποίο μπορούν να χρησιμοποιήσουν άλλοι μικροοργανισμοί σε αναερόβιες συνθήκες.
 - DAMO: μπορεί να μειώσει το NO_2^- σε N_2 υπό αναερόβιες συνθήκες με χρήση μεθανίου (CH_4) ως δότη ηλεκτρονίων και μοναδική πηγή άνθρακα.
- (Mellado et al., 2021; Fernández del Castillo et al., 2025; Shirdashtzadeh et al.; 2023, Chen et al., 2017; J.Wang et al., 2022)



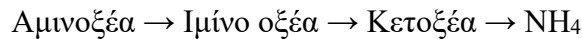
Εικόνα 8. Κύκλος του Αζώτου με τη συμμετοχή μικροοργανισμών στην επεξεργασία λυμάτων (Xu et al., 2021)

7.1. Αμμωνιοποίηση

Η Αμμωνιοποίηση, επίσης γνωστή ως ανοργανοποίηση αζώτου είναι μια βιολογική διαδικασία, στην οποία οι οργανικές ενώσεις αζώτου (αμινοσάκχαρα, πρωτεΐνες και νουκλεϊκά οξέα) διασπώνται σε αμμώνιο (NH_4^+). Αυτή η διαδικασία συμβαίνει τόσο σε αερόβιες όσο και σε αναερόβιες ζώνες, αλλά με διαφορετικούς ρυθμούς και απελευθερώνει ανόργανο άζωτο αμμωνίου από νεκρά και αποσυντιθέμενα υλικά. Αυτή η βιοχημική διαδικασία πολλαπλών σταδίων απελευθερώνει ενέργεια, την οποία οι μικροοργανισμοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν για ανάπτυξη, με μέρος της αμμωνίας να αφομοιώνεται άμεσα στη μικροβιακή βιομάζα. Μελέτες δείχνουν ότι ένα σημαντικό μέρος, δυνητικά έως και 100%, οργανικού αζώτου μπορεί να μετατραπεί γρήγορα σε αμμωνία.

Η διάσπαση των αμινοξέων κατά τη διάρκεια της αμμωνιοποίησης συμβαίνει μέσω διαφόρων αντιδράσεων απαμίνωσης. Η απαμίνωση των αμινοξέων συμβαίνει τόσο στην οξειδωτική όσο και στην αναγωγική προσέγγιση. Αυτή η διαδικασία συμβαίνει τόσο σε αερόβιες όσο και σε αναερόβιες ζώνες, αλλά με διαφορετικούς ρυθμούς και απελευθερώνει ανόργανο άζωτο αμμωνίου από διαφόρων ειδών ρύπους.

Η οξειδωτική απαμίνωση, η οποία κυριαρχεί σε περιβάλλοντα πλούσια σε οξυγόνο, ακολουθεί αυτή την αλληλουχία:



Αντίθετα, σε περιβάλλοντα με έλλειψη οξυγόνου, εμφανίζεται αναγωγική απαμίνωση, οδηγώντας στον ακόλουθο μετασχηματισμό:



Η αμμωνιοποίηση συμβαίνει γενικά με ταχύτερο ρυθμό σε σύγκριση με τη νιτροποίηση. Τα υψηλότερα ποσοστά ανοργανοποίησης παρατηρούνται σε οξυγονωμένες συνθήκες και σταδιακά μειώνονται καθώς η διαδικασία μεταβαίνει σε προαιρετική αναερόβια και αυστηρά αναερόβια μικροβιακή δραστηριότητα. Δεδομένου ότι τα κορεσμένα εδάφη και τα ιζήματα υγροτόπων έχουν συνήθως αερόβιο στρώμα βάθους μικρότερου από 1 cm, η αναερόβια και προαιρετική αναερόβια ανοργανοποίηση συμβάλλουν πιο σημαντικά στη συνολική μετατροπή του αζώτου.

Διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν τα ποσοστά αμμωνιοποίησης, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας, του pH, της αναλογίας άνθρακα προς άζωτο (C / N), της διαθεσιμότητας θρεπτικών ουσιών και των χαρακτηριστικών του εδάφους όπως η υφή και η δομή. Η βέλτιστη αμμωνιοποίηση συμβαίνει συνήθως σε θερμοκρασίες μεταξύ 40-60 °C και εντός εύρους pH 6,5-8,5. Τα αναφερόμενα ποσοστά αμμωνιοποίησης ποικίλλουν ευρέως σε διάφορες μελέτες, που κυμαίνονται από 0,004 έως 0,53 g N m⁻² d⁻¹. (Lee et al., 2009; Vymazal, 2007; Malyan et al., 2021; Xie et al., 2016)

Τα δημοφιλή γένη των αμμωνιοποιητικών βακτηρίων στους ΤΥ περιλαμβάνουν *Chitinophaga*, *Isoptericola*, *Bacillus*, και *Sinorhizobium*. (J.Wang et al., 2021)

7.2.Νιτροποίηση

Η νιτροποίηση περιλαμβάνει την οξείδωση του αμμωνίου (NH₃-N) σε νιτρικά άλατα (NO₃⁻), με νιτρώδη άλατα (NO₂⁻) ως ενδιάμεσο, που πραγματοποιείται από μικροοργανισμούς νιτροποίησης. Το πρώτο βήμα αυτής της διαδικασίας εκτελείται από αυστηρά αερόβια χημειοτροφικά αυτότροφα βακτήρια που χρησιμοποιούν την οξείδωση αμμωνίας ως πηγή ενέργειας και διοξείδιο του άνθρακα/ανθρακικά άλατα ως πηγή άνθρακα. (Rampuria et al., 2021) Η νιτροποίηση συμβαίνει στη ριζόσφαιρα του

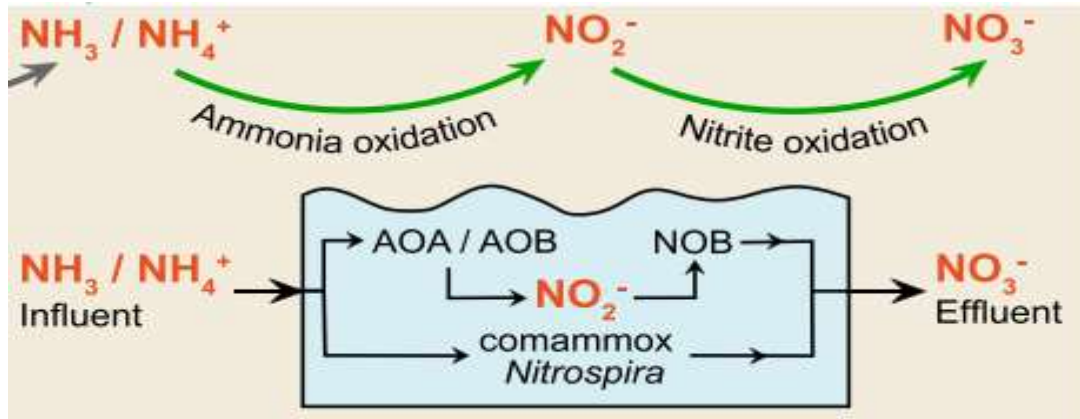
φυτού όπου το οξυγόνο απελευθερώνεται από τις ρίζες, αλλά και στην κορυφή της στήλης νερού, όπου και πραγματοποιείται η οξείδωση. Οι μικροοργανισμοί που εμπλέκονται στη νιτροποίηση μπορεί να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, οξειδωτικά βακτήρια αμμωνίας (AOB) και Αρχαία (AOA) που μετατρέπουν το αμμώνιο σε νιτρώδη, και οξειδωτικά νιτρώδη βακτήρια (NOB) που μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά άλατα.

Τα οξειδωτικά της αμμωνίας Αρχαία (AOA) μελετημένα τα τελευταία χρόνια ανήκουν στο φύλο *Thaumarchaeota* και βρίσκονται ευρέως σε ποικίλα περιβάλλοντα όπως θαλάσσια οικοσυστήματα, θερμές πηγές, κοραλλιογενείς υφάλους και εδάφη. Διαθέτουν διακριτά γονίδια 16S rRNA και *amoA*, τα οποία τα διαφοροποιούν από τα οξειδωτικά βακτήρια αμμωνίας (AOB). Τα AOA μπορεί να ταξινομηθούν σε τέσσερις κύριες ομάδες: *Nitrosopumilus*, *Nitrosotalea*, *Nitrososphaera* και *Nitrosocaldus Candidatus Nitrosocosmicus*. Σε σύγκριση με την AOB, τα AOA είναι μικρότερα σε μέγεθος, παρουσιάζουν υψηλότερη συγγένεια με την αμμωνία και το οξυγόνο και έχουν χαμηλότερο ποσοστό χρήσης αμμωνίας, αλλά χαμηλότερη ανοχή σε υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας. (Li et al., 2018; P. Wang et al., 2016; J. Wang et al., 2021)

Τα AOA μπορεί να παραμείνουν σε περιβάλλοντα χαμηλής διαλυτότητας οξυγόνου ($DO < 0,1 \text{ mg/L}$) και να συνυπάρχουν με αναερόβιους μικροοργανισμούς όπως ετερότροφους απονιτροποιητές και βακτήρια *anammox* διαδραματίζοντας κρίσιμο ρόλο σε χαμηλής θερμοκρασίας ή ολιγοτροφικούς ΤΥ. Τα AOA μπορούν να ξεπεράσουν τα AOB στα λύματα με επίπεδα αλατότητας μεταξύ 0,25% και 3,5%, με την αφθονία τους να είναι 1,6-81,1 φορές υψηλότερη από τα AOB σε ορισμένες περιπτώσεις. Τα AOA είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε ορισμένες ουσίες, συμπεριλαμβανομένης της κυστεΐνης, της τρυπτόνης και της ιστιδίνης, οι οποίες μπορούν να αναστείλουν τη δραστηριότητά τους έως και 98,90%. Ωστόσο, τα AOA παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανοχή στα αντιβιοτικά όπως η στρεπτομυκίνη, η καναμυκίνη και η αμπικιλίνη. (Xu et al., 2021)

Στα AOB ανήκουν τα *Betaproteobacteria*, *Rudaea* που ανήκουν στα *Gammaproteobacteria* και *Nitrobacter* που ανήκουν τα *Alphaproteobacteria* και προτιμούν μέτριες θερμοκρασίες και κυριαρχούν σε πλούσια σε θρεπτικά συστατικά λύματα. Τα AOB λειτουργούν σε συνδυασμό με οξειδωτικά βακτήρια νιτρώδων (NOB) όπως το *Nitrospira* για να ολοκληρώσουν τη διαδικασία νιτροποίησης. Μια υψηλότερη αναλογία NOB/AOB συνδέεται με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα νιτροποίησης και πληρέστερη οξείδωση αμμωνίας. (Li et al., 2018) Μελέτη (P. Wang et al., 2016) έδειξε

ότι το *Nitrospira* ήταν το μόνο NOB που ανιχνεύθηκε σε όλα τα συστήματα, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα *Nitrosomonas*, *Nitrosospira*, και *Nitrospira* έπαιξαν τους σημαντικότερους ρόλους στη νιτροποίηση.



Εικόνα 9. Νιτροποίηση Τα στάδια της οξείδωσης της αμμωνίας και των νιτρωδών.
(Al-Ajeel et al., 2022)

7.3.Comammox

Το Comammox είναι μια πρόσφατα ανακαλυφθείσα διαδικασία (2015) στην οποία η αμμωνία οξειδώνεται πλήρως σε νιτρικά άλατα σε ένα μόνο βήμα, σε αντίθεση με την παραδοσιακή νιτροποίηση, η οποία περιλαμβάνει δύο ξεχωριστά βήματα που διαμεσολαβούνται από βακτήρια και αρχαία οξείδωσης αμμωνίας (AOB- AOA) και οξειδωτικά βακτήρια νιτρωδών (NOB). Πολλές μελέτες επιβεβαίωσαν ότι ορισμένα είδη *Nitrospira* μπορούν να οξειδώσουν πλήρως την αμμωνία μέσω νιτρωδών σε νιτρικά, διαθέτοντας όλα τα απαραίτητα ένζυμα μονοοξυγενάσης αμμωνίας. Οι τύποι *Candidatus Nitrospira nitrosa*, *Candidatus Nitrospira nitrificans*, *Candidatus Nitrospira kreffii*) είναι πιο αντιπροσωπευτικοί σε περιβάλλοντα χαμηλής αμμωνίας όπου ανταγωνίζονται τα AOB και τα AOA. (Garibay et al., 2022)

Αυτή η εναλλακτική μεταβολική οδός έχει πιθανά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένου του μειωμένου ενεργειακού κόστους αερισμού και της εξάλειψης των εξωτερικών πηγών άνθρακα που απαιτούνται για την απονιτροποίηση. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι τα βακτήρια Comammox έχουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε χαμηλό DO έναντι των παραδοσιακών νιτροποιητών, όπως επίσης μπορούν να ευδοκιμήσουν σε συνθήκες χαμηλής περιεκτικότητας σε μέταλλα όπου αγωνίζονται τα AOB και τα NOB. Έρευνες δείχνουν ότι το Comammox *Nitrospira* σε

αντίθεση με τα AOB, στερείται αναγωγασών NO και δεν παράγει N_2O , ένα ισχυρό αέριο θερμοκηπίου, καθιστώντας το μια φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία.

Συμπερασματικά τα βακτήρια Comammox συμβάλλουν στη σταθερή νιτροποίηση υπό ακραίες συνθήκες, έχουν χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των ελάχιστων εκπομπών N_2O και μπορούν να ενισχύσουν την ολική απομάκρυνση αζώτου συνεργαζόμενα με αναερόβια βακτήρια οξείδωσης αμμωνίας (AnAOB). Η ικανότητά τους να λειτουργούν αποτελεσματικά σε χαμηλά επίπεδα αμμωνίας και DO τα καθιστά πολύτιμα στις σύγχρονες στρατηγικές επεξεργασίας λυμάτων. (Zhu et al., 2022)

Θα είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η δραστηριότητα νιτροποίησης του Comammox *Nitrospira* στους τεχνητούς υγροτόπους, καθώς και η εμφάνιση άλλων νιτροποιητικών ομάδων που απαντώνται συχνά στα ίδια ενδιαιτήματα και μπορεί να παρουσιάζουν πολύπλοκες σχέσεις. Για παράδειγμα, οξειδωτικά αμμωνίας αλληλοεπιδρούν άμεσα με οξειδωτικά νιτρώδων και εξαιτίας αυτού, αυτές οι ομάδες εντοπίζονται συχνά μαζί και καταγράφονται σε συγκεντρωτικά μεγέθη. Εξερευνώντας τη δραστηριότητα και τις αλληλεπιδράσεις του Comammox *Nitrospira* και AOA μεταξύ τους και άλλα και με άλλα μέλη μικροβιακής κοινότητας απομάκρυνσης αζώτου θα προκύψει μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των παραγόντων που ελέγχουν την απομάκρυνση αμμωνίας στην επεξεργασία λυμάτων γενικότερα, και θα μπορούσε να παρέχει πληροφορίες που οδηγούν σε βελτιωμένο σχεδιασμό και απόδοση αυτών των συστημάτων. (Ge et al., 2025)

7.4. Απονιτροποίηση

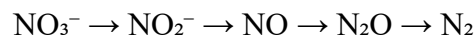
Η απονιτροποίηση είναι μια βιολογική διαδικασία στην οποία τα νιτρικά χρησιμεύουν ως τελικός δέκτης ηλεκτρονίων σε περιβάλλοντα χαμηλού οξυγόνου. Τα απονιτροποιητικά βακτήρια μετατρέπουν ανόργανες ενώσεις αζώτου, όπως νιτρικά και νιτρώδη, σε αβλαβές αέριο άζωτο. Αυτά τα βακτήρια ταξινομούνται σε δύο κύριες ομάδες: ετερότροφα και αυτότροφα.

- Οι ετερότροφοι απονιτροποιητές απαιτούν οργανικά υποστρώματα ως πηγή άνθρακα για ανάπτυξη και αντλούν ενέργεια από οργανική ύλη.
- Οι αυτότροφοι απονιτροποιητές χρησιμοποιούν ανόργανες πηγές άνθρακα ως πηγή ενέργειας όπως διοξείδιο του άνθρακα, διττανθρακικό και θείο, σίδηρο ή υδρογόνο ως ηλεκτροδότες για την αναγωγή των νιτρικών σε άζωτο

Ενώ η ετερότροφη απονιτροποίηση έχει εφαρμοστεί ευρέως σε συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, η αυτοτροφική απονιτροποίηση κέρδισε ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια.

Ετερότροφοι απονιτροποιητές

Η απονιτροποίηση πραγματοποιείται κυρίως από ετερότροφα βακτήρια, συμπεριλαμβανομένων των *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Achromobacter* και *Bacillus*, υπό αναερόβιες ή ανοξικές συνθήκες. Αυτή η διαδικασία συμβάλλει στο 60-95% της συνολικής απομάκρυνσης αζώτου, σε σύγκριση με μόνο το 1-34% που αφομοιώνεται από τα φυτά και τα φύκη. Σε αυτή τη διαδικασία, οι απονιτροποιητές χρησιμοποιούν οξειδωμένες μορφές αζώτου (NO_3^- και NO_2^-) ως τερματικούς δέκτες ηλεκτρονίων, με τον οργανικό άνθρακα να χρησιμεύει ως δότης ηλεκτρονίων. Η οδός απονίτρωσης έχει ως εξής:



Δεδομένου ότι το σύστημα ενζύμων που απαιτείται για την απονιτροποίηση καταστέλλεται παρουσία διαλυμένου οξυγόνου, αυτή η διαδικασία μπορεί να συμβεί μόνο σε ανοξικές συνθήκες. Οι υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων στις ζώνες εισόδου προάγουν ισχυρούς πληθυσμούς απονιτροποιητών στην είσοδο των υγροτόπων. (Lee et al., 2009)

Η ολική απονιτροποίηση, η μετατροπή των νιτρικών (NO_3^-) σε αέριο άζωτο (N_2), συμβαίνει μέσω τεσσάρων διαδοχικών αντιδράσεων, καθεμία από τις οποίες καταλύεται από συγκεκριμένα ένζυμα:

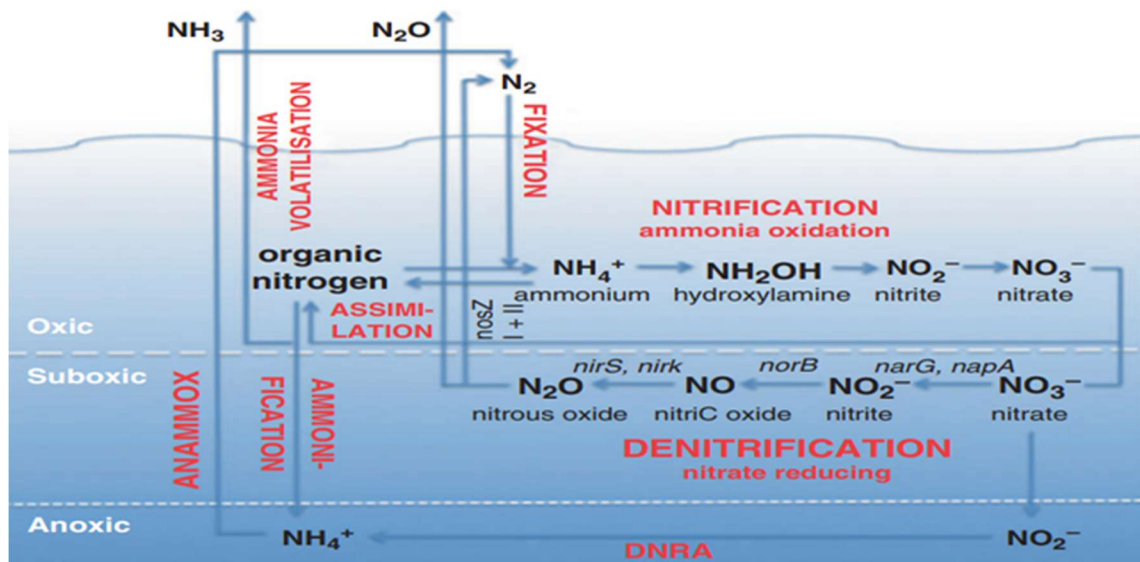
- Νιτρική αναγωγή (Nar, Nap) – Μετατρέπει NO_3^- σε NO_2^- (νιτρώδη).
- Αναγωγή νιτρωδών (Nir) – Μετατρέπει το NO_2^- σε NO (μονοξειδίο του αζώτου).
- Αναγωγή μονοξειδίου του αζώτου (Nor) – Μετατρέπει το NO σε N_2O (υποξειδίο του αζώτου).
- Αναγωγή υποξειδίου του αζώτου (Nos) – Μετατρέπει το N_2O σε αέριο N_2 .

Το τελικό βήμα, που καταλύεται από την Nos, είναι ζωτικής σημασίας για την πλήρη μείωση του αζώτου. Ωστόσο, υπό ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, αυτή η αντίδραση μπορεί να ανασταλεί ή να απουσιάζει εάν τα απονιτροποιητικά βακτήρια στερούνται του γονιδίου *nosZ*. Όταν συμβαίνει αυτό, το N_2O παραμένει ως τελικό προϊόν, συμβάλλοντας στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αντί της πλήρους απομάκρυνσης αζώτου. Αυτή η ατελής διαδικασία απονιτροποίησης μπορεί να

εξηγήσει τη σχετικά χαμηλή αποτελεσματικότητα απονιτροποίησης στους υγροτόπους επεξεργασίας. (Mander et al., 2016)

Στους τεχνητούς υγροτόπους υπάρχουν χώροι με απότομες αυξομειώσεις διαλυμένου οξυγόνου (DO), επιτρέποντας τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση σε κοντινή απόσταση. Το υψηλό DO προάγει την οξείδωση της αμμωνίας, ενώ το χαμηλό DO απαιτείται για την απονιτροποίηση. Μια επαρκής παροχή οργανικού άνθρακα είναι απαραίτητη για την απονιτροποίηση, παρέχοντας ενέργεια για τα βακτήρια. Οι στερεές πηγές άνθρακα (π.χ. βιοκάρβουνο, γεωργικά υποπροϊόντα, απορρίμματα φυτών) δρουν ως πηγές άνθρακα και υποστρώματα βραδείας απελευθέρωσης. Για παράδειγμα σε εφαρμογή με άχυρο σίτου σε ΤΥ πέτυχαν αφαίρεση 96% TN. Επίσης, υλικά με βάση το σίδηρο ενισχύουν την απονιτροποίηση, όπου ο σίδηρος (π.χ. σίδηρος μηδενικού σθένους) χρησιμεύει ως δότης ηλεκτρονίων, ενισχύοντας την απονιτροποίηση χωρίς επιπλέον προσθήκη άνθρακα και ταυτόχρονα διατηρεί ένα ανοξικό περιβάλλον και υποστηρίζει την ανάπτυξη μικροβίων. Επιπλέον υλικά ανόδου και οι μικροβιακές κυψέλες καυσίμου βελτιώνουν την απόδοση μεταφοράς ηλεκτρονίων, ενισχύοντας περαιτέρω την απονιτροποίηση. (Lin-Lana et al., 2019)

Ωστόσο, τα λύματα με χαμηλό οργανικό άνθρακα μπορούν να παρέχουν λίγους δότες ηλεκτρονίων για απονιτροποίηση για αυτό το λόγο άλλοι δότες ηλεκτρονίων είναι απαραίτητοι για την αποδοτική απομάκρυνση του αζώτου.



Εικόνα 10. Ο ρόλος της απονιτροποίησης στον κύκλο του αζώτου.

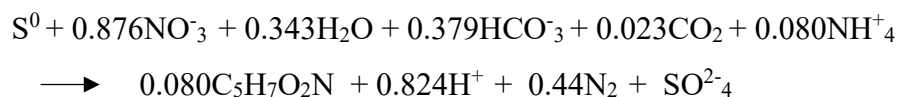
Ένζυμα απονιτροποίησης και σχετικά λειτουργικά γονίδια (σε παρένθεση): νιτρική αναγωγή (narG, napA) που μειώνει τα νιτρικά σε νιτρώδη, αναγωγή νιτρώδους ιόντος (nirS, nirK), αναγωγή μονοξειδίου του αζώτου (norB) και αναγωγή υποξειδίου του αζώτου (nosZ) (Mander et al., 2016)

Αυτότροφοι απονιτροποιητές

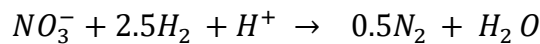
Η αυτοτροφική απονιτροποίηση αναφέρεται στη διαδικασία όπου τα οξείδια του αζώτου μειώνονται, ενώ οι ανόργανες ενώσεις χρησιμεύουν ως δότες ηλεκτρονίων. Οι κύριοι δότες ηλεκτρονίων των αυτοτροφικών περιλαμβάνουν ενώσεις θείου, υδρογόνο (H_2) και δότες ηλεκτρονίων με βάση μέταλλα. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει:

Αυτοτροφική απονιτροποίηση με βάση το θείο :

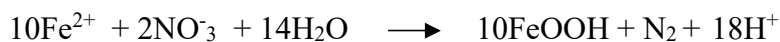
Οξείδωση σουλφιδίου ή θειοθειικού σε θειικό άλας (πιο συχνή)



Αυτοτροφική απονιτροποίηση με βάση το υδρογόνο: Οξείδωση υδρογόνου στο νερό .



Οξείδωση μετάλλων μηδενικού σθένους ή χαμηλού σθένους σε καταστάσεις υψηλού σθένους.



Αυτές οι αντιδράσεις, σε συνδυασμό με τη μείωση των νιτρικών, αποτελούν βασικές οδούς για την απομάκρυνση του αζώτου στα ΤΥ. Η δυνατότητα χρήσης υποστρωμάτων με βάση το θείο (χρησιμοποιείται συνήθως) και μετάλλων σε ΤΥ έχει προσελκύσει αυξανόμενη προσοχή λόγω της αποτελεσματικότητάς τους στην ενίσχυση της απομάκρυνσης νιτρικών. Ο συνδυασμός σιδήρου με μαγγάνιο ή θείο μπορεί να βελτιώσει την απόδοση. (Ma et al., 2020)

Μικροβιακή κοινότητα που έχει παρατηρηθεί σε αυτοτροφική απονιτροποίηση σε τεχνητούς υγροτόπους είναι του γένους *Thiobacillus* που φτάνει σε αφθονία 87% . Έχει παρατηρηθεί επίσης σε βιοηλεκτροχημικά συστήματα υγροτόπων με μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (TY-MFC) τα γένη *Thiohalophilus*, *Clostridium*, *Comamonadaceae*, και *Xanthomonadaceae* .

Οι βασικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη διαδικασία είναι το pH και η θερμοκρασία. Μελέτες δείχνουν ότι η αυτοτροφική απονιτροποίηση μπορεί να λάβει χώρα εντός ενός εύρους pH 5-10, ανάλογα με τη σύνθεση του εισρέοντος νερού και τη μικροβιακή κατανομή. Επιπλέον, θερμοκρασίες μεταξύ 25-37 ° C είναι βέλτιστες για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της αυτοτροφικής απονιτροποίησης.

Η απόδοση απομάκρυνσης αζώτου με εφαρμογή στους τεχνητούς υγροτόπους ενισχύεται με τα παρακάτω:

- Οι υγρότοποι κάθετης υποεπιφανειακής ροής και οι υγρότοποι παλιρροϊκής ροής βελτιώνουν τις ανοξικές συνθήκες και προάγουν την ανάπτυξη αυτοτροφικών βακτηρίων.
- Ο συνδυασμός αυτοτροφικής & ετερότροφης απονιτροποίησης ενισχύει την απομάκρυνση του αζώτου.
- Η μικροηλεκτρόλυση και ο βιοάνθρακας βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα της απονιτροποίησης.
- Με τεχνητούς υγροτόπους με μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (TY-MFC) (Ma et al., 2020)

7.5.Ανομοιογενής Αναγωγή Νιτρικών Σε Αμμώνιο (DNRA)

Τα βακτήρια DNRA (Dissimilatory nitrate reduction to ammonium) μειώνουν το NO_3^- σε διαθέσιμο NH_4^+ για χρήση από άλλους μικροοργανισμούς, όπως AOB και AOA και θεωρείται ανταγωνιστική οδός σε σχέση με την απονιτροποίηση στη μείωση των νιτρικών. Επιπλέον σε περιβάλλοντα χωρίς αμμωνία, η διαδικασία DNRA παρέχει αμμωνία στη διαδικασία ANAMMOX και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο συντονισμό και εξισορρόπηση NO_2^- (πηγές και καταβόθρες), σχηματίζοντας έτσι έναν μηχανισμό σύζευξης μεταξύ της οξείδωσης αμμωνίας, ANAMMOX και DNRA .

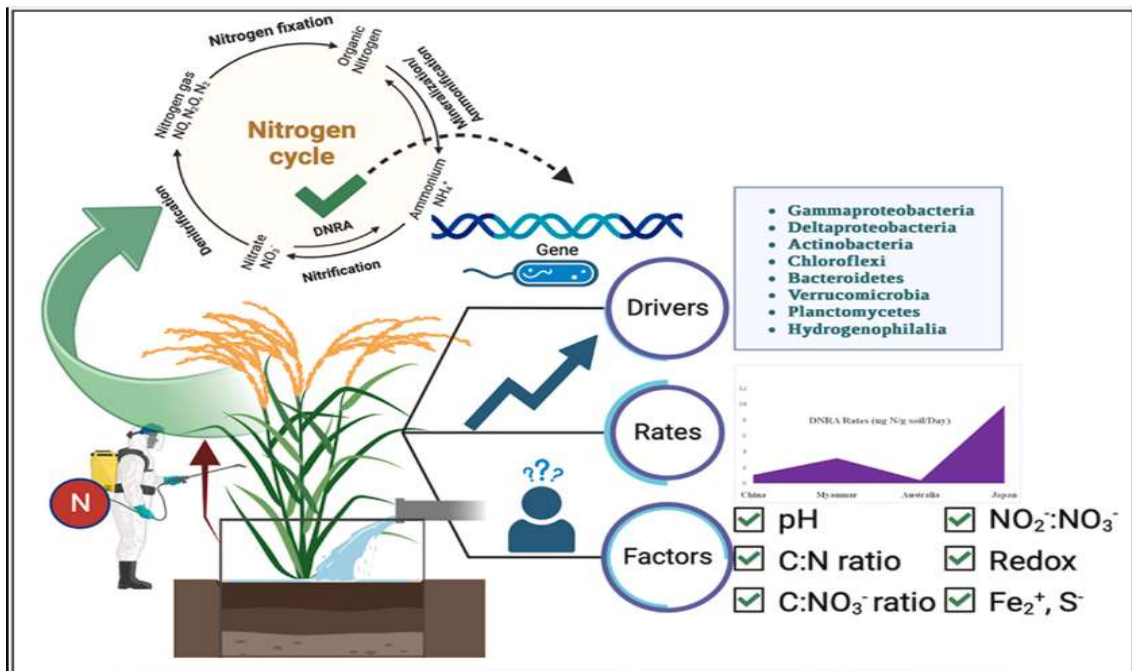
Τα βακτήρια DNRA μετατρέπουν τα νιτρικά άλατα σε αμμωνία μέσω νιτρωδών χρησιμοποιώντας οργανικούς ή ανόργανους δότες ηλεκτρονίων. Μπορούν να είναι ετερότροφα, αυτοτροφικά και να δρουν κυρίως σε αερόβιες συνθήκες. Τα ετερότροφα βακτήρια DNRA αποδομούν μεγάλα οργανικά μόρια. Παραδείγματα περιλαμβάνουν *Aerobacter aerogenes*, *Citrobacter freundii*, *Enterobacter spp.*, και *Denitrovibrio spp.* Τα αυτοτροφικά βακτήρια DNRA χρησιμοποιούν υδρογόνο και σουλφίδιο ως δότες ηλεκτρονίων. Παραδείγματα περιλαμβάνουν *Desulfovibrio gigas* και *Veillonella alcalescens*. Οι μικροοργανισμοί DNRA είναι συνήθως αυστηρά αναερόβια, με βασικά γένη συμπεριλαμβανομένων των *Thauera*, *Hydrogenophaga*, *Shewanella* και *Geobacter* (*Desulfuromonadales*). (Tang et al., 2020; J.Wang et al., 2021)

Η ανάπτυξη των DNRA βακτηρίων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως οι δότες ηλεκτρονίων, η διαθεσιμότητα οργανικού άνθρακα, το H_2S (περισσότερο) και το Fe^{2+} . Ο ανταγωνισμός με τους απονιτροποιητές σε τεχνητούς υγροτόπους καθορίζεται

σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα οργανικής ύλης και όχι από τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου. Τα βακτήρια DNRA κυριαρχούν μόνο σε υψηλές αναλογίες άνθρακα προς νιτρικά άλατα ($C:NO_3^- > 12$) έχουν υψηλότερη συγγένεια για τα νιτρικά άλατα σε σχέση με τους απονιτροποιητές. Επίσης, τα βακτήρια DNRA ευδοκιμούν σε συστήματα υψηλής θερμοκρασίας και υψηλού pH (αλκαλικά) (Xu et al., 2021)

Πολλές μελέτες έχουν διαπιστώσει ότι ορισμένα απονιτροποιητικά γένη μπορούν να εκτελέσουν τη διαδικασία DNRA σε τεχνητούς υγροτόπους, όπως το *Vibrio*, το *Clostridium* και το *Desulfovibrio*. (J Wang et al., 2022) Πιο συγκεκριμένα μελέτη έδειξε ότι τα βακτήρια DNRA ήταν ευρέως διαδεδομένα σε τεχνητούς υγροτόπους και ότι η κύρια χλωρίδα DNRA σε επίπεδο φύλου ήταν *Proteobacteria*, *Chloroflexi*, και *Verrucomicrobia*, *Anaeromyxobacter* (*Deltaproteobacteria*) ήταν τα πιο άφθονα γονίδια σε όλους τους μελετημένους ΤΥ. (Li et al., 2020)

Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι δύσκολο να γίνει διάκριση απονιτροποιητικών βακτηρίων από βακτήρια DNRA, τα οποία απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη της μοριακής βιοτεχνολογίας.



Εικόνα 11. Οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν και οι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία DNRA στους ΤΥ (Kaviraj et al., 2024)

7.6. Anammox

Διαδικασία Anammox

Η αναερόβια οξειδωση του αμμωνίου (anammox) είναι μια αυτοτροφική διαδικασία που διεξάγεται από βακτήρια anammox, στην οποία το αμμώνιο μετατρέπεται άμεσα σε αέριο άζωτο (N_2) χρησιμοποιώντας νιτρώδη ως δέκτη ηλεκτρονίων. Η διαδικασία anammox επιτρέπει την αυτοτροφική οξειδωση του αμμωνίου σε αέριο άζωτο χρησιμοποιώντας νιτρώδη ως δέκτη ηλεκτρονίων υπό αναερόβιες συνθήκες, εξαλείφοντας την ανάγκη αερισμού και εξωτερικών πηγών άνθρακα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση κόστους και ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ατελούς μετατροπής οργανικής ύλης.

Αυτή η διαδικασία απαιτεί μια συμβιωτική σχέση μεταξύ οξειδωτικών βακτηρίων αμμωνίας (AOB) και βακτηρίων anammox όπου τα AOB οξειδώνουν το αμμώνιο σε νιτρώδη, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται από βακτήρια anammox για την παραγωγή αερίου αζώτου, ενώ η αναστολή των οξειδωτικών βακτηρίων νιτρωδών (NOB), η περιορισμένη δραστηριότητά τους, είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη του ανταγωνισμού για διαλυμένο οξυγόνο, αμμώνιο και νιτρώδη άλατα. Επιπλέον, όταν υπάρχει οργανικός άνθρακας στα λύματα, τα απονιτροποιητικά βακτήρια ευδοκιμούν, οδηγώντας σε νιτρώδη άλατα που χρησιμοποιούνται για απονιτροποίηση και όχι για anammox. Η οδός anammox είναι ιδιαίτερα πλεονεκτική σε περιβάλλοντα με χαμηλό οξυγόνο ($DO < 100 \text{ mg L}^{-1}$) και χαμηλές αναλογίες C/N. Επίσης, η anammox μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορα εύρη θερμοκρασιών με βέλτιστη θερμοκρασία μεταξύ 12°C και 15°C σε κρύα κλίματα αλλά ιδανική είναι στους 37°C . Όσον αφορά το pH, λειτουργεί καλύτερα σε εύρος pH από 7,5 έως 8,0. (Garibay et al., 2022)

Αυτή η διαδικασία διενεργείται κυρίως από βακτηριακά είδη που ανήκουν στο φύλο Planctomycetes, συμπεριλαμβανομένων των γενών *Kuenenia*, *Scalindua*, *Brocadia*, *Jettenia* και *Anammoxoglobus*, αλλά και του φύλου *Candidatus Candidatus Brocadia Anammoxidans*, *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*, *Candidatus Brocadia fulgida*, *Candidatus Jettenia asiatica* και *Candidatus Anaammoxoglobus Brocadia* τα οποία έχουν εντοπιστεί σε πολυάριθμους ΤΥ. (Fernández del Castillo et al., 2025)

Συνεργιστικές δράσεις

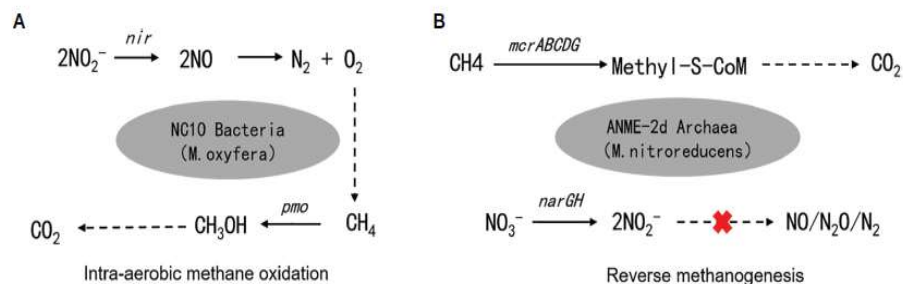
Η διαδικασία ταυτόχρονης νιτροποίησης, *anammox* και απονιτροποίησης (SNAD) ενσωματώνει μικροοργανισμούς οξείδωσης αμμωνίας, νιτροποίησης, αναερόβιας αμμωνίας οξείδωσης και απονιτροποίησης για ενισχυμένη απομάκρυνση αζώτου. Υπό συνθήκες περιορισμού του οξυγόνου, η νιτροποίηση αναστέλλεται μερικώς, οδηγώντας σε μερική οξείδωση αμμωνίας σε νιτρώδη άλατα, έτσι οι μικροοργανισμοί *anammox* χρησιμοποιούν τα νιτρώδη άλατα ως δέκτη ηλεκτρονίων για την οξείδωση της υπόλοιπης αμμωνίας και απονιτροποιητικοί μικροοργανισμοί μειώνουν τα νιτρικά, ένα υποπροϊόν της διαδικασίας *anammox*. Η κυρίαρχη οδός απομάκρυνσης αζώτου στο SNAD ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των λυμάτων εισροής, για παράδειγμα όταν στην εισροή λυμάτων υπερισχύουν τα νιτρικά, τότε στην SNAD κυριαρχεί η απονιτροποίηση, όταν στην εισροή υπερισχύει η αμμωνία τότε στην SNAD κυριαρχεί η *Anammox*. (Tang et al., 2020)

Η διαδικασία CANON (Completely Autotrophic Nitrogen Removal Over Nitrite) είναι μια προηγμένη οδός απομάκρυνσης αζώτου που βασίζεται στη συνεργιστική αλληλεπίδραση μεταξύ μικροοργανισμών οξείδωσης αμμωνίας (AOM) και μικροοργανισμών *anammox*. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τεχνητούς υγροτόπους που επεξεργάζονται λύματα χαμηλής αναλογίας άνθρακα προς άζωτο (C/N). Κατά τη διαδικασία CANON, η AOM οξειδώνει την αμμωνία σε νιτρώδη υπό αερόβιες συνθήκες ενώ καταναλώνει οξυγόνο, δημιουργώντας ένα ανοξικό περιβάλλον και στη συνέχεια τα βακτήρια *anammox* μετατρέπουν την αμμωνία και τα νιτρώδη άλατα σε αέριο άζωτο (N₂), με μερικά νιτρικά άλατα ως υποπροϊόν. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή διαδικασία νιτροποίησης-απονιτροποίησης (NDN), η CANON προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως να μειώνει την κατανάλωση οξυγόνου κατά 63%, και να εξαλείφει σχεδόν το 100% της ανάγκης για πρόσθετες πηγές οργανικού άνθρακα. Η εφαρμογή της CANON έχει παρατηρηθεί σε διάφορα συστήματα ΤΥ όπως τον υγρότοπος παλιρροιακής ροής. (Tang et al., 2020; Negi et al., 2022)

Δεδομένων των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων της *anammox*, που την καθιστά κατάλληλη για ενσωμάτωση σε υπάρχοντα συστήματα τεχνητών υγροτόπων, η έρευνα για την ενσωμάτωση αυτής της διαδικασίας σε ΤΥ, βρίσκεται ακόμη στα αρχικά της στάδια, με σημαντικά κενά που πρέπει να αντιμετωπιστούν για ευρύτερη εφαρμογή.

7.7. Απονιτροποιητική αναερόβια οξείδωση μεθανίου (DAMO)

Η διαδικασία NO_x-DAMO (Denitrifying anaerobic methane oxidation) είναι μια μικροβιακή διαδικασία που χρησιμοποιεί μια κοινοπραξία αρχαίων DAMO και βακτηρίων για τη μείωση των νιτρικών αλάτων σε αέριο άζωτο, με το μεθάνιο ως δότη ηλεκτρονίων. Οι κύριοι οργανισμοί που εμπλέκονται στους τεχνητούς υγροτόπους είναι τα N-DAMO archaea, συγκεκριμένα τα νιτρομειωτικά *Candidatus Methanoperedens*, τα οποία μπορούν να μειώσουν τα νιτρικά άλατα σε νιτρώδη άλατα, και τα βακτήρια n-DAMO από το φύλο NC10, όπως το *Candidatus Methyloirabilis oxyfera* και το *Candidatus Methyloirabilis sinica*, τα οποία μειώνουν περαιτέρω τα νιτρώδη άλατα σε N₂. (Wei et al., 2022)



Εικόνα 12. Μεταβολικές οδοί DAMO μικροοργανισμών

(A) εξαρτώμενου από νιτρώδη DAMO βακτηρίου NC10 *M. oxyfera* και (B) εξαρτώμενου από νιτρικά άλατα DAMO αρχαίο ANME-2d *M. nitroreducens*. (Wei et al., 2022)

Παράγοντες όπως τα επίπεδα θρεπτικών ουσιών (π.χ. συγκέντρωση υποστρώματος, ιχνοστοιχεία) και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. χρόνος κατακράτησης στερεών (SRT), θερμοκρασία, επίπεδα οξυγόνου) επηρεάζουν σημαντικά τη δραστηριότητα και την ανάπτυξη μικροοργανισμών NO_x-DAMO. Για παράδειγμα, η συγκέντρωση μεθανίου μπορεί να ενισχύσει τη δραστηριότητα των βακτηρίων n-DAMO, ενώ τα υπερβολικά επίπεδα νιτρώδων ή οξυγόνου μπορούν να αναστείλουν τη λειτουργία τους. Η προσθήκη δοτών ηλεκτρονίων όπως η μεθανόλη και το οξικό νάτριο μπορεί επίσης να διεγείρει τη δραστηριότητά τους. Ιχνοστοιχεία όπως ο σίδηρος και ο χαλκός προωθούν περαιτέρω την ανάπτυξή τους. Επιπλέον, οι μικροοργανισμοί n-DAMO ευδοκίμουν σε μεσόφιλες, ουδέτερες και μη αλατούχες συνθήκες, αλλά είναι ευαίσθητοι στο οξυγόνο.

Όσον αφορά την αφθονία, τα βακτήρια n-DAMO είναι πιο διαδεδομένα από τα αρχαία n-DAMO στα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, καθώς τα αρχαία απαιτούν

λανθανίδες (15 στοιχεία), τα οποία συχνά απουσιάζουν στα λύματα. Παρά το γεγονός ότι είναι λιγότερο άφθονα, τα αρχαία n-DAMO εξακολουθούν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία. Μελέτες εργαστηριακής κλίμακας που χρησιμοποιούν αντιδραστήρες με βάση μεμβράνες, όπως ο MGSR (Membrane Granular Sludge Reactor) έχουν δείξει υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης αζώτου (έως 16,53 kg N/m³/d), αποδεικνύοντας τις δυνατότητες των διεργασιών NO_x-DAMO στη βιώσιμη απομάκρυνση αζώτου από τα λύματα. Ωστόσο, λόγω των σύντομων χρόνων κατακράτησης SRT και έλλειψης νιτρώδων στις κύριες διαδικασίες απορρύπανσης, υπάρχουν προκλήσεις στη διατήρηση υψηλών επιπέδων δραστηριότητας αυτών των μικροοργανισμών σε εφαρμογές πλήρους κλίμακας. Ένα πείραμα επώασης υδαρούς κοπριάς έδειξε ότι τόσο n- DAMO αρχαία όσο και τα αναερόβια βακτήρια αυξήθηκαν με την πάροδο του χρόνου σε τεχνητούς υγροτόπους, υποδεικνύοντας ότι αυτοί οι δύο μικροοργανισμοί θα μπορούσαν να συνεργάζονται για να ολοκληρωθεί τη διαδικασία απονιτροποίησης από νιτρικό σε αέριο άζωτο. (Xu et al., 2021; Negi et al., 2022)

Η διαδικασία DAMO μπορεί να συμβάλλει στην μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και στη μείωση του περιττού υποπροϊόντος N₂O στη διαδικασία απομάκρυνσης αζώτου, επιτρέποντας έτσι περισσότερα περιβαλλοντικά οφέλη. (J.Wang et al., 2021) Ωστόσο, ενώ η διαδικασία NO_x-DAMO δείχνει πολύ καλά αποτελέσματα στην απομάκρυνση αζώτου στην επεξεργασία λυμάτων, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών και την αντιμετώπιση των προκλήσεων της διατήρησης αποτελεσματικών μικροβιακών πληθυσμών σε πραγματικές εφαρμογές.

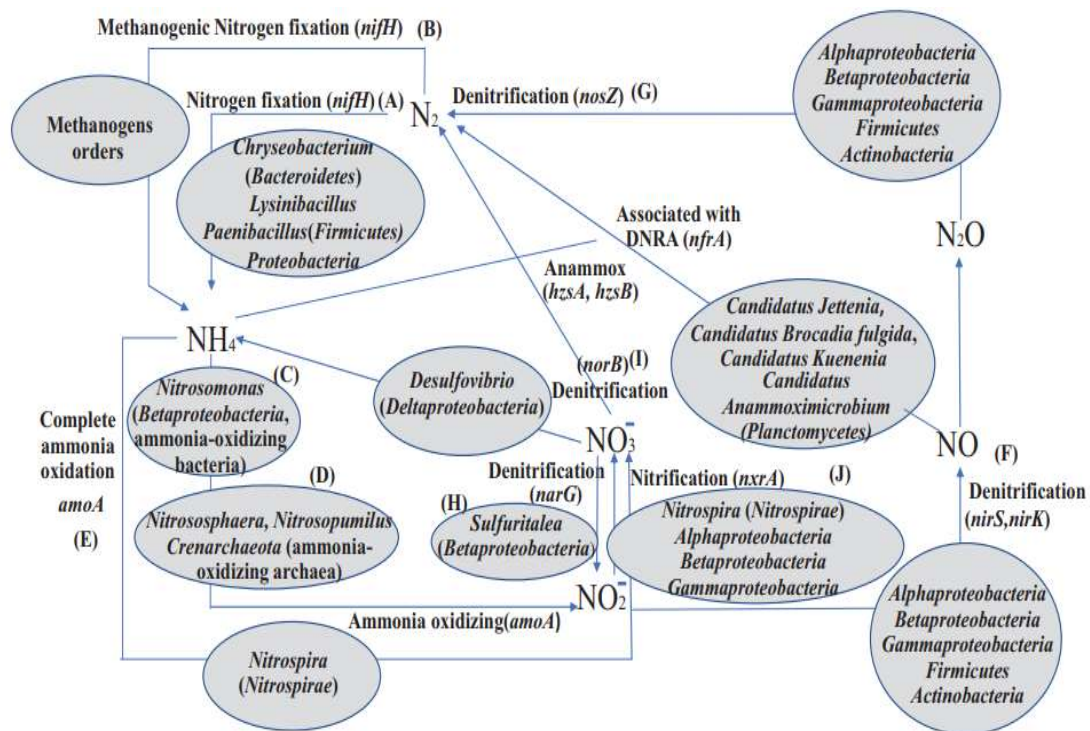
7.8.Ετερότροφα νιτροποιητικά βακτήρια και αερόβιοι απονιτροποιητές (HN-AD)

Στις μικροβιακές κοινότητες των τεχνητών υγροτόπων, τα νιτροποιητικά βακτήρια εμφανίζουν συχνά χαμηλή αφθονία και μειωμένη ανταγωνιστικότητα, γεγονός που καθιστά τη νιτροποίηση ένα περιοριστικό στάδιο στην απομάκρυνση του αζώτου. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη περίοδο εκκίνησης έως ότου επιτευχθεί σταθερή οξείδωση του NH₄⁺. Σε αυτό το πλαίσιο, πρόσφατες μελέτες έχουν αναδείξει τη σημασία των ετερότροφων νιτροποιητικών (HN-AD) βακτηρίων. Οι ετερότροφοι νιτροποιητές μπορούν να παράγουν νιτρικά άλατα χρησιμοποιώντας τόσο ανόργανες όσο και οργανικές πηγές. Σε αντίθεση με τα αυτοτροφικά βακτήρια, οι μικροοργανισμοί HNAD παρουσιάζουν υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης και μπορούν ταυτόχρονα να εκτελέσουν νιτροποίηση και απονιτροποίηση υπό αερόβιες συνθήκες. Αυτά τα

βακτήρια παίζουν κρίσιμο ρόλο στη μετατροπή του NH_4^+ και του NO_3^- κατά τη φάση εκκίνησης των ΤΥ, συμβάλλοντας στη μετατροπή του αζώτου σε αέρια μορφή για πλήρη απονιτροποίηση. Επιπλέον, τα HN-AD βακτήρια αναπτύσσονται ταχύτερα και μπορούν να κυριαρχήσουν γρήγορα στο μικροβιακό περιβάλλον των ΤΥ. (Rampuria et al., 2021)

Η σημασία αυτής της διαδικασίας έχει συχνά υποτιμηθεί, καθώς πολλοί ετερότροφοι νιτροποιητές (HN) είναι επίσης αερόβιοι απονιτροποιητές (AD). Τα παραδοσιακά απονιτροποιητικά βακτήρια μπορούν να μετατοπιστούν μεταξύ οξυγόνου και αζώτου ως δέκτες ηλεκτρονίων, αλλά αυτή η μετάβαση απαιτεί μια περίοδο καθυστέρησης. Αντίθετα, τα αερόβια απονιτροποιητικά βακτήρια έχουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα λόγω της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται γρήγορα στις διακυμάνσεις των αερόβιων και ανοξικών συνθηκών. Αυτή η διαδικασία απονιτροποίησης χρησιμοποιεί αποτελεσματικά οργανικό άνθρακα μέσα στον ίδιο όγκο λυμάτων που χρησιμοποιείται για νιτροποίηση, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης αζώτου. Η διαδικασία ετερότροφης νιτροποίησης - αερόβιας απονιτροποίησης έχει επίσης ονομαστεί ταυτόχρονη νιτροποίηση και απονιτροποίηση (SND)

Μικροοργανισμοί που έχουν απομονωθεί από ΤΥ και εδάφη, όπως *Paracoccus denitrificans*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes faecalis*, *Microvirgula aerodenitrificans*, *Klebsiella*, *Anoxybacillus contaminans* HA, *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Flavobacterium*, *Pedobacter* και *Bacillus* έχουν αναγνωριστεί ότι διαθέτουν ικανότητα ετερότροφης νιτροποίησης-αερόβιας απονιτροποίησης (HNAD). (J.Wang et al., 2021) Η ανακάλυψή τους έχει αλλάξει την παραδοσιακή θεώρηση ότι η νιτροποίηση πραγματοποιείται αποκλειστικά από αυτοτροφικά βακτήρια και η απονιτροποίηση συμβαίνει μόνο υπό αναερόβιες συνθήκες. Η νέα αυτή προσέγγιση καθιστά τη διαδικασία απομάκρυνσης αζώτου και οργανικής ύλης πιο αποδοτική, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα των τεχνητών υγροτόπων. Έχει παρατηρηθεί η χρήση HN σε παλιρροϊκής ροής και κάθετης ροής ΤΥ. (Rampuria et al., 2021)



Εικόνα 13. Μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στον κύκλο του Αζώτου.

(A) Αρχαία και (B) βακτήρια που συμμετέχουν στη δέσμευση του N_2 , (C) AOA και (D) AOB οξειδωτικά αμμωνίας, (E) Comammox βακτήρια, (F) (G) (H) Απονιτροποιητικά βακτήρια και (J) Νιτροποιητικά βακτήρια. (Mellado et al., 2021)

8. Απομάκρυνση Φωσφόρου

Ο ευτροφισμός είναι ένα ευρέως διαδεδομένο περιβαλλοντικό ζήτημα που επηρεάζει τα υδάτινα οικοσυστήματα, με τον φώσφορο να αναγνωρίζεται ως ο βασικός παράγοντας. Κατά συνέπεια, η απομάκρυνση του φωσφόρου διαδραματίζει καίριο ρόλο στην αποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων οικοσυστημάτων. Οι τεχνητοί υγροτόποι μπορεί να χρησιμοποιηθούν και ως δευτερογενή και τριτογενής επεξεργασία για την απομάκρυνση φωσφόρου κυρίως από βιομηχανικά και αγροτικά υγρά απόβλητα που είναι ιδιαίτερος επιβαρυνμένα με το στοιχείο αυτό. Η απομάκρυνση του φωσφόρου (P) στους τεχνητούς υγροτόπους επηρεάζεται από παράγοντες όπως η σύνθεση των υγρών αποβλήτων, η διαμόρφωση και ο σχεδιασμός της κλίνης. Διάφορες διεργασίες συμβάλλουν στην απομάκρυνση P, όπως η προσρόφηση από πορώδη μέσα, η διήθηση, η καθίζηση, η κατακρήμνιση, η απορρόφηση από τις ρίζες των φυτών και

η βακτηριακή δραστηριότητα. Η απομάκρυνση του φωσφόρου μέσω προσρόφησης υποστρώματος έχει αναφερθεί ότι συμβάλλει μεταξύ 36,2% και 87,5% του συνολικού φωσφόρου (TP), ενώ η απομάκρυνση μέσω της πρόσληψης των φυτών και της μικροβιακής αφομοίωσης αντιπροσωπεύει μόνο το 1,3% έως 26,4% της TP. (Wu et al., 2021) Σε αντίθεση με την απομάκρυνση του N, όσον αφορά το φώσφορο ενώ η επιστημονική αρθρογραφία ειδικεύεται στους μηχανισμούς απομάκρυνσής του σε ΤΥ, δεν υπάρχει εκτενή αναφορά στις αποδόσεις απομάκρυνσής του. Σε γενικές γραμμές η απομάκρυνση του φωσφόρου σε ΤΥ δεν θεωρείται ικανοποιητική, με αναφορές για 71% (Lyu et al., 2024) 40-60% (Lu et al., 2023) ή 20.6%–32.1% (Wu et al., 2021) TP και για αυτό το λόγο οι ΤΥ χρησιμοποιούνται ως τριτογενής επεξεργασία σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων.

Ο φώσφορος στα λύματα υπάρχει σε διάφορες μορφές, συμπεριλαμβανομένων οργανικών ενώσεων π.χ. φωσφολιπίδια, νουκλεϊκά οξέα και νουκλεοπρωτεΐνες και ανόργανων ενώσεων π.χ. πολυφωσφορικά και τα ελεύθερα ορθοφωσφορικά ιόντα (PO_4^{3-}) που είναι τα πιο κοινά σε ιοντική ισορροπία. Η μικροβιακή αποικοδόμηση και η πρόσληψη από φυτά απομακρύνουν κυρίως τα φωσφορικά, ενώ οι μηχανισμοί προσρόφησης και κατακρήμνισης απομακρύνουν όλες τις μορφές του P.

Η ενισχυμένη βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου (EBPR) αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο επεξεργασίας λυμάτων, βασιζόμενη στην εναλλαγή αναερόβιων και αερόβιων/ανοξικών συνθηκών για την απομάκρυνση του συνολικού φωσφόρου (TP). Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα δοκιμασμένη και αποτελεσματική σε συστήματα ενεργού ιλύος και εφαρμόζεται ολοένα και περισσότερο στους τεχνητούς υγροτόπους, λόγω του χαμηλού κόστους και της μακροπρόθεσμης σταθερότητάς της. Η EBPR στους ΤΥ πραγματοποιείται κυρίως από οργανισμούς συσσώρευσης φωσφόρου (PAO), οι οποίοι απορροφούν φωσφορικά άλατα από τα λύματα και τα αποθηκεύουν στα κύτταρά τους εν μέσω εναλλασσόμενων αερόβιων και αναερόβιων συνθηκών. Σε αναερόβιες συνθήκες, οι PAO διασπών το ενδοκυτταρικό πολυφωσφορικό και απορροφούν πτητικά λιπαρά οξέα από το περιβάλλον, τα οποία αποθηκεύονται με τη μορφή πολυδροξυαλκανοϊκών. Αντίθετα, υπό αερόβιες συνθήκες, οι PAO χρησιμοποιούν τα πολυδροξυαλκανοϊκά ως πηγή ενέργειας και απορροφούν φωσφορικά άλατα για τον σχηματισμό αποθηκευμένων πολυφωσφορικών. Συνολικά, η ποσότητα φωσφόρου που προσλαμβάνεται από τους PAO είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα που απελευθερώνεται, επιτυγχάνοντας έτσι

την απομάκρυνση του φωσφόρου μέσω μικροοργανισμών στους ΤΥ. (J Wang et al., 2021)

Οι συμβατικοί οργανισμοί συσσώρευσης φωσφόρου (PAO) μπορούν να συνυπάρχουν με απονιτροποιητικά βακτήρια για να διευκολύνουν την ταυτόχρονη απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου στην επεξεργασία λυμάτων. Ωστόσο, ο ανταγωνισμός για πηγές άνθρακα μπορεί να μειώσει την αποδοτικότητα. Η ανακάλυψη απονιτροποιητικών PAO (D-PAOs), που χρησιμοποιούν νιτρικά (NO_3^-) και νιτρώδη άλατα (NO_2^-) ως δέκτες ηλεκτρονίων για να απορροφήσουν πολυφωσφορικά υπό αναερόβιες συνθήκες, βοήθησε στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Επιπλέον, η αερόβια απονιτροποίηση που μελετάται τις τελευταίες δεκαετίες έχει συνδεθεί με την απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου μέσω PAO. (Rani et al., 2024; Fernández del Castillo et al., 2025; Y. Zang et al., 2024)

Μια επίσης πρόσφατη πρόοδος περιλαμβάνει τα απονιτροποιητικά βακτήρια PAO (D-PAOs) αλλά και τα αερόβια απονιτροποιητικά PAO (AD-PAOs), τα οποία ενισχύουν τη διαδικασία EBPR εντείνοντας την απομάκρυνση του φωσφόρου και μειώνοντας το κόστος. Μια άλλη καινοτόμος προσέγγιση, η διαδικασία απονιτροποίησης θείου ενισχυμένης βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου (DS-EBPR), ενσωματώνει το μεταβολισμό του θείου με το EBPR για να ενισχύσει την απομάκρυνση του φωσφόρου ενώ λειτουργεί υπό υψηλές θερμοκρασίες και αλατότητα θαλασσινού νερού. Τα PAO που σχετίζονται με το θείο (S-PAOs) λειτουργούν παράλληλα με θειικά αναγωγικά και οξειδωτικά βακτήρια σουλφιδίου για να διευκολύνουν τον κύκλο φωσφόρου και θείου. Επιπλέον, τα βακτήρια διαλυτοποίησης φωσφόρου (PSB) βοηθούν στην απομάκρυνση του φωσφόρου εκκρίνοντας οργανικά οξέα, όπως οξαλικό, κιτρικό, μηλικό και γλυκονικό οξύ. Αυτά τα οξέα βοηθούν στη μετατροπή του αδιάλυτου φωσφόρου σε διαλυτές μορφές, καθιστώντας τον πιο προσιτό για πρόσληψη από τα φυτά.

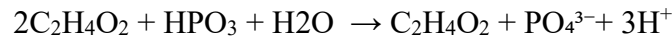
Παρά τις εξελίξεις αυτές, η απόδοση του PAO επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως οι πηγές άνθρακα, το pH, η θερμοκρασία και το διαλυμένο οξυγόνο. Επιπλέον, ο ανταγωνισμός μεταξύ των PAO και των οργανισμών που συσσωρεύουν γλυκογόνο (GAO) μπορεί να εμποδίσει την αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης φωσφόρου. Ως εκ τούτου, η βελτιστοποίηση των συνθηκών για την ανάπτυξη του PAO είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της απόδοσης του EBPR. Ωστόσο, η έρευνα σχετικά με τους AD-PAO και τους S-PAO παραμένει περιορισμένη, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση. (Rani et al., 2024; Fernández del Castillo et al., 2025; Y. Zang et al., 2024)

Η απομάκρυνση του φωσφόρου στους ΤΥ εξαρτάται από βασικούς παράγοντες όπως το pH, η θερμοκρασία και ο χρόνος υδραυλικής κατακράτησης (HRT). Το εύρος pH επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης φωσφόρου και την ανάπτυξη των φυτών σε συστήματα υγροτόπων. Έρευνες έχουν δείξει ότι pH μεταξύ 5,7 και 6,1 είναι ιδανικό για την ανάπτυξη φυτών σε ελεύθερα επιφανειακά συστήματα υγροτόπων, επιτυγχάνοντας έως και 90% απομάκρυνση ολικού φωσφόρου (TP). Οι ακραίες τιμές pH και οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη μικροβιακή ποικιλότητα και την υγεία των φυτών, μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης φωσφόρου.

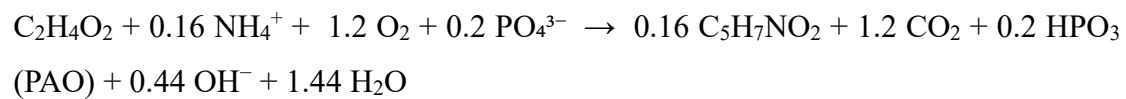
Η θερμοκρασία παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο, καθώς οι υψηλότερες θερμοκρασίες ενισχύουν την απομάκρυνση TP στους υγροτόπους. Επιπλέον, η HRT έχει άμεση επίδραση στην απομάκρυνση του φωσφόρου, με μεγαλύτερους χρόνους κατακράτησης που επιτρέπουν μεγαλύτερες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του φωσφόρου στην εισροή, τα υποστρώματα και τις ρίζες των φυτών. Μελέτες δείχνουν ότι εντός ενός εύρους HRT από 12 ώρες έως 20 ημέρες, η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης TP κυμαίνεται μεταξύ 1,6% και 98,5% υπογραμμίζοντας την σημασία των εκτεταμένων χρόνων κατακράτησης στη βελτίωση της απομάκρυνσης φωσφόρου. (Rani et al., 2024, Du et al., 2017)

8.1.Οργανισμοί συσσώρευσης φωσφόρου PAO

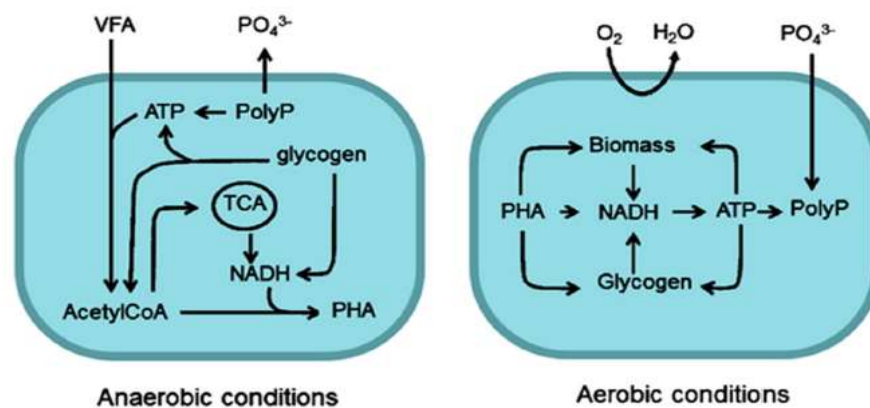
Οι οργανισμοί συσσώρευσης φωσφόρου (PAO) διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην ενισχυμένη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου (EBPR) εναλλάσσοντας μεταξύ αναερόβιων και αερόβιων συνθηκών. Υπό αναερόβιες συνθήκες, οι PAO απελευθερώνουν φώσφορο, διασπούν τα ενδοκυτταρικά πολυφωσφορικά (poly-P) και το γλυκογόνο και απορροφούν πτητικά λιπαρά οξέα (VFA), αποθηκευοντάς τα ως πολυ-β-υδροξυαλκανοϊκά (PHAs). Η ενέργεια για αυτή τη διαδικασία προέρχεται από το ATP, που παράγεται από την υδρόλυση αποθηκευμένου πολυφωσφορικού ή την αποικοδόμηση του γλυκογόνου, οδηγώντας στην απελευθέρωση ορθοφωσφορικού στο χύδην υγρό. Η σύνθεση του PHA απαιτεί NADH, το οποίο μπορεί να παρέχεται είτε από τον κύκλο TCA είτε από τη γλυκόλυση, με την τελευταία να είναι πιο αποτελεσματική για την απομάκρυνση του φωσφόρου. Οι PAO μπορούν να εναλλάσσονται μεταξύ αυτών των μεταβολικών οδών ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες.



Υπό αερόβιες συνθήκες, οι PAO χρησιμοποιούν οξυγόνο ως δέκτη ηλεκτρονίων, οξειδώνοντας τα PHAs για να παράγουν ενέργεια για ανάπτυξη και πρόσληψη φωσφόρου, η οποία αποθηκεύεται ως poly-P μέσα στα κύτταρα. Η ενέργεια που απελευθερώνεται χρησιμοποιείται για την πρόσληψη φωσφορικών, η οποία υπερβαίνει την ποσότητα που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αναερόβιας φάσης, με αποτέλεσμα την καθαρή συσσώρευση φωσφόρου. Επιπλέον, το γλυκογόνο συντίθεται για μελλοντική αποθήκευση ενέργειας.



Στη συνέχεια, η λάσπη υψηλής περιεκτικότητας σε φώσφορο απομακρύνεται από το σύστημα, επιτυγχάνοντας την απομάκρυνση του φωσφόρου. Ωστόσο, τα PAO ανταγωνίζονται με οργανισμούς συσσώρευσης γλυκογόνου (GAOs) όπως ο *Amaricoccus kaplicensis* και ο *Tetracoccus cecii*, οι οποίοι καταναλώνουν πτητικά οξέα, αλλά στερούνται ικανότητας αποθήκευσης φωσφόρου. (Du et al., 2017; Bunce et al., 2018)



Εικόνα 14. Μεταβολικές οδοί των PAO υπό αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες. PHA, πολυυδροξυαλκανοϊκό. PolyP, πολυφωσφορικό (Bunce et al., 2018)

Το κύριο φύλο μικροοργανισμών που εμπλέκεται στην απομάκρυνση φωσφόρου είναι τα Proteobacteria, όπου τα Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria και Gammaproteobacteria περιλαμβάνουν τα περισσότερα μικροβιακά είδη. Τα

Rhodobacteraceae και *Rhizobiaceae*, οικογένειες των *Alphaproteobacteria*, μπορούν να απορροφούν πτητικά λιπαρά οξέα υπό αερόβιες συνθήκες και να τα μετατρέπουν σε πολυ-β-υδροξυαλκανοϊκά, συμβάλλοντας έτσι στην απομάκρυνση του φωσφόρου σε τεχνητούς υγροτόπους. Στην κατηγορία *Betaproteobacteria*, κυρίαρχα γένη είναι τα *Candidatus Accumulibacter*, *Dechloromonas* και *Rhodocyclus*. Το *Accumulibacter*, ένα καλά μελετημένο PAO, χρησιμοποιεί VFAs για αερόβια πρόσληψη φωσφόρου και ταξινομείται σε δύο κύριους τύπους με βάση τις διαφορές στο γονίδιο της πολυφωσφορικής κινάσης (*prpK1*). Ο τύπος I και ο τύπος II χωρίζονται περαιτέρω σε πολλαπλούς εξελικτικούς κλάδους, ο καθένας με ξεχωριστές φυσιολογικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, ο κλάδος IA μπορεί να συνδυάσει τη μείωση των νιτρικών αλάτων με την πρόσληψη φωσφόρου, ενώ ο κλάδος IIA δεν μπορεί. Το γένος *Dechloromonas* έχει την ικανότητα να μειώνει το υπερχλωρικό, να συσσωρεύει πολυφωσφορικά και να απορροφά άνθρακα υπό αναερόβιες συνθήκες αλλά και το γένος *Rhodocyclus* συμβάλλει σημαντικά στην απομάκρυνση φωσφόρου. Όσον αφορά τα *Gammaproteobacteria*, τα γένη *Klebsiella*, *Pseudomonas* και *Acinetobacter* έχουν ταυτοποιηθεί ως σημαντικά για την απομάκρυνση του φωσφόρου. Μεταξύ αυτών, τα βακτήρια *Pseudomonas* παρουσιάζουν εξαιρετική ικανότητα απορρόφησης φωσφόρου από λύματα και αποθήκευσής του στα κύτταρά τους ως πολυφωσφορικό, καθιστώντας τους ιδιαίτερα αποτελεσματικούς μικροοργανισμούς για την απομάκρυνση του φωσφόρου. Επίσης αναφορές υπάρχουν για βακτήρια φύλου *Chloroflexi*. (J.Wang et al., 2022; Zhang et al., 2024)

8.2. Αναερόβιοι Απονιτροποιητές PAO (D-PAO)

Η τεχνολογία απονιτροποίησης του φωσφόρου προσφέρει μια πιθανή λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με τη συμβατική αφαίρεση φωσφόρου. Οι απονιτροποιητές PAO (D-PAOs) χρησιμοποιούν νιτρικά (NO_3^-) και νιτρώδη άλατα (NO_2^-) ως δέκτες ηλεκτρονίων για πρόσληψη φωσφορικών και σύνθεση γλυκογόνου υπό εναλλασσόμενες αναερόβιες/ανοξικές συνθήκες. Αυτή η προσέγγιση μειώνει τη ζήτηση πηγής άνθρακα για απονιτροποίηση και ελαχιστοποιεί τις απαιτήσεις αερισμού, καθιστώντας τη διαδικασία πιο ενεργειακά αποδοτική. Επιπλέον, επειδή οι DPAO έχουν χαμηλότερη απόδοση κυττάρων από τους PAO, η εφαρμογή απονιτροποίησης της απομάκρυνσης φωσφόρου μπορεί να βοηθήσει στον μετριασμό των προβλημάτων απόφραξης σε τεχνητούς υγροτόπους.

Για τον αποτελεσματικό εμπλουτισμό των D-PAO σε ΤΥ, θα πρέπει να διατηρηθούν δύο βασικές επιχειρησιακές προϋποθέσεις: Εναλλασσόμενες αναερόβιες / ανοξικές συνθήκες όπου κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, στην αναερόβια φάση οι D-PAO μετατρέπουν τα NO_3^- και NO_2^- σε αέριο άζωτο (N_2), απορροφούν πηγές άνθρακα και τις αποθηκεύουν ως ενδοκυτταρικά πολυμερή πολυ-β-υδροξυαλκανοϊκά (PHAs) χρησιμοποιώντας ενέργεια που προέρχεται από την αποσύνθεση πολυφωσφορικών και την αποικοδόμηση γλυκογόνου, οδηγώντας σε ανταγωνισμό για πόρους άνθρακα. Στην ανοξική φάση, το NO_3^- -N ή NO_2^- -N χρησιμεύει ως δέκτης ηλεκτρονίων, επιτρέποντας την πρόσληψη φωσφόρου. Ορισμένοι PAO έχουν βρεθεί ότι χρησιμοποιούν O_2 , NO_3^- και NO_2^- ως δέκτες ηλεκτρονίων. (Wu et al., 2021)

Η πλήρης απονιτροποίηση από NO_3^- σε N_2 συμβαίνει σε τέσσερα στάδια αναγωγής, παράγοντας νιτρώδη (NO_2^-), μονοξείδιο του αζώτου (NO) και υποξείδιο του αζώτου (N_2O) ως ενδιάμεσα. Αν και το N_2O παράγεται συνεχώς, συνήθως ανάγεται σε αέριο άζωτο. Ωστόσο, το ελεύθερο νιτρώδες οξύ, επηρεασμένο από τη συγκέντρωση νιτρωδών και το pH, μπορεί να αναστείλει τη μείωση του N_2O .

Η τακτική απομάκρυνση της περίσσειας φωσφόρου από το βιοφίλμ ΤΥ είναι ένα ζήτημα προς λύση. Η σταθερή και αποτελεσματική ενισχυμένη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου (EBPR) εξαρτάται από την περιοδική απόρριψη ιλύος εμπλουτισμένης με φώσφορο σε συστήματα ενεργοποιημένης ιλύος. Σε αντίθεση με τα συστήματα ενεργοποιημένης ιλύος, η αφαίρεση του εμπλουτισμένου με φώσφορο βιοφίλμ από τα ΤΥ είναι πιο δύσκολη. Μια προηγούμενη μελέτη (Wu et al., 2021) έδειξε ότι η εισαγωγή ενός διαλύματος συμπυκνωμένης πηγής άνθρακα θα μπορούσε να διεγείρει την απελευθέρωση φωσφόρου χωρίς να επηρεάσει αρνητικά την επακόλουθη απομάκρυνση φωσφόρου σε συστήματα εμπλουτισμένα με PAO. Με βάση αυτή την προσέγγιση, η μελέτη αυτή παρείχε περιοδικά ένα συμπυκνωμένο διάλυμα πηγής άνθρακα στα ΤΥ για να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητά του στην πρόκληση απελευθέρωσης φωσφόρου διατηρώντας παράλληλα την απόδοση απομάκρυνσης φωσφόρου στη διαδικασία δράσης απονιτροποιητών PAO βακτηρίων.

Ορισμένα D-PAO, συμπεριλαμβανομένου του σφαιρικού *Accumulibacter*, μπορούν προαιρετικά να χρησιμοποιήσουν νιτρώδη ή οξυγόνο ως δέκτες ηλεκτρονίων. Επιπλέον, οι D-PAO παρουσιάζουν αυξημένη πρόσληψη φωσφορικών υπό ανοξικές συνθήκες όταν χρησιμοποιούνται νιτρώδη άλατα ως δέκτη ηλεκτρονίων. Το γένος *Dechloromonas* είναι ένα άλλο βασικό D-PAO, ικανό να χρησιμοποιεί πτητικά λιπαρά οξέα (VFA) ως πηγή άνθρακα και νιτρικά άλατα ως δέκτη ηλεκτρονίων για πρόσληψη

φωσφόρου υπό υποξικές συνθήκες. Επίσης τα *Alphaproteobacteria* (π.χ., το γένος *Paracoccus*) και *Anaerolineae* έχουν αναφερθεί ως D-PAO. (J.Wang et al., 2022; Wu et al., 2021; Zhang et al., 2024)

8.2. Αερόβιοι Απονιτροποιητές PAO AD-PAO

Οι αερόβιοι απονιτροποιητικοί οργανισμοί συσσώρευσης φωσφόρου (AD-PAO) χρησιμοποιούν NO_3^- και O_2 ως δέκτες ηλεκτρονίων, επιτρέποντάς τους να εκτελούν ταυτόχρονα απονιτροποίηση και υπερβολική πρόσληψη φωσφόρου. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς PAO, οι AD-PAO δεν απελευθερώνουν φώσφορο υπό αναερόβιες συνθήκες, αλλά αντίθετα το κάνουν υπό αερόβιες συνθήκες. Οι πηγές ενέργειάς τους για την αερόβια απομάκρυνση φωσφόρου περιλαμβάνουν το γλυκογόνο και το πολυ-β-υδροξυβουτυρικό (PHB), τα οποία επιτρέπουν τη συσσώρευση πολυφωσφορικών. Η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης του φωσφόρου από τους AD-PAO επηρεάζεται από τη συγκέντρωση οξυγόνου. Η ταυτόχρονη εμφάνιση απονιτροποίησης και συσσώρευσης φωσφόρου υπό αερόβιες συνθήκες απλοποιεί το σχεδιασμό των δεξαμενών αντίδρασης και μειώνει σημαντικά την παραγωγή ιλύος. Αυτή η ικανότητα διαφοροποιεί τους AD-PAO από τους συμβατικούς μικροοργανισμούς που συνήθως εκτελούν απονιτροποίηση μόνο υπό ανοξικές συνθήκες. Επιπλέον, οι AD-PAO μπορούν να αφομοιώσουν το αμμώνιο, πραγματοποιώντας τόσο νιτροποίηση όσο και απονιτροποίηση υπό αερόβιες συνθήκες, παρόμοια με τους ετερότροφους νιτροποιητικούς- αερόβιους απονιτροποιητικούς μικροοργανισμούς (HNADM). Αυτοί οι οργανισμοί εμπίπτουν στην κατηγορία των βακτηρίων απομάκρυνσης φωσφόρου ταυτόχρονης ετερότροφης νιτροποίησης-αερόβιας απονιτροποίησης (SNDPR), τα οποία συμβάλλουν στην υψηλή αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης αζώτου και φωσφόρου λόγω της ικανότητάς τους να αντισταθμίζουν την κατανάλωση αλκαλικότητας κατά τη νιτροποίηση.

Σε επίπεδο γένους, οι αναφερόμενες AD-PAO περιλαμβάνουν τα *Achromobacter sp.*, *Bacillus subtilis*, *Acinetobacter sp.*, *Escherichia coli*, *Arthrobacter sp.* και *Brevundimonas sp.*, τα οποία έχουν ανιχνευθεί σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και με αναφορά σε TY είναι τα *Pseudomonas sp.* (Y. Zhang et al., 2024, Shukla et al., 2020)

Η διάκριση μεταξύ AD-PAO και D-PAO είναι σημαντική, με τους AD-PAO να επικεντρώνονται στη νιτροποίηση-αερόβια απονιτροποίηση και την ταυτόχρονη

απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου. Ωστόσο, η διαδικασία ετερότροφης νιτροποίησης σε AD-PAO παραμένει ανεπιβεβαίωτη, καθώς οι τρέχουσες μελέτες δείχνουν άμεση μετατροπή σε βιοδιαθέσιμο άζωτο (Bio-N) μέσω αφομοίωσης αμμωνίου. Η διαδικασία SNDPR αντιμετωπίζει προκλήσεις λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας άνθρακα, η οποία επηρεάζει την απόδοση του PAO. Ο προσδιορισμός των AD-PAO στη διαδικασία SNDPR παρέχει μια πιθανή λύση για τη βελτίωση της βιωσιμότητας και της μικροβιακής προσαρμοστικότητας στα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. (Y. Zhang et al., 2024)

8.3.S-PAO

Ο μηχανισμός των σχετιζόμενων με το θείο οργανισμών συσσώρευσης φωσφόρου (S-PAO) περιλαμβάνει μια κυκλική διαδικασία απελευθέρωσης και πρόσληψης φωσφόρου, που οδηγείται από οξείδωση και αναγωγή θείου. Στην αναερόβια φάση, απελευθερώνεται φώσφορος και αποθηκεύονται στο κύτταρο ενεργειακά υλικά (PHA), ενώ το θειικό ανάγεται σε σουλφίδιο και πολυσουλφίδια (poly-S), τα οποία συσσωρεύονται ενδοκυτταρικά. Κατά τη διάρκεια της ανοξικής ή μικροαερόβιας φάσης, ο φώσφορος απορροφάται, τα PHA παρέχουν ενέργεια και το σουλφίδιο/πολυ-S οξειδώνεται προς το θειικό άλας, ολοκληρώνοντας έναν κύκλο θείου.

Αυτή η διαδικασία ονομάζεται απονιτροποιητική βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου ενισχυμένη με θείο (Denitrifying Sulfur-Enhanced Biological Phosphorus Removal) (DS-EBPR) και σχετίζεται με τον κύκλο απονιτροποίησης θείου, χρησιμοποιώντας οξικό άλας ως πηγή άνθρακα και θειικό άλας ως πηγή θείου για τη ρύθμιση της πρόσληψης και απελευθέρωσης φωσφορικών. Ουσιαστικά, αντιμετωπίζει τα προβλήματα που προκαλούνται στην διαδικασία ενισχυμένης βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου (EBPR), όπου η διατήρηση της σταθερότητας του συστήματος είναι δύσκολη λόγω του ανταγωνισμού μεταξύ οργανισμών που συσσωρεύουν φώσφορο (PAOs) και οργανισμών που συσσωρεύουν γλυκογόνο (GAOs) για οργανική ύλη.

Σε εφαρμοσμένο DS-EBPR, σε μονάδα επεξεργασίας λυμάτων βασισμένο στη μακρογονιδιοματική, δείχνει ότι οι PAO που σχετίζονται με *Desulfobacteraceae* μπορεί να σχετίζονται με το μεταβολισμό του θείου, ενώ οι PAO που σχετίζονται με το *Thauera sp.* συνδέονται με το μεταβολισμό του αζώτου. Επιπλέον, το *Rhodobacteraceae* έχει αναγνωριστεί ως S-PAO με αποτελεσματικότητα

απομάκρυνσης φωσφόρου περίπου 50% υπό κατάλληλες συνθήκες (pH 6,9–7,1, θερμοκρασία $22 \pm 2^\circ\text{C}$). (Y. Zhang et al., 2024; Liang et al., 2025)

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, οι χαμηλές συγκεντρώσεις ιλύος και ο εμπλουτισμός με GAO μπορούν να δημιουργήσουν προκλήσεις. Η μικροβιακή συνεργασία στα συστήματα DS-EBPR ενισχύει την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης φωσφόρου, καθιστώντας την μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την επεξεργασία λυμάτων ακόμα και σε τεχνητούς υγροτόπους.

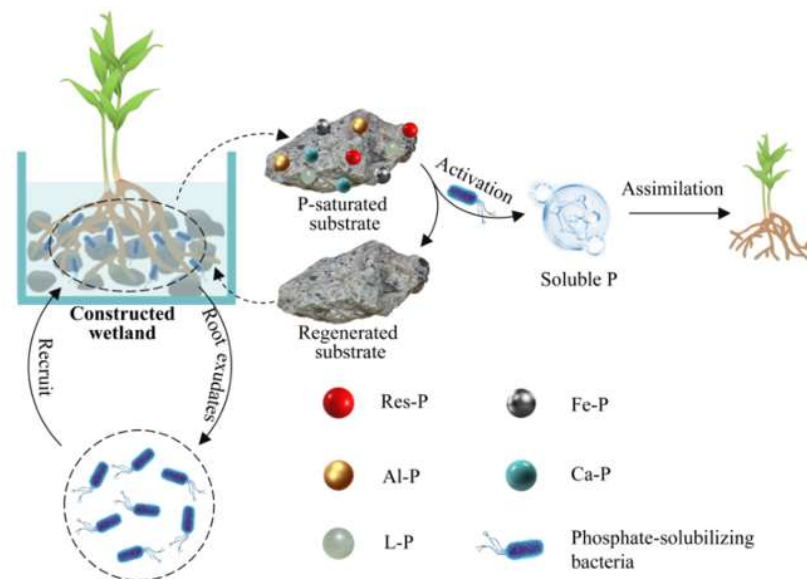
8.4. Βακτήρια διαλυτοποίησης φωσφόρου (PSB)

Μια αποτελεσματική μέθοδος για την απομάκρυνση του φωσφόρου σε τεχνητούς υγροτόπους είναι η πρόσληψη και η συγκομιδή από τα φυτά. Ωστόσο, τα φυτά δεν μπορούν να έχουν άμεση πρόσβαση στον φώσφορο που δεσμεύεται στο υπόστρωμα. Σε συνθήκες έλλειψης φωσφόρου, δρουν βακτήρια διαλυτοποίησης φωσφόρου (PSB), τα οποία ενισχύουν τη διαθεσιμότητα φωσφόρου απελευθερώνοντας πρωτόνια και οργανικά ανιόντα.

Ο οργανικός φώσφορος στο έδαφος υπάρχει συνήθως σε αδρανή μορφή, καθιστώντας δύσκολη την απορρόφηση από τα φυτά, ενώ ο ανόργανος φώσφορος δεσμεύεται εύκολα με ιόντα όπως Fe^{3+} , Al^{3+} και Ca^{2+} , σχηματίζοντας αδιάλυτες ενώσεις. Τα βακτήρια διαλυτοποίησης φωσφόρου (PSB) διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση της πρόσληψης φωσφόρου από τα φυτά μετατρέποντας τον φώσφορο στο υπόστρωμα σε μια πιο προσιτή μορφή, ανοργανοποιώντας τον οργανικό φώσφορο μέσω έκκρισης οξέος και υδρολύοντας τα ανόργανα ορυκτά φωσφόρου μέσω της ενζυμικής δραστηριότητας, μετατρέποντας τον αδιάλυτο φώσφορο σε βιοδιαθέσιμες μορφές. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα PSB μπορούν να επιτύχουν αυτό μέσω της έκκρισης ενζύμων (φυτάση, φωσφατάση), της παραγωγής οξέων (οργανικών και ανόργανων) και της αποσιδήρωσης (σιδεροφόρα, εξωκυτταρικοί πολυσακχαρίτες). (Pan et al., 2023) Οι ρίζες των φυτών συμβάλλουν σε αυτή τη διαδικασία απελευθερώνοντας οργανικά οξέα, τα οποία μειώνουν το pH της ριζόσφαιρας και προάγουν τη διάλυση του αδιάλυτου φωσφόρου. Επιπλέον, τα εκκρίματα ρίζας παρέχουν απαραίτητα θρεπτικά συστατικά και ενέργεια που υποστηρίζουν την επιβίωση και τον πολλαπλασιασμό των PSB. (Chu et al., 2025)

Τα PSB όχι μόνο βελτιώνει τη διαλυτότητα του φωσφόρου στα εδάφη, αλλά και ενισχύει την αποτελεσματικότητα των ορυκτών φωσφορικών χαμηλής ποιότητας. Η

παρουσία τους στα ΤΥ μπορεί να συμβάλει στην ενεργοποίηση του φωσφόρου, προωθώντας την ανάπτυξη των φυτών. Σε μελέτη (Chu et al., 2025), στελέχη PSB απομονώθηκαν από ομάδες φυτικής επεξεργασίας, με το *Curtobacterium pusillum* να επιδεικνύει την υψηλότερη ικανότητα διαλυτοποίησης φωσφορικών. *Curtobacterium*, ένα γένος εντός της οικογένειας *Microbacteriaceae*, συνδέεται συνήθως με τις ρίζες των φυτών και συμβάλλει στην προώθηση της ανάπτυξης. Επιπλέον, το *C. citreum* έχει αναγνωριστεί ως αποτελεσματικός διαλυτοποιητής φωσφορικών. Επίσης, σε αυτή τη μελέτη, ο εμβολιασμός του *C. pusillum* που απομονώθηκε από τον ΤΥ αύξησε τον πληθυσμό PSB και τη σχετική αφθονία τους, οδηγώντας σε υψηλότερο ρυθμό ενεργοποίησης φωσφόρου αυξάνοντας κατά 57,16 % την πρόσληψη από τα φυτά. Επίσης σε άλλη μελέτη (Wang, Q et al., 2021) έχουν αναγνωριστεί ως PSB τα *Corynebacterium* and *Enterobacter*. Ωστόσο, η έρευνα για την PSB σε τεχνητούς υγροτόπους παραμένει προς το παρόν περιορισμένη.



Εικόνα 15. Μηχανισμοί απομάκρυνσης φωσφόρου από PSB βακτήρια σε συνεργασία φυτών τεχνητών υγροτόπων. (Chu et al., 2025)

Πίνακας 4. Μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στην απομάκρυνση φωσφόρου στους ΤΥ

Μηχανισμός	Φύλο	Γένος	Μορφή Φωσφόρου απομάκρυνσης	Πηγή
PAO	Proteobacteria	<i>Rhodobacteraceae</i> (οικογ.), <i>Rhizobiaceae</i> (οικογ.)	Φωσφορικό άλας	J.Wang et al., 2022 Zhang et al., 2024
		<i>Alphaproteobacteria</i> <i>Candidatus, Accumulibacter</i> , <i>Dechloromonas</i> , <i>Rhodocyclus</i>		
		<i>Betaproteobacteria</i> <i>Pseudomonas</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Acinetobacter</i>		
D-PAO	Chloroflexi, Gemmatimonadetes Proteobacteria	<i>Gammaproteobacteria</i> <i>Rhodocyclaceae</i> (οικογ.),	Πολυφωσφορικό	J.Wang et al., 2022, Wu et al., 2021, Zhang et al., 2024
		<i>Gemmatimonadaceae</i> (οικογ.), <i>Gemmatimonas</i>		
		<i>Alphaproteobacteria</i> , <i>Paracoccus</i>		
AD-PAO	Proteobacteria	<i>Pseudomonadaceae</i> (οικογ), <i>Pseudomonas</i> , <i>Dechloromonas</i>	Πολυφωσφορικό	Shukla et al., 2020
		<i>Anaerolineae</i>		
S-PAO	<i>Desulfobacterota</i>	<i>Desulfobacteraceae</i>	Οργανικό φωσφορικό	Y. Zhang et al., 2024, Liang et al., 2025
	<i>Proteobacteria</i>	<i>Thauera</i> <i>Rhodobacteraceae</i>		
PSB	<i>Actinobacteria</i> , <i>Proteobacteria</i>	<i>Corynebacterium</i> , <i>Enterobacter</i>	Μετατροπή αδιάλυτου φωσφόρου σε διαλυτό φώσφορο	Chu et al., 2025 Wang,Q et al., 2021 J.Wang et al., 2022
	<i>Actinomycetota</i>	<i>Curtobacterium</i>		

9.Απομάκρυνση Βαρέων Μετάλλων

Η ρύπανση του νερού από βαρέα μέταλλα (BM) και μεταλλοειδή είναι ένα σημαντικό παγκόσμιο ζήτημα, που προέρχεται τόσο από φυσικές όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες. Βιομηχανικές δραστηριότητες όπως η διύλιση πετρελαίου, η ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση, η εξόρυξη, η παραγωγή μπαταριών και η όξινη αποστράγγιση ορυχείων (AMD) συμβάλλουν στη ρύπανση των λυμάτων από βαρέα μέταλλα. Τα βαρέα μέταλλα είναι μη βιοαποικοδομήσιμα και συσσωρεύονται στο

περιβάλλον, θέτοντας σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία μέσω της άμεσης κατανάλωσης και της βιοσυσσώρευσης στην τροφική αλυσίδα. Η έρευνα σχετικά με την ρύπανση των λυμάτων από βαρέα μέταλλα ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή, με μελέτες να έχουν δείξει την επιβάρυνση υδάτων με As, Cd, Cu, Zn, Ni, Cr, και Pb. Η αποκατάσταση των ΒΜ και ο έλεγχος των συγκεντρώσεων τους εντός επιτρεπόμενων ορίων στην επεξεργασία, είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος.

Σε σχέση με τις κοινές μεθόδους απομάκρυνσης ΒΜ σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων όπως ανταλλαγή ιόντων, εκχύλιση διαλύτη, ηλεκτροχημική επεξεργασία, επίπλευση, μικροβιακή επεξεργασία, οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, διαχωρισμό μεμβράνης και προσρόφηση, οι οποίες έχουν υψηλή κατανάλωση ενέργειας και κόστος αλλά και παράγουν δευτερογενή απόβλητα. Στα συστήματα ΤΥ, τα ΒΜ αφαιρούνται με συνεργασία υποστρώματος, φυτών και μικροοργανισμών μέσω κατακρήμνισης, συν-κατακρήμνισης, προσρόφησης, ανταλλαγής ιόντων, πρόσληψης φυτών (φυτοαποκατάσταση) και μικροβιακής δραστηριότητας. Ωστόσο, οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της αφαίρεσης. (Yu et al., 2021; Z.Zhang et al., 2024)

Το pH επηρεάζει την προσρόφηση, κατακρήμνιση, τη μικροβιακή δραστηριότητα και την ανάπτυξη των φυτών. Το χαμηλό διαλυμένο οξυγόνο (DO) επηρεάζει τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες (ενισχύει το σχηματισμό μεταλλικού σουλφιδίου), ενώ το υψηλό DO προάγει την καθίζηση και την προσρόφηση οξειδίων μετάλλων. Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) διεγείρει τη μικροβιακή δραστηριότητα και επηρεάζει τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες (ενισχύοντας τη μείωση του θεικού άλατος και το σχηματισμό μεταλλικού σουλφιδίου). Τα υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων ΒΜ μπορεί να είναι τοξικά για τα φυτά και τα μικρόβια, διακόπτοντας τις διαδικασίες απομάκρυνσης. Τέλος η θερμοκρασία ρυθμίζει το μεταβολισμό των φυτών, τις μικροβιακές διεργασίες και τις ιδιότητες προσρόφησης υποστρώματος.

(Yu et al., 2021; Z.Zhang et al., 2024)

Η απομάκρυνση βαρέων μετάλλων στους τεχνητούς υγροτόπους μέσω μικροβιακών διεργασιών περιλαμβάνει βιοπροσρόφηση, βιοσυσσώρευση, οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, μείωση θεικού άλατος και κατακρήμνιση ΒΜ, καθώς και αλληλεπιδράσεις φυτών-μικροοργανισμών.

Βιοπροσρόφηση (Biosorption): Τα ιόντα των ΒΜ προσροφώνται στις λειτουργικές ομάδες των εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών (EPS) ή των κυτταρικών τοιχωμάτων

(εξωκυτταρική δέσμευση). Λειτουργικές ομάδες όπως το καρβοξύλιο, το υδροξύλιο, το άμινο και το φωσφορικό άλας στα τοιχώματα των μικροβιακών κυττάρων διευκολύνουν την προσρόφηση μετάλλων όπως Cd, Pb, Cu και Zn.

Βιοσυσσώρευση (Bioaccumulation): Τα BM εισέρχονται στο εσωτερικό των μικροβιακών κυττάρων και δεσμεύονται από μεταλλοθειονεΐνες ή πρωτεΐνες μεταφοράς μετάλλων, επιτρέποντας την απομόνωσή τους (ενδοκυτταρικής αποθήκευση). Η διαδικασία αυτή μειώνει την τοξικότητα των BM και συμβάλλει στην αποτελεσματική απομάκρυνσή τους από τα λύματα.

Μείωση θειικού άλατος και κατακρήμνιση βαρέων μετάλλων: Τα θειοαναγωγικά βακτήρια (SRB) διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μακροπρόθεσμη ακινητοποίηση του BM οδηγώντας την καθίζηση και τη συν-καθίζηση σουλφιδίου μετάλλων. Τα SRB μετατρέπουν το θειικό άλας (SO_4^{2-}) σε σουλφίδιο (S^{2-}), το οποίο αντιδρά με μεταλλικά ιόντα για να σχηματίσει αδιάλυτα σουλφίδια μετάλλων, απομακρύνοντας αποτελεσματικά τα BM από τα λύματα.

Μικροβιακές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις: Οι μικροοργανισμοί μεταβάλλουν την ειδογένεση BM με αντιδράσεις οξείδωσης και αναγωγής, επηρεάζοντας τη διαλυτότητα των μετάλλων. Ενώ ορισμένα βακτήρια βοηθούν στην απομάκρυνση του BM, άλλα μπορούν να απελευθερώσουν εκ νέου κατιόντα μετάλλων, προκαλώντας ενδεχομένως δευτερογενή ρύπανση. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία οξείδωσης ενισχύει επίσης τις ευκαιρίες προσρόφησης για επανα-απελευθερωμένα BM, επιτρέποντας στα συστήματα ΤΥ να ανακυκλώνουν και να συγκρατούν αποτελεσματικά τα μέταλλα.

Αλληλεπιδράσεις μικροοργανισμών-φυτών: Τα ριζοβακτήρια και τα ενδοφυτικά βακτήρια υποστηρίζουν την ανάπτυξη των φυτών διευκολύνοντας την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών παράγοντας ορμόνες που προάγουν την ανάπτυξη των φυτών και ενισχύοντας τη ρύπανση και την ανοχή στο στρες, βελτιώνοντας παράλληλα τη συσσώρευση μετάλλων. Με τη σειρά τους, τα φυτά συμβάλλουν παρέχοντας οξυγόνο και οργανική ύλη, δημιουργώντας ένα ευνοϊκό περιβάλλον για τις μικροβιακές κοινότητες. (Bhuiyan et al., 2023; J.Wang et al., 2022; Yu et al., 2021; Z.Zhang et al., 2024)

9.1.Βιοπροσρόφηση Βαρέων Μετάλλων

Η βιοπροσρόφηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία οι μικροοργανισμοί προσκολλώνται σε ανόργανους και οργανικούς ρύπους μέσω διαφόρων φυσικών και

χημικών μηχανισμών. Το μικροβιακό κυτταρικό τοίχωμα, που αποτελείται από πολυσακχαρίτες, λιπίδια και πρωτεΐνες, χρησιμεύει ως φράγμα που εμποδίζει τους ρύπους να εισέλθουν στο κύτταρο. Λειτουργικές ομάδες όπως η αμίνη, το καρβοξύλιο, η θειόλη, το υδροξύλιο, το φωσφορικό άλας και το θειικό άλας διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην προσκόλληση ρύπων.

Οι οργανικοί ρύποι προσροφώνται μέσω διάχυσης και ανταλλαγής ιόντων, ενώ οι μη πολικές ουσίες διεισδύουν στην κυτταρική μεμβράνη λόγω της λιπόφιλης φύσης τους. Η βιοπροσρόφηση βαρέων μετάλλων συμβαίνει κυρίως μέσω ανταλλαγής ιόντων, όπου τα μεταλλικά ιόντα ανταγωνίζονται με πρωτόνια για θέσεις σύνδεσης. Όταν τα βαρέα μέταλλα και τα φυτοφάρμακα συνυπάρχουν, μπορεί να ανταγωνίζονται για θέσεις προσρόφησης, οδηγώντας σε αλληλεπιδράσεις που είτε ενισχύουν είτε εμποδίζουν τη βιοπροσρόφηση ανάλογα με τις συγκεντρώσεις και τις συγγένειες πρόσδεσής τους.

Οι ρύποι συνδέονται επίσης με επιφανειακά μόρια όπως πρωτεΐνες, γλυκοπρωτεΐνες, εξωπολυσακχαρίτες, λιποπολυσακχαρίτες και πεπτιδογλυκάνες. Οι εξωπολυσακχαρίτες EPS περιέχουν ανιονικές λειτουργικές ομάδες που προσκολλώνται στα βαρέα μέταλλα μέσω ανταλλαγής πρωτονίων. Γενικά, τα βαρέα μέταλλα σχηματίζουν ισχυρότερες ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις από τους οργανικούς ρύπους, καθιστώντας τα πιο πιθανό να συνδεθούν με λειτουργικές ομάδες. Επιπλέον, η προσρόφηση βαρέων μετάλλων μπορεί να μεταβάλει τις φυσικοχημικές ιδιότητες της μικροβιακής επιφάνειας, επηρεάζοντας τη δομή και τη λειτουργία της κυτταρικής μεμβράνης και του τοιχώματος. Αυτό μπορεί να προωθήσει τη βιοπροσρόφηση των λιπόφιλων φυτοφαρμάκων μειώνοντας την πολικότητα της κυτταρικής επιφάνειας (Kondakindi et al., 2024)

9.2.Βιοσυσσώρευση βαρέων μετάλλων

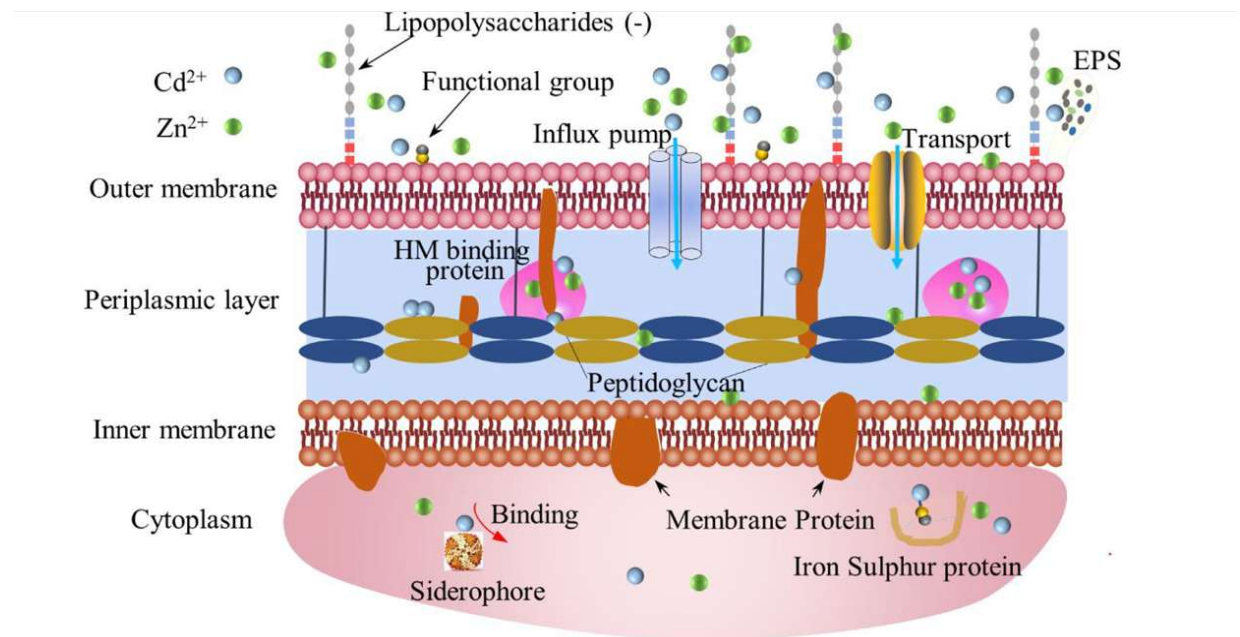
Η βιοσυσσώρευση είναι μια ενεργή, καθοδηγούμενη από το μεταβολισμό διαδικασία όπου τα ζωντανά κύτταρα συσσωρεύουν ενδοκυτταρικά ιόντα μετάλλων. Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια: μια αρχική ταχεία προσρόφηση μεταλλικών ιόντων στην κυτταρική επιφάνεια, παρόμοια με τη βιοπροσρόφηση, ακολουθούμενη από μια βραδύτερη ενδοκυτταρική μεταφορά μεταλλικών ειδών μέσω ενεργών μηχανισμών μεταφοράς. Σε αντίθεση με τη βιοπροσρόφηση, η βιοσυσσώρευση είναι μη αναστρέψιμη και εξαρτάται από τον κυτταρικό μεταβολισμό.

Η βιοσυσσώρευση είναι μια πολύπλοκη διαδικασία κατά την οποία οι ρύποι, ιδιαίτερα τα ιόντα μετάλλων, διασχίζουν το κυτταρικό τοίχωμα και τη μεμβράνη και δεσμεύονται σε ενδοκυτταρικές δομές. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει ενδοκυτταρική συσσώρευση, οξείδωση και αντιδράσεις αναγωγής, καθιστώντας την ιδιαίτερα εξαρτημένη από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως το pH, η θερμοκρασία και η παρουσία άλλων ρύπων αλλά και ένας βασικός περιορισμός είναι ότι η μικροβιακή ανάπτυξη απαιτεί πηγές οργανικού άνθρακα στο μέσο. Τα τοξικά μεταλλικά ιόντα μπορούν να διαταράξουν την ακεραιότητα της κυτταρικής μεμβράνης και να επηρεάσουν την ενζυματική δραστηριότητα δεσμεύοντας σουλφυδρυλικές ομάδες ενζύμων. Ωστόσο, οι μικροοργανισμοί εξουδετερώνουν αυτό συνθέτοντας μεταλλοθειονεΐνες, οι οποίες δεσμεύουν και εξουδετερώνουν τα μεταλλικά ιόντα.

Οι προσαρμοσμένοι μικροοργανισμοί από ρυπασμένα περιβάλλοντα επιδεικνύουν υψηλότερη αποτελεσματικότητα βιοσυσσώρευσης από τους μη προσαρμοσμένους. Γενετικά τροποποιημένοι μικροοργανισμοί έχουν επίσης διερευνηθεί για ενισχυμένη βιοσυσσώρευση, όπως το *E.coli* που έχει τροποποιηθεί με γονίδια μεταλλοθειονεΐνης για την απομάκρυνση του υδραργύρου. Επίσης, η βιοσυσσώρευση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική με μικροοργανισμούς που ανέχονται υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων, καθώς αυτά τα στελέχη μπορούν να συσσωρεύσουν μεγάλες ποσότητες μεταλλικών ιόντων χωρίς αναστολή. Μερικοί μικροοργανισμοί αναπτύσσουν ειδικές ενδοκυτταρικές θέσεις δέσμευσης εμπλουτισμένες με ομάδες θειόλης για την εξουδετέρωση της τοξικότητας μετάλλων. Μελέτες δείχνουν ότι η αύξηση της συγκέντρωσης μεταλλικών ιόντων οδηγεί σε μορφολογικές και φυσιολογικές αλλαγές στα μικροβιακά κύτταρα. (Chojnacka, 2010; Krishna et al., 2018)

Δεδομένου ότι τα βαρέα μέταλλα είναι γενικά τοξικά για τους μικροοργανισμούς και μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη μικροβιακή αφθονία και ποικιλότητα, η εισαγωγή ανθεκτικών μικροοργανισμών σε ΤΥ είναι μια αποτελεσματική στρατηγική για την επεξεργασία λυμάτων επιβαρυνόμενα με ΒΜ. Η έρευνα (G. Yu et al., 2020) έδειξε ότι ο εμβολιασμός των ΤΥ με ανθεκτικούς μικροοργανισμούς οδήγησε σε 10,13% και 8,15% υψηλότερη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης των Cd^{2+} και Zn^{2+} , αντίστοιχα, σε σύγκριση με τα ΤΥ χωρίς εμβολιασμό καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Επιπλέον, οι μικροβιακές κοινότητες όπου η *Serratia* και η *Pseudomonas* ήταν τα κυρίαρχα μικροβιακά είδη, έδειξαν αυξημένη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ΒΜ σε σύγκριση με τα μη εμβολιασμένα βακτηριακά συστήματα. Επίσης, το υποχρεωτικά αερόβιο βακτήριο *Pseudomonas putida SPI* και το προαιρετικό

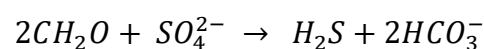
αναερόβιο *Bacillus sp. PZ-1* έχουν επιδείξει υψηλές ικανότητες προσρόφησης για Hg(II) και Pb(II), αντίστοιχα. Υπό ορισμένες συνθήκες, το *Pseudomonas putida SPI* πέτυχε πλήρη (100%) απομάκρυνση του Hg(II) από τα λύματα, ενώ ο *Bacillus sp. PZ-1* παρουσίασε ποσοστό βιοπροσρόφησης Pb(II) 93,01%. (Yu et al., 2021)



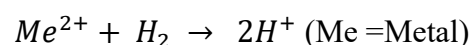
Εικόνα 16. Μηχανισμοί ενισχυμένης απομάκρυνσης των ΒΜ από μικροοργανισμούς σε ΤΥ. (G. Yu et al., 2020)

9.3. Κατακρήμνιση βαρέων μετάλλων από θειοαναγωγικά βακτήρια

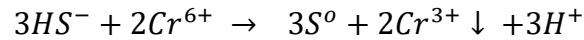
Η καθίζηση σουλφιδίου μετάλλων από θειοαναγωγικά βακτήρια (SRB) είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές φυσικοχημικές μεθόδους για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια: (i) SRB οξειδώνει απλές οργανικές ενώσεις (π.χ. γαλακτικό, οξικό, προπιονικό, βουτυρικό) υπό αναερόβιες συνθήκες, χρησιμοποιώντας θειικό άλας ως δέκτη ηλεκτρονίων για την παραγωγή υδρόθειου (H₂S) και διττανθρακικού.



ii) το βιολογικά παραγόμενο H₂S αντιδρά με διαλυμένα βαρέα μέταλλα (π.χ. Cu, Zn, Ni) για να σχηματίσει αδιάλυτα ιζήματα σουλφιδίου μετάλλων.



Επιπλέον, το SRB μπορεί έμμεσα να ανάγει το Cr^{6+} σε Cr^{3+} μέσω της παραγωγής H_2S ή μέσω άμεσης ενζυματικής αναγωγής που περιλαμβάνει υδρογονάσες και c_3 κυτοχρώματα.



Σε σύγκριση με τις μεθόδους χημικής καθίζησης που παράγουν υδροξείδια ή οξυϋδροξείδια, η καθίζηση σουλφιδίου μετάλλων προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της χαμηλότερης παραγωγής υπολειμματικής ιλύος, της μεγαλύτερης σταθερότητας των μεταλλικών σουλφιδίων ακόμη και σε όξινο pH, της υψηλής δραστηριότητας και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας. Αυτή η μέθοδος όχι μόνο αφαιρεί τοξικά βαρέα μέταλλα, αλλά επιτρέπει επίσης την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων σε μορφή σουλφιδίου.

Οι μικροοργανισμοί παρουσιάζουν ποικίλα επίπεδα αντοχής στα μέταλλα μέσω μηχανισμών όπως ο αποκλεισμός μετάλλων, η ενεργή μεταφορά, η ενδοκυτταρική και εξωκυτταρική απομόνωση, η ενζυματική αποτοξίνωση και η μειωμένη ευαισθησία των κυτταρικών στόχων. Η αποτελεσματικότητα της θεραπείας με βάση το SRB εξαρτάται από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα δότη ηλεκτρονίων, το pH, η θερμοκρασία, η συγκέντρωση θειικού άλατος και ο τύπος των βαρέων μετάλλων που υπάρχουν. (Kieu et al., 2011)

Σε ΤΥ με οργανικά εμπλουτισμένα υποστρώματα (OES) , μέθοδος για ενισχυμένη απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, με υλικά όπως τύρφη, κομπόστ και κελύφη καρυδιάς, εμφανίζουν χαμηλά επίπεδα DO και Eh . Σε αυτές τις συνθήκες, τα OES δρουν ως πηγή οργανικών ουσιών που χρησιμεύουν ως δότες ηλεκτρονίων και πηγές ενέργειας, διεγείροντας τη δραστηριότητα των απομειωτικών (ανάγουν-μειώνουν) θειοαναγωγικών βακτηρίων (SRB). Αυτό θεωρείται και ένας βασικός μηχανισμός σε ΤΥ με OES, βελτιστοποιώντας την αφαίρεση ΒΜ. Παραδείγματα με οργανικό υπόστρωμα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (G.Yu et al., 2023) για την απομάκρυνση Ni, Zn , είναι ποσοστά που φθάνουν 99.3 % και 94.7 % αυξάνοντας την απόδοση κατά 32.8 % και 20.7% αντίστοιχα.

Τα SRB βακτήρια που έχουν εντοπιστεί σε ΤΥ για απομάκρυνση Fe^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{2+} είναι με κυρίαρχο το φύλο *Proteobacteria* (*Deltaproteobacteria*; *Desulfobacteriaceae* (πχ γένος *Desulfotignum*, *Desulfosarcina*, *Desulfobacter*, *Desulfococcus*), αλλά και *Firmicutes* (*Desulfotomaculum*, *Desulfosporosinus*),

Actinobacteria, *Planctomycetes*, *Parcubacteria*, *Chloroflexi*, *Acidobacteria*, *Fibrobacteres* *Bacteroidetes*. Επίσης, άλλοι λειτουργικοί μικροοργανισμοί με συμπληρωματικούς οικολογικούς ρόλους διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αποτελεσματική αποκατάσταση λυμάτων επιβαρυνμένων με βαρέα μέταλλα όξινης αποστράγγισης ορυχείων. Για παράδειγμα, μικροοργανισμοί από το γένος *Propioniciclav* (*Actinobacteria*) μπορούν να μεταβολίσουν διάφορους υδατάνθρακες για να παράγουν οξικό και προπιονικό οξύ, το οποίο με τη σειρά του υποστηρίζει τον απομειωτικό μεταβολισμό των βακτηρίων SRB. (J Wang et al., 2022; Z.Zhang et al., 2024)

9.4. Μικροβιακές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις

Τα αναερόβια βακτήρια που μειώνουν τα μέταλλα και τα αρχαία χρησιμοποιούν μέταλλα ως τερματικούς δέκτες ηλεκτρονίων στην αναπνοή, επηρεάζοντας την κινητικότητα των μετάλλων. Αυτοί οι μικροοργανισμοί μπορούν να ακινητοποιήσουν τα μέταλλα μειώνοντάς τα σε λιγότερο διαλυτές μορφές, καθιστώντας τα χρήσιμα για βιοαποκατάσταση. Το χρώμιο (VI), ένας τοξικός ρύπος από βιομηχανικές πηγές, μπορεί να μειωθεί στο λιγότερο τοξικό Cr(III) από διάφορους μικροοργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των θειοαναγωγικών βακτηρίων, με δότες ηλεκτρονίων όπως το NADH. Αυτή η βιοαναγωγή οδηγεί σε καθίζηση Cr και απομάκρυνση από το νερό. Ομοίως, το ουράνιο (VI) ανάγεται σε αδιάλυτο U(IV) από βακτήρια που μειώνουν το Fe(III) όπως το *Geobacter metallireducens* και το *Desulfovibrio desulfuricans*, οδηγώντας σε καθίζηση ουρανίου και φυσική διήθηση σε υγροτόπους.

Τα διαλυμένα Fe(II) και Mn(II) υφίστανται οξείδωση μέσω αβιοτικών αντιδράσεων και βακτηριακής δραστηριότητας, οδηγώντας στην καθίζησή τους κυρίως ως υδροξείδια. Η οξείδωση του Fe(II) είναι ευρέως διαδεδομένη σε περιβάλλοντα ρυπασμένα με μέταλλα, συμπεριλαμβανομένης της αποστράγγισης ορυχείων, των σωλήνων αποστράγγισης, των ιζημάτων, των τυρφώνων και των ριζοσφαιρίων των φυτών. Τα βακτήρια εναπόθεσης σιδήρου το *Thiomonas* και το *Sideroxydans* διευκολύνουν αυτή τη διαδικασία οξειδώνοντας το Fe²⁺ σε Fe³⁺, το οποίο στη συνέχεια αντιδρά με το νερό για να σχηματίσει αδιάλυτο υδροξείδιο του σιδήρου βοηθώντας στην καθίζησή του και μειώνοντας την τοξικότητά του.

Στις αερόβιες ζώνες των τεχνητών υγροτόπων, η καθίζηση οξειδίων του σιδήρου και του μαγγανίου - που οδηγείται τόσο από αβιοτική οξείδωση όσο και από μικροβιακές διεργασίες - είναι ο πρωταρχικός μηχανισμός για την απομάκρυνση μετάλλων. Η αργή

ροή του νερού και η εκτεταμένη επιφάνεια των αερόβιων υγροτόπων ενισχύουν την οξείδωση των βακτηριακών μετάλλων, οδηγώντας στην υδροξυλίωση, την καθίζηση και τη συγκράτηση των υδροξειδίων Fe, Mn και Al. Μελέτες δείχνουν ότι το 40-70% του σιδήρου που αφαιρείται από την όξινη αποστράγγιση ορυχείων στα ΤΥ είναι με τη μορφή υδροξειδίων του σιδήρου. Αυτά τα κατακρημνισμένα οξυδροξείδια απορροφούν επίσης αποτελεσματικά βαρέα μέταλλα όπως Cu, Pb, Ni, Co και Cr, καθαρίζοντας περαιτέρω το επιβαρυνμένο νερό. Ωστόσο, ενώ η οξείδωση του σιδήρου και η υδρόλυση συμβάλλουν στην απομάκρυνση μετάλλων, μπορούν επίσης να μειώσουν το pH του νερού. Η οξείδωση του μαγγανίου συμβαίνει πιο αργά από την οξείδωση του σιδήρου και αναστέλλεται από το Fe (II). Ως αποτέλεσμα, το Mn κατακρημνίζεται κυρίως σε μεταγενέστερα στάδια των συστημάτων ροής υγροτόπων, κυρίως ως MnO₂, MnS ή Mn(OH)₂. Τέλος, λόγω της δραστηριότητας των οξειδωτικών αλλά και θειοαναγωγικών βακτηρίων σε διάφορα συστήματα υγροτόπων, εξαλείφθηκαν πάνω από το 98% του Fe, το 95% του Ni, και το 45% του S από τη διαρροή όξινης αποστράγγισης ορυχείου. (J Wang et al., 2022; Kosolapov et al., 2004)

9.5. Αλληλεπιδράσεις μικροοργανισμών-φυτών

Οι μικροβιακές και φυτικές αλληλεπιδράσεις διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, κυρίως μέσω συμβιωτικών σχέσεων και μηχανισμών ανοχής μετάλλων που ενισχύουν την ανάπτυξη των φυτών. Δύο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απορρόφηση ιόντων μετάλλων από τις ρίζες είναι οι μικροοργανισμοί της ριζόσφαιρας και τα ένζυμα τους. Πέρα από την άμεση πρόσληψη, τα φυτά υγροτόπων μπορούν επίσης να διευκολύνουν τη μείωση των μετάλλων, την προσρόφηση και την καθίζηση μέσω συμβίωσης με βακτήρια. Η παρουσία βακτηρίων ριζόσφαιρας μπορεί να ενισχύσει τη συσσώρευση βαρέων μετάλλων στα φυτά, ιδιαίτερα όταν αυτά τα βακτήρια έχουν αναπτύξει μηχανισμούς ανοχής - που κυμαίνονται από συμβίωση έως συνεργιστικές αλληλεπιδράσεις.

Τα βακτήρια που προάγουν την ανάπτυξη των φυτών (PGPR) είναι μικροοργανισμοί που διεγείρουν την ανάπτυξη φωτοσυνθετικών οργανισμών. Εκτός από το ότι δρα ως φυτικές ορμόνες, το PGPR μπορεί επίσης να προστατεύσει τα φυτά από τοξικές ουσίες όπως τα βαρέα μέταλλα. Το αερόβιο περιβάλλον της ριζόσφαιρας του φυτού ευνοεί τον πολλαπλασιασμό των οξειδωτικών βακτηρίων του θείου, τα οποία παίζουν κρίσιμο

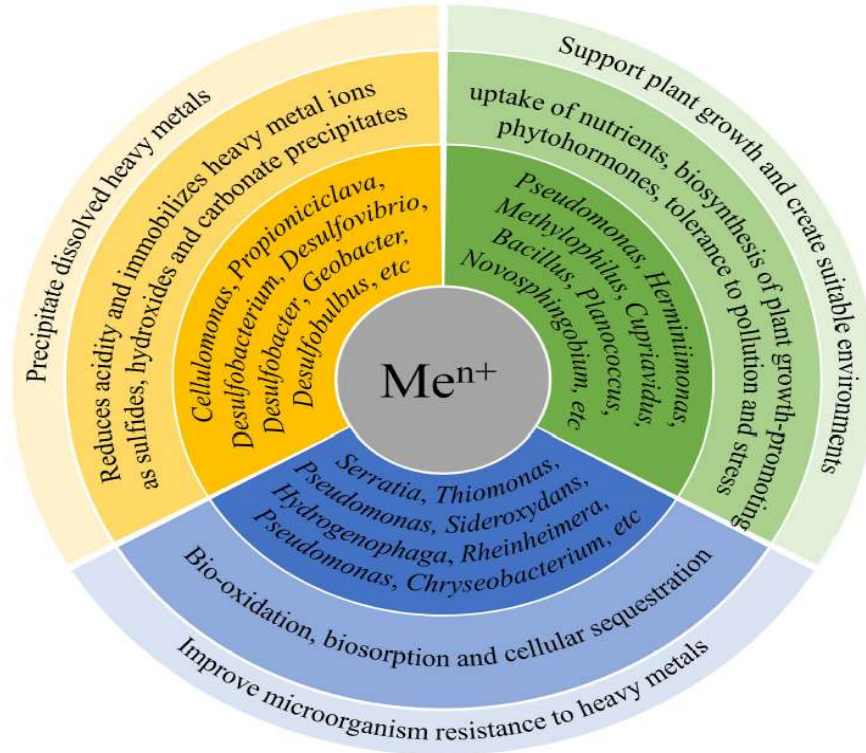
ρόλο στη διαδικασία μείωσης του θειικού άλατος και συμβάλλουν σημαντικά στην απομάκρυνση μετάλλων σε τεχνητούς υγροτόπους. (Qu et al., 2023)

Μελέτες ανέλυσαν τη συμβολή διαφόρων οδών αφαίρεσης των ΒΜ και αναφέρουν ότι η συσσώρευση σε υποστρώματα ήταν η μεγαλύτερη οδός (>50%) για την απομάκρυνση των ΒΜ με καθίζηση, ενώ η πρόσληψη των ΒΜ από τα φυτά αντιστοιχούσε μόνο στο 3% περίπου της αρχικής συγκέντρωσης ΒΜ εισόδου. (Z.Zhang et al., 2024) Οι εποχιακές περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, η ηλιακή ακτινοβολία και η εισροή οργανικής ύλης, επηρεάζουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και την ανάπτυξη των φυτών, επηρεάζοντας έτσι την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης μετάλλων. (Kosolapov et al., 2004)

Μελέτες έχουν δείξει ότι τα εμβολιασμένα με ενδοφυτικά βακτήρια φυτά παρουσιάζουν βελτιωμένους δείκτες ανάπτυξης, όπως αυξημένο μήκος και βιομάζα, οδηγώντας σε αυξημένη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης μιγμάτων βαρέων μετάλλων σε τεχνητούς υγροτόπους. Τα φυτά παρέχουν απαραίτητα θρεπτικά συστατικά και ενδιαιτήματα για τα ενδόφυτα, τα οποία, με τη σειρά τους, ενισχύουν την παραγωγή φυτικής βιομάζας επηρεάζοντας την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών, τη μετατόπιση μετάλλων, τη συσσώρευση, τον μετασχηματισμό και την αποτοξίνωση.

Τα ευεργετικά αποτελέσματα των ενδοφυτικών βακτηρίων προέρχονται από διάφορους βασικούς μηχανισμούς: (1) Διευκολύνουν την πρόσληψη ή τη σύνθεση βασικών θρεπτικών συστατικών όπως φωσφορικά, αμμώνιο και νιτρικά, τα οποία μεταφέρονται γρήγορα στο φυτό ξενιστή. (2) Ρυθμίζουν την έκφραση των πρωτεϊνών που σχετίζονται με το στρες και των γονιδίων οξειδωτικού στρες, βελτιώνοντας τις αντιοξειδωτικές ενζυμικές δραστηριότητες μειώνοντας παράλληλα τη συσσώρευση επιβλαβών αντιδραστικών ειδών οξυγόνου (ROS) και μηλονοδιαλδεϋδης (MDA). (3) Παράγουν φυτικές αυξητικές ορμόνες, όπως ινδολο-3-οξικό οξύ (IAA) και 1-αμινοκυκλοπροπανο-1-καρβοξυλικό οξύ (ACC), προωθώντας τη διάδοση της βιομάζας. (4) Βοηθούν στη μετατόπιση των ΒΜ στους εναέριους φυτικούς ιστούς, πιθανώς λόγω της ικανότητας απορρόφησης και αντοχής των μετάλλων. Πρόσφατες εφαρμογές βιοενίσχυσης σε κλίμακα πεδίου με ενδόφυτα σε ΤΥ έχουν αποδείξει τις δυνατότητές τους στη βελτίωση της υγείας των φυτών και στην αύξηση της αποτελεσματικότητας της απομάκρυνσης μετάλλων. Τα ενδοφυτικά βακτήρια *Microbacterium arborescens* *Bacillus endophyticus* *Bacillus pumilus* *Bacillus sp.* *Pantoea sp.* συμβάλλαν στην απομάκρυνση Cr, Fe, Ni και Cd με αύξηση 10% , 40%

25% 14% αντίστοιχα και τελική απομάκρυνση 97%, 89%, 88 %, 72 %. (G.Yu et al., 2023)



Εικόνα 17. Κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων και μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στους τεχνητούς υγροτόπους. (J Wang et al., 2022)

10.Απομάκρυνση Αντιβιοτικών- Γονιδίων Ανθεκτικών στα Αντιβιοτικά (Args)

Τα αντιβιοτικά χρησιμοποιούνται εκτενώς για τη θεραπεία μολυσματικών ασθενειών, την προστασία της ανθρώπινης υγείας και την προώθηση εντατικής κτηνοτροφίας. Ωστόσο, το 30-90% των χορηγούμενων αντιβιοτικών απεκκρίνονται ως δραστικές ενώσεις ή μεταβολίτες στα ούρα και τα κόπρανα. Ενώ οι συγκεντρώσεις αντιβιοτικών σε υδάτινα περιβάλλοντα κυμαίνονται από νανογραμμάρια έως χιλιοστόγραμμα ανά λίτρο, ακόμη και χαμηλά επίπεδα μπορούν να προωθήσουν την εξάπλωση των ανθεκτικών στα αντιβιοτικά βακτηρίων (ARB) και των γονιδίων αντοχής στα αντιβιοτικά (ARG). Τα ARGs μπορούν να εξαπλωθούν γρήγορα μέσω οριζόντιας

μεταφοράς γονιδίων (HGT), που παραμένουν σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, επιφανειακά, υπόγεια ύδατα, ιζήματα και έδαφος. Ακόμη και μετά τη μείωση της χρήσης αντιβιοτικών, τα ARG συνεχίζουν να εξαπλώνονται μέσω κινητών γενετικών στοιχείων. Αυτή η αυξανόμενη έκθεση ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις αντιβιοτικών μπορεί να επηρεάσει τη δομή και λειτουργία μικροβιακών κοινοτήτων και να επηρεάσουν το άζωτο, τους κύκλους άνθρακα και θείου ώστε τα ARG να αποτελούν σοβαρή απειλή για την οικολογική βιωσιμότητα και την ανθρώπινη υγεία και να αναγνωρίζονται ως παγκόσμια κρίση δημόσιας υγείας. (Yang M. et al., 2024, Liu et al., 2019)

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, η κατανάλωση αντιβιοτικών ξεπερνά τους 100.000 τόνους ετησίως, με σημαντικό μέρος να χρησιμοποιείται στην κτηνοτροφία. Βάση της μελέτης του ΠΟΥ, η ανθρώπινη έτησια κατανάλωση αντιβιοτικών στην Ευρώπη το 2015 ήταν περίπου 8000 τόνοι και πιο συγκεκριμένα στην Ελλάδα ήταν 139 τόνοι. Από την άλλη το 2013, η Κίνα, ως ένας από τους μεγαλύτερους παραγωγούς και καταναλωτές αντιβιοτικών, κατέγραψε κατανάλωση 92.700 τόνων, με το 52% να διατίθεται στην κτηνοτροφία. Επίσης, με βάση την έρευνα του ΠΟΥ η αυξανόμενη επικράτηση των ARG αποτελεί μείζονα παγκόσμια απειλή για την υγεία και την ανάπτυξη, η οποία εκτιμάται ότι ευθύνεται για 1,27 εκατομμύρια θανάτους το 2019 και ταυτόχρονα συμβάλλει σε 4,95 εκατομμύρια θανάτους. Η κατάχρηση και η υπερβολική χρήση αντιμικροβιακών ουσιών οδηγούν στην ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών ανθεκτικών στα φάρμακα. Η αντιμικροβιακή αντοχή πλήττει δυσανάλογα τις χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος, επιδεινώνοντας τις ανισότητες και απειλώντας τις σύγχρονες ιατρικές εξελίξεις.

Οι συμβατικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων δεν έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την αποτελεσματική απομάκρυνση των αντιβιοτικών, καθώς η κύρια λειτουργία τους είναι η εξάλειψη των εύκολα βιοαποικοδομήσιμων ενώσεων. Αν και έχουν αναπτυχθεί αρκετές προηγμένες μέθοδοι απομάκρυνσης ρύπων, όπως οι προηγμένες διεργασίες οξείδωσης και διεργασίες μεμβράνης, το υψηλό κόστος εφαρμογής, η τοξικότητα των υποπροϊόντων μετά την αποικοδόμηση και η δευτερογενής ρύπανση που μπορεί να προκληθεί από προϊόντα μετατροπής, είναι δεδομένα που δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως. Επιπρόσθετα τα βιοφίλμ δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιούνται, γεγονός που περιορίζει τη μακροπρόθεσμη εφαρμογή τους. Ως πράσινη τεχνολογία, οι TY αναγνωρίστηκαν πρόσφατα για την υψηλή αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης αντιβιοτικών, με μελέτες να αναφέρουν ποσοστά απομάκρυνσης από 49,43% έως 85%

για τη σουλφαμεθοξαζόλη (SM), άνω του 90% για τα σουλφοναμίδια (SA) και τις τετρακυκλίνες (TCs) και 82%–100% για κινολόνη (QN) από τα λύματα. Ωστόσο, η απομάκρυνση αντιβιοτικών στα ΤΥ είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει πολλαπλούς ταυτόχρονους φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς μηχανισμούς, συμπεριλαμβανομένης της εξάτμισης, της φωτοαποικοδόμησης, της καθίζησης, της προσρόφησης υποστρώματος, της υδρόλυσης, της πρόσληψης και συσσώρευσης φυτών και της μικροβιακής αποικοδόμησης. Για την απομάκρυνση του αντιβιοτικού, συχνά, συμβάλλουν πολλαπλοί μηχανισμοί, όπου εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη ολοκληρωμένης ανάλυσης απομάκρυνσης διαφορετικών κατηγοριών αντιβιοτικών με ποικίλες φυσικοχημικές ιδιότητες σε σχέση με τα τρία βασικά συστατικά του ΤΥ: υπόστρωμα, μακρόφυτα και μικρόβια. Αυτά τα στοιχεία αλληλεπιδρούν με πολύπλοκους τρόπους και η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης αντιβιοτικών στα ΤΥ ποικίλλει σημαντικά με βάση παράγοντες όπως ο σχεδιασμός ΤΥ, τα είδη φυτών και η υδραυλική φόρτιση. (Yang M. et al., 2024; Lv et al., 2022; Huang et al., 2021; Zhao et al., 2024)

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης ανα είδος αντιβιοτικών και τύπο τεχνητών υγροτόπων ποικίλλει σημαντικά. Οι κινολόνες και οι τετρακυκλίνες είναι μεταξύ αντιβιοτικών που παρουσιάζουν τα υψηλότερα ποσοστά αφαίρεσης, κατά μέσο όρο 70-90% σε όλους τους τύπους. Άλλη μελέτη διαπίστωσε μια ακολουθία αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης αντιβιοτικών:

οξυτετρακυκλίνη > σιπροφλοξασίνη > σουλφαμεθαζίνη.

Άλλες κατηγορίες αντιβιοτικών, συμπεριλαμβανομένων των σουλφοναμίδων, μακρολιδίων, των χλωραμφενικολών και των βήτα-λακταμών (BLs), παρουσιάζουν γενικά χαμηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης, εκτός από τους υγρότοπους κάθετης υποεπιφανειακής ροής, όπου οι σουλφοναμίδες και τα μακρολίδια επιτυγχάνουν αποδόσεις 74,61% και 81,73%, αντίστοιχα. Επομένως, τα αποτελέσματα ερευνών δείχνουν ότι η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης αυτού του τύπου ΤΥ για τα αντιβιοτικά είναι υψηλότερη (πάνω από 70% για τα περισσότερα αντιβιοτικά). (Liu et al., 2019)

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση μικροοργανισμών για την αποικοδόμηση αντιβιοτικών έχει ερευνηθεί εκτενώς. Ειδικότερα την τελευταία πενταετία, μελέτες διερευνούν τον ρόλο των βακτηρίων, των μικροφυκών και των μικροβιακών κοινοπραξιών στη διάσπαση των αντιβιοτικών και την απομάκρυνσή τους από τα υδάτινα περιβάλλοντα.

Οι μικροβιακές κοινοπραξίες, οι οποίες αποτελούνται από πολλαπλά αλληλεπιδρώντα μικροβιακά είδη, διαδραματίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο στην αποδόμηση τους.

Οι κύριοι μηχανισμοί που εμπλέκονται στην απομάκρυνση αντιβιοτικών περιλαμβάνουν:

- Βιοαποικοδόμηση : Η διάσπαση των αντιβιοτικών μέσω της ενζυματικής δραστηριότητας.
- Βιοσυσσώρευση : Η απορρόφηση, αποθήκευση αντιβιοτικών μέσα σε μικροβιακά κύτταρα.
- Βιοπροσρόφηση : Η παθητική προσκόλληση αντιβιοτικών σε μικροβιακές επιφάνειες.

Μια αποδοτική μέθοδος για την ενίσχυση της μικροβιακής αποικοδόμησης των αντιβιοτικών είναι η προσθήκη επιπλέον θρεπτικών συστατικών ως πηγής άνθρακα, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη ενός συν-μεταβολικού συστήματος. Ο συν-μεταβολισμός είναι μια διαδικασία κατά την οποία οι μικροοργανισμοί μεταβολίζουν ταυτόχρονα βασικά υποστρώματα ανάπτυξης (πρωτογενή μεταβολικά υποστρώματα) και παράλληλα μετασχηματίζουν άλλες, μη απαραίτητες ενώσεις (συν-μεταβολικά υποστρώματα). Σε αυτή τη διαδικασία, το συν-μεταβολισμένο υπόστρωμα δεν αξιοποιείται ως άμεση πηγή ενέργειας ή άνθρακα, αλλά μετατρέπεται μέσω του ενζυμικού συστήματος των μικροοργανισμών. (Zhao et al., 2024)

Τα αντιβιοτικά ταξινομούνται σε 11 κατηγορίες με βάση τη χημική τους δομή, συμπεριλαμβανομένων των αμινογλυκοσιδών, των β-λακταμών, των γλυκοπεπτιδίων, των μακρολιδίων, των οξαζολιδινόνων, των πολυμυξινών, των κινολονών, των στρεπτογραμμινών, των σουλφοναμιδών και των τετρακυκλινών. Μεταξύ αυτών, οι τετρακυκλίνες, οι σουλφοναμίδες και οι μακρολίδες χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο στην ανθρώπινη όσο και στην κτηνιατρική ιατρική. Αυτά τα αντιβιοτικά διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προστασία της υγείας των ζώων και στη διάγνωση και θεραπεία μολυσματικών ασθενειών στον άνθρωπο. Η πενικιλίνη, ένα β-λακταμικό αντιβιοτικό, είναι το παλαιότερο και πιο γνωστό αντιβιοτικό. Οι σουλφοναμίδες, οι μακρολίδες και οι κινολόνες είναι από τα πιο συχνά ανιχνευόμενα αντιβιοτικά σε λύματα, λυματολάσπη, ιζήματα, εδάφη και τρόφιμα. (Samrot et al., 2023). Αντιβιοτικά που έχουν ανιχνευθεί σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5. Αντιπροσωπευτικά είδη αντιβιοτικών σε λύματα
(Ma et al., 2022)

Αντιβιοτικά	Αντιπροσωπευτικά αντιβιοτικά
Τετρακυκλίνες	Τετρακυκλίνη, Οξυτετρακυκλίνη, Χλωροτετρακυκλίνη,
Μακρολίδια	Ροξιθρομυκίνη, Αζιθρομυκίνη, Κλαριθρομυκίνη,
Σουλφοναμίδια	Σουλφαμεθοξαζόλη, Σουλφαδιαζίνη, Σουλφαϊσοξαζόλη,
Φθοριοκινολόνες	Σιπροφλοξασίνη, Ενροφλοξασίνη, Νορφλοξασίνη,
Χλωραμφενικόλε	Χλωραμφενικόλη, Θειαμφενικόλη, Χλωραμφενικόλη άοσμη
β-λακτάμες	Πενικιλίνη, Κεφαλοσπορίνη,
Πολυπεπίδια	Πολυμυξίνη Β, Πολυμυξίνη Ε,
Αμινογλυκοσίδες	Γενταμικίνη, Στρεπτομυκίνη,
Άλλα	Φωσφομυκίνη, Γκριζεοφουλβίνη

10.1. Βιοπροσρόφηση

Η βιοπροσρόφηση συμβαίνει όταν ουσίες προσκολλώνται στην επιφάνεια ενός οργανισμού μέσω ομοιοπολικών, ηλεκτροστατικών ή διαμοριακών αλληλεπιδράσεων, όπως οι δυνάμεις van der Waals. Περιλαμβάνει διάφορους μηχανισμούς, συμπεριλαμβανομένου του δεσμού υδρογόνου, της υδρόφοβης κατανομής, της ανταλλαγής κατιόντων, των ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων, της επιφανειακής συμπλοκοποίησης (Complexation) και των αλληλεπιδράσεων δότη-δέκτη ηλεκτρονίων. Οι εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS) διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο σε αυτή τη διαδικασία λόγω της αφθονίας των λειτουργικών ομάδων τους. Οι πρωταρχικοί μηχανισμοί βιοπροσρόφησης περιλαμβάνουν απορρόφηση, προσρόφηση, ανταλλαγή ιόντων, επιφανειακή συμπλοκοποίηση και καθίζηση. Κατά τη διάρκεια της απομάκρυνσης των αντιβιοτικών, οι μικροοργανισμοί παράγουν εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες, οι οποίες είναι απαραίτητες για την προσρόφηση αντιβιοτικών, οι οποίες μπορεί να περιέχουν πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες, ένζυμα, λιπίδια και άλλες υποκατάστατες ουσίες, με έως και 90% οργανικό υλικό. Οι εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες δρουν ως δεξαμενές όπου τα αντιβιοτικά μπορούν να ενσωματωθούν και να συσσωρευτούν, επιτρέποντας στους μικροοργανισμούς να έχουν πρόσβαση σε υλικά ανάπτυξης πιο αποτελεσματικά και συμβάλλει σε δομικούς και λειτουργικούς ρόλους, ενισχύοντας την ικανότητα προσρόφησης κυττάρων, τις επιφανειακές ιδιότητες, την κατακράτηση ενζύμων, τη σταθερότητα μεταφοράς μάζας, τη δομική ακεραιότητα και τις διαδικασίες πέψης. Μια μεγαλύτερη σχετική επιφάνεια ενισχύει την ικανότητα προσρόφησης των μικροοργανισμών.

Οι EPS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριους τύπους: εξωτερικό διαλυτό EPS και εσωτερικά δεσμευμένο EPS. Αποτελούνται από πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες (ένζυμα), νουκλεϊνικά οξέα, λιπίδια και χουμικές ουσίες. Οι πολυσακχαρίτες και τα λιπίδια στο EPS υπάρχουν σε διαφορετικές αλληλουχίες και περιέχουν ποικίλες λειτουργικές ομάδες - όπως μεθυλο, αμινο και φωσφορικό - οι οποίες παρέχουν θέσεις σύνδεσης, ενισχύουν την ικανότητα προσρόφησης, διατηρούν ένζυμα και συμβάλλουν στις πεπτικές λειτουργίες. Επιπλέον, τα ενεργά ένζυμα εντός του EPS επιτρέπουν στους μικροοργανισμούς να αποικοδομούν, να μετασχηματίζουν και να συνθέτουν ταυτόχρονα ουσίες κατά τη διάρκεια της προσρόφησης. Έρευνες δείχνουν ότι το pH παίζει κρίσιμο ρόλο στη βιοαπορρόφηση, γιατί η ηλεκτροστατική έλξη έχει πιο σημαντικό αντίκτυπο από τις υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις. Επιπλέον, η βιορόφηση επηρεάζεται από παράγοντες όπως το φορτίο, η διαλυτότητα, η υδροφοβία και η χημική δομή των αντιβιοτικών. (Lv et al., 2022; Zhao K et al., 2022; Eheneden et al., 2022)

10.2. Βιοσυσσώρευση

Η βιοσυσσώρευση είναι η διαδικασία με την οποία οι οργανισμοί προσροφούν και συσσωρεύουν αντιβιοτικά από το περιβάλλον τους μέσα στα κύτταρά τους. Ωστόσο, η βιοπροσρόφηση δεν προηγείται απαραίτητα της βιοσυσσώρευσης, καθώς ορισμένα προσροφημένα αντιβιοτικά μπορεί να μην εισέλθουν στα κύτταρα για συσσώρευση. Η βιοσυσσώρευση περιλαμβάνει τον μικροβιακό μεταβολισμό των αντιβιοτικών, ενσωματώνοντας αντιοξειδωτική δράση εντός των κυττάρων επηρεαζόμενη ταυτόχρονα από διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες και δομές, όπως τη σχετική διαλυτότητα, σταθερές ρυθμού διαλυμένης απορρόφησης, αποτελεσματικότητα αφομοίωσης ουσιών και ρυθμό εκροής. Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας είναι η διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης, η οποία ρυθμίζει τη διέλευση αντιβιοτικών στο κυτταρόπλασμα των κυττάρων. Για παράδειγμα, η διαπερατότητα των κυτταρικών μεμβρανών επηρεάζει την παθητική διάχυση των αντιβιοτικών. Επιπλέον, ορισμένα αντιβιοτικά μπορούν να αυξήσουν τη διαπερατότητα των κυτταρικών μεμβρανών.

Η πρόσληψη ή ανταλλαγή βιομορίων και ιόντων απαιτεί πρωτεΐνες σχηματισμού πόρων (πορίνες) στην εξωτερική μεμβράνη των βακτηριακών κυττάρων, ενώ άλλοι μηχανισμοί μεταφοράς βασίζονται στη λιπιδική μεμβράνη διπλής στιβάδας. Η συσσώρευση αντιβιοτικών μέσα στα κύτταρα μπορεί να προκαλέσει υπερβολική

παραγωγή αντιδραστικών ειδών οξυγόνου (ROS), τα οποία συνήθως υποστηρίζουν τον κυτταρικό μεταβολισμό. Ωστόσο, υπό αντιβιοτικό στρες, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δυσμενείς επιπτώσεις όπως βλάβη της κυτταρικής μεμβράνης, βλάβη του DNA, μετουσίωση πρωτεϊνών και μειωμένη μικροβιακή αναπαραγωγή. Οι μικροοργανισμοί μεταβολίζουν ενδοκυτταρικά συσσωρευμένα αντιβιοτικά, καθιστώντας τη βιοσυσσώρευση προπαρασκευαστικό βήμα για επακόλουθη βιοαποικοδόμηση. (Zhao K et al., 2022; Eheneden et al., 2022)

Επιπρόσθετα, ταυτόχρονα με τις διεργασίες βιοπροσρόφησης και βιοσυσσώρευσης, οι μικροοργανισμοί εκκρίνουν εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS) στο υπόστρωμα τεχνητών υγροτόπων. Οι EPS περιλαμβάνουν απαραίτητα εξωκυτταρικά ένζυμα που παίζουν βασικό ρόλο στη βιοαποικοδόμηση των αντιβιοτικών. Εκτός από τα ένζυμα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω το EPS αποτελείται από πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες, νουκλεϊνικά οξέα, λιπίδια και χουμικές ουσίες. Αυτά τα συστατικά διαθέτουν διάφορες λειτουργικές ομάδες, όπως καρβοξύλιο, αμίνη και υδροξύλιο, μαζί με υδρόφοβες περιοχές, οι οποίες παρέχουν πολλαπλές θέσεις σύνδεσης για προσρόφηση αντιβιοτικών. Αυτό ενισχύει την ικανότητα προσρόφησης των υποστρωμάτων ΤΥ, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης αντιβιοτικών. (Yang M. et al., 2024; Lv et al., 2022)

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι δεν υφίστανται όλα τα βιοσυσσωρευμένα αντιβιοτικά βιοαποικοδομήσεις. Ορισμένα αντιβιοτικά μπορούν να παραμείνουν εντός του κυτταροπλάσματος των βακτηρίων και μπορεί να μεταφερθούν μέσω της υδρόβιας τροφικής αλυσίδας σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα. Η αποτελεσματική απομάκρυνση των αντιβιοτικών απαιτεί συνήθως μικροβιακή βιοδιάσπαση, η οποία διευκολύνει την περαιτέρω μετατροπή σε ενδιάμεσα προϊόντα και, τελικά, την πλήρη ανοργανοποίηση.

10.3.Βιοαποικοδόμηση

Η βιοαποικοδόμηση από μικροοργανισμούς είναι ο πρωταρχικός μηχανισμός απομάκρυνσης αντιβιοτικών σε τεχνητούς υγρότοπους, όπου πολύπλοκες ενώσεις διασπώνται σε απλούστερα μόρια μέσω μεταβολικής αποδόμησης. Τα αντιβιοτικά στα ΤΥ μπορούν να υποστούν αποικοδόμηση μέσω του μεταβολισμού, όπου χρησιμεύουν ως πηγή άνθρακα ή δότης/δέκτης ηλεκτρονίων, προκαλώντας έκφραση ενζύμων ή μέσω συν-μεταβολισμού (co – metabolism), όπου αποικοδομούνται από ένζυμα που καταλύουν σε άλλα υποστρώματα. Τα ένζυμα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην

κατάλυση της βιοαποικοδόμησης των αντιβιοτικών, συμπεριλαμβανομένου του κυτοχρώματος P450 (CYP), της υπεροξειδάσης (POD) και των υδρολασών σερίνης. Αυτά τα ένζυμα διευκολύνουν την υδροξυλίωση της σουλφαμεθοξαζόλης (SMX) και τη διάσπαση των χημικών δεσμών, επιτρέποντας την απομάκρυνση των αντιβιοτικών από την υδατική φάση μέσω μικροβιακού συν-μεταβολισμού .

Έρευνες δείχνουν ότι η μικροβιακή βιοαποικοδόμηση των αντιβιοτικών συμβαίνει σε τρία στάδια, καθένα από τα οποία ορίζεται από συγκεκριμένες ενζυματικές λειτουργίες:

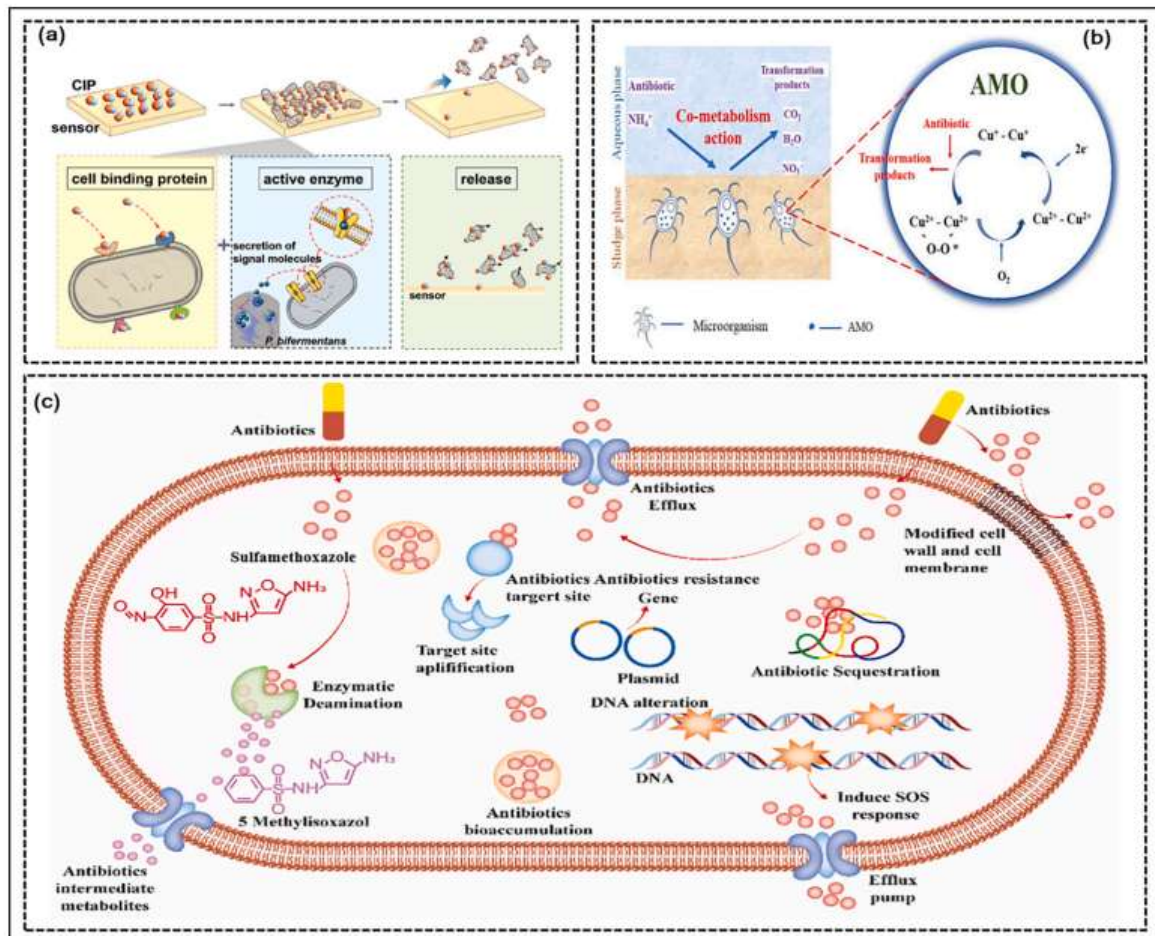
- Η φάση I περιλαμβάνει ένζυμα CYP, τα οποία συνδέονται στενά με τα αντιβιοτικά και διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην αποτοξίνωση των περιβαλλοντικών αντιβιοτικών ρύπων. Αυτά τα ένζυμα ενισχύουν την υδροφιλία, διευκολύνοντας διάφορες ενζυματικές αντιδράσεις όπως υδρογόνωση, καρβοξυλίωση, αποκαρβοξυλίωση, υδροξυλίωση, μεθυλίωση, απομεθυλίωση και διάσπαση πλευρικού δεσμού. Αυτές οι αντιδράσεις συχνά περιλαμβάνουν σχηματισμό δεσμού υδρογόνου.

- Η φάση II αποτελείται από την καταλυτική αποτοξίνωση εξωγενών ουσιών από την τρανσφεράση γλουταθειόνης-S (GST) και την οικογένεια ενζύμων της .

- Η φάση III περιλαμβάνει τη μετατροπή των αντιβιοτικών σε απλούστερες, πιο αποικοδομήσιμες μορφές μέσω της δράσης ενζύμων όπως η καταλάση, οι τρανσφεράσες, οι υδρολάσες και οι καρβοξυλάσες.

Μετά από αυτά τα τρία στάδια, οι μεταβολίτες των βιοαποικοδομημένων αντιβιοτικών απελευθερώνονται πίσω στο περιβάλλον ως ενδιάμεσα προϊόντα

Η βιοδιάσπαση των αντιβιοτικών μπορεί να συμβεί είτε ενδοκυτταρικά είτε εξωκυτταρικά. Η ενδοκυτταρική αποδόμηση εξαρτάται από την πρόσληψη αντιβιοτικών από μικροβιακά κύτταρα, η οποία μπορεί να περιοριστεί για ιονισμένα αντιβιοτικά ή για άτομα με υψηλό μοριακό βάρος. Αντίθετα, η εξωκυτταρική αποικοδόμηση περιλαμβάνει την έκκριση ενζύμων που διασπούν τα αντιβιοτικά έξω από το κύτταρο. Επίσης ο μεταβολισμός ενεργοποιείται γενικά μόνο σε υψηλές συγκεντρώσεις αντιβιοτικών, καθώς οι χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να μην επαρκούν για να προκαλέσουν ενζυμική δραστηριότητα. Ωστόσο, η ακριβής συγκέντρωση που απαιτείται για την έναρξη του μικροβιακού μεταβολισμού στα TY χρειάζεται περεταίρω έρευνα.(He et al., 2021; Lv et al.,2022; Zhao K et al., 2022)



Εικόνα 18. Μηχανισμός δράσης του βακτηριακού μεταβολισμού των αντιβιοτικών.
(α) Ο βακτηριακός μηχανισμός προσρόφησης της σιπροφλοξασίνης (β) Μετασχηματισμός αντιβιοτικών με μεσολάβηση AMO (γ) Φυσιολογική αντίδραση των βακτηρίων σε αντιβιοτικά.
(Zhao K et al., 2022)

Τα κυρίαρχα βακτήρια από μελέτες που εντοπίζονται σε τεχνητούς υγρότοπους που επεξεργάζονται λύματα (κτηνοτροφικά, νοσοκομειακά) επιβαρυνμένα με αντιβιοτικά είναι φύλα Proteobacteria (38-48%), Firmicutes (20-27%), τα Bacteroidetes (12-15%) και τα Actinobacteria (4-9%) τα οποία ήταν κυρίαρχα. Τα σουλφοναμίδια (SAs) όπως η σουλφαμεθοξαζόλη (SMX) και η σουλφαδιαζίνη (SDZ) είναι κοινά αντιβιοτικά που βρίσκονται συχνά στα λύματα λόγω της ευρείας χρήσης τους στη κτηνοτροφία και την υγειονομική περίθαλψη. Αυτά τα αντιβιοτικά αναστέλλουν τους βακτηριακούς πληθυσμούς και επηρεάζουν τους κύκλους θείου και αζώτου. Η μικροβιακή αποδόμηση παίζει κύριο ρόλο στην απομάκρυνση των SA στους τεχνητούς υγρότοπους, με αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες να συμβάλλουν στη διαδικασία. Τα

κύρια φύλα που εμπλέκονται στην αποδόμηση των σουλφοναμιδίων είναι τα *Proteobacteria*, *Actinobacteria* και τα *Firmicutes*.

Τα βασικά μικροβιακά γένη που εμπλέκονται περιλαμβάνουν τα παρακάτω : Ο *Bacillus* σε αερόβιες συνθήκες μπορεί να αποικοδομήσει το SMX σε αμμώνιο (NH_4^+) και νιτρικό άλας (NO_3^-) και το *Geobacter* (αερόβιες συνθήκες) υποβαθμίζει το SDZ, ενώ το *Microbacterium* υπό αερόβιες συνθήκες χρησιμοποιεί το SMX ως μοναδική πηγή άνθρακα, με τον μηχανισμό αποικοδόμησής του να περιλαμβάνει αντιδράσεις υδροξυλίωσης. Σε αναερόβιες συνθήκες επιταχύνεται απομάκρυνση των SA από τα *Bradyrhizobium*, *Geothrix*, *Terrimonas*. Τα βακτήρια γένους *Pseudomonas*, μπορεί να μεταβολίσουν τη γλυκόζη και να μειώσουν το SMX μέσω του συν-μεταβολισμού της οργανικής ύλης και του SMX, όπως και το *Desulfovibrio* διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον μετασχηματισμό του SMX.

Επίσης συχνά εντοπισμένα αντιβιοτικά σε ΤΥ είναι: Φθοριοκινολόνες (FQ) όπως σιπροφλοξασίνη (CIP), οφλοξασίνη (OFL), και enrofloxacin (ENR)(κτηνιατρικό) αλλά και κεφαλοσπορίνες (CP) όπως κεφτιοφούρη (CEF).

Το βακτήριο *Labrys portucalensis* F11 υποβαθμίζει διάφορα αντιβιοτικά που ανήκουν στα FQ όπως και το *Arthrobacter* μπορεί να αποικοδομήσει τα FQs χρησιμοποιώντας τα ως πηγή άνθρακα και ενέργειας. Τα αντιβιοτικά τύπου ENR και το CEF αποικοδομούνται από το βακτήριο *Dysgonomonas*. (J Wang et al., 2022; Lv et al., 2022; Shan et al., 2020)

10.4. Παράγοντες που επηρεάζουν την βιοαποικοδόμηση των αντιβιοτικών

Συγκέντρωση αντιβιοτικών

Η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης των αντιβιοτικών σε τεχνητούς υγρότοπους μειώνεται καθώς αυξάνεται η εισρέουσα συγκέντρωση αντιβιοτικών πάνω από ένα βαθμό, πιθανώς λόγω της αυξημένης τοξικότητας που αναστέλλει τον μικροβιακό μεταβολισμό. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι χαμηλές συγκεντρώσεις δεν επαρκούν για να ενεργοποιηθεί η ενζυμική δραστηριότητα.

HRT - HLR

Ο μακρύτερος υδραυλικός χρόνος κατακράτησης (HRT) και ο χαμηλότερος υδραυλικός ρυθμός φόρτωσης (HLR) βελτιώνει την απομάκρυνση των αντιβιοτικών αυξάνοντας το χρόνο επαφής με φυτά, υποστρώματα και μικροοργανισμούς, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να επιβραδύνει την βιοαποικοδόμηση και να αυξήσει το κόστος.

Ένα υψηλό HLR μπορεί να ενισχύσει την ανάπτυξη μικροβίων και φυτών λόγω της καλύτερης παροχής θρεπτικών ουσιών, αλλά μπορεί επίσης να μειώσει το πορώδες του υποστρώματος .

Αερισμός

Ο περιορισμός του οξυγόνου είναι ένας βασικός παράγοντας που περιορίζει την βιοαποικοδόμηση. Ο τεχνητός αερισμός έχει αποδειχθεί αποτελεσματική λύση για την αύξηση των επιπέδων οξυγόνου, ιδιαίτερα σε οριζόντια υποεπιφανειακή ροή (HSSF) ΤΥ όπου και επεκτείνει τις αερόβιες ζώνες και προάγει την αερόβια βιοαποικοδόμηση των αντιβιοτικών. Ο υπερβολικός αερισμός, ωστόσο, μπορεί να έχει διασπαστική επίδραση στο βιοφίλμ, να μειώσει τη μικροβιακή βιομάζα και να μεταβάλει τη δομή της βιολογικής κοινότητας, επηρεάζοντας αρνητικά τη βιοαποικοδόμηση των αντιβιοτικών. Ωστόσο, κάποια αντιβιοτικά όπως η οφλοξασίνη που έδειξε τη μεγαλύτερη απομάκρυνση (99,5%), βιοαποικοδομούνται σε αναερόβιες συνθήκες.

Θερμοκρασία

Η λειτουργία των τεχνητών υγρότοπων είναι συνήθως εντός ενός εύρους θερμοκρασιών από 4 έως 30 ° C. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες επιταχύνουν τον βιολογικό μεταβολισμό, προωθώντας την αποικοδόμηση των αντιβιοτικών. Ενισχύουν επίσης τη θερμική κίνηση των αντιβιοτικών μορίων, αυξάνοντας τη διαθεσιμότητά τους για βιοπροσρόφηση και βιοσυσσωρευση. Επιπλέον, η θερμοκρασία επηρεάζει τη δομή και τη λειτουργία των μικροβιακών κοινοτήτων, επηρεάζοντας τις διαδικασίες αποδόμησης των αντιβιοτικών. Έχει αναφερθεί ότι η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης 54 αντιβιοτικών αυξήθηκε κατά περισσότερο από 20% όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε κατά περίπου 20 ° C (από 5 σε 25 ° C) στα ΤΥ. Ωστόσο, δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά όλα τα αντιβιοτικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην αδρανοποίηση των ενζύμων που εμπλέκονται στην αποικοδόμηση των αντιβιοτικών σε υψηλότερες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα μειωμένη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού που οι θερμοκρασίες φθάνουν 40°C. Επίσης και το κρύο επηρεάζει αρνητικά την μικροβιακή δραστηριότητα.

pH

Μελέτες έχουν συνοψίσει τις τιμές pH στους τεχνητούς υγρότοπους να είναι κυρίως στην περιοχή 7 έως 8. Εντός αυτού του εύρους, παρατηρήθηκε αρνητική συσχέτιση μεταξύ της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης αντιβιοτικών και του pH και δρα αρνητικά στη μεταβολική δραστηριότητα των αναερόβιων μικροοργανισμών στα ΤΥ,

επηρεάζοντας ενδεχομένως την αναερόβια αποικοδόμηση των αντιβιοτικών. Επιπλέον, ακραίες συνθήκες pH, όπως αυτές που βρίσκονται στην αποστράγγιση ορυχείων, στις περιοχές αλατούχου διαλύματος και στα βιομηχανικά λύματα, μπορεί να επηρεάσουν τις βακτηριακές κοινότητες και τη συνολική διαδικασία καθαρισμού των λυμάτων στα ΤΥ. (M Yang et al., 2024)

10.5. Ανθεκτικά Βακτήρια- Γονίδια ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά

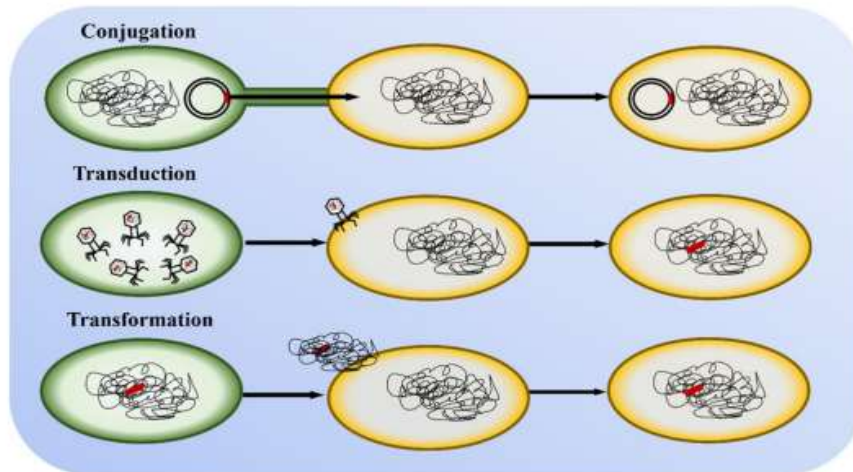
Η ευρεία παρουσία αντιβιοτικών στο περιβάλλον έχει συνδεθεί με τον πολλαπλασιασμό των ανθεκτικών στα αντιβιοτικά βακτηρίων (ARB) και των γονιδίων αντοχής στα αντιβιοτικά (ARG), τα οποία συμβάλλουν στο αυξανόμενο ζήτημα της μικροβιακής αντοχής (AR). Τα ARB και τα ARG έχουν αναδειχθεί ως μολυσματικοί παράγοντες ανησυχίας και ανιχνεύονται συχνά σε διάφορα υδάτινα σώματα, αλλά και στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων.

Επί του παρόντος, η μικροβιακή αντοχή αναγνωρίζεται ως μία από τις πιο κρίσιμες προκλήσεις δημόσιας υγείας αυτού του αιώνα. Ενώ η μικροβιακή αντοχή μπορεί να αναπτυχθεί μέσω αυθόρμητων μεταλλάξεων και να περάσει μέσω κάθετης μεταφοράς γονιδίων (VGT), ο κυρίαρχος μηχανισμός για την εξάπλωση της αντίστασης είναι η οριζόντια μεταφορά γονιδίων (HGT) η οποία γίνεται μέσω διαφόρων μηχανισμών, συμπεριλαμβανομένων:

Μέσω βακτηριακής σύζευξης μέσω κινητών γενετικών στοιχείων (MGEs) όπως πλασμίδια, ιντεργκόνια (integrons) και τρανσποζόνια (transposon)

Μεταγωγή μέσω βακτηριοφάγων

Μετασχηματισμού, όπου τα βακτήρια αποκτούν άμεσα ελεύθερο DNA από το περιβάλλον.



Εικόνα 19. Οι κύριοι μηχανισμοί οριζόντιας μεταφοράς γονιδίων στα βακτήρια
(Wang J. & Chen, X., 2020)

Αυτές οι διαδικασίες, επιτρέπουν στα βακτήρια να αποκτήσουν πολλαπλά χαρακτηριστικά αντοχής, διευκολύνοντας την εμφάνιση πολυανθεκτικών παθογόνων, τα οποία αποτελούν σημαντικές απειλές για τη δημόσια υγεία και την οικολογική βιωσιμότητα. (Wang J. & Chen, X., 2020)

Οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στον μετριασμό της εξάπλωσης των ARB και των ARG αλλά δεν τα εξαλείφουν εντελώς, οδηγώντας σε πιθανούς κινδύνους για τα κατάντη περιβάλλοντα). Επιπλέον, οι μονάδες βιολογικής επεξεργασίας στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων παρέχουν ένα ιδανικό περιβάλλον για τον πολλαπλασιασμό του ARB και του HGT λόγω της υψηλής πυκνότητας βιομάζας, άφθονων θρεπτικών συστατικών και των επιλεκτικών εφαρμογών για απομάκρυνση ρύπων όπως αντιβιοτικά, βαρέα μέταλλα κ.α.

Η ανεπαρκής απομάκρυνση των ARB και ARG από τις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων οδηγεί στη συσσώρευσή τους στα υδάτινα συστήματα υποδοχής, προκαλώντας κινδύνους για την επαναχρησιμοποίηση και την άρδευση των υδάτων. Επιπλέον, η ιλύς από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, η οποία συχνά περιέχει ARG και ARB, μπορεί να επανεισαγάγει αυτούς τους ρύπους σε γεωργικές εκτάσεις όταν χρησιμοποιούνται ως λιπάσματα. Αυτό ενισχύει την επείγουσα ανάγκη για αποτελεσματικές τεχνολογίες θεραπείας για την πρόληψη της περιβαλλοντικής απελευθέρωσης αντιβιοτικών, ARB και ARG. (Wang J. & Chen, X., 2020)

Προηγούμενες μελέτες έχουν εντοπίσει διάφορα γονίδια αντοχής στα αντιβιοτικά (ARGs), όπως tet(G), tet(W), tet(X), sul(1) intI(1), sul1, dfrA1, aphA, tetX, ermC,

tetO, τόσο στην εισροή, όσο και στην εκροή των λυμάτων στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Τα ανθεκτικά στα αντιβιοτικά βακτήρια (ARB), όπως το *E. coli* και οι εντερόκοκκοι (ανθεκτικά στην τετρακυκλίνη, στην ερυθρομυκίνη, στα σουλφοναμίδια και στην σουλφαμεθοξαζόλη), αλλά και *Salmonella* και *Shigella spp.*, (ανθεκτικό στην αμπικιλίνη, ερυθρομυκίνη, χλωραμφενικόλη) υπάρχουν τόσο στα ακατέργαστα λύματα όσο και στα επεξεργασμένα λύματα από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. (Hazra et al., 2022; Chen et al., 2023; Jianlong Wang et al., 2020)

Οι τεχνητοί υγρότοποι, έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικοί στη μείωση των ρύπων, ιδιαίτερα των ανθεκτικών στα αντιβιοτικά βακτηρίων. Ο μηχανισμός απομάκρυνσης είναι και σε αυτή την περίπτωση ένας συνδυασμός συνεργασίας υποστρώματος φυτών και μικροοργανισμών. Μελέτες έδειξαν 97-99% απομάκρυνση των *E. coli* και κολοβακτηριδίων.

Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τη μείωση των ανθεκτικών στα αντιβιοτικά βακτηρίων (ARB) στα λύματα, συμπεριλαμβανομένης της πηγής και των φυσιοχημικών ιδιοτήτων της εισροής, της σύνθεσης της μικροβιακής κοινότητας και των περιβαλλοντικών συνθηκών όπως η θερμοκρασία του νερού, η θολότητα, οι πηγές ρύπανσης και τα ποσοστά καθίζησης. Για παράδειγμα έρευνα έχει δείξει ότι οι υγρότοποι επιφανειακής ροής TY επιτυγχάνουν υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης ARB σε σύγκριση με την υποεπιφανειακή ροή ή τα ελεύθερα επιφανειακά TY, υποδεικνύοντας ότι τα υβριδικά TY επηρεάζονται λιγότερο από τη θερμοκρασία.

Για να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα πρότυπα απόρριψης, είναι συχνά απαραίτητες πρόσθετες μέθοδοι απολύμανσης, όπως η χλωρίωση ή η επεξεργασία με υπεριώδη ακτινοβολία, καθώς απαιτούν χαμηλότερες δόσεις και χρόνους επαφής μετά την επεξεργασία με TY. Τα TY, όταν συνδυάζονται με συμβατικές τεχνολογίες επεξεργασίας λυμάτων, προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη μείωση του ARB, ιδιαίτερα σε χώρες μεσαίου και χαμηλού εισοδήματος. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών μικροβιακής αντοχής στα υποστρώματα TY, καθώς αυτές οι αλληλεπιδράσεις διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην απομάκρυνση του ARB. (Hazra et al., 2022)

Οι μικροοργανισμοί παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απομάκρυνση των γονιδίων αντοχής στα αντιβιοτικά σε τεχνητούς υγρότοπους. Η προσρόφηση και η βιοαποικοδόμηση του υποστρώματος είναι βασικοί μηχανισμοί για την απομάκρυνση ARG στους τεχνητούς υγρότοπους δηλαδή η βακτηριακή διήθηση ενισχύει την απομάκρυνση των ARG στα TY. Η ασθενής προσρόφηση υποστρώματος έχει

συσχετίζεται με χαμηλή απομάκρυνση γονιδίων αντοχής σε μακρολίδια σε ΤΥ. Επειδή τα βακτήρια, ειδικά οι εντερικοί μικροοργανισμοί, φιλτράρονται αποτελεσματικά από τα υποστρώματα και τα ARGs μεταφέρονται συχνά από αυτούς, η υψηλή διηθητική ικανότητα συμβάλλει στην αποτελεσματική απομάκρυνσή τους. Επιπλέον, τα ARG που συνδέονται με τα φύλα *Tenericutes*, *Cyanobacteria* και *Acidobacteria* εμφανίζουν μεγαλύτερη πιθανότητα εξάλειψης. Γενικότερα η αφαίρεση των βακτηρίων σχετίζεται άμεσα με τη μείωση των ARGs. (Eheneden et al., 2023)

Επιπλέον, ο αερισμός μειώνει σημαντικά την αφθονία αρκετών ARGs (*intl1*, *sul1*, *sul2*, *aac6*, *dfrA* και *qnrA*), με αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης που κυμαίνεται από 55,1% έως 97,4%. Αυτή η μείωση συσχετίζεται με την αύξηση των αυτοτροφικών οξειδωτικών βακτηρίων αμμωνίας, τα οποία σπάνια φέρουν ARGs, αλλά και η αντιληπτή μείωσή τους προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό άλλων βακτηριακών ειδών. Επιπλέον, ο συνμεταβολισμός μπορεί να διαδραματίσει ρόλο στην απομάκρυνση του ARG, καθώς η εξάλειψη του $\text{NH}_3\text{-N}$ και της οργανικής ύλης μειώνει τα επίπεδα ARG στα λύματα ΤΥ. Η απομάκρυνση των ARGs από τους ΤΥs επηρεάζεται επίσης από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Για παράδειγμα η ηλιακή ακτινοβολία και οι υψηλές θερμοκρασίες συμβάλλουν στην αποικοδόμηση των ARGs. Ωστόσο, η παρουσία αντιβιοτικών, βαρέων μετάλλων και στοιχείων γενετικής μεταφοράς μπορεί να προωθήσει την επιμονή και τον πολλαπλασιασμό των ARGs στους ΤΥ.

Συμπερασματικά, αν και οι τεχνητοί υγρότοποι έχουν σημαντική ικανότητα απομάκρυνσης των ARGs, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους και την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών στρατηγικών απομάκρυνσης. Η κατανόηση των περιβαλλοντικών παραγόντων και των βακτηριακών αλληλεπιδράσεων είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της αποδοτικότητας αυτών των συστημάτων και τον περιορισμό της εξάπλωσης των ARGs στο περιβάλλον. (Ma et al., 2022; Eheneden et al., 2023; Hazra et al., 2022)

10. Μικροβιακή Αποικοδόμηση Οργανικής Ύλης & Μεθανογένεση

Στους τεχνητούς υγρότοπους, η απομάκρυνση της οργανικής ύλης πραγματοποιείται τόσο μέσω φυσικών διεργασιών, όπως η διήθηση και η καθίζηση σωματιδίων, όσο και μέσω μικροβιολογικής αποδόμησης, η οποία αποσυνθέτει την οργανική ύλη υπό αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες.

Η αερόβια αποικοδόμηση διευκολύνεται κυρίως από ετερότροφους μικροοργανισμούς που μεταβολίζουν οργανικές ενώσεις για ενέργεια, μειώνοντας σημαντικά τις βιολογικές απαιτήσεις οξυγόνου, διαδικασία η οποία είναι εξαιρετικά αποτελεσματική, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της βιολογικής ζήτησης οξυγόνου (BOD) κατά την επεξεργασία λυμάτων. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα διαλυμένης οργανικής ύλης και οξυγόνου, απαιτώντας συνεχή αερισμό. Εν τω μεταξύ, τα αυτοτροφικά βακτήρια αποικοδομούν οργανικές ενώσεις που περιέχουν άζωτο χρησιμοποιώντας οξυγόνο ως τελικό δέκτη ηλεκτρονίων, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Τα κοινά βακτηριακά είδη που εμπλέκονται στην αερόβια αποδόμηση εντός των ΤΥ περιλαμβάνουν *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Aeromonas* και *Acinetobacter*.

Η αναερόβια αποδόμηση της οργανικής ύλης στα ΤΥ πραγματοποιείται κυρίως από ετερότροφα βακτήρια. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει μηχανισμούς όπως η μείωση του θειικού άλατος, η απονιτροποίηση και η μεθανογένεση, οι οποίοι επιτρέπουν τη διάσπαση της οργανικής ύλης σε περιβάλλοντα που στερούνται οξυγόνου. Υπό συνθήκες χαμηλού οξυγόνου, τα νιτρικά άλατα (NO_3^-) είναι ο πρώτος δέκτης ηλεκτρονίων που μειώνεται. (Mellado & Vera, 2020)

Η αναερόβια αποικοδόμηση ακολουθεί μια σταδιακή διαδικασία που περιλαμβάνει υδρόλυση, οξεογένεση, ακετογένεση και μεθανογένεση

Υδρόλυση: Τα μόρια υψηλού μοριακού βάρους διασπώνται σε μονομερή όπως αμινοξέα, γλυκόζη ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) και λιπαρά οξέα.

Οξυγένεση: Τα οξεογόνα βακτήρια μετατρέπουν τα μονομερή σε αλκοόλες, H_2 , αμμωνία, CO_2 και οργανικά οξέα

Ακετογένεση: Τα ακετογόνα βακτήρια μετατρέπουν τα οργανικά οξέα σε υδρογόνο, οξικό οξύ και CO_2 .

Μεθανογένεση: Τα μεθανογόνα βακτήρια χρησιμοποιούν οξικό οξύ για την παραγωγή μεθανίου (CH_4), CO_2 και H_2 ή μειώνουν το CO_2 χρησιμοποιώντας H_2 για την παραγωγή μεθανίου.

Σε τεχνητούς υγροτόπους, τα φύλα *Firmicutes*, *Proteobacteria* και *Actinobacteria* είναι άφθονα και περιλαμβάνουν είδη που εμπλέκονται στην αναερόβια υδρόλυση οργανικής ύλης. Γένη όπως το *Clostridium* και το *Bacteroides* βοηθούν στη διάσπαση σύνθετων οργανικών ενώσεων κατά τα αρχικά στάδια της αποικοδόμησης, όπως και το βακτήριο γένους *Cellulomonas*, τα οποία είναι αερόβια ή προαιρετικά αναερόβια, έχουν εντοπιστεί σε ΤΥ για υδρόλυση κυτταρίνης και λιγνίνης. Η υδρόλυση είναι ένα

κρίσιμο βήμα στη μεθανογόνο διαδικασία και μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η σύνθεση των λυμάτων, το pH και η διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών. Η αργή ή αναποτελεσματική υδρόλυση μπορεί να περιορίσει τη διαθεσιμότητα απλούστερων ενώσεων που απαιτούνται για περαιτέρω αποδόμηση.

Κατά τη διάρκεια της οξεογένεσης, τα βακτήρια από τα γένη *Clostridium*, *Bacillus*, *Enterobacter* και *Acetobacter* διαδραματίζουν βασικό ρόλο

Η ακετογένεση οδηγείται από το *Clostridium* και το *Syntrophobacter* και ορισμένα είδη *Methanosarcina* μπορούν επίσης να εκτελέσουν ακετογένεση υπό συγκεκριμένες συνθήκες

Το τελικό στάδιο της μεθανογένεσης περιλαμβάνει συγκεκριμένες ομάδες μεθανογόνων, μια ποικιλόμορφη ομάδα αρχαίων ικανή να παράγει μεθάνιο (CH_4) υπό αναερόβιες συνθήκες. (Fernández del Castillo et al., 2025)

10.1.Μεθανογένεση

Στην οδό μεθανογένεσης, το τελικό βήμα περιλαμβάνει τη μετατροπή μεθυλικών ενώσεων ή οξικού σε μεθάνιο. Αυτή η διαδικασία διεξάγεται από διαφορετικές ομάδες μεθανογόνων, ανάλογα με το υπόστρωμα που χρησιμοποιείται. Τα υδρογονοτροφικά μεθανογόνα χρησιμοποιούν υδρογόνο (H_2) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) για την παραγωγή μεθανίου. Αυτά συνήθως ταξινομούνται σε γένη όπως *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanothermobacter* και *Methanoculleus*. Τα ακετοκλαστικά μεθανογόνα χρησιμοποιούν οξικό (CH_3COO_2) ως υπόστρωμα για την παραγωγή μεθανίου και ανήκουν σε γένη όπως η *Methanosarcina* και η *Methanosaeta*. Τέλος, τα μεθυλοτροφικά μεθανογόνα χρησιμοποιούν μεθυλιωμένες ενώσεις όπως μεθανόλη (CH_3OH), μεθυλαμίνες (π.χ. μονομεθυλαμίνη, διμεθυλαμίνη) και μεθανοθειόλη (CH_3SH) για την παραγωγή μεθανίου. Αυτά αντιπροσωπεύονται κυρίως από *Methanomethylovorans*. (Mellado & Vera 2020; Garibay et al., 2022; Fernández del Castillo et al., 2025)

Τα μεθανογόνα βρίσκονται συνήθως σε χαμηλότερες ποσότητες σε τεχνητούς υγρότοπους σε σύγκριση με άλλες βακτηριακές ομάδες. Ωστόσο, υπό ορισμένες συνθήκες, τα ΤΥ μπορούν να αναπτύξουν ανεπιθύμητες αναερόβιες συνθήκες, οι οποίες προάγουν την ανάπτυξη μεθανογόνων και την παραγωγή μεθανίου (CH_4). Έχει εξεταστεί η επίδραση της θερμοκρασίας, της αγωγιμότητας και του διαλυμένου οξυγόνου στις εκπομπές μεθανίου και στις δομές της μικροβιακής κοινότητας σε

διάφορους τεχνητούς υγρότοπους χρησιμοποιώντας αλληλούχισή υψηλής απόδοσης μετά την εκχύλιση DNA. (Ke Zhang et al., 2021) Τα ευρήματα αποκαλύπτουν εποχιακές διακυμάνσεις στη ροή μεθανίου, ακολουθώντας τη σειρά καλοκαίρι > άνοιξη > φθινόπωρο > χειμώνα. Η ίδια μελέτη έδειξε ότι ο τύπος του ΤΥ, η θερμοκρασία, η αγωγιμότητα και το διαλυμένο οξυγόνο επηρεάζουν σημαντικά τις εκπομπές μεθανίου. Ωστόσο, η μελέτη περιορίζεται στην ανάλυση κοινοτήτων μεθανογόνου χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα οξειδωτικά βακτήρια μεθανίου.

Δεδομένου ότι τα ΤΥ είναι υπαίθρια συστήματα, το μεθάνιο που παράγεται απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG). Οι υγρότοποι συμβάλλουν περίπου στο 20% των παγκόσμιων εκπομπών μεθανίου, με τους τεχνητούς υγρότοπους να αποτελούν σημαντική πηγή παραγωγής μεθανίου εντός αυτών των οικοσυστημάτων. Οι εκπομπές μεθανίου από μικροοργανισμούς από τα ΤΥ επηρεάζονται από παράγοντες όπως το υλικό του υποστρώματος, το βάθος και η κατεύθυνση ροής του νερού. Θα πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι εκτός των μικροοργανισμών στους τεχνητούς υγροτόπους, συμβάλλουν στην παραγωγή του μεθανίου και τα φυτά. Παρά τα πλεονεκτήματά τους ως συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, ο ρόλος των ΤΥ στις εκπομπές μεθανίου παραμένει μη προσδιορίσιμος. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα για την κατανόηση των πολύπλοκων σχέσεων στα ΤΥ, ιδίως λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητές τους ως καταβόθρες άνθρακα και τις κρίσιμες οικοσυστημικές υπηρεσίες που παρέχουν.

10.2.Οξείδωση του μεθανίου

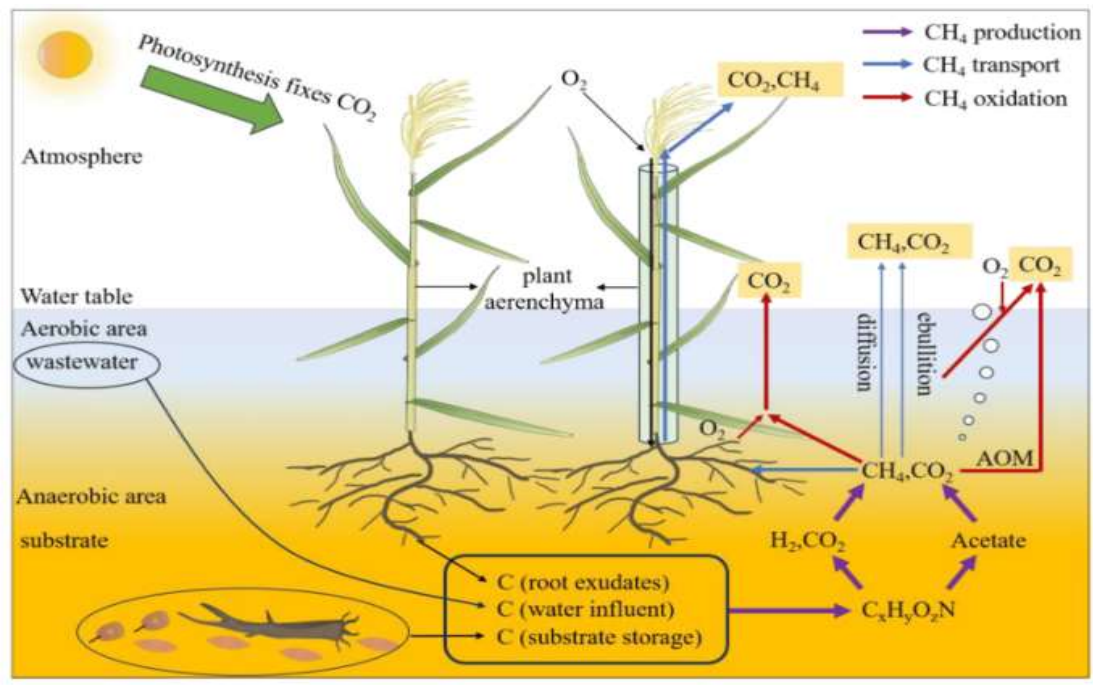
Η οξείδωση του μεθανίου (CH_4) διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον περιορισμό των εκπομπών CH_4 έχοντας ως βάση την μικροβιολογική δραστηριότητα. Ωστόσο, έχει λάβει περιορισμένη προσοχή στα οικοσυστήματα των υγροτόπων. Τα μεθανότροφα *Methanotrophs*, μια ποικιλόμορφη ομάδα αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών, οξειδώνουν το μεθάνιο και διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον έλεγχο των εκπομπών μεθανίου. Σε αντίθεση με τα μεθανογόνα, τα μεθανοτρόφα λειτουργούν τόσο υπό οξικές όσο και υπό ανοξικές συνθήκες. Ενώ η αερόβια οξείδωση μεθανίου εκτιμάται ότι μειώνει τις εκπομπές μεθανίου κατά 40%-70% στους υγρότοπους, η αναερόβια οξείδωση του μεθανίου (AOM) μπορεί να μειώσει κατά 50% της συνολικής παραγωγής μεθανίου. Η μείωση της μεθανοτροφικής δραστηριότητας μπορεί να οδηγήσει σε

αυξημένες εκπομπές μεθανίου, καθώς δεν επηρεάζει άμεσα τη μεθανογενή δραστηριότητα. Η αερόβια οξείδωση μεθανίου εκτελείται κυρίως από *Proteobacteria* (*Gammaproteobacteria* και *Alphaproteobacteria*) και *Verrucomicrobia*, με κυρίαρχα γένη συμπεριλαμβανομένων των *Methylomonas*, *Cenothrix*, *Methylobacter* και *Methylocystis*.

Αντίθετα, η αναερόβια οξείδωση μεθανίου (AOM) πραγματοποιείται τόσο από βακτήρια όσο και από αρχαία, καθιστώντας την μια πιο ποικίλη διαδικασία. Η αναερόβια οξείδωση μεθανίου (AOM) στους ΤΥ περιλαμβάνει ανιχνευμένες ομάδες που χρησιμοποιούν διαφορετικές μεταβολικές οδούς. Μια βασική ομάδα αποτελείται από αναερόβια βακτήρια που αναφέρονται ως εξαρτώμενα από νιτρώδη αναερόβια οξείδωση μεθανίου (d-namo). Αξιοσημείωτα μέλη περιλαμβάνουν τους *Candidatus Methyloirabilis oxyfera* και *Candidatus Methyloirabilis sinica* (φύλο NC10), τα οποία ευδοκούν σε περιβάλλοντα πλούσια σε μεθάνιο. Για παράδειγμα το *Methyloirabilis oxyfera* παρουσιάζει μεταβολική ευελιξία εκτελώντας τόσο απονιτροποίηση όσο και αερόβια οξείδωση μεθανίου. Αυτή η συζευγμένη διαδικασία, που ονομάζεται απονιτροποιητική αναερόβια οξείδωση μεθανίου (DAMO), συνδέει την οξείδωση μεθανίου με τον κύκλο αζώτου. Η δεύτερη ομάδα μικροοργανισμών οξειδωτικών μεθανίου αποτελείται από εκείνους που οξειδώνουν το μεθάνιο μέσω της αναγωγής των νιτρικών σε νιτρώδη, με τα νιτρικά άλατα *Candidatus Methanoperedens* να αποτελούν βασικό μέλος. Η κατανόηση της συνεργασίας και του ανταγωνισμού μεταξύ των διαφόρων μικροοργανισμών που εμπλέκονται στην οξείδωση του μεθανίου είναι ζωτικής σημασίας, αν και η διαφοροποίηση των θέσεων δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητή. Μια άλλη ομάδα οξειδωτικών μικροοργανισμών μεθανίου χρησιμοποιεί θειικό άλας ή μέταλλα (π.χ. Fe (III), Mn (IV)) για την εκτέλεση αναερόβιας οξείδωσης μεθανίου, συμβάλλοντας στη διατήρηση του κύκλου θείου. Τα αρχαία εμπλέκονται επίσης σε αυτούς τους μηχανισμούς. Επιπλέον, το αρσενικό οξύ (AsO_4^{3-}) μπορεί να χρησιμεύσει ως δέκτης ηλεκτρονίων, το οποίο μειώνεται σε αρσενικό. Τόσο τα αρχαία όσο και τα βακτήρια μπορούν να χρησιμοποιήσουν αρσενικό για αναερόβια οξείδωση μεθανίου. Για παράδειγμα, τα αρχαία ANME-1 και ANME-2 μπορούν να αντιστρέψουν τη μεθανογένεση κατά την οξείδωση του μεθανίου, λειτουργώντας συνεργιστικά με βακτήρια που μειώνουν το αρσενικό οξύ όπως το *Geobacter* και το *Sulfurospirillum*. (Mellado & Vera 2020; Yu et al., 2023)

Και στην περίπτωση της οξείδωσης του μεθανίου η απομόνωση, η ταυτοποίηση και η γενετική περιγραφή των μικροοργανισμών αποτελούν δύσκολες εργασίες. Η πρόκληση

δεν είναι μόνο η περιγραφή νέων ειδών. Είναι σημαντικό να ερευνηθούν οι μεταβολικές τους διαδρομές και πώς μπορεί να αυξηθεί η δραστηριότητά τους υπό ελεγχόμενες συνθήκες για τη διαχείριση των εκπομπών μεθανίου.



Εικόνα 20. Διεργασίες παραγωγής, μεταφοράς και οξείδωσης CH₄ σε TY (Yin et al., 2023)

11. Συμπεράσματα

Οι μικροοργανισμοί διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο στην απομάκρυνση των ρύπων και στους βιογεωχημικούς κύκλους εντός τεχνητών υγροτόπων επεξεργασίας λυμάτων. Ως βασικοί παράγοντες των κύκλων αζώτου, φωσφόρου, θείου και άνθρακα, συμβάλλουν στην αποδόμηση της οργανικής ύλης, των βαρέων μετάλλων και των αντιβιοτικών μέσω διαδικασιών όπως η βιοαποικοδόμηση, η βιοπροσρόφηση, η βιοσυσσώρευση, η ενζυματική κατάλυση, οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, καθώς και μέσω των αλληλεπιδράσεων με τις ρίζες των φυτών.

Η κυριαρχία των Proteobacteria, μαζί με σημαντικές συνεισφορές από Firmicutes, Bacteroidetes, Actinobacteria και Chloroflexi, καταδεικνύουν τη μικροβιακή ποικιλομορφία, αλλά και την εξειδίκευση των εκάστοτε μικροοργανισμών εντός των ΤΥ. Τα Αρχαία συμβάλλουν επίσης σε βασικές βιοχημικές διεργασίες,

συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής μεθανίου, της οξείδωσης μεθανίου και του μεταβολισμού του αζώτου.

Η συμμετοχή των μικροοργανισμών στον κύκλο του αζώτου έχει ενδιαφέρον και αποδεικνύεται ιδιαίτερος πολύπλοκη, αλλά και κυρίαρχη στην απομάκρυνση των αζωτούχων ρύπων. Νεότερες διεργασίες όπως η ετερότροφη νιτροποίηση-απονιτροποίηση (HN-AD), η Comammox (νιτροποίηση ενός σταδίου), η DAMO και η Anammox προσφέρουν πιο αποδοτικές και περιβαλλοντικά ευνοϊκές λύσεις. Η έρευνα εστιάζει πλέον στην αναγνώριση λειτουργικών γονιδίων και στην κατανόηση μικροοργανισμών όπως τα AOA, τα βακτήρια HN-AD, και τα αναερόβια anammox. Οι συνεργιστικές δράσεις μικροοργανισμών είναι συχνό φαινόμενο και σε συνδυασμό με τις νέες εφαρμογές στους ΤΥ που προσφέρουν ιδανικό περιβάλλον για τις μικροβιακές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, οι υγρότοποι επεξεργασίας επιτυγχάνουν υψηλούς στόχους απορρύπανσης.

Παρόλο που οι μικροοργανισμοί δεν έχουν μεγάλη συμμετοχή στην απομάκρυνση του φωσφόρου (κύριο ρύπο αγροτικών λυμάτων), η βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου (EBPR) αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο, βασισμένη στη δράση οργανισμών συσσώρευσης φωσφόρου (PAO) που αυξάνει την αποδοτικότητα απορρύπανσης.

Επίσης, είναι γνωστή η συμβολή των μικροοργανισμών στην απορρύπανση βιομηχανικών λυμάτων από βαρέα μέταλλα, αλλά νέες τεχνικές όπως τα οργανικά εμπλουτισμένα υποστρώματα που διεγείρουν τη δραστηριότητα των θειοαναγωγικών βακτηρίων (SRB) ή ο εμβολιασμός φυτών με ενδοφυτικά βακτήρια, αυξάνουν την απόδοση των συστημάτων ΤΥ.

Η εκτεταμένη παρουσία αντιβιοτικών στο περιβάλλον έχει οδηγήσει στην εξάπλωση ανθεκτικών βακτηρίων (ARB) και γονιδίων αντοχής στα αντιβιοτικά (ARG), με τους ΤΥ να επιτυγχάνουν μέχρι και 99% απομάκρυνσή τους, κυρίως όταν χρησιμοποιούνται ως τριτοβάθμια επεξεργασία σε συμβατικές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων.

Παρά την αρνητική συμβολή των μεθανογόνων βακτηρίων των ΤΥ στο περιβάλλον με την παραγωγή μεθανίου, η χρήση μεθανοτρόφων βακτηρίων που οξειδώνουν το μεθάνιο είναι μια οικολογική λύση για τη μείωση του φαινομένου.

Οι εξελίξεις στις τεχνικές μοριακής βιολογίας, όπως η αλληλούχιση 16S rDNA, η μεταγονιδιωματική και η λειτουργική γονιδιακή ανάλυση, έχουν ενισχύσει την κατανόηση των μικροβιακών κοινοτήτων και τους οικολογικούς τους ρόλους στους τεχνητούς υγροτόπους. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των δομών της μικροβιακής

κοινότητας και οι περιορισμοί ακόμα και των σύγχρονων τεχνικών μικροβιακής ανάλυσης θέτουν προκλήσεις για τον πλήρη χαρακτηρισμό των μικροβιακών αλληλεπιδράσεων. Ως κύριος σκοπός της έρευνας παραμένει η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης ρύπων σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου τα οποία αναδεικνύονται ως βασικό μειονέκτημα των ΤΥ όσων αφορά τα χαρακτηριστικά τους ως πράσινες υποδομές.

Βιβλιογραφία

Addo-Bankas, O., Zhao, Y., Wei, T., & Stefanakis, A. (2024). From past to present: Tracing the evolution of treatment wetlands and prospects ahead. *Journal of Water Process Engineering*, 60, 105151

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105151>

Akyürek, A., & Ağdağ, O. N. (2024). Comparison of constructed wetlands and package-type sequencing batch biological treatment plants in rural areas in terms of efficiency and cost in a full-scale example. *Ecological Engineering*, 201, 107190.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107190>

Ali, H., Min, Y., Yu, X., Kooch, Y., Marnn, P., & ABMed, S. (2024). Composition of the microbial community in surface flow-constructed wetlands for wastewater treatment. *Frontiers in Microbiology*, 15.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1421094>

Baddar Elhaj, Z., Bier, R., Spencer, B., & Xu, X. (2024). Microbial community changes across time and space in a constructed wetland. *ACS Environmental Au*, 4(6).

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenvironau.4c00021>

Bhuiyan, M., Muthukumaran, S., Fagan, J., Jegatheesan, V., & Moazzem, S. (2023). Microbiome wetlands in nutrient and contaminant removal. *Current Pollution Reports*, 9, 694–709. <https://doi.org/10.1007/s40726-023-00280-9>

Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2022). Constructed wetlands for reclamation and reuse of wastewater and urban stormwater: A review. *Water and Wastewater Management*, 10 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.836289>

Bunce, J. T., Ndam, E., Ofiteru, I. D., Moore, A., & Graham, D. W. (2018). A review of phosphorus removal technologies and their applicability to small-scale domestic wastewater treatment systems. *Frontiers in Environmental Science*, 6, Article 8.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00008>

Chen, J., Ying, G.-G., Liu, Y.-S., Wei, X.-D., Liu, S.-S., He, L.-Y., Yang, Y.-Q., & Chen, F.-R. (2017). Nitrogen removal and its relationship with the nitrogen-cycle genes and microorganisms in the horizontal subsurface flow constructed wetlands with different design parameters. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 52(8), 804–818.

[10.1080/10934529.2017.1305181](https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1305181)

Chen, P., Yu, X., Zhang, J., & Wang, Y. (2023). New and traditional methods for antibiotic resistance genes removal: Constructed wetland technology and photocatalysis technology. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1110793

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1110793>

Choi, H., Geronimo, F. K., Jeon, M., & Kim, L.-H. (2022). Evaluation of bacterial community in constructed wetlands treating different sources of wastewater. *Ecological Engineering*, 182, 106703. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106703>

Chojnacka, K. (2010). Biosorption and bioaccumulation – The prospects for practical applications. *Environment International*, 36(3), 299–307

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.12.001>

Chu, S., Zhao, F., Liu, Y., Xiao, J., Ma, X., & Yan, Z. (2025). Phosphorus activation from phosphorus-saturated substrates by constructed wetlands plants: Performance and mechanism. *Journal of Water Process Engineering*, 71, 107219.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107219>

Colares, G. S., Dell'Osbel, N., Wiesel, P. G., Oliveira, G. A., Lemos, P. H. Z., da Silva, F. P., Lutterbeck, C. A., Kist, L. T., & Machado, Ê. L. (2020). Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis. *Science of The Total Environment*, 714, 136776.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136776>

Cui, H., Yang, Y., Ding, Y., Li, D., Zhen, G., Lu, X., Huang, M., & Huang, X. (2019). A novel pilot-scale tubular bioreactor-enhanced floating treatment wetland for efficient in situ nitrogen removal from urban landscape water: Long-term performance and microbial mechanisms. *Water Environment Research*.

<https://doi.org/10.1002/wer.1147>

Du, L., Chen, Q., Liu, P., Zhang, X., Wang, H., Zhou, Q., Xu, D., & Wu, Z. (2017). Phosphorus removal performance and biological dephosphorization process in treating reclaimed water by Integrated Vertical-flow Constructed Wetlands (IVTYs). *Bioresource Technology*, 243, 204–211.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.092>

Eheneden, I., Wang, R., & Zhao, J. (2023). Antibiotic removal by microalgae-bacteria consortium: Metabolic pathways and microbial responses. *Science of The Total Environment*, 891, 164489.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164489>

Engida, T., Alemu, T., Wu, J., Xu, D., Zhou, Q., & Wu, Z. (2021). Microbial community dynamics and activity in constructed wetlands treating agro-industrial and domestic wastewater: A review. *Applied Ecology and Environmental Research*, 19(4), 2667–2687

DOI: [10.15666/aeer/1904_26672687](https://doi.org/10.15666/aeer/1904_26672687)

Fernández del Castillo, A., Verduzco Garibay, M., Senes-Guerrero, C., & Gradilla-Hernández, M. S. (2025). Chapter 7 - A revisit of constructed wetlands technology—microbial structure and diversity and their relation to pollutant removal. In *Emerging Developments in Constructed Wetlands* (pp. 195–216).

<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14078-5.00007-6>

Gaballah, M. S., Yousefyani, H., Karami, M., & Lammers, R. W. (2024). Free water surface constructed wetlands: Review of pollutant removal performance and modeling approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 44649–44668

<https://doi.org/10.1007/s11356-024-34151-7>

Garibay Verduzo, M., Fernández del Castillo, A., de Anda, J., Senés-Guerrero, C., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022). Structure and activity of microbial communities in response to environmental, operational, and design factors in constructed wetlands. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 11587–11612 <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03719-y>

Ge, R., Wang, B., Chen, H., Zhou, J., Song, C., Chen, J., Chai, Z., & Zheng, M. (2025). Rhizosphere as a hotspot for ammonia oxidation in secondary effluent constructed wetlands: The role of comammox Nitrospira. *SSRN*. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5114181>

Gorgoglione, A., & Torretta, V. (2018). Sustainable management and successful application of constructed wetlands: A critical review. *Sustainability*, 10(11), 3910.

<https://doi.org/10.3390/su10113910>

Hazra, M., Joshi, H., Williams, J. B., & Watts, J. E. M. (2022). Antibiotics and antibiotic-resistant bacteria/genes in urban wastewater: A comparison of their fate in conventional treatment systems and constructed wetlands. *Chemosphere*, 303(Part 2), 135148.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135148>

Huang, A., Yan, M., Lin, J., Xu, L., Gong, H., & Gong, H. (2021). A review of processes for removing antibiotics from breeding wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4909.

doi: [10.3390/ijerph18094909](https://doi.org/10.3390/ijerph18094909)

Kieu, H. T. Q., Müller, E., & Horn, H. (2011). Heavy metal removal in anaerobic semi-continuous stirred tank reactors by a consortium of sulfate-reducing bacteria. *Water Research*, 45(13), 3863-3870.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.043>

Kondakindi, V. R., Pabbati, R., Erukulla, P., Maddela, N. R., & Prasad, R. (2024). Bioremediation of heavy metals-contaminated sites by microbial extracellular polymeric substances – A critical view. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 408-421.

<https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.05.002>

Kosolapov, D. B., Kuschik, P., Vainshtein, M. B., Vatsourina, A. V., Wießner, A., Kästner, M., & Müller, R. A. (2004). Microbial processes of heavy metal removal from carbon-deficient effluents in constructed wetlands. *Engineering in Life Sciences*, 4(5), 391-472.

<https://doi.org/10.1002/elsc.200420048>

Krishna, R., Chintalpudi, V. K., & Muddada, S. (2018). Application of biosorption for removal of heavy metals from wastewater. In *Biosorption* (Chapter 4).

DOI: [10.5772/intechopen.77315](https://doi.org/10.5772/intechopen.77315)

Lee, C. G., Fletcher, T. D., & Sun, G. (2009). Nitrogen removal in constructed wetland systems. *Engineering in Life Sciences*, 9(1), 11–22.

<https://doi.org/10.1002/elsc.200800049>

Li, B., Yang, Y., Chen, J., Wu, Z., Liu, Y., & Xie, S. (2018). Nitrifying activity and ammonia-oxidizing microorganisms in a constructed wetland treating polluted surface water. *Science of The Total Environment*, 628–629, 310–318.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.041>

Li, Q., Bu, C., Adeel, H. A. M., Guimbaud, C., Gao, B., Qiao, Z., Ding, S., & Ni, S. Q. (2020). The distribution of dissimilatory nitrate reduction to ammonium bacteria in multistage constructed wetland of Jining, Shandong, China. *Environmental Science and Pollution Research*.

[doi:10.1007/s11356-020-10709-z](https://doi.org/10.1007/s11356-020-10709-z)

Li, X., Li, Y., Li, Y., & Wu, J. (2019). Enhanced nitrogen removal and quantitative analysis of removal mechanism in multistage surface flow constructed wetlands for the large-scale treatment of swine wastewater. *Journal of Environmental Management*, 246, 575–582.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.019>

Liang, N., Qaisar, M., Zhang, K., Zhu, X., & Cai, J. (2025). A novel phosphorus removal process in the sulfide-based autotrophic denitrification system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 1115268.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115268>

Liu, X., Guo, X., Liu, Y., Lu, S., Xi, B., Zhang, J., Wang, Z., & Bi, B. (2019). A review on removing antibiotics and antibiotic resistance genes from wastewater by constructed wetlands: Performance and microbial response. *Environmental Pollution*, 254(A), 112996.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112996>

Lopsik, K. (2013). Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10, 1295–1308

<https://doi.org/10.1007/s13762-012-0159-y>

Lu, J., Dong, L., Guo, Z., Hu, Z., Dai, P., Zhang, J., & Wu, H. (2023). Highly efficient phosphorous removal in constructed wetland with iron scrap: Insights into the microbial removal mechanism. *Journal of Environmental Management*, 347, 119076.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119076>

Lv, M., Zhang, D., Niu, X., Ma, J., Lin, Z., & Fu, M. (2022). Insights into the fate of antibiotics in constructed wetland systems: Removal performance and mechanisms. *Journal of Environmental Management*, 321, 116028.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116028>

Lyu, T., Headley, T., Kadlec, R. H., Jefferson, B., & Dotro, G. (2024). Phosphorus removal in surface flow treatment wetlands for domestic wastewater treatment: Global experiences, opportunities, and challenges. *Journal of Environmental Management*, 369, 122392.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122392>

Ma, J., Cui, Y., Zou, A., Ma, C., & Chen, Z. (2022). Antibiotics and antibiotic resistance genes from wastewater treated in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 177, 106548.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106548>

Ma, Y., Zheng, X., Fang, Y., Xu, K., He, S., & Zhao, M. (2020). Autotrophic denitrification in constructed wetlands: Achievements and challenges. *Bioresource Technology*, 318, Article 123778.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123778>

Makopondo, R. O. B., Rotich, L. K., & Kamau, C. G. (2020). Potential use and challenges of constructed wetlands for wastewater treatment and conservation in game lodges and resorts in Kenya. *The Scientific World Journal*

<https://doi.org/10.1155/2020/9184192>

Malyan, S. K., Yadav, S., Sonkar, V., Goyal, V. C., Singh, O., & Singh, R. (2021). Mechanistic understanding of the pollutant removal and transformation processes in the constructed wetland system. *Water Environment Research*.

[10.1002/wer.1599](https://doi.org/10.1002/wer.1599)

Mander, Ü., Tournebize, J. W. J., & Mitsch, W. J. (2016). Denitrification in constructed wetlands for wastewater treatment and created riverine wetlands. In *The Wetland Book* (pp. 1-8).

[10.1007/978-94-007-6172-8_324-1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6172-8_324-1)

Megha Kaviraj, Kumar, U., Chatterjee, S., Parija, S., Padbhushan, R., Nayak, A. K., & Gupta, V. V. S. R. (2024). Dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA): A unique biogeochemical cycle to improve nitrogen (N) use efficiency and reduce N-loss in rice paddy. *Rhizosphere*, 30, 100875.

<https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100875>

Mellado, M., & Vera, J. (2021). Microorganisms that participate in biochemical cycles in wetlands. *Canadian Journal of Microbiology*, 771–788.

<https://doi.org/10.1139/cjm-2020-0336>

Muduli, M., Choudharya, M., & Ray, S. (2024). A review on constructed wetlands for environmental and emerging contaminants removal from wastewater: Traditional and recent developments. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 30181–30220.

<https://doi.org/10.1007/s10668-023-04190-0>

Negi, D., Verma, S., Singh, S., Daverey, A., & Lin, J. G. (2022). Nitrogen removal via anammox process in constructed wetland – A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 437(Part 2), 135434.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135434>

Pan, L., & Cai, B. (2023). Phosphate-solubilizing bacteria: Advances in their physiology, molecular mechanisms, and microbial community effects. *Microorganisms*, 11(12), 2904

doi: [10.3390/microorganisms11122904](https://doi.org/10.3390/microorganisms11122904)

Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2022). A review of constructed wetlands on type, treatment, and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101261,

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>

Qu, Y., Yang, Y., Sonne, C., Chen, X., Yue, X., Gu, H., Lam, S. S., & Peng, W. (2023). Phytosphere purification of urban domestic wastewater. *Environmental Pollution*, 336, 122417.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122417>

Rajan, R. J., Sudarsan, J. S., & Nithiyanantham, S. (2019). Microbial population dynamics in constructed wetlands: Review of recent advancements for wastewater treatment. *Environmental Engineering Research*, 24(2), 181–190

DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.127>

Rampuria, A., Kulshreshtha, N. M., Gupta, A. B., & Brighu, U. (2021). Novel microbial nitrogen transformation processes in constructed wetlands treating municipal sewage: A mini-review. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37, Article 40.

<https://doi.org/10.1007/s11274-021-03001-w>

Rani, A., Chauhan, M., Sharma, P. K., Kumari, M., Mitra, D., & Joshi, S. (2024). Microbiological dimensions and functions in constructed wetlands: A review. *Current Research in Microbial Sciences*, 7, 100311.

<https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100311>

S. Al-Ajeel, S., Spasov, E., Sauder, L. A., McKnight, M. M., & Neufeld, J. D. (2022). Ammonia-oxidizing archaea and complete ammonia-oxidizing Nitrospira in water treatment systems. *Water Research X*, 15, Article 100131.

<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2022.100131>

Samrot, A. V., Wilson, S., Preeth, S. S., Prakash, P., Sathiyasree, M., Saigeetha, S., Shobana, N., Pachiyappan, S., & Rajesh, V. V. (2023). Sources of antibiotic contamination in wastewater and approaches to their removal—An overview. *Sustainability*, 15(16), 12639.

<https://doi.org/10.3390/su151612639>

Sánchez, O. (2016). Constructed wetlands revisited: Microbial diversity in the -omics era. *Microbial Ecology*, 73(3), 722–733.

<https://doi.org/10.1007/s00248-016-0881-y>

Sanicola, O., Lucke, T., Stewart, M., Tondera, K., & Walker, C. (2019). Root and shoot biomass growth of constructed floating wetlands plants in saline environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2), 275.

doi: [10.3390/ijerph16020275](https://doi.org/10.3390/ijerph16020275)

Sasi, R., & Suchithra, T. V. (2023). Wastewater microbial diversity versus molecular analysis at a glance: A mini-review. *Brazilian Journal of Microbiology*, 54, 3033–3039.

<https://doi.org/10.1007/s42770-023-01130-y>

Seth, N., Vats, S., Lakhanpaul, S., Arafat, Y., Mazumdar-Leighton, S., Bansal, M., & Babu, C. R. (2024). Microbial community diversity of an integrated constructed wetland used for treatment of sewage. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1355718

DOI: [10.3389/fmicb.2024.1355718](https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1355718)

Shahid, M. J., AL-surhane, A. A., Kouadri, F., Ali, S., Nawaz, N., Afzal, M., Rizwan, M., Ali, B., Soliman, M. H. (2020). Role of microorganisms in the remediation of wastewater in floating treatment wetlands: A review. *Sustainability*, 12(14), 5559;

<https://doi.org/10.3390/su12145559>

Shan, A., Wang, W., Kang, K. J., Hou, D., Luo, J., Wang, G., Yang, X. (2020). The Removal of Antibiotics in Relation to a Microbial Community in an Integrated Constructed Wetland for Tail Water Decontamination. *Wetlands*

<https://doi.org/10.1007/s13157-019-01262-8>

Shirdashtzadeh, M., Chua, L. H. C., & Brau, L. (2022). Microbial communities and nitrogen transformation in constructed wetlands treating stormwater runoff. *Frontiers in Water*, 3, Article 751830.

<https://doi.org/10.3389/frwa.2021.751830>

Shukla, S., Rajta, A., Setia, H., & Bhatia, R. (2020). Simultaneous nitrification–denitrification by phosphate accumulating microorganisms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(10).

<https://doi.org/10.1007/s11274-020-02926-y>

Stefanakis, A. I. (2019). The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. *Sustainability*, 11(24), 6981

<https://doi.org/10.3390/su11246981>

Stefanakis, A. I., & Akratos, C. S. (2014). Constructed wetlands classification. In *Vertical flow constructed wetlands* (Chapter 2). Elsevier.

DOI: [10.1016/B978-0-12-404612-2.00002-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404612-2.00002-7)

Stefanakis, A., Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). Introduction. In *Vertical flow constructed wetlands: Eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment* (pp. 1-16). Elsevier

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404612-2.00001-5>

Tang, S., Liao, Y., Xu, Y., Dang, Z., Zhu, X., & J., G. (2020). Microbial coupling mechanisms of nitrogen removal in constructed wetlands: A review. *Bioresource Technology*, 314, 123759.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123759>

Tsihrintzis, V. A. (2017). The use of vertical flow constructed wetlands in wastewater treatment. *Water Resources Management*, 31, 3245–3270

<https://doi.org/10.1007/s11269-017-1710-x>

Valencia Urrea, S., de Almeida Melo, A. L., Gonçalves, D. R. P., Galvão, C. W., & Etto, R. M. (2020). Molecular techniques to study microbial wastewater communities. *Brazilian Archives of Biology and Technology*

DOI: [10.1590/1678-4324-2021200193](https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021200193)

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 380(1–3), 48–65.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>

Vymazal, J. (2019). Constructed wetlands for wastewater treatment. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Encyclopedia of Ecology* (2nd ed., Vol. 1, pp. 14-21). Elsevier .

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11238-2>

Vymazal, J. (2022). The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*, 11(2), 174 <https://doi.org/10.3390/land11020174>

Vymazal, J. (2023). Thirty years of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 194, 107054. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107054>

Waly, M. M., ABMed, T., Abunada, Z., Mickovski, S. B., & Thomson, C. (2022). Constructed wetland for sustainable and low-cost wastewater treatment: Review article. *Land*, 11(9), 1388

<https://doi.org/10.3390/land11091388>

Wang J. & Chen, X. ,2020 . Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes: An overview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1–60

<https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835124>

Wang, H., Xu, Y., & Chai, B. (2023). Effect of temperature on microorganisms and nitrogen removal in a multi-stage surface flow constructed wetland. *Water*, 15(7), 1256.

<https://doi.org/10.3390/w15071256>

Wang, J., Chu, L., Wojnárovits, L., & Takács, E. (2020). Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic-resistant genes (ARGs), and antibiotic-resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: An overview. *Science of The Total Environment*, 744, 140997.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140997>

Wang, J., Long, Y., Yu, G., Wang, G., Zhou, Z., Li, P., Zhang, Y., Yang, K., & Wang, S. (2022). A review on microorganisms in constructed wetlands for typical pollutant removal: Species, function, and diversity. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 845725.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.845725>

Wang, J., Xia, L., Chen, J., Wang, X., Wu, H., Li, D., Wells, G. F., Yang, J., Hou, J., & He, X. (2021). Synergistic simultaneous nitrification-endogenous denitrification and EBPR for advanced nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*, 420, 127605.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127605>

Wang, P., Zhang, H., Zuo, J., Zhao, D., Zou, X., Zhu, Z., Jeelani, N., Leng, X., & An, S. (2016). A hardy plant facilitates nitrogen removal via microbial communities in subsurface flow constructed wetlands in winter. *Scientific Reports*, 6(1), Article 33600. <http://dx.doi.org/10.1038/srep33600>

Wang, Q., Ding, J., Xie, H., Hao, D., Du, Y., Zhao, C., Xu, F., Kong, Q., & Wang, B. (2021). Phosphorus removal performance of microbial-enhanced constructed wetlands that treat saline wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125119 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125119>

Weber, K. P., & Gagnon, V. (2014). Microbiology in treatment wetlands. Sustainable Sanitation Practice, 18, 25–30. (Report)
[Report](#)

Wei, H., Wang, M., Ya, M., & Xu, C. (2022). The denitrifying anaerobic methane oxidation process and microorganisms in the environments: A review. *Frontiers in Marine Science*, 9, Article 687387. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1038400>

Wu, H., Wang, J., Chen, J., Wang, X., Li, D., Hou, J., & He, X. (2021). Advanced nitrogen and phosphorus removal by combining endogenous denitrification and denitrifying dephosphatation in constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*, 294, 112967. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112967>

Wu, H., Wang, R., Yan, P., Wu, S., Chen, Z., Zhao, Y., Cheng, C., Hu, Z., Zhuang, L., Guo, Z., Xie, H., & Zhang, J. (2023). Constructed wetlands for pollution control. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 218–234 <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00395-z>

Xie, E., Ding, A., Zheng, L., et al.,. (2016). Seasonal variation in populations of nitrogen-transforming bacteria and correlation with nitrogen removal in a full-scale horizontal flow constructed wetland treating polluted river water. *Geomicrobiology Journal*, 33, 338–346. <https://doi.org/10.1080/01490451.2015.1052115>

Xu, S., Wu, X., & Lu, H. (2021). Overlooked nitrogen-cycling microorganisms in biological wastewater treatment. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 15(6). <http://dx.doi.org/10.1007/s11783-021-1426-2>

Yang, M., Liang, S., Hu, Z., Xie, H., Zhuang, L., & Zhang, J. (2024). Antibiotic removal based on constructed wetland: Mechanism, performance, and regulation. *Current Pollution Reports*, 11, 3. <https://doi.org/10.1007/s40726-024-00333-7>

Yin, D., Chen, Y., Jia, H., Wang, Q., Chen, Z., Xu, C., Li, Q., Wang, W., Yang, Y., Fu, G., & Chen, A. S. (2021). Sponge city practice in China: A review of construction, assessment, operational and maintenance. *Journal of Cleaner Production*, 280(Part 2), 124963.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124963>

Yin, X., Jiang, C., Xu, S., Yu, X., Yin, X., Wang, J., Maihaiti, M., Wang, C., Zheng, X., & Zhuang, X. (2023). Greenhouse gases emissions of constructed wetlands: Mechanisms and affecting factors. *Water*, 15(2871).

<https://doi.org/10.3390/w15162871>

Yu G, Chen J, Wang G, Chen H, Huang J, Li Y, Wang W, Song F, Ma Y, Wang Q, Wang M, Ling T, Shu Z, Sun J and Yu Z (2023) Recent advances in constructed wetlands methane reduction: Mechanisms and methods. *Front. Microbiol.* 14:1106332

doi: [10.3389/fmicb.2023.1106332](https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1106332)

Yu, G., Li, P., Wang, G., Wang, J., Zhang, Y., Wang, S., Yang, K., Du, C., & Chen, H. (2021). A review on the removal of heavy metals and metalloids by constructed wetlands: Bibliometric, removal pathways, and key factors. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*.

DOI: [10.1007/s11274-021-03123-1](https://doi.org/10.1007/s11274-021-03123-1)

Yu, G., Wang, G., Chi, T., Du, C., Wang, J., Li, P., Zhang, Y., Wang, S., Yang, K., Long, Y., & Chen, H. (2022). Enhanced removal of heavy metals and metalloids by constructed wetlands: A review of approaches and mechanisms. *Science of The Total Environment*, 821, 153516.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153516>

Yu, G., Wang, G., Li, J., Chi, T., Wang, S., Peng, H., Chen, H., Du, C., Jiang, C., Liu, Y., Zhou, L., & Wu, H. (2020). Enhanced Cd²⁺ and Zn²⁺ removal from heavy metal wastewater in constructed wetlands with resistant microorganisms. *Bioresource Technology*, 316, 123898.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123898>

Yujie He ,Li Zhang , Longxue Jiang , Thomas Wagner , Nora B. Sutton , Rong Ji , Alette A.M. Langenhoff , 2021, Improving removal of antibiotics in constructed wetland treatment systems based on key design and operational parameters: A review *Journal of Hazardous Materials*, Volume 407, 124386

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124386>

Zhang, C. K., Wang, J., Liu, X., Xiaoying, H., Li, M., Jiang, B., Chen, J., Chen, W., Huang, B., Fan, L., Cheng, L., An, X., Che, F., & Zhang, X. H. (2021). Methane emissions and methanogenic community investigation from constructed wetlands in Chengdu. *Urban Climate*, 39, 100956

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100956>

Zhang, Y., Qiu, X., Luo, J., Li, H., How, S. W., Wu, D., He, J., Cheng, Z., Gao, Y., & Lu, H. (2024). A review of the phosphorus removal of polyphosphate-accumulating organisms in natural and engineered systems. *Science of The Total Environment*, 912, 169103.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169103>

Zhang, Z., Zhao, Y., Wei, T., Bai, X., Chen, Z., Lei, X., & Liu, Y. (2024). Constructed wetlands for metallic wastewater treatment: An updated global profile. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105852.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105852>

Zhao, K., Si, T., Liu, S., Liu, G., Li, D., & Li, F. (2024). Co-metabolism of microorganisms: A study revealing the mechanism of antibiotic removal, progress of biodegradation transformation pathways. *Science of The Total Environment*, 954, 176561.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176561>

Zhao, Y., Ji, B., Liu, R., Ren, B., & Wei, T. (2020). Constructed treatment wetland: Glance of development and future perspectives. *Water Cycle*, 1, 104-112.

<https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.07.002>

Zheng, Z., Duan, X., & Lu, S. (2021). The application research of rainwater wetland based on the Sponge City. *Science of The Total Environment*, 771, 144475.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144475>

Zhou, T., & Penning-Rowsell, E. (2021). China's 'sponge cities': The role of constructed wetlands in alleviating urban pluvial flooding. *Water and Environmental Journal*.

<https://doi.org/10.1111/wej.12705>

Zhou, X., Yang, J., Sha, A., Zhuang, Z., Bai, S., Sun, H., & Zhao, X. (2024). Enhancing environmental and economic benefits of constructed wetlands through plant recovery: A life cycle perspective. *Science of The Total Environment*, 951, 175784

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175784>

Zhu, G., Wang, X., Wang, S., Yu, L., Armanbek, G., Yu, J., Jiang, L., Yuan, D., Guo, Z., Zhang, H., Zheng, L., Schwark, L., Jetten, M. S. M., Yadav, A. K., & Zhu, Y. G. (2022). Review towards a more labor-saving way in microbial ammonium oxidation: A review on complete ammonia oxidation (comammox). *Science of The Total Environment*, 829, Article 154590.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154590>

Zhuang, L., Yang, T., Zhang, J., & Li, X. (2019). The configuration, purification effect and mechanism of intensified constructed wetlands for wastewater treatment from the aspect of nitrogen removal: A review. *Bioresource Technology*, 293, Article 122086.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122086>

ΙΣΤΟΤΟΠΟΣ

[green infrastructure EU](#)

[SSRN](#)

[WHO report on surveillance of antibiotic consumption](#)

[Antimicrobial resistance](#),2023, WHO