



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διερεύνηση της απόδοσης διαφορετικών ειδών τεχνητών
υγροβιότοπων στην απομάκρυνση συμβατικών ρύπων και
μικρορύπων

Κωνσταντίνος Παπαδόπουλος

Επιβλέπων: Συμεών Μαλαμής, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2023

Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Πινάκων	iv
Κατάλογος Εικόνων	vi
Περίληψη	viii
Abstract	xi
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας	1
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	4
Κεφάλαιο 2: Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας.....	6
2.1 Εισαγωγικές Έννοιες Φυσικών Συστημάτων	6
2.2 Χαρακτηριστικά των Φυσικών Συστημάτων Επεξεργασίας	6
2.3 Σύγκριση Φυσικών και Συμβατικών Συστημάτων	8
Κεφάλαιο 3: Κατηγοριοποίηση Τεχνητών Υδροβιότοπων.....	12
3.1 Υγροβιότοποι-Ορισμός.....	12
3.2 Φυσικοί Υγροβιότοποι.....	13
3.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι.....	14
3.3.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιφανειακής Ροής	17
3.3.1.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι με Επιπλέοντα Φυτά	20
3.3.1.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι με Βυθιζόμενα Φυτά	22
3.3.1.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι με Αναδύμενα Φυτά.....	23
3.3.1.4 Τεχνητοί Υγροβιότοποι με Πλωτές Ψάθες Αναδύμενων Φυτών	24
3.3.1.5 Τεχνητοί Υγροβιότοποι με Δέντρα.....	24
3.3.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Υποεπιφανειακής Ροής	25
3.3.2.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής ...	27
3.3.2.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Κατακόρυφης Υποεπιφανειακής Ροής	31
3.3.3 Σύγκριση Τεχνητών Υδροβιότοπων Επιφανειακής & Υποεπιφανειακής Ροής	34
3.3.4 Υβριδικά Συστήματα Τεχνητών Υδροβιότοπων.....	35
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία Σχεδιασμού Τεχνητών Υγροβιότοπων.....	35
4.1 Βασικά Βήματα Σχεδιασμού.....	37
4.2 Χωροθέτηση	39
4.3 Βλάστηση.....	41
4.4 Πληρωτικό Υλικό	43
4.5 Διαστασιολόγηση Τεχνητών Υγροβιότοπων Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής (CW-HSSF).....	49

4.6	Διαστασιολόγηση Τεχνητών Υγροβιότοπων Κατακόρυφης Υπό-Επιφανειακής Ροής (CW-VSSF).....	59
Κεφάλαιο 5: Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρύπων		67
5.1	Απομάκρυνση Αιωρούμενων Στερεών	67
5.1.1	Απομάκρυνση Στερεών σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους Επιφανειακής Ροής	70
5.1.2	Απομάκρυνση Στερεών σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους Υποεπιφανειακής Ροής.....	70
5.2	Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου	72
5.2.1	Αερόβια Διάσπαση Οργανικού Φορτίου	73
5.2.2	Αναερόβια Διάσπαση Οργανικού Φορτίου	74
5.3	Απομάκρυνση Αζώτου.....	78
5.4	Απομάκρυνση Φωσφόρου	85
5.5	Απομάκρυνση Παθογόνων Μικροοργανισμών	88
5.6	Απομάκρυνση Μετάλλων	91
5.7	Απομάκρυνση Παρασιτοκτόνων.....	92
5.8	Απομάκρυνση Φαρμακευτικών Παραπροϊόντων και Προσωπικής Φροντίδας/ Υγιεινής Παραπροϊόντων (PPCPs)	107
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις.....		118
6.1	Περίληψη	118
6.2	Συμπεράσματα	119
6.3	Προτάσεις	122
Βιβλιογραφία:		125

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά επιλογής θέσης και χαρακτηριστικά σχεδιασμού φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων [9].....	6
Πίνακας 2.2: Σύγκριση συμβατικών και φυσικών συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων [13].....	22
Πίνακας 4.1: Υλικά για κατασκευή υποστρώματος και χαρακτηριστικά τους [56].....	44
Πίνακας 4.2: Εδαφικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά άμμου.....	50
Πίνακας 5.1: Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών από αστικά λύματα.....	68
Πίνακας 5.2: Απομάκρυνση οργανικού φορτίου από αστικά λύματα.....	75
Πίνακας 5.3: Απομάκρυνση αζώτου από αστικά λύματα.....	82
Πίνακας 5.4: Απομάκρυνση φωσφόρου από αστικά λύματα.....	85
Πίνακας 5.5: Μηχανισμοί απομάκρυνσης παθογόνων σε τεχνητούς υγροτόπους [63].....	86
Πίνακας 5.6: Απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών από αστικά λύματα....	87
Πίνακας 5.7: Απομάκρυνση μετάλλων από αστικά λύματα.....	90
Πίνακας 5.8: Κατάλογος παρασιτοκτόνων [103].....	92
Πίνακας 5.9: Σύνοψη των μηχανισμών αποδόμησης των φαρμακευτικών προϊόντων και των προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής [67].....	106
Πίνακας 5.10: Επίπεδα συμβολής των μηχανισμών απομάκρυνσης φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής.....	109
Πίνακας 5.11: Απομάκρυνση φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής από αστικά λύματα.....	111
Πίνακας 5.12: Είδη που αναφέρθηκαν για απομάκρυνση φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής από αστικά λύματα [115].	112

Πίνακας 5.13: Απομάκρυνση φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής από αστικά λύματα σε διαφορετικούς τύπους υδροβιότοπων [116].....114

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3.1: Κατηγοριοποίηση των τεχνητών υγροβιότοπων.....	17
Εικόνα 3.2:Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής.....	19
Εικόνα 3.3: Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής με (α) <i>Eichhornia crassipes</i> (υάκινθος νερού) στο Langtou κοντά στο Guangzhou, και με (β) η <i>Lemna spp.</i> (duckweed) and <i>Taxodium distichum</i> (baldcypress) σχεδιασμένο για την επεξεργασία της απορροής των όμβριων υδάτων στο Ορλάντο της Φλόριντα [22].	21
Εικόνα 3.4: Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής με (α) <i>Nuphar lutea</i> (spatterdock) σχεδιασμένο για τριτογενή επεξεργασία στο Ορλάντο της Φλόριντα, και με (β) βυθιζόμενα φυτά (κυρίως <i>Myriophyllum spicatum</i> , water milfoil) στο Μόντρεαλ του Καναδά [22].	23
Εικόνα 3.5: Τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής με (α) αναδυόμενα φυτά (<i>Eleocharis sphacelata</i>) στην Otorohanga, Νέα Ζηλανδία, (β) πλωτές ψάθες φυτεμένος με <i>Cyperus alternifolius</i> στην Ningbo, Κίνα, και (γ) με μαγγρόβια (<i>Kandelia candel</i>) στον κόλπο Dapeng, Ταϊβάν [22].	25
Εικόνα 3.6: Τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής.....	30
Εικόνα 3.7: Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής.....	34
Εικόνα 4.1: Σχεδιασμός, λειτουργία και συντήρηση των τεχνητών υδροβιότοπων.....	39
Εικόνα 4.2: Είδη φυτών στους τεχνητούς υγροβιότοπους.....	42
Εικόνα 5.1: Ο κύκλος του άνθρακα σε τεχνητούς υγροβιότοπους (DOC:dissolved organic carbon, διαλυμένος οργανικός άνθρακας).....	76
Εικόνα 5.2: Ο κύκλος του αζώτου σε τεχνητούς υγροβιότοπους.....	83
Εικόνα 5.3: Ποσοστά απομάκρυνσης ζιζανιοκτόνων από τεχνητούς υγροβιότοπους.....	100
Εικόνα 5.4: Ποσοστά απομάκρυνσης εντομοκτόνων από τεχνητούς υγροβιότοπους.....	102
Εικόνα 5.5: Ποσοστά απομάκρυνσης μυκητοκτόνων από τεχνητούς υγροβιότοπους.....	104
Εικόνα 5.6: Απομάκρυνση των παρασιτοκτόνων ανά χημική ομάδα [103]......	105
Εικόνα 5.7: Απομάκρυνση των παρασιτοκτόνων ανά εποχή [105]......	106
Εικόνα 5.8: Επίπεδα συμβολής των μηχανισμών απομάκρυνσης φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής.	112

Εικόνα 5.9: Ποσοστά απομάκρυνσης προϊόντων σε φυτεμένους και μη φυτεμένους τεχνητούς υγροβιότοπους..... 115

Περίληψη

Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα της σύγχρονης κοινωνίας ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι η ρύπανση των υδάτων το οποίο καθιστά απαραίτητη τη σωστή διαχείριση των λυμάτων και την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επιτρέπουν την απομάκρυνση των ρύπων από τα αστικά λύματα. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια διότι αποτελούν μια φυσική λύση (nature-based solution) η οποία είναι οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία για τη διαχείριση υγρών αποβλήτων. Τα αστικά υγρά απόβλητα περιέχουν επιβλαβείς ρύπους όπως τα αιωρούμενα σωματίδια, οργανικές ενώσεις, άζωτο και φώσφορο σε σημαντικές ποσότητες, ενώ περιέχουν σε μικρές συγκεντρώσεις οργανικές και ανόργανες ουσίες όπως είναι τα παρασιτοκτόνα, αντιβιοτικά, φαρμακευτικά παραπροϊόντα, παραπροϊόντα προσωπικής φροντίδας και υγιεινής, βαρέα μέταλλα κλπ. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατηγοριοποιούνται με βάση την ύπαρξη (ή όχι) ελεύθερης επιφάνειας του υγρού και επιπρόσθετα είτε με βάση την κατεύθυνση ροής των λυμάτων μέσα στο σύστημα, είτε με βάση το είδος φυτού που υπάρχει στο σύστημα. Συγκεκριμένα κατηγοριοποιούνται στους τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής και υποεπιφανειακής ροής με τους πρώτους να έχουν ελεύθερη επιφάνεια ροής του υγρού και τους δεύτερους να έχουν κάποιο πληρωτικό υλικό (συνήθως άμμο ή χαλίκι) μέσα από το οποίο πραγματοποιείται η ροή του υγρού. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής έπειτα διαχωρίζονται με βάση κατεύθυνση του υγρού σε κατακόρυφους και οριζόντιους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι επιφανειακής ροής κατηγοριοποιούνται με βάση το είδος των φυτών στους ακόλουθους: (α) τεχνητοί υδροβιότοποι με επιπλέοντα φυτά, (β) τεχνητοί υδροβιότοποι με βυθιζόμενα φυτά, (γ) τεχνητοί υδροβιότοποι

με αναδύομενα φυτά, (δ) τεχνητοί υγροβιότοποι με πλωτές ψάθες αναδύομενων φυτών, και (ε) τεχνητοί υγροβιότοποι με δέντρα.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της απομάκρυνσης τόσο των συμβατικών ρύπων όσο και των μικρορύπων (ανόργανων και οργανικών) από αστικά λύματα με την χρήση τεχνητών υγροβιότοπων αξιοποιώντας τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτά τα συστήματα.

Αρχικά, όσον αφορά τα αιωρούμενα στερεά η απομάκρυνσή τους βασίζεται είτε στην κροκίδωση/καθίζηση (για επιφανειακούς τεχνητούς υγροβιότοπους) είτε στην διήθηση/κροκίδωση/καθίζηση των κολλοειδών σωματιδίων στους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής. Επιπλέον, και στα δύο είδη τεχνητών υγροβιότοπων τα οργανικά αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται με τη βιολογική αποδόμησή τους υπό αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες. Η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου (COD, BOD₅) μπορεί να οφείλεται είτε σε αερόβια διάσπαση είτε σε αναερόβια/ανοξική. Πιο συγκεκριμένα η απομάκρυνση του BOD₅ των υγροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής είναι πάνω από 75%, ενώ η απομάκρυνση του COD πάνω από 65%. Η απομάκρυνση του αζώτου οφείλεται στις διεργασίες της αμμωνιοποίησης, νιτροποίησης, απονιτροποίησης, πτητικοποίησης, και πρόσληψης του αζώτου από τα φυτά που ως αποτέλεσμα επιτυγχάνουν στις περισσότερες περιπτώσεις ποσοστά απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου (NH₃-N) πάνω από 70%. Επιπρόσθετα οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης του φωσφόρου σε τεχνητούς υγροβιότοπους είναι η προσρόφηση στο υπόστρωμα και χημική κατακρήμνιση, η αφομοίωση στο βιολογικό φιλμ (βιοφίλμ), και η πρόσληψη από τα φυτά. Επίσης, η προσρόφηση στο πληρωτικό υλικό, η καθίζηση ως αδιάλυτα άλατα, η πρόσληψη στους βιολογικούς/χημικούς κύκλους τους από φυτά και βακτήρια, και η εναπόθεση

των αιωρούμενων στερεών αποτελούν τους κύριους μηχανισμούς απομάκρυνσης των μετάλλων με ικανοποιητικές απομακρύνσεις ανάλογα με είδος τους. Ακόμα, οι κύριοι μηχανισμοί για την απομάκρυνση των παρασιτοκτόνων αφορούν την διασπορά τους, τη φυσική εναπόθεση, και την πρόσληψη από τα φυτά. Ανάλογα την χημική ομάδα των παρασιτοκτόνων και το είδος του τεχνητού υγροβιότοπου παρατηρούνται ποσοστά απομάκρυνσης από 23% (Triazinone) έως και 98% (Organochlorine). Τέλος, οι μηχανισμοί απομάκρυνσης/αποδόμησης φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής περιλαμβάνουν κυρίως φωτολυτική αποδόμηση, φυτοαποικοδόμηση και τη μικροβιακή αποδόμηση με ποσοστά απομάκρυνσης 3-82%, 19-100%, 50-55%, αντίστοιχα.

Όσον αφορά τους ρυθμούς και τα ποσοστά απομάκρυνσης, σε ένα γενικότερο πλαίσιο παρατηρήθηκαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την εφαρμογή τεχνητών υγροβιότοπων στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Τα ποσοστά απομάκρυνσης κάθε ρύπου εξαρτώνται από τον τύπο του υγροβιότοπου που χρησιμοποιείται, τη σύσταση των λυμάτων, την υδραυλική και οργανική φόρτιση του τεχνητού υγροβιότοπου, το πληρωτικό υλικό, τα φυτά του υγροβιότοπου. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση μικροοργανικών ρύπων όπως φυτοφάρμακα και φαρμακευτικά παραπροϊόντα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας/υγιεινής τα καταγεγραμμένα ποσοστά απομάκρυνσης φαίνεται είναι ικανοποιητικά.

Abstract

One of the most important concerns of modern society as a result of human activities is water pollution, which makes necessary the proper management of wastewater and the development of technologies that will allow the removal of pollutants from urban wastewater. The majority of the existing wastewater treatment plants (WWTPs) are based on the technology of the activated sludge process which is effective in the removal of the conventional pollutants. However, the activated sludge process is energy intensive resulting in significant operating expenses.

Constructed wetland is a nature-based solution (NBS) which has attracted interest in recent years because it is economical and environmentally friendly technology for wastewater treatment. The wastewater contains harmful pollutants such as suspended particles, organic compounds, nitrogen and phosphorus in large quantities, and organic micropollutants such as pesticides, antibiotics, pharmaceutical by-products, personal care and hygiene by-products, heavy metals etc. Constructed wetlands are divided into free water surface and subsurface flow, based on whether or not there is a free water surface. The subsurface flow constructed wetlands are further divided based on the direction of flow into horizontal and vertical.

The purpose of this thesis is to investigate the removal of conventional pollutants and micropollutants (organic and inorganic) from urban wastewater using constructed wetlands. The pollutants are removed by a variety of physical, chemical and biological processes that take place in these systems. Initially, with regards to suspended solids, their removal is based on either flocculation/sedimentation in free surface flow constructed wetlands and filtration/flocculation in

subsurface flow constructed wetlands. Moreover, the organic suspended solids that are retained by the wetlands are degraded through aerobic, anaerobic and anoxic biochemical reactions.

Also, the removal of the organic load (COD, BOD₅) is attributed to either its aerobic or anaerobic/anoxic decomposition. The processes of ammonification, nitrification, denitrification, volatilization, and plant uptake are responsible for nitrogen removal. Additionally, the main phosphorus removal mechanisms in constructed wetlands are substrate adsorption and chemical precipitation, biofilm assimilation, and plant uptake. Also, sorption to sediments, precipitation as insoluble salts, adsorption and induced changes in their biological/chemical cycles by plants and bacteria, and deposition of suspended solids are the main mechanisms of metal removal. The main mechanisms for the removal of pesticides are their physical deposition/filtration, biodegradation and uptake by plants. Finally, the mechanisms of removal/degradation of pharmaceutical by-products and personal care/hygiene products mainly include filtration, adsorption, phytodegradation and microbial degradation.

Regarding removal rates and removal percentages, in a more general context encouraging results were observed for the application of constructed wetlands in wastewater treatment. The removal rates of each pollutant depend on the type of wetland used, the composition of the wastewater, the loading rate at which the wastewater is fed, the filling material of the wetland, the plants of the wetland, the hydrological characteristics of the system and the climate of the area.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί το εισαγωγικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά γίνεται μια περιληπτική παρουσίαση του προβλήματος της διαχείρισης των λυμάτων. Εν συνεχεία γίνεται μια ανασκόπηση στις συμβατικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Έπειτα δίνεται ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού περιγράφεται η δομή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

1.1 Γενικά

Η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η σύγχρονη κοινωνία. Ως περιβάλλον ορίζεται το σύνολο των στοιχείων που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους ή πιο συγκεκριμένα οι φυσικές συνθήκες μέσα στις οποίες ζουν, αλληλοεπιδρούν και αναπτύσσονται οι ζωντανοί οργανισμοί. Ως ρύπανση έχει οριστεί η απελευθέρωση ουσιών στην ατμόσφαιρα, το νερό ή το έδαφος (άμεση ή έμμεση) η οποία είναι απόρροια των εντατικοποιημένων ανθρώπινων δραστηριοτήτων οι οποίες δημιουργούν αξιοσημείωτες μεταβολές στο περιβάλλον [1]. Ο ουσιαστικός έλεγχος της ρύπανσης του περιβάλλοντος είναι πολύ σημαντικός για την προστασία τόσο του ίδιου όσο και της ανθρώπινης υγείας.

Ένα σημαντικό πρόβλημα της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι η ρύπανση των υδάτων. Το νερό αποτελεί ένα από τους πιο σημαντικούς πόρους για την ζωή του ανθρώπου και όχι μόνο. Η διαχείριση της ποιότητας του νερού από τον άνθρωπο δεν ήταν πάντα η καλύτερη, καθώς παρατηρείται συσσωρευμένη ρύπανση των υδάτινων οικοσυστημάτων λόγω της ελλιπής

διαχείρισης των υγρών αποβλήτων. Η ελλιπής διαχείριση των αστικών λυμάτων εκτός από τους κινδύνους που εγκυμονεί για την ανθρώπινη υγεία (μετάδοση ασθενειών από μολυσμένο νερό), δημιουργεί φαινόμενα αποξυγόνωσης των υδάτινων αποδεκτών, τοξικότητα στα υδάτινα οικοσυστήματα λόγω της παρουσίας της αμμωνίας και διογκώνει τα προβλήματα ευτροφισμού.

Η Ελλάδα έχει προχωρήσει στην κατασκευή και λειτουργία εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) σε όλες τις πόλεις με εξαίρεση την Ανατολική Αττική όπου τα σχετικά έργα αναμένεται να δρομολογηθούν τα επρχόμενα χρόνια. Ωστόσο σημαντικός αριθμός ΕΕΛ δεν έχει υλοποιηθεί για τους εξυπηρετούμενους πληθυσμούς κάτω των 10000.

Για τους παραπάνω λόγους είναι απαραίτητη η σωστή διαχείριση των λυμάτων και η ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επιτρέπουν την απομάκρυνση των ρύπων από αστικά λύματα. Στις μέρες μας υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες που αποσκοπούν στην επεξεργασία των αστικών με σκοπό το απαλλαγμένο από ρύπους νερό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες δραστηριότητες ή να διατεθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα οι ρύποι μέσω αυτών των διεργασιών μειώνονται στα επιτρεπτά όρια (Ευρωπαϊκή Οδηγία 91/271/ΕΟΚ του εκάστοτε τελικού αποδέκτη (ποτάμια, λίμνες, θάλασσα κλπ.). Ως επιβλαβείς ρύποι θεωρούνται τα αιωρούμενα σωματίδια, οργανικές ενώσεις, το άζωτο και ο φώσφορος τα οποία περιέχονται στα αστικά λύματα σε σημαντικές συγκεντρώσεις. Επιπλέον, υπάρχουν ρύποι σε μικρές συγκεντρώσεις (τις τάξης των $\mu\text{g/L}$ ή και λιγότερες) οι οποίοι ονομάζονται μικρορύποι και είναι ανόργανοι και οργανικοί. Οι ανόργανοι ρύποι αφορούν τα βαρέα μέταλλα, ενώ οι οργανικοί παρασιτοκτόνα, αντιβιοτικά, φαρμακευτικά παραπροϊόντα, προσωπικής φροντίδας και υγιεινής παραπροϊόντα κλπ.

Η πλειονότητα των υφιστάμενων ΕΕΛ βασίζεται στο δοκιμασμένο και ευρέως γνωστό σύστημα της ενεργού ιλύος (activated sludge process) το οποίο απομακρύνει αποτελεσματικά τους συμβατικούς ρύπους διασφαλίζοντας την ανθρώπινη υγεία και την προστασία του περιβάλλοντος.

Το κόστος κατασκευής καθώς και η απαιτούμενη ενέργεια των υφιστάμενων ΕΕΛ αποτελούν ανασταλτικούς παράγοντες της χρήσης των συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων. Επίσης, η κλιματική αλλαγή και αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου και υποξειδίου του αζώτου έχει οδηγήσει στην αναζήτηση πράσινων τεχνολογιών με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και εν τέλει χαμηλότερες εκπομπές αέριων ρύπων. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι έχουν ελκύσει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια διότι αποτελούν μια οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία για διαχείριση υγρών αποβλήτων.

Η τεχνολογία των τεχνητών υδροβιότοπων έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο όσον αφορά το σχεδιασμό, το κόστος κατασκευής και τις ενεργειακές απαιτήσεις.

1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της απομάκρυνσης των συμβατικών ρύπων και των οργανικών μικρορύπων από αστικά λύματα με την χρήση τεχνητών υδροβιότοπων. Η διπλωματική εργασία αυτή σκοπεύει στην αποτύπωση των βασικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα για την απομάκρυνση των συμβατικών ρύπων όπως είναι τα ολικά αιωρούμενα στερεά, οργανικές ουσίες (COD, BOD₅, TOC), το άζωτο, ο φώσφορος, το μικροβιακό φορτίο και των ανόργανων και οργανικών μικρορρύπων (βαρέα μέταλλα, παρασιτοκτόνα, φαρμακευτικά, αντιβιοτικά κτλ.)

1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία έχει χωριστεί και αναλυθεί σε 5 επιμέρους κεφάλαια. Το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου συνοψίζεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το γενικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η κοινωνία στις μέρες μας για την διαχείριση των υγρών αποβλήτων και δίνεται επιγραμματικά τα πλεονεκτήματα που μπορεί να εμφανίζουν οι τεχνητοί υδροβιότοποι σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα της ενεργού ιλύος. Στη συνέχεια αναφέρεται ο σκοπός και η δομή της διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 αναφέρονται περιληπτικά εισαγωγικές έννοιες όσον αφορά τα φυσικά συστήματα (nature-based solutions) επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Επίσης, τονίζονται τα μειονεκτήματα των συμβατικών συστημάτων για να κατανοηθεί η ανάγκη χρησιμοποίησης φυσικών συστημάτων επεξεργασίας όπως είναι οι τεχνητοί υδροβιότοποι.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα των τεχνητών υδροβιότοπων και τις δυσκολίες των φυσικών υδροβιότοπων που καταφέρνουν να ξεπεράσουν. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατηγοριοποιούνται με βάση την τεχνολογία τους καθώς και τα πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα της εκάστοτε τεχνολογίας.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα υλικά και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σε ένα τεχνητό υδροβιότοπο. Στην αρχή του κεφαλαίου περιγράφονται τα βασικά βήματα σχεδιασμού και παρατίθενται πληροφορίες για τα είδη φυτών που χρησιμοποιούνται και τον ρόλο τους.

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύονται οι διαφορετικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης των ρύπων (συμβατικών ρύπων και μικρορρύπων) από τα υγρά απόβλητα στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Επιπλέον, γίνεται ανασκόπηση της απομάκρυνσης των διάφορων ρύπων από τους τεχνητούς υδροβιότοπους.

Στο κεφάλαιο 6 διατυπώνονται και συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία σχετικά με την αξιολόγηση των τεχνητών υδροβιότοπων για την απομάκρυνση ρύπων από τα αστικά λύματα. Στο τέλος του κεφαλαίου προτείνονται μελλοντικές δράσεις.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται η λίστα των βιβλιογραφικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Κεφάλαιο 2: Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των φυσικών και συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα τους. Επίσης, περιγράφονται και αναλύονται συνοπτικά οι βασικές έννοιες και αρχές λειτουργίας που αφορούν τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων.

2.1 Εισαγωγικές Έννοιες Φυσικών Συστημάτων

Ως φυσικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων (ευρύτητα γνωστά με τον όρο nature-based solutions) ορίζονται αυτά, στα οποία η επεξεργασία των λυμάτων γίνεται με φυσικά μέσα και διεργασίες ή συνδυασμό αυτών που συμβαίνουν στο περιβάλλον [2]. Τα φυσικά συστήματα θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα μέσα επεξεργασίας διότι παρουσιάζουν ικανοποιητικές αποδόσεις, σχετικά χαμηλό κόστος, σημαντική απομάκρυνση ρύπων, και ευκολία στην λειτουργία και την συντήρηση.

Τα σύστημα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής [3,4]: (α) λίμνες επεξεργασίας (λίμνες σταθεροποίησης ή οξείδωσης, αερόβιες λίμνες, αεριζόμενες λίμνες) (β) εδαφικά συστήματα (γ) συστήματα τεχνικών υδροβιότοπων.

2.2 Χαρακτηριστικά των Φυσικών Συστημάτων Επεξεργασίας

Η σύγκριση των χαρακτηριστικών σχεδιασμού στους διάφορους τύπου φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υδάτων είναι σημαντική για την κατανόηση της γενικότερης

τεχνολογίας τέτοιων συστημάτων. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά επιλογής θέσης και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων [9]. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των συστημάτων είναι η απαραίτητη προεπεξεργασία, είτε με μηχανική ή/και με βιολογική επεξεργασία, πριν την εφαρμογή των αποβλήτων στα φυσικά συστήματα. Επίσης, εκτός από τα εδαφικά συστήματα ταχείας διήθησης, σε όλα τα υπόλοιπα καθίσταται αναγκαία η φυτική βλάστηση η οποία όμως για λόγους υγιεινής δεν καταναλώνεται άμεσα από τους ανθρώπους.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά επιλογής θέσης και χαρακτηριστικά σχεδιασμού φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων [9].

Χαρακτηριστικά	Εδαφικά Συστήματα Βραδείας Διήθησης	Εδαφικά Συστήματα Ταχείας Διήθησης	Εδαφικά Συστήματα Επιφανειακής Ροής	Υγροβιότοποι	Συστήματα με επιπλέοντα υδροχαρή φυτά
Επιδιωκόμενοι σκοποί	Δευτεροβάθμια ή προωθημένη επεξεργασία και μηδενική εκροή	Δευτεροβάθμια ή προωθημένη επεξεργασία ή εμπλουτισμό υδροφόρων	Δευτεροβάθμια ή επεξεργασία με υψηλή απομάκρυνση αζώτου	Δευτεροβάθμια ή προωθημένη επεξεργασία	Δευτεροβάθμια ή προωθημένη επεξεργασία
Τεχνική εφαρμογής	Καταιονισμός ή/και επιφανειακά	Συνήθως επιφανειακά	Καταιονισμός ή/και επιφανειακά	Καταιονισμός ή/και επιφανειακά	Επιφανειακά
Τύποι εδάφους	Αργιλο-πηλώδη αμμοπηλώδη	Αμμώδη – αμμοπηλώδη	Αργιλώδη-ιλοπηλώδη	Αργιλώδη με αδιαπέραστες στρώσεις	Αργιλώδη με αδιαπέραστες στρώσεις
Βάθος εδάφους (m)	>0.6	>1.5	>0.3	<0.6	<1.0
Κλίση	<15% σε καλλιεργήσιμα εδάφη <40 % σε ακαλλιεργήτα	<10% μόνο για την αποφυγή αναχωμάτων	1-8%	<5%	<5%
Κλιματικές συνθήκες	Σε περιόδους ψύχους και βροχών	Πιθανοί μετασχηματισμοί στις περιόδους	Σε περιόδους ψύχους	Σε περιόδους ψύχους	Σε περιόδους ψύχους

		ψύχους			
Υδραυλικό φορτίο (m/έτος)	0.61-6.10	6-90	7.3-56.7	5.5-18.3	5.5-18.3
Απαιτούμενη επιφάνεια (στρ./ $(10^3\text{m}^3/\text{d})$)	60-590	4-60	6.5-48.1	19.2-66.3	19.2-66.3
Ελάχιστη προεργασία	Πρωτοβάθμια επεξεργασία (καθίζηση)	Πρωτοβάθμια επεξεργασία (καθίζηση)	Πρωτοβάθμια επεξεργασία (εσχάρωση)	Πρωτοβάθμια επεξεργασία	Πρωτοβάθμια επεξεργασία
Διάθεση αποβλήτου	Εξατμισο-διαπνοή και διήθηση-κατείδηση	Διήθηση-κατείδηση	Επιφανειακή απορροή και εκατμισο-διαπνοή	Εξατμισο-διαπνοή κατείδηση και απορροή	Μερική εξατμισο-διαπνοή
Φυτική βλάστηση	Απαραίτητη	Προαιρετική	Απαραίτητη	Απαραίτητη	Απαραίτητη

2.3 Σύγκριση Φυσικών και Συμβατικών Συστημάτων

Τα φυσικά συστήματα παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα και για αυτό κερδίζουν όλο και περισσότερο ενδιαφέρον στις Η.Π.Α. και σε χώρες τις Ευρώπης όπως η Γερμανία, η Αυστρία, η Τσεχία, και η Δανία. Σε αυτές τις χώρες τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων χρησιμοποιούνται σε οικισμούς έως 3000 άτομα [9].

Τα υγρά απόβλητα στην περίπτωση των συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας συλλέγονται σε μια κεντρική μονάδα από διάφορες περιοχές συνήθως μακριά από κατοικημένες περιοχές. Η διαδικασία αυτή επιφέρει σημαντικό κόστος και επίσης δεν θεωρείται φιλική προς το περιβάλλον [10]. Επίσης, τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων όπως είναι το σύστημα της ενεργού ιλύος χαρακτηρίζονται από σημαντικό ενεργειακό αποτύπωμα. Περιλαμβάνουν πολλές αντλίες και εξοπλισμό για την παροχή οξυγόνου στους βιολογικούς

αντιδραστήρες (φουσητήρες και διαχυτήτες) το οποίο απαιτεί ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω των μεγάλων ποσοτήτων αέριων ρύπων που παράγουν (διοξειδίου του άνθρακα, οξείδια του αζώτου και μεθάνιο). Επιπρόσθετα, είναι δαπανηρή η κατασκευή μιας τέτοιας μονάδας καθώς και η συντήρηση των μηχανικών μερών της και η διαχείριση των παραπροϊόντων που παράγονται όπως η ιλύς. [10].

Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, τα φυσικά συστήματα βασίζονται στην φιλοσοφία ότι κατασκευάζονται σε κοντινή απόσταση από τον οικισμό, γεγονός το οποίο αυξάνει την βιωσιμότητα τους [11]. Από οικονομικής άποψης το κόστος εγκατάστασης τους είναι συνήθως μικρότερο από τα συμβατικά συστήματα διότι δεν περιλαμβάνουν πολύπλοκες κατασκευές χωρίς ιδιαίτερη χρήση σκυροδέματος και χάλυβα ενώ δεν υπάρχουν έργα επεξεργασίας της ιλύος. Επίσης, στα φυσικά συστήματα η ζήτηση ενέργειας για τη λειτουργία τους είναι χαμηλή γιατί δεν πραγματοποιείται ενεργητικός αερισμός, σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα τα οποία απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας [11,12].

Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τις εγκαταστάσεις των συμβατικών συστημάτων, τα φυσικά συστήματα δεν έχουν υψηλό κόστος συντήρησης καθώς δεν έχουν μηχανικά μέρη τα οποία χρειάζονται συνεχή συντήρηση εκτός από κάποιες αντλίες.

Πολλές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα φυσικά συστήματα όπως καθίζηση, διύλιση, προσρόφιση, οξειδωση, κατακρήμνιση, βιοχημικές διεργασίες (νιτροποίηση, απονιτροποίηση, υδρόλυση, οξειδωση οργανικού άνθρακα). Οι διεργασίες αυτές γίνονται συνήθως ταυτόχρονα στο ίδιο φυσικό σύστημα σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα στα οποία οι διεργασίες γίνονται ξεχωριστά [11,12]. Επίσης, στα φυσικά συστήματα δεν υπάρχει

κόστος διαχείρισης των παραπροϊόντων όπως η ιλύς και θεωρούνται πιο φιλικά στο περιβάλλον καθώς έχουν μικρότερες (άμεσες και κυρίως έμμεσες) εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο αξίζει να σημειωθεί ότι το βασικό μειονέκτημα των φυσικών συστημάτων είναι ότι χρειάζονται μεγαλύτερη έκταση συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα για αυτό είναι η απαραίτητη η εύρεση χαμηλού κόστους εκτάσεων για την κατασκευή τους. Δεν θεωρούνται συστήματα κατάλληλα για πληθυσμούς μεγαλύτερους από 10,000 κατοίκους. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες καθώς και στις Η.Π.Α. χρησιμοποιούνται σε οικισμούς συνήθως έως 3,000 κατοίκους. Επίσης, τα φυσικά συστήματα έχουν και κάποια σχεδιαστικά μειονεκτήματα όσον αφορά τις καιρικές συνθήκες και την προέλευση των λυμάτων. Έχει τονιστεί ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες μειώνεται η απόδοση τους και για αυτό θεωρούνται κατάλληλα για πιο ήπια κλίματα [11,12]. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι βασικές διαφορές των συμβατικών και των φυσικών συστημάτων όσον αφορά το κόστος, την ενέργεια, την εγκατάσταση, την απόδοση, την λειτουργία, το προσωπικό, την συντήρηση, τις οσμές, τις διακυμάνσεις παροχής, την ιλύς, την εμφάνιση, και την έκταση γης [13].

Πίνακας 2.2: Σύγκριση συμβατικών και φυσικών συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων [13].

	Συμβατικά Συστήματα	Φυσικά Συστήματα
Κόστος	Υψηλό κόστος κατασκευής, διατήρησης, συντήρησης και λειτουργίας	Σχετικά Χαμηλό κόστος κατασκευής για διαθέσιμες εκτάσεις χαμηλού κόστους, ελάχιστο κόστος λειτουργίας
Ενέργεια	Υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Εγκατάσταση	Πολλά μηχανικά μέρη (αντλίες, φουσητήρες)	Απουσία μηχανικών μερών εκτός από κάποιες αντλίες
Απόδοση	Συνεχή παροχή υψηλής απόδοσης	Μείωση απόδοσης στα ψυχρά κλίματα
Λειτουργία/ Προσωπικό	Απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για συνεχή παρακολούθηση Διάρκεια ζωής έως 30 έτη	Δεν απαιτείται προσωπικό για συνεχή παρακολούθηση Διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 30 έτη
Διακυμάνσεις παροχής	Υψηλές παροχές οδηγούν σε μειωμένη απόδοση	Ανθεκτικά σε μεγάλες διακυμάνσεις
Ιλύς	Σημαντική παραγωγή, απομάκρυνση και επεξεργασία σε καθημερινή βάση	Μηδενική παραγωγή
Εμφάνιση	Μη ελκυστική	«Πράσινη εμφάνιση»
Έκταση γης	Μικρή έκταση	Μεγάλη έκταση

Κεφάλαιο 3: Κατηγοριοποίηση Τεχνητών Υγροβιότοπων

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αρχικά περιγράφονται περιληπτικά οι φυσικοί υγροβιότοποι ως συστήματα επεξεργασίας καθώς και τα πλεονεκτήματά τους. Λόγω των περιορισμών που παρουσιάζουν αναπτύχθηκαν τεχνητά συστήματα, οι τεχνητοί υγροβιότοποι. Στη συνέχεια οι τεχνητοί υγροβιότοποι κατηγοριοποιούνται και το κάθε σύστημα αναλύεται διεξοδικά.

3.1 Υγροβιότοποι-Ορισμός

Υγροβιότοποι χαρακτηρίζονται οι περιοχές όπου είτε το νερό καλύπτει το έδαφος είτε η έκταση γης είναι κορεσμένη με νερό [14]. Το νερό προέρχεται από υπόγεια ύδατα τα οποία υπάρχουν κοντά στην επιφάνεια και διαφεύγουν μέσω ενός υδροφόρου ορίζοντα ή μιας πηγής. Το νερό μπορεί επίσης να προέρχεται από λίμνες, ποτάμια ή ακόμα και από την θάλασσα σε περιπτώσεις παράκτιων περιοχών με αυξημένες περιπτώσεις παλιρροιών [15]. Ο κορεσμός του νερού αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για την ανάπτυξη του εδάφους και καθορίζει την βλάστηση που αναπτύσσεται στον υγροβιότοπο. Τα φυτά ενός υγροβιότοπου είναι συνήθως γνωστά ως υδρόφυτα λόγω της εκτεταμένης παρουσίας νερού. Παρόλα αυτά σε υγροβιότοπους που σε συγκεκριμένες περιόδους του έτους επικρατεί ξηρασία μπορούν να αναπτυχθούν δέντρα και άλλη εύρωστη βλάστηση [14,15]. Η φυτική βλάστηση που αναπτύσσεται στους υγροβιότοπους αποτελεί το βασικό υπόστρωμα ανάπτυξης βακτηρίων τα οποία διασπών/οξειδώνουν τα συστατικά των λυμάτων.

Οι υγροβιότοποι είναι πολύ σημαντικά συστήματα διότι φιλοξενούν διάφορες ποικιλίες χλωρίδας και πανίδας καθώς έχουν και την δυνατότητα μέσω ποικίλων χημικών και βιολογικών

διεργασιών να καθαρίζουν λύματα. Εκτός από την χρήση τους στον καθαρισμό λυμάτων, συμβάλλουν στην αποτροπή πλημμυρών, και στην επαναφόρτιση των υπόγειων υδάτων [16]. Στον καθαρισμό λυμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο φυσικοί όσο και τεχνητοί υγροβιότοποι με τους πρώτους να έχουν περιορισμένη χρήση.

Τα πλεονεκτήματα των υγροβιότοπων θα μπορούσαν να συνοψιστούν ως εξής [30]:

1. Εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων. Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του υγροβιότοπου, το κλίμα, τα γνωρίσματα της λεκάνης απορροής κ.α. αποτελούν τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν στον εμπλουτισμό.
2. Ανάσχεση πλημμυρικών φαινομένων.
3. Παγίδευση ιζημάτων και άλλων ουσιών.
4. Αποθήκευση και ελευθέρωση θερμότητας. Η μεγάλη ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα του νερού το καθιστούν αποθήκη θερμότητας κατά την θερινή περίοδο την οποία απελευθερώνουν τους χειμερινούς μήνες.
5. Απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα. Η βλάστηση που αναπτύσσεται έχει την δυνατότητα να δεσμεύει σημαντικές ποσότητες του διοξειδίου του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα.
6. Δέσμευση ηλιακής ακτινοβολίας και στήριξη τροφικών πλεγμάτων.

3.2 Φυσικοί Υγροβιότοποι

Ως φυσικοί υγροβιότοποι χαρακτηρίζονται οι μεταβατικές περιοχές μεταξύ χερσαίων και υδάτινων περιοχών και είναι είτε μόνιμα είτε εποχικά κορεσμένοι με νερό. Υπάρχουν αρκετοί τύποι υγροβιότοπων όπως έλη, βάλτοι, δάση, υγρά λιβάδια, και παράκτιοι υγροβιότοποι,

υγροβιότοποι από βρύα, μούσκλια, και αναδύμενα υδροχαρή φυτά [17]. Παρόλες τις διαφορές τους όλοι οι τύποι υγροβιότοπων έχουν κάποιες βασικές ομοιότητες όπως ότι το νερό έχει σχετικά μικρό βάθος όλο το έτος, ότι τα εδάφη των υγροβιότοπων διαφέρουν σημαντικά από τα εδάφη των κοντινών τους περιοχών, και τέλος ότι παρουσιάζουν ιδιαίτερους τύπους βλάστησης.

Τα παλαιότερα χρόνια οι υγροβιότοποι καταστρέφονταν για να επεκταθούν οι πόλεις ή για να δημιουργηθούν περισσότερα αγροτικά εδάφη. Στις Η.Π.Α χρησιμοποιούσαν την αποστράγγιση ή την επιχωμάτωση των υγροβιότοπων για να αυξήσουν τα αστικά ή τα αγροτικά εδάφη με αποτέλεσμα να χαθεί έως και το 50% των φυσικών υδροβιότοπων [18]. Οι κυβερνήσεις τα τελευταία χρόνια κατανόησαν πλήρως την αξία των υγροβιότοπων για αυτό οι φυσικοί υγροβιότοποι προστατεύονται από συμβάσεις όπως η σύμβαση Ramsar και η διάσκεψη του Ρίο για το περιβάλλον και την ανάπτυξη (Agenda 21) για να αποφευχθεί οποιαδήποτε μετατροπή τους [19,20].

Οι υγροβιότοποι θεωρούνται τα σπουδαιότερα οικοσυστήματα τα οποία έχουν την ικανότητα να αφαιρούν διάφορους ε όπως είναι οι οργανικές ουσίες, τα αιωρούμενα στερεά , και το άζωτο [21]. Η απομάκρυνση των ρύπων βασίζεται σε ποικίλες διεργασίες όπως καθίζηση, διύλιση, αποθήκευση, εναλλαγή ιόντων, πρόσληψη θρεπτικών συστατικών, πτητικοποίηση, αμμωνιοποίηση, νιτροποίηση, απονιτροποίηση, προσρόφιση, βιολογική διάσπαση.

3.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι

Η χρήση τεχνητών υδροβιότοπων για τον καθαρισμό αποβλήτων έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω της ικανότητάς τους να μειώνουν και να μετασχηματίζουν πλήθος ρύπων.

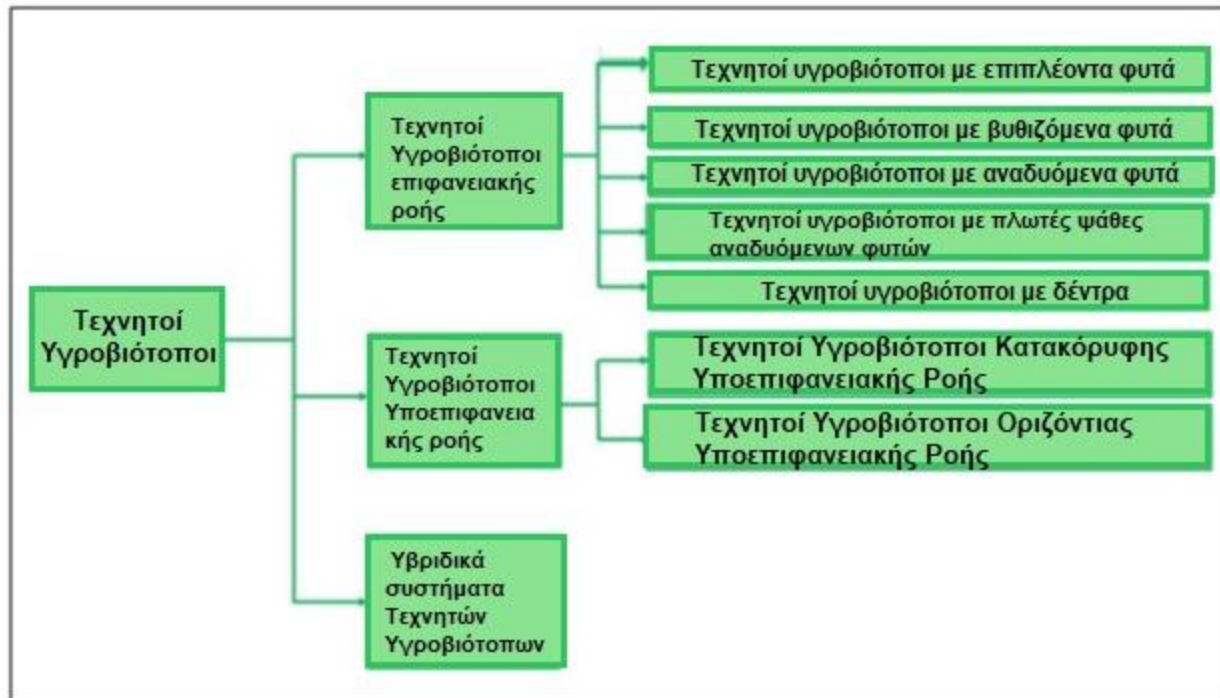
Οι τεχνητοί υδροβιότοποι αναπτύσσονται από το 1960 και σχηματίζονται σε περιοχές που προηγουμένως δεν υπήρχε υδροβιότοπος. Πιο συγκεκριμένα η κατασκευή τους στοχεύει στην χρήση διεργασιών που έχουν παρατηρηθεί στους φυσικούς υδροβιότοπους για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων όσον αφορά την απομάκρυνση ρύπων κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες με υψηλή αποδοτικότητα. Όμοια με τους φυσικούς υδροβιότοπους, χρησιμοποιούν τον ήλιο, τον αέρα, το νερό, το έδαφος και τη βιομάζα για παροχή ενέργειας. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι παρέχουν επιπρόσθετα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τους φυσικούς, όπως η επιλογή τοποθεσίας, η ευελιξία στο μέγεθος και ο έλεγχος των υδραυλικών οδών και ο χρόνος παραμονής [23]. Στους τεχνητούς υδροβιότοπους τα αναπτυσσόμενα φυτά στοχεύουν κυρίως στην μόνωση των συστημάτων στις περιπτώσεις υποεπιφανειακής ροής, στην παροχή οξυγόνου σε περιοχές που απουσιάζει, στην παροχή επιφάνειας για προσκολλημένη βιομάζα, στην μείωση του ανέμου που επιτρέπει καλύτερη καθίζηση των αιωρούμενων σωματιδίων, και τέλος στην πρόληψη των θρεπτικών συστατικών [24-26].

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι συναντώνται συνήθως σε αγροτικές, και ορεινές περιοχές που δεν υπάρχει ούτε αποχετευτικό σύστημα ούτε κεντρική μονάδα επεξεργασίας λυμάτων. Αστικά υγρά απόβλητα, αποστραγγίσεις ορυχείων, αστικές απορροές, υγρά απόβλητα κτηνοτροφίας, αγροτικά λύματα, βιομηχανικά λύματα, εκροές από διυλιστήρια κ.α. είναι κάποια από τα υγρά απόβλητα που επεξεργάζονται σε τεχνητούς υδροβιότοπους [27]. Ειδικά για την επεξεργασία των λυμάτων η χρήση τεχνητών υδροβιότοπων μπορεί να προσφέρει σημαντικές αποδόσεις στην

απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα των αιωρούμενων στερεών και του αζώτου. Για την απομάκρυνση του φωσφόρου δεν ενδείκνυται η χρήση τους καθώς δεν είναι συστηματική.

Η κατηγοριοποίηση των τεχνητών υδροβιότοπων γίνεται βάσει συγκεκριμένων χαρακτηριστικών τους, είτε με βάση την ύπαρξη (ή όχι) ελεύθερης επιφάνειας υγρού είτε με το είδος φυτού που υπάρχει στο σύστημα. Με βάση την πρώτη κατηγοριοποίηση διακρίνονται δυο μεγάλες κατηγορίες (εικόνα 3.1): τεχνητοί υδροβιότοποι επιφανειακής ροής και τεχνητοί υδροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής.

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι επιφανειακής ροής διαχωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το είδος του φυτού που υπάρχει στο σύστημα: (α) τεχνητοί υδροβιότοποι με επιπλέοντα φυτά, (β) τεχνητοί υδροβιότοποι με βυθιζόμενα φυτά, (γ) τεχνητοί υδροβιότοποι με αναδύμενα φυτά, (δ) τεχνητοί υδροβιότοποι με πλωτές ψάθες αναδύμενων φυτών, και (ε) τεχνητοί υδροβιότοποι με δέντρα. Τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν σε οριζόντια και κατακόρυφα, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής. Τέλος υπάρχουν τα υβριδικά συστήματα υδροβιότοπων.



Εικόνα 3.1: Κατηγοριοποίηση των τεχνητών υγροβιότοπων.

3.3.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιφανειακής Ροής

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής αποτελούνται ως επί το πλείστον από ρηχές λεκάνες ή κανάλια με χώμα, ή άλλα υποστρώματα εδάφους, όπου είναι φυτεμένα τα μακρόφυτα. Η ροή γίνεται πάνω από το στρώμα του εδάφους με βάθος περίπου 10-60 εκατοστά και με ελεύθερη επιφάνεια στην ατμόσφαιρα [28]. Η αποφυγή της ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα επιτυγχάνεται είτε με μονώσεις (χρήση αργίλου ή μονωτικών γεωμεμβρανών) είτε με το ίδιο το έδαφος εάν η σύστασή του εξασφαλίζει πολύ χαμηλή διαπερατότητα. Στις λεκάνες ή τα κανάλια στην συνέχεια προστίθεται το κατάλληλο έδαφος για την φύτευση των υδροχαρών

φυτών, και το νερό ρέει σε σχετικά μικρό βάθος οριζόντια πάνω στην επιφάνεια τους εδάφους για την επεξεργασία των λυμάτων [4].

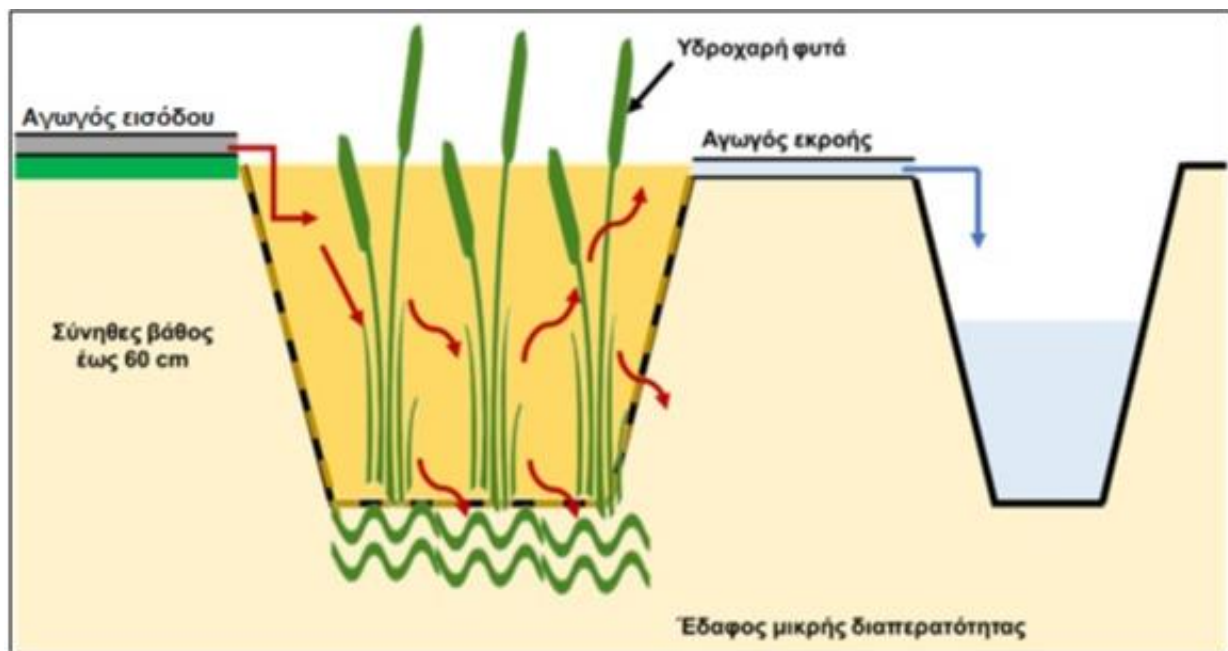
Τα υγρά απόβλητα εισάγονται από τη μία άκρη του τεχνητού υγροβιότοπου και ρέουν προς της έξοδο η οποία είναι τοποθετημένη αντιδιαμετρικά της εισόδου σε οριζόντια πορεία. Ο υγροβιότοπος έχει μια ελαφριά κλίση κατάντη ώστε να ρέουν τα λύματα προς την έξοδο υπό βαρύτητα. Κατά τη διάρκεια της ροής τα προς επεξεργασία λύματα έρχονται σε επαφή με αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες ζώνες στις οποίες πραγματοποιείται η απομάκρυνση των ρύπων (Εικόνα 3.2) [29]. Σε αυτούς τους τύπους τεχνητών υγροβιότοπων, οι οργανικοί ρύποι απομακρύνονται συνήθως μέσω του βακτηριακού μεταβολισμού και της καθίζησης, τα αιωρούμενα στερεά μέσω της καθίζησης λόγω βαρύτητας, το άζωτο μέσω νιτροποίησης/απονιτροποίησης, ενώ η απομάκρυνση φωσφόρου είναι σχετικά χαμηλή [22].

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα συγκρινόμενοι με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων (σύστημα ενεργού ιλύος) [30]. Τα πλεονεκτήματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Αποτελεσματική επεξεργασία με ελάχιστο μηχανικό εξοπλισμό.
- Χαμηλότερο κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης.
- Η λειτουργία τους για δευτεροβάθμια επεξεργασία είναι δυνατή σε κάθε κλίμα με μόνη εξαίρεση να αποτελούν τα πολύ ψυχρά κλίματα, ενώ η λειτουργία τους για τριτοβάθμια επεξεργασία είναι πιθανή σε θερμά κλίματα.
- Δεν παράγουν ιλύ που απαιτεί επιπρόσθετη επεξεργασία.
- Αποτελούν αξιόπιστη λύση για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε οικισμούς κάτω των πέντε χιλιάδων κατοίκων.

Τα μειονεκτήματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Απαίτηση για μεγάλη έκταση γης ιδιαίτερα στις περιπτώσεις απομάκρυνσης αζώτου και φωσφόρου.
- Ο φώσφορος, τα μέταλλα, και κάποια οργανικά συσσωρεύονται με το πέρασμα του χρόνου καθώς προσροφώνται στα ιζήματα.
- Στα ψυχρά κλίματα, ο ρυθμός απομάκρυνσης του οργανικού άνθρακα μειώνεται.
- Η ταχεία νιτροποίηση της αμμωνίας περιορίζεται λόγω του ότι το μεγαλύτερο μέρος του νερού είναι ανοξικό.
- Συχνά υπάρχουν προβλήματα με εκλυόμενες οσμές, ενώ προσελκύουν και κουνούπια



Εικόνα 3.2: Τεχνητός υδροβιότοπος επιφανειακής ροής

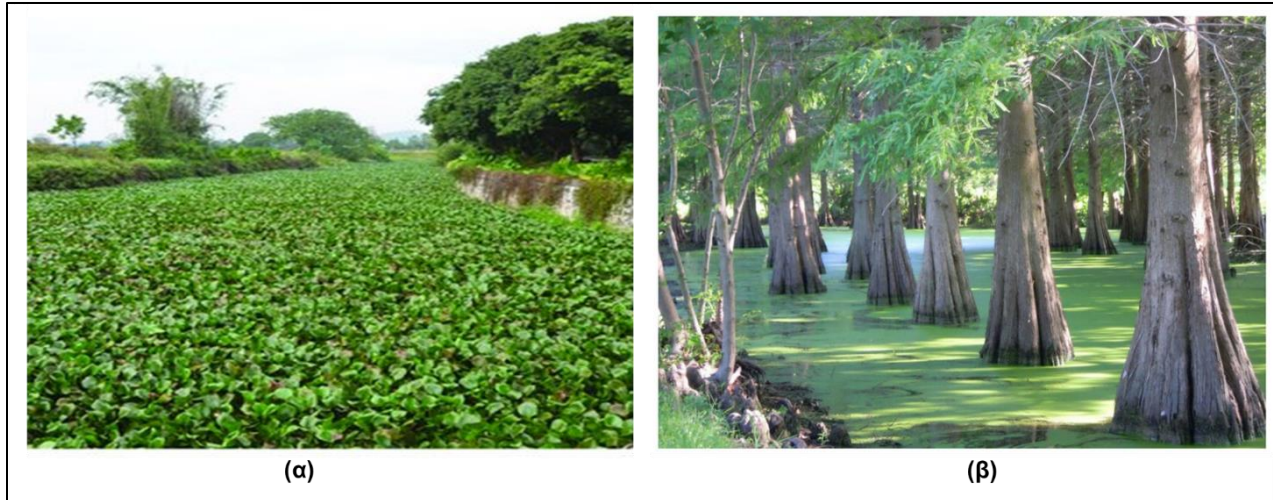
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαφορετικά είδη φύτευσης στους τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής ροής.

3.3.1.1 Τεχνητοί Υδροβιότοποι με Επιπλέοντα Φυτά

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι με επιπλέοντα φυτά χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες:

- Τεχνητοί Υδροβιότοποι με Ελεύθερα Επιπλέοντα Φυτά

Τα επιπλέοντα φυτά που χρησιμοποιούνται στους τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής ροής διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους όσο προς την μορφή και τον βιότοπό τους. Για παράδειγμα μπορεί να είναι είτε μεγάλα φυτά με μεγάλα φύλλα και ρίζες όπως το *Eichhornia crassipes* το οποίο είναι τύπος υδάτινου υάκινθου, και το *Pistia stratiotes*, είτε πολύ μικρά φυτά με μικροσκοπικές ρίζες όπως τα Lemnaceae (για παράδειγμα *Lemna* spp., *Sprodelia polytricha* ή *Wolffia* spp.) (Εικόνα 3.3) [31]. Όλοι οι τύποι ελεύθερων επιπλεόντων φυτών είναι από τα ταχύτερα αναπτυσσόμενα φυτά. Τα *E. Crassipes* και *P. stratiotes* χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε τροπικά και υποτροπικά κλίματα καθώς είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε ψυχρά κλίματα, ενώ τα Lemnaceae μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε κλίμα [32]. Οι τύποι υδροβιότοπων που χρησιμοποιούσαν ελεύθερα επιπλέοντα φυτά μελετήθηκαν διεξοδικά τις δεκαετίες 1970 και 1980. Ωστόσο το κόστος λειτουργίας και συντήρησής τους είναι υψηλό λόγω της συνεχόμενης συγκομιδής φυτών και για αυτό δεν χρησιμοποιήθηκαν σε ευρεία κλίμακα [33].



Εικόνα 3.3: Τεχνητός υδροβιότοπος επιφανειακής ροής με (α) *Eichhornia crassipes* (υάκινθος νερού) στο Langtou κοντά στο Guangzhou, και με (β) η *Lemna* spp. (duckweed) and *Taxodium distichum* (baldcypress) σχεδιασμένο για την επεξεργασία της απορροής των όμβριων υδάτων στο Ορλάντο της Φλόριντα [22].

- Τεχνητοί Υδροβιότοποι με Επιπλέοντα Φυτά με Φύλλα

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι με επιπλέοντα φυτά με φύλλα κατασκευάζονται με είδη φυτών που έχουν ρίζες στο υπόστρωμα και τα φύλλα τους σε μακριούς μίσχους επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού. Παραδείγματα τέτοιων μακρόφυτων αποτελούν τα νούφαρα (*Nymphaea* spp.), το spatterdock (*Nuphar lutea*) ή ο Ινδικός λωτός (*Nelumbo nucifera*) (Εικόνα 3.4^α). Τα φυτά αυτής της ομάδας έχουν συνήθως μεγάλα ριζώματα και φύλλα που επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού και συνδέονται με τα ριζώματα με μακριούς μίσχους. Μέχρι σήμερα πολλοί λίγοι τεχνητοί υδροβιότοποι χρησιμοποιούν τέτοιου είδους μακρόφυτα για απομάκρυνση ρύπων από λύματα [22].

3.3.1.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι με Βυθιζόμενα Φυτά

Τα βυθιζόμενα φυτά στους τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής έχουν τις ρίζες τους στην εδαφική στρώση και όλο το φυτό είναι βυθισμένο στο νερό. Αυτά τα φυτά προσλαμβάνουν τα απαραίτητα συστατικά για την επιβίωση τους από το έδαφος ., Παρόλα αυτά έχει αναφερθεί ότι κάποια από αυτά μπορούν να απορροφούν θρεπτικά συστατικά που βρίσκονται στο νερό [34]. Η χρήση των βυθισμένων φυτών στους υγροβιότοπους είναι περιορισμένη σε νερά με υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου και χαμηλές αιωρούμενων στερεών διότι υψηλές συγκεντρώσεις των τελευταίων περιορίζουν την διείσδυση της ακτινοβολίας που είναι απαραίτητη για την φωτοσύνθεση των φυτών. Για αυτό τον λόγο η χρήση των φυτών αυτών περιορίζεται στην τριτοβάθμια επεξεργασία [22]. Το *Myriophyllum spicatum* είναι ένα είδος βυθιζόμενου φυτού που έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλης κλίμακας υγροβιότοπους (Εικόνα 3.4β) [35]. Επιπρόσθετα έχουν χρησιμοποιηθεί τα *Najas guadalupensis* και τα *Ceratophyllum demersum* που συναντώνται στα Everglades στην Φλόριντα [22]. Όλα αυτά τα είδη βυθισμένων φυτών καλύπτονται από άλγη , τα οποία εξυπηρετούν στην απομάκρυνση των ρύπων μέσω απελευθέρωσης οξυγόνου και πρόσληψη θρεπτικών συστατικών. Παρόλα αυτά δεν πρέπει να υπάρχει υπερβολική ανάπτυξη αλγών διότι εμποδίζεται η διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας [22].



Εικόνα 3.4: Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής με (α) *Nuphar lutea* (spatterdock) σχεδιασμένο για τριτογενή επεξεργασία στο Ορλάντο της Φλόριντα, και με (β) βυθιζόμενα φυτά (κυρίως *Myriophyllum spicatum*, water milfoil) στο Μόντρεαλ του Καναδά [22].

3.3.1.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι με Αναδύμενα Φυτά

Μια τυπική διάταξη υγροβιότοπου αναδύμενων φυτών αποτελείται από μια λεκάνη με ένα στρώμα εδάφους πάχους 20-30 [cm] άνω του οποίου υπάρχουν τα λύματα βάθους 20-40 [cm], και μια μικρή συστάδα φυτών (Εικόνα 3.5). Τα *Phragmites australis* (κοινό καλάμι), *Typha* spp. (Ψαθί)) και *Scirpus/Schoenoplectus* spp. (Κυπερίδες) είναι τα πιο κοινά φυτά που συναντώνται σε αυτή την κατηγορία υγροβιότοπων. Το μικρό βάθος νερού, η χαμηλή ταχύτητα ροής και η παρουσία των μίσχων και των υπολειμμάτων των φυτών ρυθμίζουν τη ροή του νερού [36]. Σε τέτοια συστήματα παρατηρούνται συχνά αεριζόμενες ζώνες κοντά στην επιφάνεια του νερού λόγω της παραγωγής οξυγόνου από τα άλγη και ανοξικές ή ακόμα και αναερόβιες ζώνες κοντά στο πυθμένα [22]. Στην Ευρώπη, αυτή η τεχνολογία ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και το 1967 στο Lelystand της Ολλανδίας και στο Keszthely της Ουγγαρίας

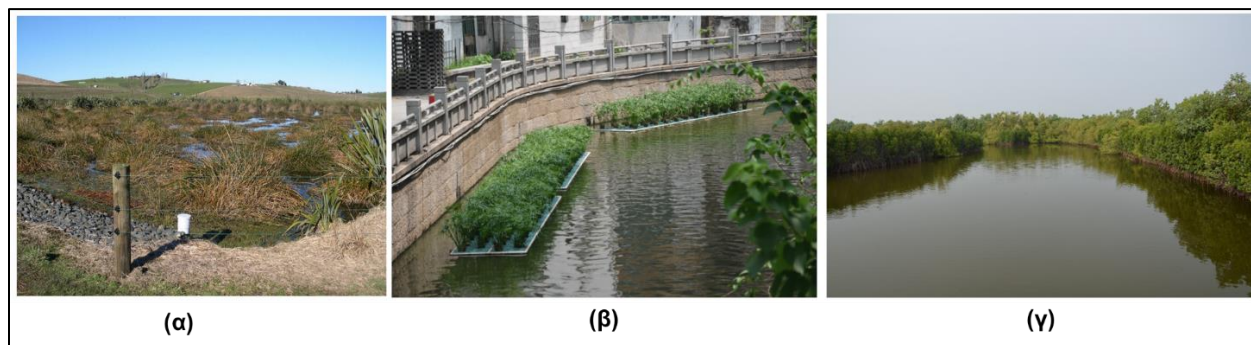
κατασκευάστηκαν τεχνητοί υγροβιότοποι με αναδύμενα φυτά σε πλήρη κλίμακα [37,38].

3.3.1.4 Τεχνητοί Υγροβιότοποι με Πλωτές Ψάθες Αναδύμενων Φυτών

Μερικά αναδύμενα μακρόφυτα είναι ικανά να σχηματίσουν επιπλέοντα στρώματα, παρόλο που τα μεμονωμένα φυτά τους δεν είναι ικανά για τέτοια ύπαρξη (Εικόνα 3.5β). Πλωτές ψάθες αναδύμενων φυτών συναντώνται σε τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής σε όλο τον κόσμο τόσο σε εύκρατα όσο και σε τροπικά κλίματα [22]. Τα αναδύμενα φυτά μεγαλώνουν σε μια ψάθα/χαλάκι το οποίο επιπλέει στο νερό, αντί να μεγαλώνουν και να ριζώνουν στον πυθμένα του νερού. Αυτό τα καθιστά ικανά να αντιμετωπίζουν τις μεγάλες διακυμάνσεις στα βάθη του νερού που είναι χαρακτηριστικές των λιμνών όμβριων υδάτων [39]. Επίσης, απορροφούν τα θρεπτικά συστατικά απαραίτητα για την ανάπτυξή τους άμεσα από την στήλη του νερού και όχι από τον πυθμένα, γεγονός που συμβάλει στην αύξηση του ρυθμού πρόσληψης θρεπτικών συστατικών [39]. Υλικά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιους τύπους υγροβιότοπων είναι τα αιωρούμενα καλώδια, το φενιζόλ, οι χορδές από τύρφη καρύδας η το μπαμπού [40,41].

3.3.1.5 Τεχνητοί Υγροβιότοποι με Δέντρα

Η χρήση δέντρων για την κατασκευή τεχνητών υγροβιότοπων επιφανειακής ροής για την επεξεργασία αποβλήτων είναι σπάνια. Υπάρχουν ωστόσο κάποια λίγα παραδείγματα δέντρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία λυμάτων που αξίζει να αναφερθούν όπως *Taxodium distichum* (φαλακρό κυπαρίσσι), το *Melaleuca quinquenervia* (χάρτινο τεϊόδεντρο) ή τα μαγγρόβια (Εικόνα 3.5γ) [22].



Εικόνα 3.5: Τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής με (α) αναδύομενα φυτά (*Eleocharis sphacelata*) στην Otorohanga, Νέα Ζηλανδία, (β) πλωτές ψάθες φυτεμένος με *Cyperus alternifolius* στην Ningbo, Κίνα, και (γ) με μαγγρόβια (*Kandelia candel*) στον κόλπο Dapeng, Ταϊβάν [22].

3.3.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Υποεπιφανειακής Ροής

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής κατασκευάζονται με σκοπό την δευτεροβάθμια ή την τριτοβάθμια επεξεργασία των αστικών λυμάτων. Οι υγροβιότοποι αυτού του τύπου κατασκευάζονται σε λεκάνες με στεγανοποιημένους πυθμένες και περιέχουν άμμο/χαλίκι ή κάποιο άλλο κατάλληλο πληρωτικό υλικό για την ανάπτυξη της υδροχαρούς βλάστησης [42]. Στα συστήματα αυτά τα υγρά απόβλητα τροφοδοτούνται και ρέουν ακριβώς μέσα από το πληρωτικό υλικό. Τα λύματα ρέουν μέσω του κοκκώδους μέσου (συνήθως άμμος) και έρχονται σε επαφή με τους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται στο πληρωτικό υλικό και πάνω στις ρίζες των φυτών και τα ριζώματα φυτών. Οι ρύποι από τα υγρά απόβλητα απομακρύνονται μέσω ενός ευρέως φάσματος φυσικών και βιοχημικών διεργασιών αλλά και

μέσω της προσρόφησης στις ρίζες του υδροχαρούς φυτού [42]. Πιο συγκεκριμένα, η απομάκρυνση του BOD και των αιωρούμενων στερεών πραγματοποιείται μέσω διήθησης, καθίζησης, και αποδόμησης από μικροοργανισμούς, η απομάκρυνση του αζώτου επιτυγχάνεται μέσω της νιτροποίησης και απονιτροποίησης, πρόσληψης από τα φυτά και διήθησης, η απομάκρυνση του φωσφόρου εξαρτάται λόγω κατακρήμνισης, η απομάκρυνση μετάλλων επιτυγχάνεται μέσω της προσρόφησης τους και ιοντοανταλλαγής, και η απομάκρυνση των παθογόνων ρύπων βασίζεται στην ταχύτητα ροής [42].

Η ανάπτυξη των τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής ξεκίνησε την δεκαετία του 1960 στην Γερμανία. Ενώ ο αρχικός σχεδιασμός εξελίχθηκε για να βασίζεται σε ροή διαμέσου χαλικιού ή χονδρόκοκκης άμμου, και όχι αργιλικών εδαφών, η βασική λογική της διέλευσης των λυμάτων οριζοντίως μέσω ενός πορώδους μέσου παραμένει η ίδια,. Οι CW-HSSF χρησιμοποιούνται ευρέως για την δευτεροβάθμια και την τριτοβάθμια επεξεργασία οικιακών και βιομηχανικών λυμάτων [41]. Για τους CW-HSSF που επεξεργάζονται αστικά λύματα συνήθως η πρωτοβάθμια επεξεργασία επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης σηπτικών δεξαμενών ή δεξαμενών Imhoff. Τέτοιου είδους συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως σε χώρες όπως η Τσεχία, η Ισπανία, η Πορτογαλία, η Νικαράγουα. Σε περιοχές με εύκρατο ή τροπικό κλίμα τέτοιες μονάδες συνδυάζονται συχνά με Αναερόβιους Αντιδραστήρες με Ανακλαστήρες (ABR) και Αναερόβιους Αντιδραστήρες Ανοδικής Ροής Κλίνης Ιλύος (UASB).

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής παρόλο που απαιτούν μεγάλη έκταση για τη δημιουργία τους, παρουσιάζουν πλήθος πλεονεκτημάτων τα οποία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής [30]:

- Χαμηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης για επεξεργασία λυμάτων σε δευτεροβάθμιο και τριτοβάθμιο επίπεδο.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (έως και 50 χρόνια).
- Απλή και εύκολη λειτουργία.
- Ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας.
- Απουσία ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- Εύκολη επέκταση οποιαδήποτε χρονική στιγμή.
- Η διαδικασία καθαρισμού παραμένει σταθερή κάτω από διάφορες καιρικές συνθήκες.
- Απουσία δυσάρεστων οσμών και κουνουπιών.
- Δεν παράγουν ιλύ

Οι υγροβιότοποι αυτοί ταξινομούνται με βάση την κατεύθυνση της ροής σε οριζόντιους και κατακόρυφους. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής τροφοδοτούνται συνεχώς ενώ αυτοί της κατακόρυφης ροής μπορούν να τροφοδοτούνται είναι συνεχώς είτε κατά διαστήματα [22]. Η διαφορετική αυτή τροφοδοσία τους έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζουν διαφορετικές συνθήκες οξειδοαναγωγής στα μέσα διήθησης. Στα συστήματα οριζόντιας ροής είναι ανοξικά/ αναερόβια ενώ στα συστήματα κατακόρυφης ροής είναι αερόβια.

3.3.2.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής

Η κατασκευή τέτοιων υγροβιότοπων ξεκινά με την δημιουργία λεκανών με βάθος περίπου 40-60 εκατοστά και κλίση 1 έως 2% και στη συνέχεια αυτές στεγανοποιούνται είτε με πεπιεσμένη αργιλική στρώση είτε με γεωμεμβράνη είτε με σκυρόδεμα για την αποφυγή

διαρροής στα υπόγεια ύδατα. Τα υδροχαρή φυτά φυτεύονται και αναπτύσσονται σε ένα πληρωτικό υλικό (χαλίκι ή άμμος) βάθους 40-60 εκατοστών και με διάμετρο κόκκων 2.5-5 εκατοστά (Εικόνα 3.6) [43].

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, τα προεπεξεργασμένα λύματα ρέουν με αργό ρυθμό κάτω από την επιφάνεια του υγροβιότοπου η οποία είναι γεμάτη από πορώδη υλικά στα οποία έχουν φυτευτεί αναδυόμενα φυτά. Το μικρό βάθος του νερού, η σχετικά μικρή κλίση, το μεγάλο μήκος διαδρομής, και η παρουσία φυτικών υπολειμμάτων είναι οι κύριοι λόγοι που εξασφαλίζουν τον αργό ρυθμό ροής των λυμάτων. Τα λύματα εισέρχονται από την μία άκρη του υγροβιότοπου, κινούνται σε οριζόντια κατεύθυνση εντός του πορώδους υλικού, και η κίνηση τους είναι αντιδιαμετρικά της εισόδου [43]. Όταν φτάσουν στην ζώνη εκροής (έξοδος) συλλέγονται και απομακρύνονται από το σύστημα. Τα λύματα ρέοντας από το πληρωτικό υλικό διήθησης περνούν από αερόβιες, ανοξικές, και αναερόβιες ζώνες το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τον καθαρισμό τους [24]. Οι αερόβιες περιοχές παρατηρούνται κοντά στις ρίζες και στα ριζώματα των φυτών σε στενές περιορισμένες ζώνες. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις ρίζες και στα ριζώματα αναπτύσσονται αερόβιοι μικροοργανισμοί οι οποίοι χρησιμοποιώντας το οξυγόνο έχουν την δυνατότητα να αποικοδομούν τους ρύπους από τα απόβλητα, εξασφαλίζοντας καλύτερη επεξεργασία. Σε αυτό το είδος των τεχνητών υγροβιότοπων το ριζικό σύστημα των φυτών είναι ο μόνος ουσιαστικός τρόπος παροχής οξυγόνου στα λύματα.

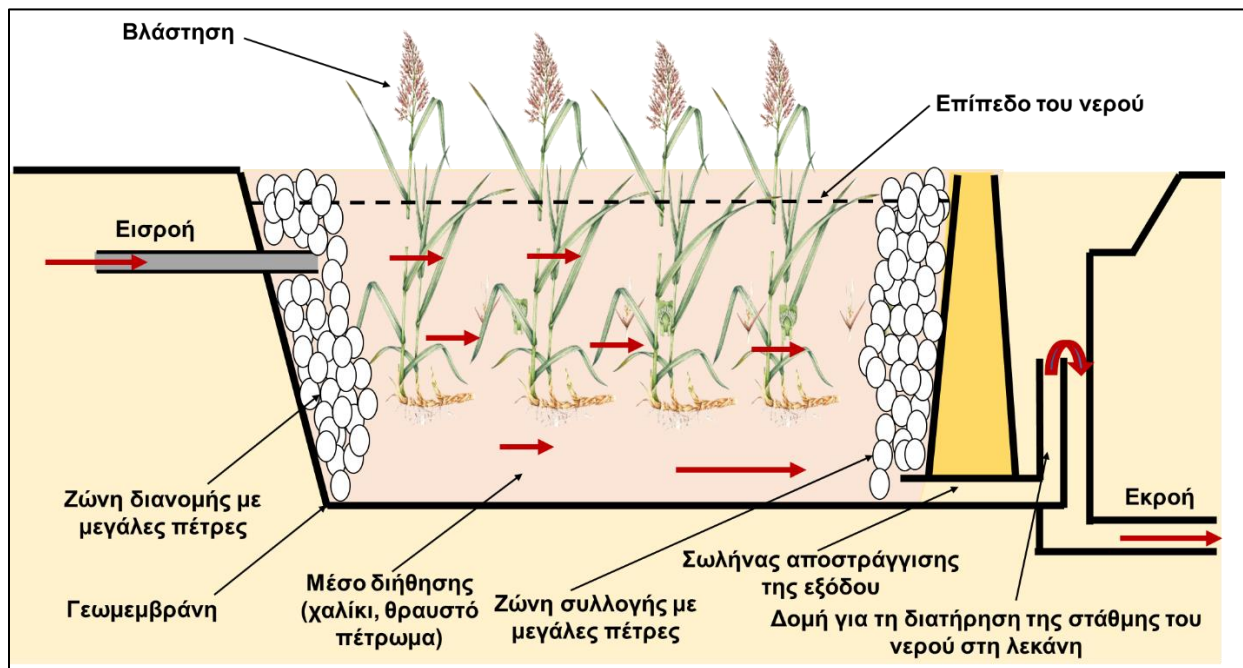
Τα υδροχαρή φυτά που αναπτύσσονται στους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής εκτός από την δέσμευση των θρεπτικών ουσιών, έχουν την δυνατότητα να μονώνουν την επιφάνεια σε περιόδους χαμηλών θερμοκρασιών, να παρέχουν το κατάλληλο

υπόστρωμα για βακτήρια, και να απελευθερώνουν εκκρίσεις με αντιμικροβιακές ιδιότητες [22]. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα φυτά που χρησιμοποιούνται είναι το *Phragmites australis* (Κοινό καλάμι), το *Typha* spp. (Ψαθί), *Phalaris arundinacea* (Reed canarygrass), *Scirpus* (Κυπερίδες) (*Schoenoplectus*) spp. (Bulrush) και *Iris pseudacorus* (Ιριδα) [22].

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής έχουν την δυνατότητα να απομακρύνουν σε υψηλά ποσοστά τα οργανικά και αιωρούμενα σωματίδια. Τα οργανικά αποικοδομούνται ή οξειδώνονται τόσο από αναερόβιους όσο από αερόβιους μικροοργανισμούς, με τους τελευταίους να βρίσκονται μόνο κοντά στις ρίζες και τα ριζώματα που απελευθερώνεται οξυγόνο [44]. Τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται είτε με καθίζηση η οποία ευνοείται από τις μικρές ταχύτητες ροής των λυμάτων είτε με διήθηση διαμέσου του εδαφικού στρώματος. Επιπρόσθετα οι ανοξικές/αναερόβιες συνθήκες που επικρατούν ευνοούν την απονιτροποίηση, παρόλα αυτά λόγω της απουσίας οξυγόνου, η νιτροποίηση ελαχιστοποιείται όπως και η εξάτμιση καθώς απουσιάζει η ελεύθερη επιφάνεια νερού. Η απομάκρυνση του αζώτου λόγω της απορρόφησης του από τα φυτά είναι παρόμοια με τους φυσικούς υδροβιότοπους [45]. Επιπλέον, η αφαίρεση του φωσφόρου είναι χαμηλή λόγω των κοινών υλικών διήθησης όπως χαλίκι και άμμος [46]. Αυτό θα μπορούσε να βελτιωθεί με την χρήση υλικών όπως σκωρίες χάλυβα, άμμος κελύφους ή υλικά διογκωμένης αργίλου τα οποία παρουσιάζουν υψηλή ικανότητα προσρόφησης [47]. Τέλος, η απομάκρυνση του φωσφόρου μέσω της φυτικής βλάστησης είναι επίσης περιορισμένη [22].

Όσον αφορά το κόστος κατασκευής των συγκεκριμένων υδροβιότοπων είναι συγκριτικά υψηλότερο από αυτό των υδροβιότοπων επιφανειακής ροής λόγω της ιδιαίτερης στεγανοποίησης και των πληρωτικών υλικών. Από την άλλη το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι χαμηλό

και συνδέεται με την συντήρηση των μονάδων προ επεξεργασίας [48]. Αν και το κόστος λειτουργίας/συντήρησης είναι χαμηλό, μειονεκτήματα αυτών των συστημάτων όπως το χαμηλό ποσοστό απομάκρυνσης των θρεπτικών συστατικών και η απαίτηση εκτάσεων με ήπιες κλίσεις έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια την κατασκευή τεχνητών υδροβιότοπων κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής.



Εικόνα 3.6: Τεχνητός υδροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής.

3.3.2.2 Τεχνητοί Υδροβιότοποι Κατακόρυφης Υποεπιφανειακής Ροής

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης ροής χαρακτηρίζονται από την κατακόρυφη ροή των υγρών αποβλήτων μέσα από τις εδαφικές στρώσεις από κατάλληλα διαβαθμισμένα υλικά (άμμος, χαλίκι άλλο πληρωτικό υλικό) των λεκανών τους, τα οποία συλλέγονται από ένα δίκτυο αποστραγγιστικών αγωγών που βρίσκεται στην βάση του. Η λειτουργία των συγκεκριμένων υδροβιότοπων μπορεί να παρομοιαστεί με το περιοδικό πότισμα μια γλάστρας στην οποία το νερό αρχικά πλημμυρίζει την λεκάνη και στη συνέχεια αφήνεται να στραγγίσει [49].

Η κατασκευή των συστημάτων κατακόρυφης ροής περιλαμβάνει αρχικά την κατασκευή λεκανών με βάθος 0.45-1.2 μέτρα. Για την αποφυγή διαρροής των υγρών αποβλήτων στον υπόγειο υδροφόρο, χρησιμοποιείται γεωμεμβράνη για την κάλυψη του πυθμένα και των πρανών. Ακολουθεί η πλήρωση των λεκανών με αδρανή υλικά, η κοκκομετρία των οποίων μειώνεται από τον πυθμένα προς την επιφάνεια. Συχνά το μεσαίο στρώμα είναι καλύπτεται με άμμο (230-40 εκατοστά), ενώ το πάνω και κάτω στρώμα είναι από χαλίκι. Στο άνω μέρος του υδροβιότοπου φυτεύονται και αναπτύσσονται τα φυτά [50]. Στην Ευρώπη, το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο φυτό στους υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής, είναι το *Phragmites Australis*. Στην Ασία χρησιμοποιούνται διάφορα είδη όπως *Arundo donax*, *Miscanthus sacchariflorus*, *Cyperus alternifolius*, *Thalia dealbata*, *Vetiveria zizanoides*, και *Cannashot indica* [22].

Τα λύματα τροφοδοτούνται σε μεγάλες δόσεις στην επιφάνεια των κλινών, με αποτέλεσμα να κατακλύζεται η επιφάνειά τους. Τα λύματα φιλτράρονται από το πορώδες μέσο κατά την κατακόρυφη ροή τους λόγω βαρύτητας. Η λειτουργία αυτή πιέζει προς τα κάτω τον παγιδευμένο αέρα, εισάγοντας φρέσκο οξυγόνο στις λεκάνες. Ανάμεσα στις περιόδους

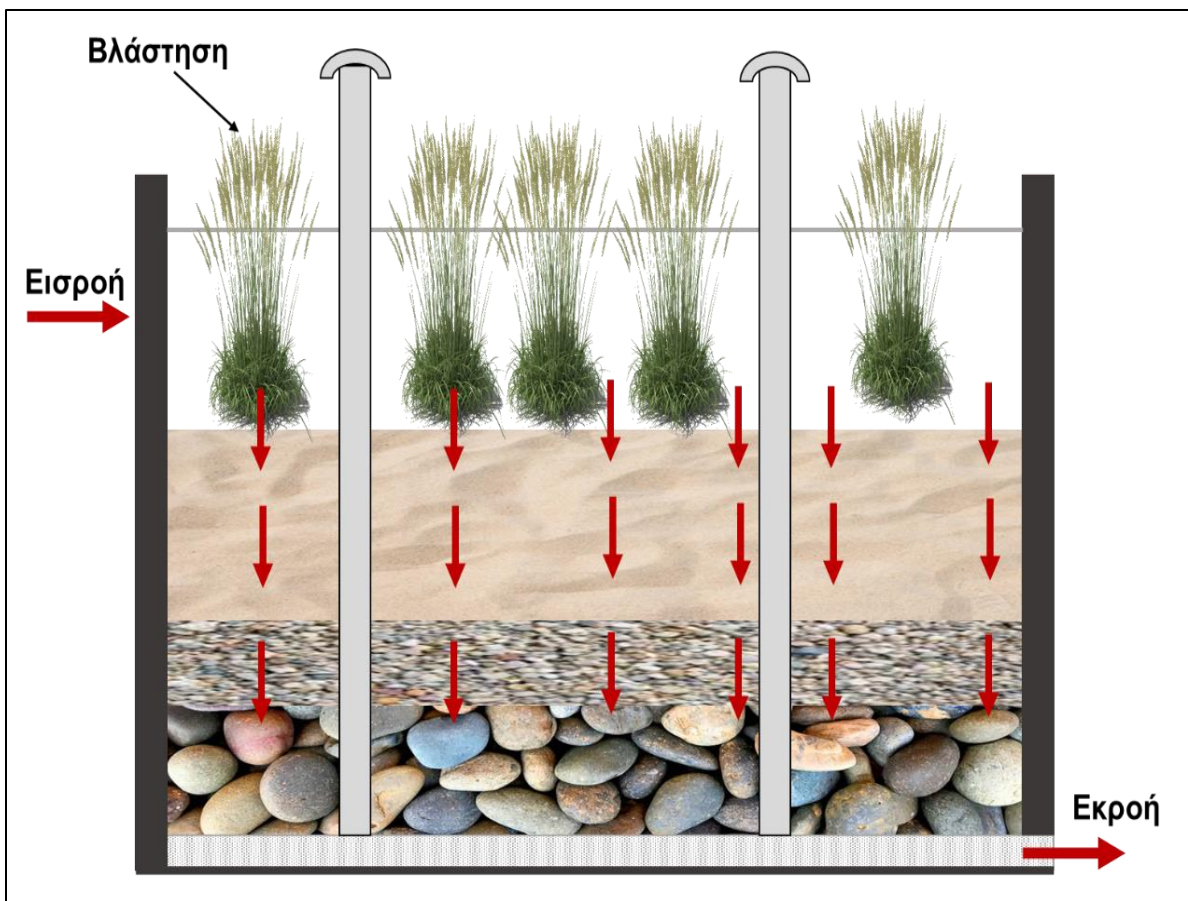
τροφοδοσίας του συστήματος παρεμβάλλεται μια περίοδος ανάπαυσης. Αφού το νερό έχει διεισδύσει δια μέσω του φίλτρου, τότε τροφοδοτείται η νέα παρτίδα, γεγονός το οποίο επιτρέπει τη διάχυση του αέρα στην κενή κλίνη και, επομένως, η κλίνη διήθησης είναι κυρίως αερόβια. Συνιστάται η κατασκευή σωληνώσεως αερισμού για ενίσχυση του αερισμού των κλινών. Επίσης, αυτές οι εναλλαγές στις φάσεις τροφοδοσίας και ανάπαυσης επηρεάζουν σημαντικά την ανάπτυξη της βιομάζας και την αερόβια βιοαποικοδόμηση ουσιών (οργανική ύλη - οξείδωση, άζωτο-νιτροποίηση κλπ.). Το επεξεργασμένο νερό συλλέγεται από ένα δίκτυο αποστραγγιστικών αγωγών που είναι τοποθετημένο στον πυθμένα του υδροβιότοπου, σε αποστάσεις περίπου 1m μεταξύ τους, και στη συνέχεια οδηγείται σε ένα φρεάτιο για περαιτέρω επεξεργασία ή διάθεση [22].

Τα συστήματα αυτά είναι αποτελεσματικά στην απομάκρυνση των οργανικών, των αιωρούμενων στερεών και της αμμωνίας. Οι συνθήκες οξυγόνωσης τέτοιων συστημάτων ευνοούν τη διάσπαση του οργανικού φορτίου και την νιτροποίηση [22]. Λόγω των κατά βάση αερόβιων συνθηκών στους υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής δεν επιτυγχάνεται απονιτροποίηση. Τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται κυρίως με φιλτράρισμά τους στο έδαφος ή το υπέδαφος. Η απομάκρυνση του φωσφόρου εξαρτάται από τη φύση του υποστρώματος και μπορεί να ενισχυθεί με υλικά διήθησης τα οποία παρουσιάζουν υψηλή ικανότητα προσρόφησης [51]. Η απομάκρυνση των μετάλλων οφείλεται κυρίως στην προσρόφηση και η απομάκρυνση των παθογόνων οργανισμών εξαρτάται από τη δομή του υποστρώματος και την ταχύτητα ροής.

Το βασικό πλεονεκτήματα αυτού του είδους τεχνητού υδροβιότοπου συγκριτικά με τους υπόλοιπους είναι η μικρότερη απαιτούμενη έκταση γης καθώς και η διατήρηση αερόβιων

συνθηκών κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των λυμάτων λόγω της αποτελεσματικότερης μεταφοράς του οξυγόνου. Για την αύξηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος όσον αφορά στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, πολλές φορές οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης ροής συνδυάζονται με αυτούς οριζόντιας ροής ή άλλα συστήματα μικρής κλίμακας όπως σηπτική δεξαμενή διαμορφώνοντας έτσι ένα υβριδικό σύστημα.

Η χρήση των τεχνητών υδροβιότοπων κατακόρυφης υπο-επιφανειακής ροής ξεκίνησε να κερδίζει έδαφος την δεκαετία του 1990 για να καλυφθούν οι αλλαγές στην ευρωπαϊκή νομοθεσία (συγκεκριμένα στην Γερμανία, την Αυστρία και τη Δανία) όπου έθεταν πιο αυστηρά όρια για την απομάκρυνση του αζώτου στις μικρές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Η βασική του εφαρμογή είναι στην δευτεροβάθμια επεξεργασία αλλά υπάρχουν και συγκεκριμένα είδη CW-VSSF που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία ακατέργαστων υγρών αποβλήτων (Γαλλικό σύστημα). Επιπλέον σύνηθες είναι η χρήση τους σε συνδυασμό με άλλα είδη τεχνητών υδροβιότοπων και η δημιουργία υβριδικών συστημάτων.



Εικόνα 3.7: Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής.

3.3.3 Σύγκριση Τεχνητών Υγροβιότοπων Επιφανειακής & Υποεπιφανειακής Ροής

Συγκρίνοντας τους τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής και υποεπιφανειακής ροής παρατηρείται ότι τα τελευταία παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στις διακυμάνσεις θερμοκρασίας, υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων στα υγρά απόβλητα, ελαχιστοποίηση

προβλημάτων όσον αφορά έντομα και οσμές, και μεγαλύτερη ικανότητα αφομοίωσης ανά μονάδα επιφάνειας. Επιπρόσθετα, το πορώδες υλικό στην περίπτωση των υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής παρέχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής για με τα υγρά απόβλητα . Εφόσον η επιφάνεια του νερού δεν είναι εκτεθειμένη σε τέτοια συστήματα δεν υπάρχει πρόβλημα στην ανθρώπινη υγεία εάν βρίσκεται κοντά στο κοινό. Από την άλλη μεριά ωστόσο, τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης και ο έλεγχος τους είναι δυσκολότερος. Τέλος, μερικά συστήματα έχει παρατηρηθεί να εμφανίζουν υδραυλική υπερφόρτωση και φράξιμο των πόρων του υλικού. Σε σχέση με την ποιότητα της τελικής εκροής τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής επιτυγχάνουν πολύ καλύτερη ποιότητα σε σχέση με την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των ολικών αιωρούμενων στερεών λόγω της διύλισης που πραγματοποιείται με το πληρωτικό υλικό και στην ανάπτυξη μικροοργανισμών επάνω στο πληρωτικό υλικό. Στους τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής ροής δημιουργούνται άλγη που ταπεινώνουν την ποιότητα της τελικής εκροής, ενώ η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών λαμβάνει χώρα κυρίως λόγω καθίζησης και βιολογικής αποδόμησης. Επιπλέον, ο κατακόρυφος τεχνητός υδροβιότοπος είναι πολύ πιο αποδοτικός στην παθητική διάσχυση του οξυγόνου μέσα στο πληρωτικό υλικό σε σχέση με τον οριζόντιο, για αυτό και επιτυγχάνει πολύ καλύτερη νιτροποίηση.

Περισσότερη ανάλυση σχετικά με τους μηχανισμούς απομάκρυνσης των ρύπων δίνονται στο επόμενο Κεφάλαιο.

3.3.4 Υβριδικά Συστήματα Τεχνητών Υδροβιότοπων

Οι διάφοροι τύποι υδροβιότοπων που περιεγραφήκαν μπορούν να συνδυαστούν και

κυρίως οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατακόρυφης και οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, με σκοπό την αλληλοσυμπλήρωσή τους έτσι ώστε να αυξηθεί η αποτελεσματικότητά τους ως προς την απομάκρυνση των ρύπων. Ο βασικός τρόπος κατασκευής τους βασίζεται στην αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων του ενός τύπου έτσι ώστε να εξαλειφθούν τα μειονεκτήματα του άλλου. Για παράδειγμα όσον αφορά την απομάκρυνση αζώτου, η οποία είναι χαμηλή στα συστήματα οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής διότι η μειωμένη μεταφορά οξυγόνου εντός της κλίνης καθιστά αναποτελεσματική την διεργασία της νιτροποίησης, μπορεί να ενισχυθεί από τους υδροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής οι οποίοι είναι αποδεδειγμένα πιο αποτελεσματικοί στην νιτροποίηση και κατ' επέκταση στην απομάκρυνση του αζώτου [22].

Από την άλλη μεριά οι οριζόντιας ροής υδροβιότοποι έχουν κατάλληλες συνθήκες για απονιτροποίηση. Υπάρχουν δύο τρόποι να σχεδιαστούν: (α) ένα στάδιο κατακόρυφης ροής που να ακολουθείται από ένα οριζόντιας ροής, και (β) ένα στάδιο οριζόντιας ροής που ακολουθείται από ένα στάδιο κάθετης ροής με κατάλληλη ανακυκλοφορία [10]. Ο πρώτος τρόπος δεν παρουσιάζει ικανοποιητική απονιτροποίηση λόγω περιορισμένου άνθρακα. Έχει προταθεί ότι στην περίπτωση που ο κατακόρυφης ροής υδροβιότοπος προηγείται του οριζοντίου η απομάκρυνση BOD, COD, και παθογόνων είναι πιο ικανοποιητική, αλλά η απομάκρυνση αζώτου είναι χαμηλότερη[52].

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία Σχεδιασμού Τεχνητών Υγροβιότοπων

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά βήματα σχεδιασμού των τεχνητών υγροβιότοπων τα οποία περιλαμβάνουν τη χωροθέτηση του συστήματος, την επιλογή των φυτών κάλυψης των υγροβιότοπων, την επιλογή του υλικού πλήρωσης (για τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακή ροής). Στο τέλος του Κεφαλαίου δίνονται οι βασικές μέθοδοι και αντίστοιχες εξισώσεις οι οποίες εφαρμόζονται για την εύρεση της επιφάνειας τεχνητών υγροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής (οριζόντιοι και κατακόρυφης ροής) οι οποίοι είναι και πλέον εφαρμοζόμενοι στην Ευρώπη τα τελευταία χρόνια.

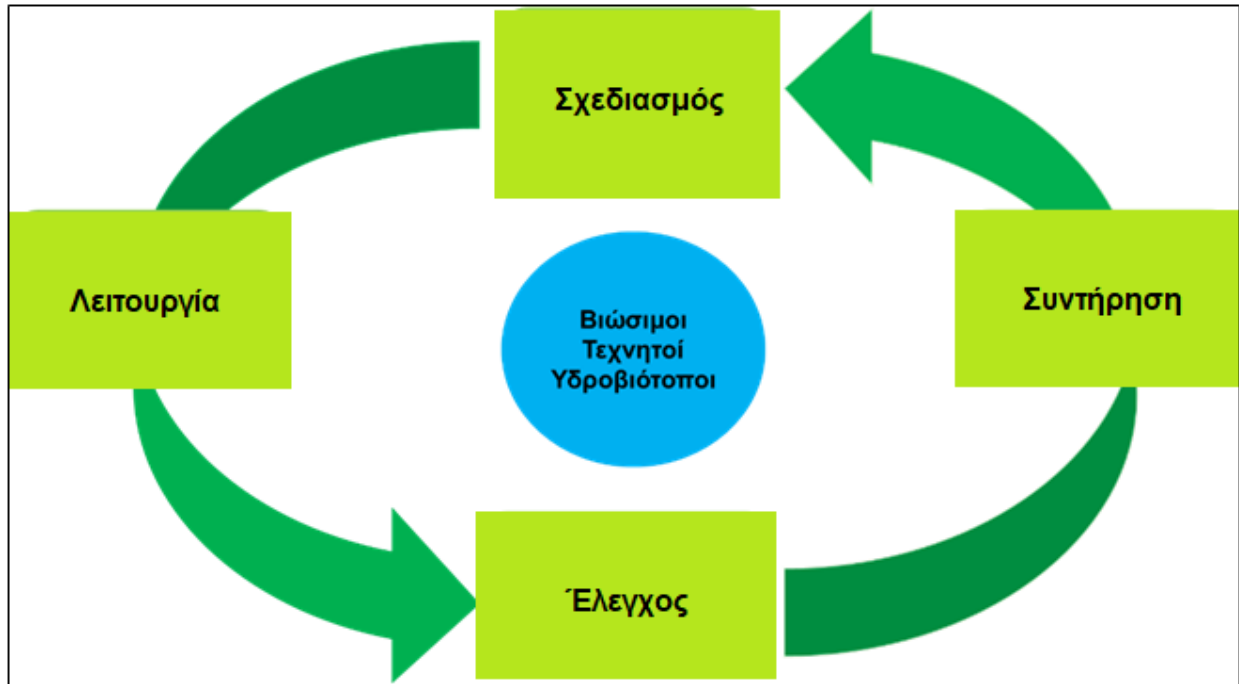
4.1 Βασικά Βήματα Σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός των τεχνητών υγροβιότοπων διέπεται από κάποια συγκεκριμένα βήματα τα οποία έχουν ως εξής [53]:

- Χαρακτηρισμός και ανάλυση των ρύπων στα υγρά απόβλητα που εισέρχονται στον τεχνητό υγροβιότοπο.
- Καθορισμός απαιτούμενου ποσοστού απομάκρυνσης των ρύπων από τα λύματα και της απαιτούμενης ποιότητας της επεξεργασμένης εκροής . Αυτό καθορίζεται με βάση την εφαρμογή του επεξεργασμένου υγρού (πχ διάθεση σε υδάτινο αποδέκτη ή επαναχρησιμοποίηση). Ο καθορισμός των ορίων των ρύπων στην εκροή καθορίζουν την απαιτούμενη αποδοτικότητα του συστήματος και την έκταση του υγροβιότοπου που θα κατασκευαστεί.

- Κατάλληλη επιλογή φυτού για την απομάκρυνση των ρύπων που περιέχονται στα υγρά απόβλητα.
- Κατάλληλη επιλογή του πληρωτικού υλικού το οποίο να χαρακτηρίζεται από αποδεκτό μέγεθος πόρων και διαπερατότητα
- Διάταξη τροφοδοσίας λυμάτων και διάταξη συλλογής του επεξεργασμένου υγρού
- Κατάλληλη επιλογή του στεγανωτικού υλικού (γεωμεμβράνη) ώστε να αποφευχθεί κίνδυνος διείσδυσης των λυμάτων στον υπόγειο υδροφόρο
- Παρακολούθηση φυσικών και χημικών παραμέτρων του συστήματος.
- Συμπληρωματικές ενέργειες κατάλληλη επιλογή θέσεων των φυτών, έλεγχος ροής, έλεγχος επιπέδου του νερού, διασφάλιση της ασφάλειας της γύρω περιοχής (για παράδειγμα αποφυγή διαρροών στον υδροφόρο ορίζοντα, ή δυσάρεστων οσμών).

Η επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης των τεχνητών υδροβιότοπων περιλαμβάνει βασικά βήματα όσο αναφορά τον σχεδιασμό (αναλύθηκαν παραπάνω), τη λειτουργία (παθητικός αερισμός, μικροβιολογική ανάπτυξη, βελτιστοποίηση της υδραυλικής αγωγιμότητας και διαχείριση της τροφοδοσίας), και την συντήρηση (τεχνικές συγκομιδής των φυτών και ανακύκλωση των φυτών) [53].



Εικόνα 4.1: Σχεδιασμός, λειτουργία και συντήρηση των τεχνητών υδροβιότοπων.

4.2 Χωροθέτηση

Η επιλογή της θέσης που θα τοποθετηθεί ένας τεχνητός υδροβιότοπος είναι μια πολύ σημαντική απόφαση και οι βασικές παράμετροι που εξετάζονται είναι η τοπογραφία, η εδαφολογία, οι χρήσεις γης, η υδρολογία, και οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης.

Τοπογραφία: Σε ένα γενικότερο πλαίσιο κατάλληλες θέσεις για την κατασκευή τεχνητών υδροβιότοπων εκτιμώνται αυτές με κλίσεις μικρότερες από 5%. Πιο συγκεκριμένα για τα συστήματα επιφανειακής ροής, στα οποία τα κανάλια ή οι λεκάνες κατασκευάζονται με κλίση 1-2%, απαιτούν ομοιόμορφη τοπογραφία. Εάν χρησιμοποιηθούν εκτάσεις με μεγαλύτερη κλίση το κόστος εκσκαφής αυξάνει σημαντικά το κόστος κατασκευής.

Εδαφολογία: Κατά την κατασκευή τεχνητών υδροβιότοπων είναι σημαντική η αποφυγή διαρροών και η προστασία του υδροφόρου ορίζοντα. Για αυτό το λόγο προτιμώνται εδάφη με μικρή διαπερατότητα, συνήθως μικρότερη από 5 mm/h. Στην περίπτωση πιο διαπερατών εδαφών είναι απαραίτητη η βελτίωση του εδάφους με τεχνικές όπως η συμπύκνωση του εδάφους ή η εφαρμογή κατάλληλης στεγανωτικής στρώσης. Πλέον οι τεχνητοί υδροβιότοποι σχεδιάζονται όλοι με την εφαρμογή κατάλληλης πλαστικής γεωμεμβράνης.

Χρήσεις γης: Οι ανοιχτές γεωργικές εκτάσεις επιλέγονται ως επί τον πλείστον ως περιοχές για κατασκευή τεχνητών υδροβιότοπων καθώς σε αυτές τις περιοχές το κόστος κτήσης γης είναι χαμηλό. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν αυτές που βρίσκονται σε φυσικούς υδροβιότοπους καθώς οι τεχνητοί υδροβιότοποι έχουν το πλεονέκτημα να βελτιώνουν τους φυσικούς.

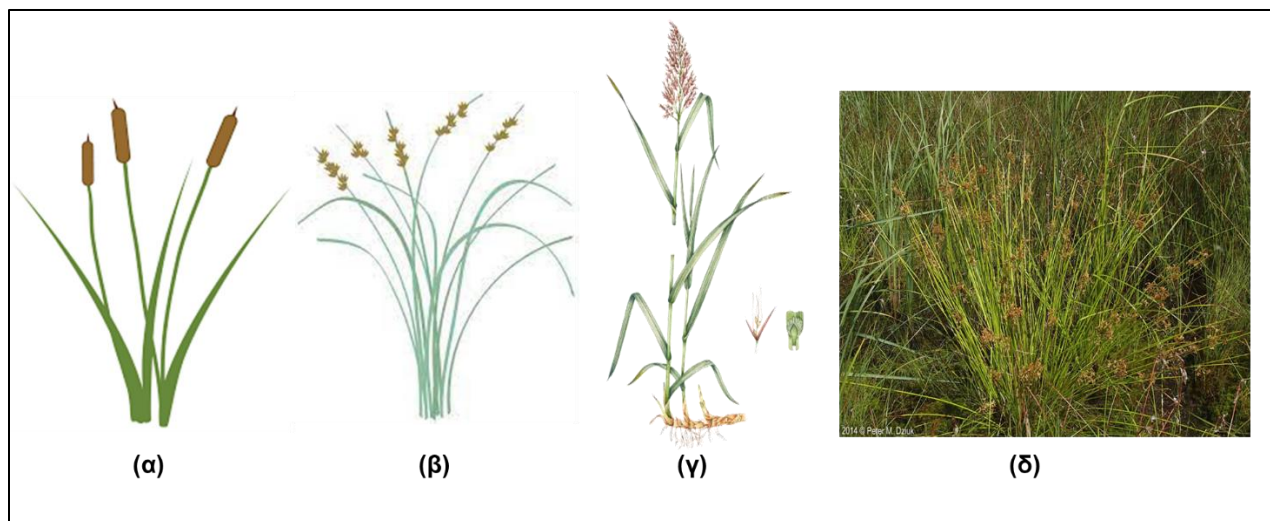
Υδρολογία: Κατά τη κατασκευή τεχνητών υδροβιότοπων επιλέγονται περιοχές οι οποίες βρίσκονται εκτός περιοχών που αντιμετωπίζουν πλημμυρικά φαινόμενα.

Καιρικές και κλιματικές συνθήκες: Σε ένα γενικότερο πλαίσιο περιοχές με ήπιες και υψηλότερες θερμοκρασίες (θερμά κλίματα) επιλέγονται ως ιδανικότερες για την κατασκευή τεχνητών υδροβιότοπων. Η θερμοκρασία έχει επίπτωση στην απόδοση του συστήματος και έχει σημειωθεί ότι στα ψυχρά συστήματα η αποδοτικότητα ελαττώνεται. Οι έντονες βροχοπτώσεις για παράδειγμα μειώνουν τον χρόνο παραμονής των υγρών αποβλήτων στον υδροβιότοπο με αποτέλεσμα οι ρύποι να παρασύρονται προς την έξοδο. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αρκετές αναφορές τεχνητών υδροβιότοπων σε ψυχρά κλίματα της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης και της Αμερικής. Σε αυτές τις περιοχές ωστόσο συνήθως επιλέγονται τεχνητοί υδροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής [54].

4.3 Βλάστηση

Η βλάστηση ή αλλιώς τα φυτά στους τεχνητούς υγροβιότοπους αποτελούν ένα πολύ σημαντικό μέρος τους και για αυτό άλλωστε χαρακτηρίζονται ως «πράσινη τεχνολογία». Όπως ήδη προαναφέρθηκε τα φυτά που χρησιμοποιούνται διαχωρίζονται σε βασικές κατηγορίες όπως επιπλέοντα φυτά, επιπλέοντα φυτά με φύλλα, αναδυόμενα φυτά και βυθιζόμενα φυτά. Τα φυτά που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να έχουν προσαρμοστεί στις εκάστοτε οικολογικές συνθήκες της κάθε περιοχής, να αντέχουν τις κλιματικές συνθήκες, να παρουσιάζουν αντοχή στους ρύπους, να έχουν γρήγορη ανάπτυξη και διάδοση, και τέλος να είναι αποτελεσματικά στην απομάκρυνση των ρύπων. Τα βασικά είδη φυτών που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας είναι τα εξής (Εικόνα 4.2) :

- a) Ψαθί (*Typha* spp.): Αποτελούν φυτά με επιμηκή φύλλα και καφέ άνθη. Είναι ανθεκτικά, αυξάνονται πολύ εύκολα και αναπτύσσονται σε διάφορες κλιματικές συνθήκες.
- b) Κυπρερίδες (*Scirpus* spp.): Αποτελούν είδη φυτών τα οποία αναπτύσσονται σε συστάδες.
- c) Καλάμι (*Phragmites* spp.): Είναι ψηλά φυτά που μοιάζουν με χόρτα με πολυετές ρίζωμα. Το είδος αυτό χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην Ευρώπη. Κάποιες από τις ποικιλίες του είναι *Phragmites australis* και η *Phragmites communis*.
- d) Βούρλο (*Juncus* spp.): Το είδος αυτό χρησιμοποιείται περιφερειακά στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Κάποιες από τις ποικιλίες του είναι η *Juncus articulatus*, και *Juncus effusus*.



Εικόνα 4.2: Είδη φυτών στους τεχνητούς υγροβιότοπους.

Ο ρόλος των φυτών είναι πολύ σημαντικός και πολύπλευρος καθώς επιτελούν πολλές λειτουργίες [55]. Αρχικά, τα αναδυόμενα φυτά έχουν το χαρακτηριστικό να απορροφούν το οξυγόνο της ατμοσφαιρας και να το προωθούν προς τις ρίζες τους. Για αυτό και στις περιοχές κοντά στις ρίζες θεωρούνται ότι αερίζονται παρόλο που είναι σε ένα αναερόβιο περιβάλλον. Ένα μέρος του οξυγόνου το οποίο δεν χρησιμοποιείται από τα φυτά μεταφέρεται στο εξωτερικό το ριζών με αποτέλεσμα οι περιοχές γύρω από τις ρίζες να είναι αερόβιες και να ευνοούν τον σχηματισμό αερόβιων μικροβίων. Οι ρίζες λειτουργούν ως υπόστρωμα για την ανάπτυξη μικροβίων τα οποία αναπτύσσονται ως λεπτές μεμβράνες (βιοφίλμ), τα οποία βοηθούν στην βιολογική αποδόμηση των ρύπων. Η μεταφορά του οξυγόνου λαμβάνει χώρα κυρίως στους υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής και διευκολύνει αερόβιες αντιδράσεις όπως η νιτροποίηση. Αυτού του είδους η μεταφορά οξυγόνου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στους τεχνητούς υγροβιότοπους καθώς αποτελεί το βασικό μηχανισμό μεταφοράς οξυγόνου.

Επιπλέον τα φυτά γενικότερα απορροφούν τα θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται για την ανάπτυξη τους από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Πιο συγκεκριμένα έχουν την δυνατότητα να απορροφούν θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο και το φώσφορο από τα υγρά απόβλητα και να τα ενσωματώνουν στην κυτταρική τους μεμβράνη. Από την άλλη μεριά, τα θρεπτικά συστατικά που ενσωματώνουν είναι πιθανόν να επιστρέψουν στα υγρά απόβλητα μέσω διεργασιών βιολογικής αποικοδόμησης για αυτό η ποσότητα των θρεπτικών συστατικών που απομακρύνεται με αυτό τον τρόπο θεωρείται σχετικά χαμηλή [54]. Παρόλα αυτά τα φυτά και οι ρίζες τους θεωρούνται πολύ σημαντικά διότι διατηρούν καλή υδραυλική αγωγιμότητα στο υπόστρωμα.

Τέλος τα φυτά έχουν την δυνατότητα να μονώνουν το σύστημα με αποτέλεσμα να βοηθά στην ομαλή διαχείριση της διαφοράς θερμοκρασίας από χειμώνα σε καλοκαίρι. Ταυτόχρονα, τα φυτά ομορφαίνουν την περιοχή των υδροβιότοπων με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η ένταξη στους φυσικό περιβάλλον.

4.4 Πληρωτικό Υλικό

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής, η απόδοση επηρεάζεται καταλυτικά από το πληρωτικό υλικό που θα επιλεγεί [56]. Τα πληρωτικά υλικά θα πρέπει να επιλέγονται πολύ σχολαστικά καθώς η λανθασμένη επιλογή τους μπορεί να οδηγήσει σε διάφορες δυσλειτουργίες του συστήματος όπως η έμφραξη του συστήματος, μη ορθή υδραυλική λειτουργία, και χαμηλή αποδοτικότητα όσο αναφορά την απομάκρυνση των ρύπων του λύματος. Για παράδειγμα, το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα σε τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής δημιουργούσε συχνά προβλήματα όπως

φράξιμο των πόρων λόγω της χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας του. Στις μέρες μας ωστόσο στα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούνται επίπεδα από χαλίκια διαφορετικού μεγέθους και ειδους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στους τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής τοποθετείται και μια στρώση άμμου. Τα χαλίκια επιλέγονται ως κατάλληλο πληρωτικό υλικό καθώς παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως [10]:

- Υποστήριξη βλάστησης και συμβολή στην ανάπτυξη των φυτών.
- Αποτελεσματικό φιλτράρισμα των λυμάτων.
- Υψηλή διαπερατότητα
- Υποβοήθεια σε διάφορες διεργασίες κατά τη διάρκεια της απομάκρυνσης των ρύπων.

Κατά την επιλογή του υποστρώματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν διάφοροι παράγοντες όπως το κόστος του υλικού, η υδραυλική αγωγιμότητά του, δυνατότητα απομάκρυνσης ρύπων, δυνατότητα υποστήριξης βλάστησης, φράξιμο του υλικού από το απόβλητο, ασφάλεια, και χρόνος ζωής του υλικού [56]. Τα μικρόβια που αναπτύσσονται μέσα στον υδροβιότοπο, τα φυτά και το υπόστρωμα βρίσκονται σε συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Για αυτό η λάθος επιλογή υποστρώματος μπορεί να επιφέρει δραματικές συνέπειες στα φυτά και στα μικρόβια του συστήματος [56]. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται διαφορά υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως πληρωτικό υλικό και τα χαρακτηριστικά τους όσο αναφορά το κόστος, τη διαθεσιμότητα, την διαπερατότητα, την επαναχρησιμοποίηση και την απομάκρυνση των ρύπων.

Πίνακας 4.1: Υλικά για κατασκευή υποστρώματος και χαρακτηριστικά τους [56].

Υπόστρωμα	Κατηγορία	Κόστος	Διαθεσιμότητα	Διαπερατότητα	Επαναχρησιμοποίηση	Απομάκρυνση ρύπων ¹							
						P	N	Βαρέα μέταλλα	Επιφανειακές δραστικές ουσίες	Φυτοφάρμακα			
Χαλίκι	Φυσικό υλικό	M	Y	Y	Ευεργετική	Y	M	Y	Y				
Άμμος		X		M	Ευεργετική	X	M	Y					
Σχιστόλιθος			X	X	Ευεργετική	Y	M						
Ζεόλιθος			M	M	M	Ευεργετική	M	Y	Y				
Ασβεστό-λιθος		X	Y	M			M	M	Y				
Λάσπη συυπητηρίας	Βιομηχανικά απόβλητα	X	Y	X	Ευεργετική		Y	Y					
Κέλυφος στρειδιού	Γεωργικά απόβλητα			M			Y	Δύσκολη	Y	Y			
Ροκανίδι									Y				
Φυτικά απόβλητα					Y	Y			M	M		Y	
Ιπτάμενη τέφρα	Βιομηχανικά απόβλητα		M	M	Ευεργετική	Y			Y				
Σκωρία			X	Y	M	Ουδέτερη	Y	M					
Οικοδομικά απόβλητα													
Κεραμίτης	Τεχνητό υλικό	M	M	Y	Ευεργετική	Y	M	Y					
Ενεργός άνθρακας						X	M						
Συνθετική ίνα						Y	X						
Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα		X	Y		Ουδέτερη	Y							
Τροποποιημένος πηλός		Y	M	M	Ευεργετική	M	Y			Y			

¹ Y: υψηλή, X: χαμηλή, M: μεσαία

Ο παραπάνω πίνακας μας δίνει χρήσιμες πληροφορίες για συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στους τεχνητούς υγροβιότοπους αλλά και για πιο σπάνια υλικά που ανήκουν

στην κατηγορία τεχνητών υλικών όπου παρουσιάζουν πολύ χρήσιμες και νέες ιδιότητες ως προς την ανθεκτικότητα αλλά και την ικανότητά τους για προσρόφιση ουσιών. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα νέων τεχνητών υλικών και σύντομη περιγραφή των ιδιοτήτων τους [56]:

- Κεραμσίτης: Είναι ένα στρογγυλό, οβάλ ή ακανόνιστο κεραμικό σωματίδιο, με πυκνότητα όγκου $300\text{--}900\text{ kg/m}^3$ και μέγεθος σωματιδίων $5\text{--}25\text{ mm}$. Είναι ένα τεχνητό υλικό το οποίο παράγεται από κεραμική παραγωγή πρώτων υλών με φρύξη σε υψηλή θερμοκρασία. Ο κεραμσίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επεξεργασία λυμάτων στους τεχνητούς υδροβιότοπους λόγω της υψηλής ικανότητας προσρόφισης, της σταθερότητας και της συγγενείας του με τη μικροβιακή βιομάζα του βιοφίλμ [56]. Η προσρόφιση φωσφόρου σε κεραμικές άμμους κεραμσίτη μελετήθηκε και η εξίσωση Langmuir θα μπορούσε κάλλιστα να περιγράψει τα πειραματικά δεδομένα της ισοθερμικής προσρόφισης. Ο κεραμσίτης ιπτάμενης τέφρας έδειξε τη μεγαλύτερη ικανότητα προσρόφισης φωσφόρου, αλλά μια μέση ικανότητα για το άζωτο. Σε άλλη μελέτη εφαρμόστηκε κεραμσίτης για την ακινητοποίηση του φωσφόρου σε τεχνητό υδροβιότοπο υιοθετώντας την ιπτάμενη τέφρα άνθρακα και την ιλύ ως κύρια υλικά και το κέλυφος στρειδιών ως πρόσθετο [56]. Τα πειράματα προσρόφισης έδειξαν ότι η θεωρητική μέγιστη ικανότητα προσρόφισης φωσφόρου του παρασκευασμένου κεραμσίτη έφτασε έως και τα $4,51\text{ mg/g}$ και τα πειράματα δυναμικής στήλης γεμάτα με μέσο κεραμσίτη πέτυχαν έως και το 90% της απομάκρυνσης φωσφόρου με HRT 12 ωρών.

- Ενεργός άνθρακας: Ο ενεργός άνθρακας είναι ένας άμορφος άνθρακας που λαμβάνεται με επεξεργασία. Έχει μεγάλη ειδική επιφάνεια και έχει καλή ικανότητα προσρόφισης για αέρια, ανόργανη ή οργανική ύλη και κolloειδή σωματίδια στο διάλυμα. Οι

ιδιότητες του ενεργού άνθρακα είναι η υψηλή μηχανική αντοχή, αντίσταση σε οξύ, αντίσταση στα αλκάλια, αντοχή στη θερμότητα, αδιάλυτη στο νερό και οργανικούς διαλύτες και επαναχρησιμοποιήσιμη. Έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε διάφορους τομείς, όπως η χημική βιομηχανία, η προστασία του περιβάλλοντος, η επεξεργασία τροφίμων, η μεταλλουργία, η φαρμακευτική διύλιση [56]. Τα υλικά τροποποιημένου ενεργού άνθρακα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στους τομείς της επεξεργασίας λυμάτων και της πρόληψης και ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και γίνονται όλο και πιο ελκυστικά στον τομέα του ελέγχου της περιβαλλοντικής ρύπανσης[56]. Οι Dai και Hu (2017) αξιολόγησαν την προσρόφιση φωσφόρου σε πολλά υποστρώματα και έδειξαν ότι η αποτελεσματικότητα προσρόφισης φωσφόρου του ενεργού άνθρακα δεν ήταν πολύ καλή. Μια πιλοτική έρευνα έδειξε ότι ο βιολογικά ενεργός κοκκώδης ενεργός άνθρακας ήταν μια αποτελεσματική μέθοδος για την απομάκρυνση του $\text{NH}_4\text{-N}$ με μέση απομάκρυνση $60,87 \pm 29,69\%$ [56].

- Τροποποιημένος άργιλος: Αναπτύσσονται διάφορα τροποποιημένα προϊόντα αργίλου, συμπεριλαμβανομένης της διογκωμένης αργίλου, της φρυγμένης αργίλου, του Filtralite P® και ούτω καθεξής. Το Filtralite P® είναι φίλτρο υψηλής ποιότητας, κατασκευασμένο από διογκωμένο πηλό και χρησιμοποιείται για διήθηση και καθαρισμό αποβλήτων και λυμάτων για οικισμούς. Το υλικό είναι ένα προϊόν που διατίθεται στο εμπόριο με υψηλό pH (>10) και υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο και μαγνήσιο. Έχει μέγεθος κόκκου στην περιοχή 0,5-4 mm, αποτελεσματικό πορώδες 40%, πορώδες σωματιδίων 68% και πυκνότητα όγκου 0,55 g/cm³ [56]. Προσδιορίστηκε η ικανότητα προσρόφισης φωσφόρου επτά υποστρωμάτων και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η επίδραση προσρόφισης του φωτοδιογκωμένης αργίλου στο φωσφόρο δεν ήταν πολύ καλή [56]. Διαπιστώθηκε ότι η διογκωμένη άργιλος έδειξε εξαιρετική ικανότητα

προσρόφησης N και μπορούσε να προσροφήσει 0,31 mg/kg NH₄-N μετά από 7 ημέρες επαφής. Σε δοκιμές στήλης, ο ρυθμός απομάκρυνσης του P στα πρωτογενή λύματα ήταν 91%, και στα δευτερεύοντα λύματα ήταν 54%. Οι Ferreira et al. (2017) αξιολόγησε την ικανότητα των τεχνητών υγροβιότοπων να απομακρύνουν τρεις αναδύμενους οργανικούς ρύπους. Η παρουσία ελαφρά διογκωμένης αργίλου συσσωματωμάτων έδειξε υψηλότερη απομάκρυνση (περίπου 61-97%) των λιπόφιλων ενώσεων (οξυβενζόνη και τρικλοζάνη) από την υδρόφιλη ένωση (καφεΐνη, περίπου 19-85%).[56]

Υπάρχουν όμως και υλικά που δεν αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα που σύμφωνα με μελέτες εμφανίζουν ενδιαφέρουσες ιδιότητες ως προς τους βαθμούς απομάκρυνσης μικρο ρύπων επιτρέποντας παράλληλα την πιο άμεση και αποτελεσματική δόμηση του υποστρώματος σε συνεργασία με το ριζικό σύστημα των υδρόβιων φυτών. Παραδείγματος χάριν:

Ανακυκλωμένο γυαλί: Το συγκεκριμένο υπόστρωμα είναι αδρανές, έχει μεγάλους χώρους πόρων και σημαντική επιφάνεια[57] . Μπορεί να μετατραπεί σε διάφορα μεγέθη για να καλύψει συγκεκριμένες απαιτήσεις σχεδιασμού. Παρέχει εξαιρετικά ευνοϊκές συνθήκες για μικροβιολογική ανάπτυξη λόγω της ευρείας αερόβιας ζώνης ανάπτυξης του ριζικού συστήματος των φυτών. Οι μετρήσεις ποικιλότητας μεταξύ φυτεμένης και μη φυτεμένης διάταξης αποκάλυψαν ότι τα μακρόφυτα μπορεί να αυξήσουν την ποικιλομορφία στο σύστημα. Σε γενικές γραμμές, το ανακυκλωμένο σπασμένο γυαλί προσδιορίστηκε ως κατάλληλη μήτρα για κοινότητες ζωοπλαγκτού στο πλαίσιο των τεχνητών υγροβιότοπων. Μεταξύ των δοκιμασμένων ρυθμίσεων, η επεξεργασία φυτευμένου γυαλιού είχε την υψηλότερη ποικιλομορφία (όντας ισοδύναμη ή, ακόμη και ανώτερη από το υπόστρωμα χαλικιού). Στο στρώμα από γυαλί μετά από σύγκριση [117] με στρώμα μίγματος διαφορετικών τύπων άμμου παρατηρήθηκε μικρή

ικανότητα προσρόφησης φωσφόρου αλλά και μειωμένη απόδοση στη διαδικασία νιτροποίησης σε σχέση με το φίλτρο άμμου όσο αυξανόταν υδραυλική φόρτιση. Πιθανή αιτία τις παραπάνω παρατήρησης σημειώνεται ως ο χαμηλότερος λόγος επιφάνειας ανά μονάδα όγκου. Απόβλητα Κατασκευών και Κατεδαφίσεων: Σε μελέτη τους οι Bianchini et al., (2005) συνέκριναν δείγματα από απόβλητα κατεδάφισης, τα οποία ήταν και ακατέργαστα (αναμεμιγμένα με μεταβλητό μέγεθος κόκκου) και επεξεργασμένα, τα οποία θρυμματίστηκαν και χωρίστηκαν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες μεγεθών κόκκων: 80 – 40 mm, 40 – 10 mm και < 10 mm.

Η συγκέντρωση CaO είναι μια κρίσιμη παράμετρος για το σχεδιασμό του υποστρώματος των κατασκευασμένων υγροτόπων. Συγκεντρώσεις άνω του 10% είναι απαγορευτικές για τη χρήση τους σε τεχνητούς υγροβιότοπους, καθώς λόγω της χημικής τους αντίδρασης με τον φώσφορο που υπάρχει στα λύματα δημιουργείται αδιάλυτο φωσφορικό ασβέστιο με αποτέλεσμα την έμφραξη του υλικού.

4.5 Διαστασιολόγηση Τεχνητών Υγροβιότοπων Οριζόντιας Υπό-επιφανειακής Ροής (CW-HSSF)

Οι μεθοδολογίες σχεδιασμού στην υπάρχουσα βιβλιογραφία αποτελούνται από τις εξής κατηγορίες:

- Μεθοδολογίες σχεδιασμού με βάση την απομάκρυνση της οργανικής ύλης (απομάκρυνση BOD)
- Μεθοδολογίες σχεδιασμού με βάση την απομάκρυνση του ολικού αζώτου (απομάκρυνση TN)
- Μεθοδολογίες σχεδιασμού με βάση την απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου (Oxygen Demand [OD])

Οι δυσκολίες που παρατηρούνται από τους μελετητές για την διαστασιολόγηση των μονάδων αφορούν κυρίως στην παραμετροποίηση των μοντέλων καθώς και στην εύρεση κατάλληλων τιμών των αρχικών παραμέτρων λόγω απουσίας τους στη διεθνή βιβλιογραφία.

Διαστασιολόγηση βάσει του οργανικού φορτίου (BOD) κατά EPA

Η μέθοδος που παρουσιάζεται παρακάτω προέρχεται από τον Αμερικάνικη Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (USA EPA) (EPA, 1988) και αντιπροσωπεύει μία προσπάθεια μέλετης των HSSF βασισμένη στην υπάρχουσα τεχνογνωσία, που στηρίζεται όμως στις βασικές σχέσεις διαστασιολόγησης των τεχνητών υδροβιότοπων ελεύθερης ροής. Ωστόσο η εξίσωση εξαρτάται παραμέτρους όπως είναι η υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες του μέσου που αναφέρονται σε συστήματα υποεπιφανειακής ροής. Συγκεκριμένα:

$$A_{s,H,1} = \frac{Q * (\ln C_o - \ln C_e)}{K_t * d * n}$$

Όπου:

$A_{s,H,1}$: Επιφάνεια του τεχνητού υδροβιότοπου για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου [m²]

Q: Παροχή λυμάτων [m³/d]

C_o : Συγκέντρωση οργανικού φορτίου εισόδου [mg/L]

C_i : Συγκέντρωση οργανικού φορτίου εξόδου [mg/L]

K_t : Σταθερά ρυθμού αντίδρασης πρώτης τάξης [1/d]

d: Βάθος βύθισης [m]

n: Πορώδες του υλικού πληρώσεως

Η σταθερά του ρυθμού αντίδρασης είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενη (Cooper, 1990) και περιγράφεται από την σχέση:

$$K_T = K_{BOD}^{20} * 1.1^{(T-20)}$$

Όπου:

K_{BOD}^{20} : Σταθερά ρυθμού αντίδρασης οργανικού φορτίου στους 20 °C

T: Θερμοκρασία λυμάτων την εκάστοτε περίοδο [OC]

Οι τιμές για το K_{BOD}^{20} έχει προκύψει από τον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 4.2: Εδαφικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά άμμου

Είδος Μέσου	Μαχ.10% μέγεθος κόκκου [mm]	Πορώδες (n)	Υδραυλική Αγωγιμότητα (k_s) [$m^3/m^2/d$]	K_{20}
Μεσαία Άμμος	1	0.42	420	1.84
Τραχιά Άμμος	2	0,39	480	1.35
Χαλικώδης Άμμος	8	0.35	500	0.86

Διαστασιολόγηση Βάσει του Οργανικού Φορτίου (BOD) κατά Plug-in-flow

Πρόκειται για ένα σύστημα που προσομοιώνεται ως ένας αντιδραστήρας παρουσία των λυμάτων που περιέχουν σωματίδια. Βασική παραδοχή της μεθόδου ότι η ροή είναι συνεχής και εμβολοειδής. Ο λόγος μήκους ως προς το πλάτος είναι μεγαλύτερος της μονάδας συνθήκη που επιτρέπει ίσο χρόνο επεξεργασίας σε κάθε στοιχείο των λυμάτων χωρίς διασπορά ή ανάμιξη

τους εντός του αντιδραστήρα. Αποτελεί μία μέθοδο με ευρεία πλέον χρήση και αρκετά πλεονεκτήματα όπως τον συνδυασμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών ενός υγροβιότοπου με τον ρυθμό πραγματοποίησης μια βιοχημικής αντίδρασης. Επίσης συνυπολογίζει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός τεχνητού υγροβιότοπου. Η επιφάνεια του συστήματος προκύπτει από την σχέση:

$$A_{s,H,2} = -\frac{Q}{k_A} * \ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_i - C^*}\right)$$

Όπου:

$A_{s,H,2}$: Επιφάνεια του τεχνητού υγροβιότοπου [m^2]

Q: Παροχή λυμάτων [m^3/d]

C_o : Συγκέντρωση οργανικού φορτίου εξόδου [mg/L]

C_i : Συγκέντρωση οργανικού φορτίου εισόδου [mg/L]

C^* : Συγκέντρωση οργανικού φορτίου υποβάθρου [mg/L]

k_A : Σταθερά ρυθμού αντίδρασης πρώτης τάξης [m/d]

Η σταθερά ρυθμού αντίδρασης πρώτης τάξης είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενη:

$$k_A = k_{A,20} * \theta^{(T-20)}$$

Όπου:

$k_{A,20}$: Σταθερά ρυθμού αντίδρασης οργανικού φορτίου στους 20 οC

T: Θερμοκρασία λυμάτων την εκάστοτε περίοδο [°C]

θ : Αναπροσαρμοσμένη σταθερά του Arrhenius

Από την παραπάνω σχέση εύκολα διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

$\theta=1$, όπου ο ρυθμός της απομάκρυνση του φορτίου δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία.

$\theta>1$, όπου η αύξηση της θερμοκρασίας άνω των 20 °C, επιταχύνει τον ρυθμό της απομάκρυνσης του φορτίου.

$\theta<1$, όπου η αύξηση της θερμοκρασίας άνω των 20 °C, επιβραδύνει τον ρυθμό της απομάκρυνσης του φορτίου.

Για την μέση τιμή των μετρήσεων ισχύει:

$$\theta=0.981<1$$

Διαστασιολόγηση Βάσει του Οργανικού Φορτίου (BOD) κατά P-k-C*

Η μέθοδος P-k-C* είναι αυτή που πλέον εφαρμόζεται περισσότερο από τις υπόλοιπες για τον υπολογισμό της επιφάνειας ενός τεχνητού υγροβιότοπου. Είναι μια εξίσωση που βελτιστοποιεί την εξίσωση plug-in-flow-k-C*. Στη μέθοδο αυτή η επιφάνεια του οριζόντιου τεχνητού υγροβιότοπου δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$A_{s,H,3} = \frac{P * Q}{k_A} * \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right)$$

Όπου:

$A_{S,H,3}$: Επιφάνεια του τεχνητού υγροβιότοπου [m^2]

Q: Παροχή λυμάτων [m^3/d]

C_0 : Συγκέντρωση οργανικού φορτίου εξόδου [mg/L]

C_i : Συγκέντρωση οργανικού φορτίου εισόδου [mg/L]

C^* : Συγκέντρωση οργανικού φορτίου υποβάθρου [mg/L]

k_A : Επιφανειακή σταθερά ρυθμού αντίδρασης πρώτης τάξης [m/d]

P: Ο φαινομενικά θεωρητικός αριθμός των δεξαμενών-σε-σειρά

Διαστασιολόγηση Βάσει του Ολικού Αζώτου (TN) κατά Plug-in-flow

Ο υπολογισμός της αναγκαίας επιφάνειας με την μέθοδο p-k-C* για την απομάκρυνση του ολικού αζώτου γίνεται όπως και για το οργανικό φορτίο. Επομένως η τελική επιφάνεια προκύπτει από τη σχέση:

$$A_{S,H,4} = -\frac{Q}{k_A} * \ln\left(\frac{C_0 - C^*}{C_i - C^*}\right)$$

Όπου:

$A_{S,H,4}$: Επιφάνεια του τεχνητού υγροβιότοπου [m^2]

Q: Παροχή λυμάτων [m^3/d]

C_0 : Συγκέντρωση ολικού αζώτου εισόδου [mg/L]

C_i : Συγκέντρωση ολικού αζώτου εξόδου [mg/L]

C^* : Συγκέντρωση ολικού αζώτου υποβάθρου [mg/L]

k_A : Σταθερά ρυθμού αντίδρασης πρώτης τάξης [m/d]

Η σταθερά ρυθμού αντίδρασης πρώτης τάξης (k_A) εξαρτάται από τη θερμοκρασία:“

$$k_A = k_{A,20} * \theta^{(T-20)}$$

Όπου:

$k_{A,20}$: Σταθερά ρυθμού αντίδρασης ολικού αζώτου στους 20°C

T: Θερμοκρασία λυμάτων την εκάστοτε περίοδο [°C]

θ : Αναπροσαρμοσμένη σταθερά του Arrhenius

Για την μέση τιμή των μετρήσεων ισχύει:

$$\theta = 1.005 > 1$$

$$k_{A,20} = 8,4$$

Διαστασιολόγηση Βάσει του Ολικού Αζώτου (TN) κατά P-k-C*

Με την χρήση της εξίσωσης κατά P-k-C* η τελική επιφάνεια του CW-HSSF προκύπτει ομοίως από την σχέση:

$$A_{S,H,5} = \frac{P * Q}{k_A} * \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right)$$

Όπου:

$A_{s,H,5}$: Επιφάνεια του τεχνητού υγροβιότοπου [m^2]

Q : Παροχή λυμάτων [m^3/d]

C_o : Συγκέντρωση ολικού αζώτου εξόδου [mg/L]

C_i : Συγκέντρωση ολικού αζώτου εισόδου [mg/L]

C^* : Συγκέντρωση ολικού αζώτου υποβάθρου [mg/L]

k_A : Επιφανειακή σταθερά ρυθμού αντίδρασης πρώτης τάξης [m/d]

P : Ο φαινομενικά θεωρητικός αριθμός των δεξαμενών-σε-σειρά

Διαστασιολόγηση Βάσει την Απαιτούμενη Ποσότητα Οξυγόνου

Ένας ακόμα τρόπος για να διαστασιολογηθεί η αναγκαία επιφάνεια του υγροβιότοπου είναι με βάση την ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Το οξυγόνο απαιτείται για την επιτέλεση των βιολογικών διεργασιών της οξείδωσης της οργανικής ύλης, της νιτροποίησης και της ενδογενούς αναπνοής.

Ενώ η παροχή οξυγόνου είναι ομοιόμορφη θεωρείται πως η ζήτηση είναι μεγαλύτερη στο πρώτο μισό του CW και επομένως διαστασιολογείται με το υποδιπλάσιο φορτίο της αντικειμενικής του οργανικής φόρτισης. Πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη την φύτευση του υγροβιότοπου περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη γεγονός που επηρεάζει την τελική επιφάνεια αλλά και την αποδοτικότητα στην επεξεργασία

λυμάτων ανάλογα με το είδος και τα χαρακτηριστικά του φυτού. Επομένως το απαιτούμενο οξυγόνο εξισώνεται με το διαθέσιμο οξυγόνο που προσλαμβάνει ο HSSF-CW και άρα προκύπτει η σχέση:

$$OD = OI$$

Όπου:

OD : Απαιτούμενο Οξυγόνο [kg/d]

OI: Διαθέσιμο Οξυγόνο [kg/d]

Το διαθέσιμο οξυγόνο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$OI = u * A_{s,H,6}$$

Όπου:

OI: Διαθέσιμο οξυγόνο [kg/d]

u: Συντελεστής μεταφοράς για τα αναφυόμενα φυτά [g/m²/d]

$A_{s,H,6}$: Επιφάνεια του τεχνητού υδροβιότοπου [m²]

Ο συντελεστής u έχει τιμές μεταξύ 5-45 [g/m²/d] και τυπική τιμή 20 [g/m²/d] και αυτή έχει ληφθεί.

Το απαιτούμενο οξυγόνο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$OD = N * L'_o$$

Όπου:

OD: Απαιτούμενο οξυγόνο [kg/d]

N: Εμπειρικός συντελεστής του λόγου του ολικού BOD προς το BOD των 5 ημερών

L'_o : Αναπροσαρμοσμένο οργανικό φορτίο σε όρους BOD [kg/d]

Για τον εμπειρικό συντελεστή N η τυπική τιμή είναι 1.5

Για το αναπροσαρμοσμένο οργανικό φορτίο L'_o ισχύει:

$$L'_o = \frac{L_o}{2}$$

Όπου:

L'_o : Αναπροσαρμοσμένο οργανικό φορτίο σε όρους BOD [kg/d]

L_o : Πραγματικό οργανικό φορτίο σε όρους BOD [kg/d]

Επομένως, η τελική επιφάνεια προκύπτει από την επίλυση των παραπάνω σχέσεων είναι η ακόλουθη:

$$A_{S,H,6} = \frac{N * L'_o}{u}$$

4.6 Διαστασιολόγηση Τεχνητών Υγροβιότοπων Κατακόρυφης Υπό-Επιφανειακής Ροής (CW-VSSF)

Οι μεθοδολογίες διαστασιολόγησης σχετίζονται είτε με την παρουσία οξυγόνου που προκύπτει από μηχανιστικές σχέσεις υπολογισμού, είτε προκύπτουν από εμπειρικά δεδομένα. Είναι συχνό φαινόμενο η αναγκαία επιφάνεια ανά κάτοικο να αποτελεί την βασική παράμετρο διαστασιολόγησης CW-VSSF.

Ένα σύστημα CW-VSSF χαρακτηρίζεται τόσο από την επιτρεπόμενη υδραυλική φόρτιση (Hydraulic Loading Rate HLR) όσο και από την επιτρεπόμενη οργανική φόρτιση (Organic Loading Rate OLR) (Stefanakis et al., 2014) καθώς η υδραυλική και η οργανική φόρτιση εμπλέκονται στην εμφάνιση εμφράξεων ή μη των συστημάτων CW-VSSF και SF-CW.

Τα CW-VSSF συστήματα έχουν ως πλεονέκτημα τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων οξυγόνου (Oxygen Transfer Capacity OTC), καθώς αρκετές βιοχημικές διεργασίες προϋποθέτουν την παρουσία οξυγόνου (αποσύνθεση της οργανικής ύλης, νιτροποίηση). Το οξυγόνο αντλείται από το υπάρχον διαλυμένο οξυγόνο εντός των λυμάτων (μικρή συνεισφορά), από τον διακοπτόμενο τρόπο παροχέτευσης (αποτελεί τη μεγαλύτερη συνεισφορά) και μέσω της ατμοσφαιρικής διάχυσης.

Οι μεθοδολογίες διαστασιολόγησης που θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία αφορούν μεθόδους στηριζόμενες α) σε εμπειρικά κριτήρια και δεδομένα (HLR, OLR), β) σε σχέσεις μηχανιστικές που αφορούν την πρόσληψη οξυγόνου (OTC), σε εμπειρικές σχέσεις (αναγκαία επιφάνεια ανά κάτοικο) (Rule-of-Thumb).

Κριτήρια για την διαστασιολόγηση της τελικής επιφάνειας των επιμέρους μονάδων αποτέλεσαν η φύτευση καλαμιών (*Phragmites australis*), η ύπαρξη παράλληλων σειρών επεξεργασίας με τις οποίες αυξάνεται η ευελιξία και προσαρμοστικότητα του συστήματος, η εφαρμογή των γερμανικών κανονισμών δηλαδή το 25% της επιφάνειας να είναι σε φάση ανάπαυσης για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος, η εφαρμογή των Αυστριακών κανονισμών όπου η επιφάνεια κάθε μονάδας είναι μικρότερη των 400 m². Σημειώνεται ότι ο έλεγχος σε σύστημα CW-VSSF αφορά το HLR και το OLR καθώς το 25% είναι σε ανάπαυση κάθε χρονική περίοδο και μόνο το 75% της εγκατάστασης δέχεται το σύνολο της παροχής και των φορτίων.

Διαστασιολόγηση Βάσει της Επιτρεπόμενης Υδραυλικής Φόρτισης (HLR)

Για την κατασκευή ενός υγροβιότοπου σημαντική παράμετρο αποτελούν οι επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, γεγονός που επηρεάζει την επιλογή της τιμής της επιτρεπόμενης υδραυλικής φόρτισης για την διαστασιολόγηση. Στα ψυχρά κλίματα οι επιτρεπόμενες τιμές της είναι μεταξύ 0.05-0.1 [m³/m²/d] ενώ για θερμά 0.15-0.2 [m³/m²/d] (Stefanakis et al. 2014, Hoffmann et al., 2011). Σε πολλές χώρες παρατηρούνται αποκλίσεις από το εύρος των τιμών που αναφέρονται ανωτέρω.

Εφαρμόζοντας την πιο κάτω σχέση προκύπτει η απαιτούμενη επιφάνεια:

$$A_{s,v,1} = \frac{Q}{HLR}$$

Όπου:

$A_{s,v,1}$: Επιφάνεια του υγροβιότοπου [m²]

Q: Παροχή λυμάτων [m³/d]

HLR: Επιτρεπόμενη υδραυλική φόρτιση [m³/m²/d]

Εξ ορισμού η μεθοδολογία έχει βάση τα εμπειρικά κριτήρια και δεδομένα ως εκ τούτου επιτρέπει να παρεισφρέει σε μεγάλο βαθμό το ρίσκο της επιλογής. Το μεγάλο εύρος επιτρεπόμενων τιμών της HLR έχει επιτρέψει την δημιουργία υγροβιότοπων με σημαντικές διαφορές ως προς το είδος των λυμάτων προς επεξεργασία, ως προς το βάθος, το υλικό πληρώσεως κλπ.

Διαστασιολόγηση Βάσει της Επιτρεπόμενης Οργανικής Φόρτισης (OLR)

Οι κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής επηρεάζουν την επιτρεπόμενη οργανική φόρτιση άρα και την διαστασιολόγηση ενός συστήματος CW-VSSF. Στα ψυχρά κλίματα το αποδεκτό εύρος των τιμών οργανικής φόρτισης είναι 20-30 [gCOD/m²/d] ενώ για θερμά 80 [gCOD/m²/d] (Stefanakis et al., 2014).

Εφαρμόζοντας την σχέση:

$$A_{s,v,2} = \frac{C_i * Q}{OLR}$$

Όπου:

$A_{s,v,2}$: Επιφάνεια του υγροβιότοπου [m²]

C_i : COD εισόδου [mg/L]

Q: Παροχή λυμάτων [m³/d]

OLR: Επιτρεπόμενη οργανική φόρτιση [gCOD/m²/d]

Εξ ορισμού η μεθοδολογία έχει ως βάση εμπειρικά κριτήρια και Δεδομένα ως εκ τούτου επιτρέπει να παρεισφρέει σε μεγάλο βαθμό το ρίσκο της επιλογής. Το μεγάλο εύρος επιτρεπόμενων τιμών της OLR έχει επιτρέψει την δημιουργία υδροβιότοπων με σημαντικές διαφορές ως προς το είδος των λυμάτων προς επεξεργασία, ως προς το βάθος, το υλικό πληρώσεως κλπ.

Διαστασιολόγηση με την Χρήση Σχέσεων για την Πρόσληψη Οξυγόνου

Οι μεθοδολογίες διαστασιολόγησης που βασίζονται στη χρήση σχέσεων για τον υπολογισμό του απαιτούμενου οξυγόνου, βασίζονται στις απαιτήσεις του εισαγόμενου οξυγόνου βάσει των βιολογικών διεργασιών που επιτελούνται.

Διαστασιολόγηση με βάση το Ισοζύγιο Οξυγόνου κατά Cooper.

Η πιο κάτω εξίσωση δίνει την ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την λειτουργία του συστήματος (Cooper, 1999).

$$OD = Q * (4.3 * (C_{N,i} - C_{N,o}) + (C_{BOD,i} - C_{BOD,o}))$$

Όπου:

OD : Απαιτούμενο Οξυγόνο [g/d]

Q: Παροχή λυμάτων [m³/d]

C_{N,i}: Συγκέντρωση αζώτου στην είσοδο [mg/L]

$C_{N,o}$: Συγκέντρωση αζώτου στην έξοδο [mg/L]

$C_{BOD,i}$: Συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην είσοδο σε όρους BOD [mg/L]

$C_{BOD,o}$: Συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην έξοδο σε όρους BOD [mg/L]

Ο Cooper χρησιμοποιεί τον όρο TKN για το άζωτο το οποίο συμπεριλαμβάνει τις οργανικές ενώσεις του αζώτου και το αμμωνιακό άζωτο που περιέχονται στα προς επεξεργασία λύματα

Η απαιτούμενη επιφάνεια προκύπτει από την σχέση:

$$A_{s,v,3} = \frac{OD}{OTR}$$

Όπου:

$A_{s,v,3}$: Επιφάνεια του υδροβιότοπου [m²]

OD : Απαιτούμενο Οξυγόνο [kg/d]

OTR: Ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου (Oxygen Transfer Rate OTR) [gO₂/m²/d]

Ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου (OTR) κατά Cooper et al (1999) κυμαίνεται στις τιμές 50 έως 90 [gO₂/m²/d], κατά Green et al (1997) κυμαίνεται μεταξύ 56-60 [gO₂/m²/d], ενώ κατά Platzer (1999) μεταξύ 23-64 [gO₂/m²/d].

Διαστασιολόγηση βάσει του Ισοζυγίου Οξυγόνου από τους Kadlec & Wallace.

Η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την λειτουργία του συστήματος κατά Kadlec & Wallace (2009) προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$OD = Q * (4.6 * (C_{N,i} - C_{N,o}) + (C_{BOD,i} - C_{BOD,o}))$$

Όπου:

OD : Απαιτούμενο Οξυγόνο [g/d]

Q: Παροχή λυμάτων [m³/d]

C_{N,i}: Συγκέντρωση αζώτου στην είσοδο [mg/L]

C_{N,o}: Συγκέντρωση αζώτου στην έξοδο [mg/L]

C_{BOD,i}: Συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην είσοδο σε όρους BOD [mg/L]

C_{BOD,o}: Συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην έξοδο σε όρους BOD [mg/L]

Η απαιτούμενη επιφάνεια προκύπτει από την σχέση:

$$A_{s,v,4}' = \frac{OD}{OTR}$$

Όπου:

$A_{s,v,4}'$: Επιφάνεια του υγροβιότοπου [m^2]

OD : Απαιτούμενο Οξυγόνο [kg/d]

OTR: Ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου (Oxygen Transfer Rate OTR) [$gO^2/m^2/d$]

Ομοίως με πιο πάνω ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου θεωρήθηκε ίσος με $OTR=30$ [$gO^2/m^2/d$]

Οι Brix et al (2002) αναφέρουν ότι στον σχεδιασμό CW-VSSF περιοδικής φόρτισης με την προσαύξηση της επιφάνειας κατά 25% μπορεί το σύστημα να φτάσει ένα βαθμό απομάκρυνσης ίσο με 85% για την απομάκρυνση του αζώτου

Επομένως η τελική επιφάνεια είναι ίση με:

$$A_{s,v,4} = 1.25 * A_{s,v,4}'$$

Όπως παρουσιάστηκε ανωτέρω ο διαφορετικός τρόπος προσέγγισης για τον υπολογισμό του απαιτούμενου οξυγόνου για τις βιοχημικές διεργασίες (διαφορετικές μεθοδολογικές

προσεγγίσεις) οφείλεται στο ποιες παραδοχές γίνονται ως προς τις ενώσεις του αζώτου που καλούνται να επεξεργαστούν. Ως κοινός τόπος εντοπίζεται ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των CW-VSSF, αυτό της πρόσληψης οξυγόνου. Όλες οι μέθοδοι περιγράφουν το φαινόμενο με παρόμοιο τρόπο με τους αντίστοιχους στα συμβατικά συστήματα ως εκ τούτου υπάρχει έλλειψη δεδομένων για τους CW-VSSF και τα μοντέλα περιγραφής δεν καλύπτουν τις ιδιομορφίες και το βάθος της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος

Κεφάλαιο 5: Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρύπων

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι απομακρύνουν μια πληθώρα ρύπων από τα λύματα με διεργασίες όμοιες με αυτές που λαμβάνουν χώρα στα φυσικά οικοσυστήματα. Πιο συγκεκριμένα, οι ρύποι διαχωρίζονται και μετατρέπονται μέσω διάφορων φυσικών, χημικών, και βιολογικών διεργασιών που είτε συμβαίνουν ταυτόχρονα είτε ξεχωριστά καθώς το απόβλητο ρέει μέσα στον υδροβιότοπο. Οι μηχανισμοί καθώς και ο τρόπος με τον οποίο συμβαίνουν εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως η σύσταση και η ποσότητα του λύματος, η συχνότητα παροχής του αποβλήτου, το υπόστρωμα, τα φυτά του υδροβιότοπου, τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος και το κλίμα της περιοχής [54]. Το οργανικό φορτίο (βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο – BOD και χημικά απαιτούμενο οξυγόνο – COD), τα αιωρούμενα στερεά, το άζωτο, ο φωσφόρος, τα βαρέα μέταλλα, οι παθογόνοι μικροοργανισμοί καθώς και πιο ειδικοί ρύποι όπως τα παρασιτοκτόνα, τα παραπροϊόντα από είδη προσωπικής υγιεινής, αντιβιοτικά και ορμόνες είναι οι κύριοι ρύποι που απομακρύνονται από τα απόβλητα με την χρήση τεχνητών υδροβιότοπων.

5.1 Απομάκρυνση Αιωρούμενων Στερεών

Τα αιωρούμενα στερεά στα αστικά λύματα αποτελούνται από διάφορα ανόργανα και οργανικά υλικά. Επίσης, τα αιωρούμενα στερεά μπορεί να αποτελούν προϊόντα των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Ο όρος αιωρούμενα στερεά αναφέρεται σε σωματίδια που υπάρχουν στα λύματα με μέγεθος μεγαλύτερο από 1-2 μm [57]. Το μέγεθος των στερεών, το πορώδες και το πάχος του πληρωτικού υλικού, η φύση τους, η

ταχύτητα ροής του υγρού, η ανάπτυξη βιολογικής στιβάδας τόσο στο πληρωτικό υλικό όσο και γύρω από τις ρίζες είναι κάποιιοι βασικοί παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την αποτελεσματικότητα του τεχνητού υδροβιότοπου να απομακρύνει τα αιωρούμενα στερεά. Στους τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής ροής, τα αιωρούμενα στερεά, οργανικά και ανόργανα, απομακρύνονται συνήθως μέσω της κροκίδωσης/καθίζησης και τα οργανικά στερεά λόγω βιολογικής επεξεργασίας (αφού πρώτα έχουν καθιζάνει).

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών γίνεται διύλιση διαμέσου του πληρωτικού υλικού καθώς τα αιωρούμενα σωματίδια κατακρατούνται μέσα στους πόρους του υλικού. Επιπλέον, τα οργανικά αιωρούμενα στερεά που κατακρατούνται διασπώνται βιολογικά από τη βιομάζα που αναπτύσσεται μέσα στους πόρους του πληρωτικού υλικού.

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζεται η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών από αστικά υγρά απόβλητα σε διάφορους τύπους υδροβιότοπων με την χρήση διαφορετικών φυτών.

Όπως παρατηρείται η απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών σε όλους τους τύπους υδροβιότοπων είναι ικανοποιητική. Παρόλα αυτά, στους τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης ροής υποεπιφανειακής ροής παρατηρείται το μεγαλύτερο ποσοστό απομάκρυνσης σύμφωνα με την βιβλιογραφία (έως και 97%) [73-76]. Επιπρόσθετα, το είδος φυτού που χρησιμοποιείται επηρεάζει την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών. Πιο συγκεκριμένα, στους υδροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, παρατηρήθηκε ότι το φυτό *Phragmites Australis* ήταν πιο αποτελεσματικό στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών από ότι το *Cyperus Papyrus* [74]. Για συστήματα υποεπιφανειακής ροής, η συγκέντρωση των αιωρούμενων

στερεών στην εκροή είναι χαμηλότερη ή κοντά στο ανώτατο επιτρεπτό όρια της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ για διάθεση σε υδάτινο αποδέκτη που είναι τα 35 mg/L [69].

Πίνακας 5.1: Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών από αστικά λύματα.

Είδος υγροβιότοπου	Είδος φυτού	Εισροή (mg/L)	Εκροή (mg/L)	Ποσοστό απομάκρυνσης (%)	Βιβλιογραφία
Τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής	<i>Typha domingensis</i>	165	35	78	[73]
Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής	<i>Cyperus Papyrus</i>	149	8	94.6	[74]
	<i>Phragmites Australis</i>		4	97.3	
Υβριδικό σύστημα τεχνητών υγροβιότοπων (κάθετη ροή ακολουθούμενη από οριζόντια ροή)	<i>Typha angustifolia</i>	168.6	39	74	[75]
	<i>Pistia stratiotes</i>		27	82	

5.1.1 Απομάκρυνση Στερεών σε Τεχνητούς Υδροβιότοπους Επιφανειακής Ροής

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής ροής, τα αιωρούμενα στερεά οργανικά και ανόργανα, απομακρύνονται συνήθως μέσω της κροκίδωσης/καθίζησης και τα οργανικά στερεά λόγω βιολογικής επεξεργασίας (αφού πρώτα έχουν καθιζάνει) [58]. Ταυτόχρονα όμως είναι η δυνατή η παραγωγή αιωρούμενων στερεών μέσω του θανάτου και της αποσύνθεσης μικροοργανισμών, τον κατακερματισμό των φυτικών υπολειμμάτων, την παραγωγή μικροβίων στο νερό ή στην επιφάνεια και το σχηματισμό χημικών ιζημάτων [30]. Η πλειονότητα των αιωρούμενων στερεών απομακρύνονται σε μια απόσταση 15 έως 30 μέτρα από την είσοδό τους στον υδροβιότοπο. Η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών ενισχύεται και βελτιστοποιείται με την παρουσία πλούσιας βλάστησης η οποία έχει την δυνατότητα να ενισχύει την καθίζηση και την διήθηση και ταυτόχρονα εμποδίζει την ανάπτυξη των αλγών. Επίσης, τα σωματίδια ενός τέτοιου τύπου υδροβιότοπου είναι κολλώδη και αναδεύονται εύκολα και συνήθως δεν επιπλέουν. Παρόλα αυτά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες όπως ο στροβιλισμός, η παραγωγή οξυγόνου από τα άλγη, η συσσώρευση κολλοειδών μπορούν να επιπλεύσουν. Ωστόσο, τέτοια επαναιώρηση δεν θεωρείται σημαντική.

5.1.2 Απομάκρυνση Στερεών σε Τεχνητούς Υδροβιότοπους Υποεπιφανειακής Ροής

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών γίνεται διύλιση διαμέσου του πληρωτικού υλικού καθώς τα αιωρούμενα σωματίδια κατακρατούνται και καθιζάνουν μέσα στους πόρους του υλικού. Η βασική

διαφοροποίηση σε σχέση με τα συστήματα επιφανειακής ροής έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι ο βασικός μηχανισμός απομάκρυνσης στους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής είναι η διύλιση και κατακράτηση από το πληρωτικό υλικό και όχι η καθίζηση. Επιπλέον, τα οργανικά αιωρούμενα στερεά που κατακρατούνται διασπώνται βιολογικά από τη βιομάζα που αναπτύσσεται μέσα στους πόρους του πληρωτικού υλικού.

Οι ρίζες και τα ριζώματα αποσυντίθεται με αποτέλεσμα την παραγωγή παραπροϊόντων. Αντίστοιχα, οι μύκητες, και τα βακτήρια όταν πεθαίνουν αποσυντίθενται και παράγουν αιωρούμενα στερεά. Σε αυτούς του υδροβιότοπους η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών γίνεται είτε με κροκίδωση είτε με καθίζηση των κολλοειδών σωματιδίων. Οι χαμηλές ταχύτητες ροής και η μεγάλη επιφάνεια του υποστρώματος ευνοούν την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών στους υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής. Τα συστήματα αυτά είναι προστατευμένα από ρεύματα ανέμου που θα προκαλούσε επαναιώρηση των στερεών. Επιπλέον ο μηχανισμός της διύλισης διαμέσου του πληρωτικού υλικού είναι πολύ πιο αποδοτικός στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών σε σχέση με την καθίζηση. Για αυτό το λόγο οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών στην έξοδο ενός υποεπιφανειακού τεχνητού υδροβιότοπου είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές στην περίπτωση των υδροβιότοπων επιφανειακής ροής. Το μεγαλύτερο ποσοστό των αιωρούμενων στερεών καθιζάνει ή παγιδεύεται σε απόσταση περίπου ίση με το 10-20% της συνολικής απόστασης του συστήματος. Παρόλα αυτά η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών των προς επεξεργασία λυμάτων πρέπει γενικότερα να μειώνεται στην είσοδο με πρωτοβάθμια επεξεργασία καθώς η απουσία της μπορεί να δημιουργήσει απόφραξη των συστημάτων.

5.2 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου

Η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου στους τεχνητούς υδροβιότοπους πραγματοποιείται στα οργανικά αιωρούμενα στερεά που έχουν καθιζάνει στα συστήματα επιφανειακής ροής και στα οργανικά αιωρούμενα στερεά που έχουν κατακρατηθεί στο πληρωτικό υλικό με την υδρόλυση και την οξείδωση του οργανικού φορτίου από την αναπτυσσόμενη βιομάζα. Επιπλέον, το διαλυτό οργανικό φορτίο (διαλυτό BOD) διασπάται βιολογικά με υψηλή ταχύτητα κατά την επαφή των λυμάτων με τη βιομάζα που υπάρχει μέσα στον τεχνητό υδροβιότοπο και έχει αναπτυχθεί στο πληρωτικό υλικό (τεχνητός υδροβιότοπος υποεπιφανειακής ροής), και τη βιομάζα που έχει καθιζάνει ή βρίσκεται σε αιώρηση στο υγρό (τεχνητός υδροβιότοπος επιφανειακής ροής) [59]. Θα πρέπει ο εφαρμοζόμενος υδραυλικός χρόνος παραμονής στον τεχνητό υδροβιότοπο να είναι επαρκής ώστε να επιτυγχάνεται η αποδοτική απομάκρυνση του διαλυτού BOD. Η βιολογική διάσπαση του οργανικού φορτίου μπορεί να λάβει χώρα κάτω από αερόβιες, ανοξικές ή αναερόβιες συνθήκες ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στον τεχνητό υδροβιότοπο. Το είδος της βιοδιάσπασης καθορίζεται βάσει της ποσότητας του οξυγόνου στο σημείο απόθεσης, το οποίο προέρχεται από τη διάχυση από τις ρίζες των φυτών στη ριζόσφαιρα. Επομένως, η διεργασία αυτή μπορεί να είναι αερόβια κοντά στην επιφάνεια των υδροβιότοπων επιφανειακής ροής και σε αερόβιες περιοχές στους υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής (κοντά στο ριζικό σύστημα των φυτών όπου αναπτύσσονται αερόβιες/μικροαερόβιες συνθήκες). Ωστόσο σε βάθη μεγαλύτερα από 0,3-0,4 m στους επιφανειακούς υδροβιότοπους επικρατούν αναερόβιες συνθήκες (ή ανοξικές συνθήκες εάν υπάρχει παρουσία νιτρικών) με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται αναερόβια βιολογική διάσπαση. Στους οριζόντιους υποεπιφανειακούς τεχνητούς υδροβιότοπους, καθώς το υγρό

απομακρύνεται από το ριζικό σύστημα των φυτών επικρατούν αναερόβιες συνθήκες με αποτέλεσμα και η βιολογική διάσπαση να είναι αναερόβια.

Στον τεχνητό υγροβιότοπο κατακόρυφης ροής στον οποίο τα λύματα εφαρμόζονται περιοδικά επικρατούν, επικρατούν κατά βάσει πλήρως αερόβιες συνθήκες καθώς ο υγροβιότοπος είναι ακόρεστος. Σε αυτού του τύπου τον υγροβιότοπο η διάσπαση του οργανικού φορτίου λαμβάνει χώρα υπό αερόβιες συνθήκες.

Η θερμοκρασία, η ανάπτυξη των φυτών και ο τύπος του υδροβιότοπου φαίνεται να είναι καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απομάκρυνση του BOD₅. Η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου είναι ταχύτερη στους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής συγκριτικά με τους τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής [28].

Η βιολογική διάσπαση βασίζεται στο γεγονός ότι οι μικροοργανισμοί απαιτούν για την αναπαραγωγή τους συνεχόμενη παροχή πηγής ενέργειας και θρεπτικών στοιχείων, μια πηγή οργανικού άνθρακα δηλαδή για τη σύνθεση νέου κυτταρικού υλικού και ανόργανα στοιχεία (θρεπτικά), όπως είναι το άζωτο, ο φώσφορος, το θείο, το κάλιο, το ασβέστιο και το μαγνήσιο. Οι βιολογικές μετατροπές που λαμβάνουν χώρα πραγματοποιούνται μέσω διαφόρων χημικών αντιδράσεων όπως περιγράφονται παρακάτω.

5.2.1 Αερόβια Διάσπαση Οργανικού Φορτίου

Η αερόβια διάσπαση του οργανικού φορτίου πραγματοποιείται από αερόβιους, ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς με βάση την πιο κάτω βιοχημική αντίδραση με την υπόθεση ότι τα αστικά λύματα περιέχουν γλυκόζη ($C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$). Σε αυτή την

αντίδραση δότης ηλεκτρονίων είναι η οργανική ύλη και αποδέκτης ηλεκτρονίων είναι το οξυγόνο. Η αντίδραση αυτή έχει μεγάλη αποδοτικότητα όταν υπάρχει ικανοποιητική συγκέντρωση οξυγόνου και συνήθως λαμβάνει χώρο στις αερόβιες περιοχές όπου αναπτύσσεται βιοφίλμ.

5.2.2 Αναερόβια Διάσπαση Οργανικού Φορτίου

Απουσία οξυγόνου παρατηρείται αναερόβια διάσπαση του οργανικού φορτίου των λυμάτων. Η αναερόβια διάσπαση είναι σε μια πολύπλοκη διεργασία πολλών βημάτων με την ανάπτυξη αναερόβιων ετεροτροφικών βακτηρίων. Το πρώτο στάδιο της αναερόβιας βιοαποδόμησης των σύνθετων οργανικών ενώσεων είναι η υδρόλυση και περιλαμβάνει την υδρόλυση υδατανθράκων, πρωτεϊνών και λιπιδίων σε πτητικά οξέα, μονοσακχαρίτες και λιπίδια αντίστοιχα. Η υδρόλυση αποτελεί σημαντικό στάδιο για την επιτυχή ολοκλήρωση της αναερόβιας διεργασίας, καθώς χωρίς αυτό οι σύνθετες οργανικές ενώσεις δεν είναι αξιοποιήσιμες από τα βακτήρια που επιτελούν τη ζύμωση.

Το δεύτερο βήμα της αναερόβιας διάσπασης ονομάζεται οξεογένεση στο οποίο παράγονται τα διαφορετικά οξέα. Η οξεογένεση περιλαμβάνει την αναερόβια διάσπαση αμινοξέων, σακχάρων, ανώτερων λιπαρών οξέων και αλκοολών. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει αντιδράσεις ζύμωσης στις αναερόβιες ζώνες κατά τις οποίες παράγονται οξικό οξύ ($C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3 CH_3COOH + H_2$), γαλακτικό οξύ ($C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 CH_3CHOHCOOH$), προπιονικό οξύ (CH_3CH_2COOH), και αιθανόλη ($C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 CO_2 + 2 CH_3CH_2OH$).

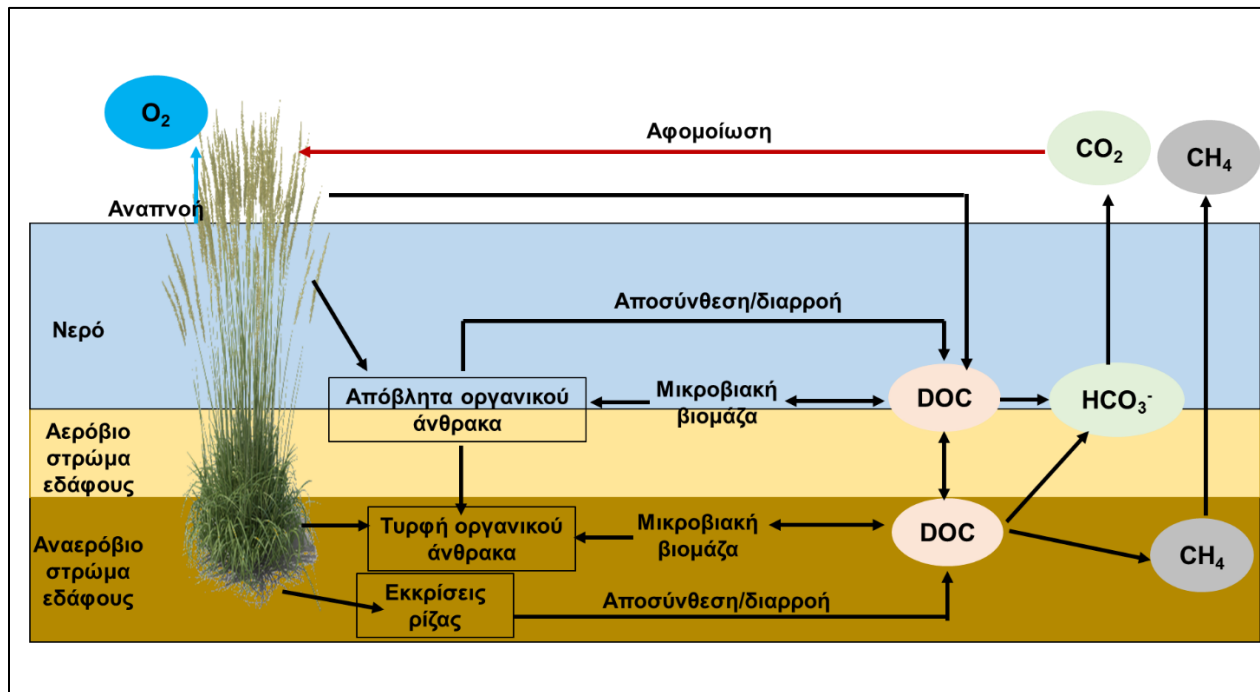
Το τρίτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης είναι γνωστό με τον όρο οξικογένεση. Κατά

το στάδιο της οξικογένεσης πραγματοποιείται η παραγωγή των ενδιάμεσων οξέων. Πιο συγκεκριμένα, τα προϊόντα του δεύτερου σταδίου (οξεογένεση) μετατρέπονται σε οξικό οξύ, H_2 και CO_2 . Συγκεκριμένα, το προπιονικό οξύ μετατρέπεται σε οξικό οξύ ($CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + 3H_2$), η γλυκόζη και η αιθανόλη μετατρέπονται επίσης σε οξικό οξύ

$$(C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2 \quad \text{και} \quad CH_3CH_2OH + 2H_2O \rightarrow CH_3COO^- + 2H_2 + H^+ \text{ αντίστοιχα})$$

Το οξικό οξύ αποτελεί ωστόσο το πρωτεύον προϊόν ζύμωσης σε τέτοια συστήματα. Κατά το τελευταίο βήμα αναερόβια θειοαναγωγικά και μεθανογόνα βακτήρια χρησιμοποιούν τα προϊόντα της ζύμωσης και παράγουν υδρόθειο και μεθάνιο, αντίστοιχα. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι: (α) $CH_3COOH + H_2SO_4 \rightarrow 2 CO_2 + 2 H_2O + H_2S$, (β) $CH_3COOH + 4H_2 \rightarrow 2 CH_4 + 2 H_2O$, (γ) $4 H_2 + CO_2 \rightarrow 2CH_4 + 2H_2O$). Τα βακτήρια που παράγουν οξέα προσαρμόζονται ευκολότερα στις συνθήκες που επικρατούν στον υδροβιότοπο, ενώ τα μεθανογόνα βακτήρια είναι πιο ευαίσθητα και απαιτούν τιμές pH σε εύρος 6.5-7.5. Επομένως εάν παραχθούν πολλά οξέα, η τιμή του pH θα είναι χαμηλή με αποτέλεσμα να διακοπεί η μεθανογένεση.

Τέλος, αντιδράσεις αναγωγής λαμβάνουν χώρα στις αναερόβιες ζώνες που βοηθούν την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. Αυτές οι αντιδράσεις συνοψίζονται ως εξής: (α) αναγωγή θειικών $2CH_3CHOCOO^- + SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow 2CH_3COO^- + 2 CO_2 + 2 H_2O + HS^-$, $CH_3COO^- + SO_4^{2-} + 2 H^+ \rightarrow 2 CO_2 + 2 H_2O + HS$, (β) αναγωγής νιτρικών $C_6H_{12}O_6 + 4NO_3^- \rightarrow 6 H_2O + 6 CO_2 + 2 N_2 + 4e^-$, και (γ) αναγωγή σιδήρου $CH_3COO^- + 8 Fe^{+3} + 3 H_2O \rightarrow 8 Fe^{+2} + CO_2 + HCO_3^- + H_2O + 8H^+$.



Εικόνα 5.1: Ο κύκλος του άνθρακα σε τεχνητούς υγροβιότοπους (DOC: διαλυμένος οργανικός άνθρακας).

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου μπορεί να οφείλεται είτε σε αερόβια αποσύνθεσή του είτε σε αναερόβια. Έχει αναφερθεί ότι η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου είναι ταχύτερη στους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής συγκριτικά με τους τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής. Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5.2, τα ποσοστά απομάκρυνσης τόσο για τους υδροβιότοπους υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής όσο και για τους υδροβιότοπους υποεπιφανειακής οριζόντιας ροής είναι ικανοποιητικά. Η απομάκρυνση του BOD₅ σε όλες τις περιπτώσεις είναι πάνω από 75%, ενώ η απομάκρυνση του COD πάνω από 65%.

Τα επίπεδα BOD₅ στην εκροή των τεχνητών υδροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής είναι συνήθως κάτω από τα 25 mg/L που ορίζεται από την από την ελληνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία ως ανώτατο όριο για τη διάθεση σε υδάτινο αποδέκτη. Ομοίως, τα επίπεδα COD είναι συνήθως χαμηλότερα από τα 125 mg/L (ανώτατο όριο). Παρόλα αυτά στην περίπτωση του υβριδικού υδροβιότοπου ο οποίος έχει μόνο κάθετη ροή ακολουθούμενη από οριζόντια ροή, ενώ τα επίπεδα COD είναι χαμηλότερα από τα ανώτατα επιτρεπτά όρια, τα επίπεδα BOD₅ είναι μεγαλύτερα από τα επιτρεπτά όρια. Σε μια άλλη μελέτη ωστόσο, στην ίδια περίπτωση υβριδικού υδροβιότοπου χρησιμοποιώντας *Phragmites australis* ως είδος φυτού αντί *Typha angustifolia* και *Pistia stratiotes*, τα επίπεδα BOD₅ και COD ήταν εντός των επιτρεπτών ορίων [75,76].

Επιπρόσθετα, οι ρυθμοί απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου μπορούν να ενισχυθούν από την εφαρμογή υβριδικών συστημάτων τεχνητών υγροτόπων τα οποία είναι ακόρεστα στο μεγαλύτερό τους βάθος και κορεσμένα σε περιορισμένο βάθος κοντά στον πυθμένα [77].

Πίνακας 5.2: Απομάκρυνση οργανικού φορτίου από αστικά λύματα.

Είδος υγροβιότοπου	Είδος φυτού	Παράμετρος	Εισροή (mg/L)	Εκροή (mg/L)	Ποσοστό απομάκρυνσης (%)	Βιβλιογραφία
Τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής	<i>Typha domingensis</i>	BOD ₅	91	24.5	80	[73]
		COD	269	82	70	
Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής	Cyperus Papyrus	BOD ₅	96	16	83	[74]
		COD	222	73	67	
	Phragmites Australis	BOD ₅	96	22	77	
		COD	222	77	65	
Υβριδικό σύστημα τεχνητών υγροβιότοπων (κάθετη ροή ακολουθούμενη από οριζόντια ροή)	<i>Typha angustifolia</i>	BOD ₅	208	50	76	[75]
		COD	451	105	77	
	<i>Pistia stratiotes</i>	BOD ₅	208	36	83	
		COD	451	100	78	
Υβριδικό σύστημα τεχνητών υγροβιότοπων (κάθετη ροή ακολουθούμενη από οριζόντια ροή)	Phragmites australis	BOD ₅	290	12	96	[76]
		COD	277	85	69	

5.3 Απομάκρυνση Αζώτου

Το άζωτο αποτελεί κύριο στοιχείο κατά τον βιοχημικό κύκλο στους υγροβιότοπους και οι μηχανισμοί απομάκρυνσής του εξαρτώνται από την ειδικότερη μορφή του. Στα αστικά υγρά απόβλητα συναντάται στις μορφές του οργανικού αζώτου και του αμμωνιακού αζώτου. Στους υγροβιότοπους λαμβάνουν χώρα ποικίλες διεργασίες κατά τις οποίες μετατρέπεται από την μία

μορφή στην άλλη. Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης του αζώτου περιλαμβάνουν διαδοχικές διεργασίες [60].

Πιο συγκεκριμένα, το οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε αμμωνιακό άζωτο (αμμωνία ή ιόν του αμμωνίου) μέσω της υδρόλυσης και της βακτηριακής αποσύνθεσης με μια διεργασία γνωστή ως αμμωνιοποίηση. Η μετατροπή αυτή μπορεί να γίνει είτε κάτω από αερόβιες είτε κάτω από αναερόβιες συνθήκες, με το ρυθμό μετατροπής να είναι μεγαλύτερος στην πρώτη περίπτωση. Ο ρυθμός αυτός στους τεχνητούς υγροβιότοπους εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία, το pH, τα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά του συστήματος, και τις εδαφικές συνθήκες. Το οργανικό άζωτο περιέχεται στα λύματα σε μορφή στερεών συστατικών σε πολύπλοκες μεγαλομοριακές οργανικές ενώσεις.

Στη συνέχεια η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρικά με την βοήθεια αερόβιων νιτροποιητικών βακτηρίων. Το απαραίτητο οξυγόνο για να λάβει χώρα η διεργασία της νιτροποίησης παρέχεται μέσω της διάχυσης από την ατμόσφαιρα και μέσω της μεταφοράς του οξυγόνου από τις ρίζες των φυτών. Η διεργασία της νιτροποίησης αποτελεί μια βιολογική διεργασία δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο, $(2 \text{ NH}_3 + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ NO}_2^- + 2 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ H}^+)$ η αμμωνία μετατρέπεται σε νιτρώδη ιόντα τα οποία μετατρέπονται σε νιτρικά ιόντα στο δεύτερο στάδιο $(2 \text{ NO}_2^- + \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ NO}_3^-)$. Η εκτέλεση του πρώτου βήματος απαιτεί χημικολιθοτροφικά (αυστηρά αερόβια) βακτήρια όπως *Nitrosospira*, *Nitrosolobus*, *Nitrosococcus*, *Nitrosomonas* και *Nitrosomonas europaea*. Η εκτέλεση του δεύτερου βήματος απαιτεί επαμφοτερίζοντα χημικολιθοτροφικά βακτήρια, γνωστά ως *Nitrobacter winogradskyi*. Η διαδικασία της νιτροποίησης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το pH, την αλκαλικότητα, την ανόργανη πηγή άνθρακα, το μικροβιακό πληθυσμό και τις συγκεντρώσεις $\text{NH}_4\text{-N}$ και του διαλυμένου οξυγόνου.

Ένα βέλτιστο εύρος θερμοκρασιών για καθαρές καλλιέργειες και εδάφη είναι 25-35 °C και 30-40 °C, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα σε αυτές τις θερμοκρασίες αναπτύσσονται τα υδροχαρή φυτά τα οποία παρέχουν το απαραίτητο οξυγόνο για την διαδικασία της νιτροποίησης. Τα συστήματα που επιτυγχάνουν την καλύτερη νιτροποίηση είναι οι ακόρεστοι τεχνητοί υγροβιότοπο υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής λόγω των αυστηρά αερόβιων συνθηκών που παρατηρούνται σε όλο το βάθος του πληρωτικού υλικού. Αντίθετα, οι τεχνητοί υγροβιότοποι οριζόντιας ροής αντιμετωπίζουν προβλήματα με τη μεταφορά του οξυγόνου το οποίο είναι διαθέσιμο μόνο από τις ρίζες των φυτών και επομένως είναι περιορισμένο.

Μετάπειτα, τα νιτρικά μετατρέπονται σε αέριο άζωτο και υποξείδιο του αζώτου με την βοήθεια απονιτροποιητικών βακτηρίων τα οποία λειτουργούν υπό ανοξικές συνθήκες. Παρόλα αυτά δεν σημαίνει ότι πρέπει να επικρατούν ανοξικές συνθήκες σε όλο το σύστημα του υγροβιότοπου, καθώς η απονιτροποίηση μπορεί να συμβαίνει μόνο στις ανοξικές περιοχές.

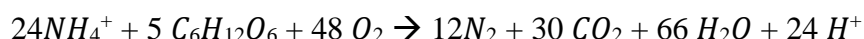
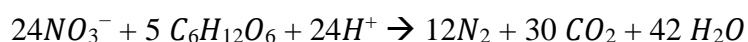
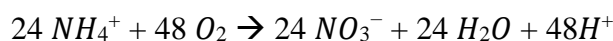
Στους ακόρεστους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής η παρουσία αερόβιων συνθηκών σε όλο το βάθος του πληρωτικού υλικού συστήματος σημαίνει ότι δεν λαμβάνει χώρα η διεργασία της απονιτροποίησης με αποτέλεσμα η τελική εκροή να έχει αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών. Όταν το νιτρικό άζωτο δεν απομακρύνεται αυτό διεισδύει στους υπόγειους υδροφορείς. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με την εφαρμογή ενός δεύτερου σταδίου τεχνητού υγροβιότοπου, είτε οριζόντιου είτε κατακόρυφου ο οποίος θα είναι πλήρως κορεσμένος ώστε να λαμβάνει χώρα η διεργασία της απονιτροποίησης.

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία της απονιτροποίησης αποτελεί μια βακτηριακή διεργασία που μπορεί να περιγραφεί ως εξής: (α) $4 \text{CH}_2\text{O} + 4\text{NO}_3^- \rightarrow 4\text{HCO}_3^- + 2\text{N}_2\text{O} + 2 \text{H}_2\text{O}$ (υποξείδιο του αζώτου), και (β) $5 \text{CH}_2\text{O} + 4\text{NO}_3^- \rightarrow 4 \text{H}_2\text{CO}_3 + 4\text{HCO}_3^- + 2\text{N}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ (αέριο

άζωτο). Έχουν αναφερθεί 17 γένη βακτηρίων, ανάμεσά τους τα γένη *Bacillus*, *Micrococcus* και *Pseudomonas* είναι τα πιο σημαντικά στα εδάφη και τα γένη *Pseudomonas*, *Aeromonas* και *Vibrio* στο υδάτινο περιβάλλον. Ο ρυθμός απονιτροποίησης βασίζεται κατά κύριο λόγο στην απουσία οξυγόνου, στο δυναμικό οξειδοαναγωγής, στην υγρασία του εδάφους, στη θερμοκρασία, στο pH, στην παρουσία νιτρικών, στον τύπο του εδάφους, στο οργανικό υλικό και στην παρουσία επικαλύπτοντος νερού [60].

Στα συστήματα των τεχνητών υδροβιότοπων, οι διεργασίες της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης μπορεί να συμβαίνουν ταυτόχρονα όταν επικρατούν και μικροαερόβιες και ανοξικές συνθήκες ή να λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικά στάδια με την εφαρμογή κορεσμένου και ακόρεστου υδροβιότοπου ως δύο διακριτά στάδια επεξεργασίας.

Συνδυάζοντας τις δυο αυτές διεργασίες, μια ισορροπημένη αντίδραση που συμβαίνει εντός αερόβιων και αναερόβιων ζωνών μπορεί να περιγράψει ως εξής [61]:

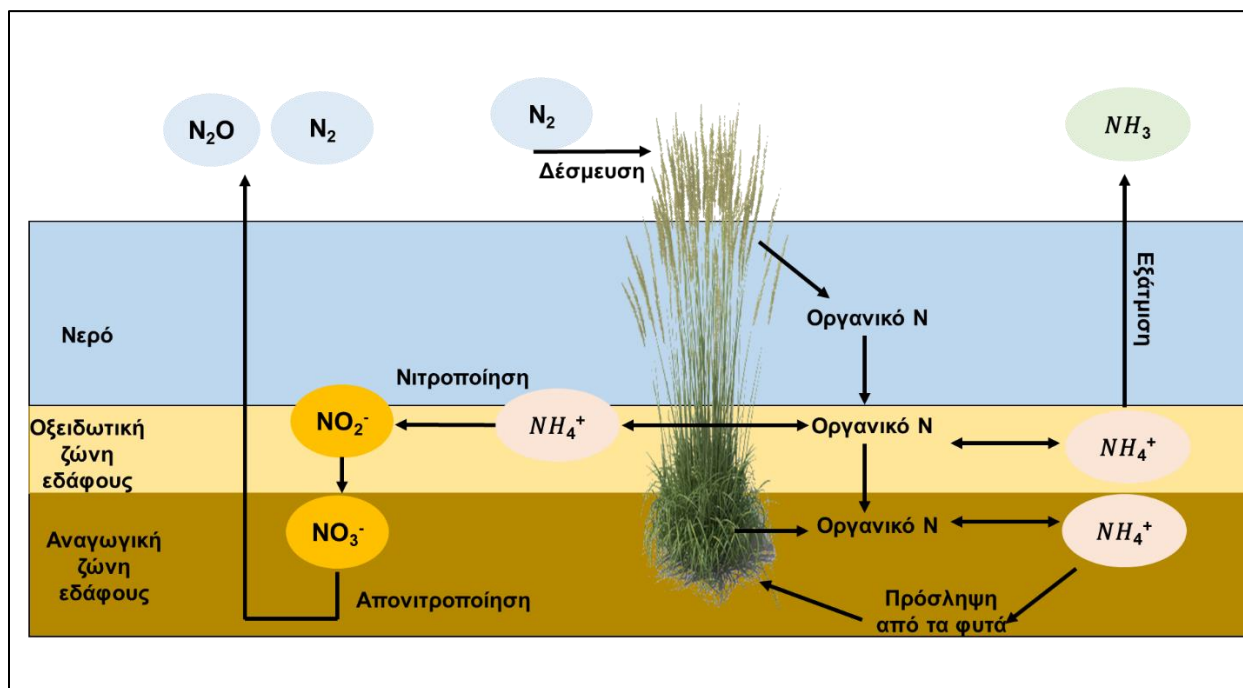


Επιπρόσθετα, το άζωτο απορροφάται από τα φυτά ως θρεπτικό συστατικό απαραίτητο για την κυτταρική σύνθεση και επανέρχεται ως οργανικό άζωτο μετά από αποσύνθεση. Ο ρυθμός πρόσληψης των θρεπτικών στοιχείων εξαρτάται από τον ρυθμό ανάπτυξης του φυτού καθώς ο ρυθμός αποθήκευσης θρεπτικών συστατικών από το φυτό περιορίζεται από την συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών στον ιστό του. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα υδροχαρή φυτά που χρησιμοποιούνται στους υδροβιότοπους για απορρόφηση θρεπτικών

συστατικών θα πρέπει να έχουν ταχεία ανάπτυξη και υψηλό ποσοστό θρεπτικών συστατικών στον ιστό τους. Έχει τονιστεί ότι ανάμεσα στα πολλά ήδη φυτών τα αναδύμενα μακρόφυτα έχουν την δυνατότητα να απομακρύνουν 1000-2500 kg N ha⁻¹ yr⁻¹, και ο υδάτινος υάκινθος μπορεί να απομακρύνει έως και 6000 kg N ha⁻¹ yr⁻¹. Από την άλλη μεριά τα βυθισμένα μακρόφυτα απομακρύνουν μικρότερες συγκεντρώσεις αζώτου έως 700 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ [23]. Παρόλα αυτά είναι απαραίτητη η συγκομιδή των φυτών του υγροβιότοπου καθώς απουσία συγκομιδής τα θρεπτικά στοιχεία θα επανέλθουν στο υγρό στοιχείο δια μέσου της διαδικασίας της αποσύνθεσης. Η εποχικότητα της συγκομιδής των φυτών είναι επίσης σημαντική διότι υπάρχουν εποχές κατά τις οποίες οι συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών στον ιστό των φυτών είναι μέγιστες.

Τέλος, η απομάκρυνση του αζώτου μπορεί να οφείλεται, σε περιορισμένο ωστόσο βαθμό, στην πτητικοποίηση και την προσρόφηση της αμμωνίας [60]. Η πτητικοποίηση της αμμωνίας αποτελεί μια διεργασία κατά την οποία το αμμωνιακό άζωτο βρίσκεται σε ισορροπία μεταξύ αέριων και υδατικών μορφών: $NH_3(aq.) + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$. Αν το pH του συστήματος είναι κάτω από το 7.5 οι απώλειες αμμωνίας μέσω πτητικοποίησης θεωρούνται πολύ μικρές. Μπορεί να εμφανιστεί μόνο σε συστήματα επιφανειακής ροής λόγω της απευθείας επαφής του υγρού με τον αέρα.

Σε αναγωγικές συνθήκες το NH₄ θεωρείται σταθερό και έχει την δυνατότητα να προσροφηθεί στο εδαφικό υπόβαθρο (στο πληρωτικό υλικό για υποεπιφανειακής ροής και στα ιζήματα σε περιπτώσεις επιφανειακής ροής). Ωστόσο αυτός ο τρόπος απομάκρυνσης δεν θεωρείται σημαντικός.



Εικόνα 5.2: Ο κύκλος του αζώτου σε τεχνητούς υγροβιότοπους.

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, οι μηχανισμοί απομάκρυνσης του αζώτου περιλαμβάνουν διαφορές διεργασίες οι οποίες μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: αμμωνιοποίηση, νιτροποίηση, απονιτροποίηση, πτητικοποίηση, προσρόφηση και πρόσληψη από τα φυτά. Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5.3, τα ποσοστά απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου για τους υγροβιότοπους υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής είναι ικανοποιητικά. Η απομάκρυνση του NH₃-N σε όλες τις περιπτώσεις είναι πάνω από 70%, ενώ η μέγιστη συγκέντρωση NO₃-N στην εκροή είναι 12.5 mg/L. Παρόλα αυτά η απομάκρυνση αζώτου στους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής δεν είναι ικανοποιητική (έως 18% απομάκρυνση TKN) [73]. Η χαμηλή αυτή απομάκρυνση του αζώτου δικαιολογείται λόγω της μειωμένης μεταφοράς οξυγόνου εντός της κλίνης που καθιστά αναποτελεσματική την διεργασία της νιτροποίησης [22].

Πίνακας 5.3: Απομάκρυνση αζώτου από αστικά λύματα.

Είδος υδροβιότοπου	Είδος φυτού	Παράμετρος	Εισροή (mg/L)	Εκροή (mg/L)	Ποσοστό απομάκρυνσης (%)	Βιβλιογραφία
Τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής	<i>Typha domingensis</i>	TKN	95	78	18	[73],[118]
		NH ₃ -N	86	60	30	
Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής	Cyperus Papyrus	NO ₃ -N	0.81	7.16	-	[74],[119]
		NH ₃ -N	29.52	8.94	70	
	Phragmites Australis	NO ₃ -N	0.81	8.35	-	
		NH ₃ -N	29.52	8.65	71	
Υβριδικό σύστημα τεχνητών υγροβιότοπων (κάθετη ροή ακολουθούμενη από οριζόντια ροή)	<i>Typha angustifolia</i>	TKN	37.5	13	66	[75],[120]
	<i>Pistia stratiotes</i>		37.5	9	76	
Υβριδικό σύστημα τεχνητών υγροβιότοπων (κάθετη ροή ακολουθούμενη από οριζόντια ροή)	Phragmites australis	TN	62	16	74	[76],[121]
		NH ₃ -N	21.2	1.1	95	
		NO _x -N	<limit of detection	12.5	-	

Τα επίπεδα αζώτου (NH₃-N και NO₃-N) στην εκροή των τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής είναι πάνω από τα 15 mg/L που ορίζεται από την νομοθεσία από την ευρωπαϊκή νομοθεσία ως η μέγιστη συγκέντρωση συνολικού αζώτου για διάθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων σε ευαίσθητες περιοχές. Αυτό σημαίνει ότι τα απόβλητα αυτά δεν μπορούν να διοχετευτούν σε υδάτινους αποδέκτες. Αξίζει να σημειωθεί ότι το είδος του φυτού (Cyperus Papyrus ή Phragmites Australis)

στην περίπτωση των τεχνητών υδροβιότοπων κάθετης υποεπιφανειακής ροής δεν είχε κάποια επιρροή στο ποσοστό απομάκρυνσης [74]. Επίσης, στα υβριδικά συστήματα υδροβιότοπων φαίνεται πως το φυτό *Phragmites australis* είναι ικανό να βοηθήσει την απομάκρυνση $\text{NH}_3\text{-N}$ (95% απομάκρυνση) [76].

5.4 Απομάκρυνση Φωσφόρου

Τα υγρά απόβλητα περιέχουν φώσφορο συνήθως σε μορφή φωσφορικών αλάτων και οι πιο πιθανές μορφές του είναι: (α) ανόργανος φώσφορος, ως ορθοφωσφορικά (PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} , H_2PO_4^-) και πολυφωσφορικά ($\text{P}_3\text{O}_{10}^{-5}$, $\text{P}_2\text{O}_7^{-4}$) και (β) οργανικός φώσφορος (σε μικρότερες ποσότητες συγκριτικά με τον ανόργανο φώσφορο).

Τα άλγη και τα φύκια χρησιμοποιούν φωσφορικά άλατα για την ανάπτυξή τους και οι μεγάλες συγκεντρώσεις φωσφόρου συμβάλλουν σε αυτήν. Οι οργανισμοί αυτοί συνήθως επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού δεσμεύοντας οξυγόνο και ταυτόχρονα αντανακλώντας την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύεται το φαινόμενο του ευτροφισμού, επομένως η απομάκρυνση του φωσφόρου από τα λύματα είναι αναγκαία. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι έχουν την δυνατότητα να απομακρύνουν κάποιες ποσότητες φωσφόρου από τα υγρά απόβλητα.

Όλοι οι τύποι τεχνητών υδροβιότοπων δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση του φωσφόρου. Πιο συγκεκριμένα, στους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής η απομάκρυνση φωσφόρου επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επιλογή υλικού του υποστρώματος το οποίο θα έχει την ικανότητα να προσροφάει φώσφορο. Η προσρόφηση αυτή του φωσφόρου οδηγείται σταδιακά σε κορεσμό με αποτέλεσμα να καθίσταται

αναγκαία η αντικατάσταση του μέσου (υποστρώματος) έτσι ώστε ο υγροβιότοπος να μπορεί να λειτουργήσει πάλι κανονικά [62].

Όσον αναφορά τους τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής, η απομάκρυνση του φωσφόρου λαμβάνει χώρα με προσρόφηση στο υπόστρωμα και χημική κατακρήμνιση καθώς και με πρόσληψη από τα φυτά. Στο πέρασμα των χρόνων τα ποσοστά απομάκρυνσης του φωσφόρου λόγω της πρόσληψης του από τα φυτά θεωρούνται πολύ μικρά καθώς μπορεί τα φυτά να προσλαμβάνουν τον ανόργανο φώσφορο ωστόσο κατά το τέλος της ζωής τους απελευθερώνουν φώσφορο. Επομένως σε τέτοια συστήματα η απομάκρυνση του φωσφόρου βασίζεται κατά κύριο λόγο στην συσσώρευσή του στα ιζήματα του υγροβιότοπου. Οι μορφές του φωσφόρου που κατακρατούνται στα ιζήματα είναι αυτές που δεν υπόκεινται σε αποσύνθεση και εν τέλη απομακρύνονται από το σύστημα ως συσσωρευμένα ιζήματα. Επιπρόσθετα, υπάρχουν μορφές του φωσφόρου οι οποίες μπορούν να μετασχηματίζονται μέσω διάφορων διεργασιών και στην συνέχεια να προσλαμβάνονται από τα υδροχαρή φυτά ως θρεπτικά συστατικά.

Γενικά, οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης του φωσφόρου σε τεχνητούς υγροβιότοπους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: (α) προσρόφηση στο υπόστρωμα και χημική κατακρήμνιση, (β) αφομοίωση στο βιολογικό φιλμ (βιοφίλμ), και (γ) πρόσληψη από τα φυτά.

Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5.4, όταν η συγκέντρωση φωσφόρου στην εισροή είναι χαμηλή (1.4 mg/L) τότε υπάρχει η δυνατότητα απομάκρυνσης έως και 86 % με την χρήση υβριδικών υγροβιότοπων. Σε αυτήν την περίπτωση, τα επίπεδα αζώτου φωσφόρου στην εκροή των τεχνητών υγροβιότοπων είναι χαμηλότερα από τα 1-2 mg/L που ορίζεται από την νομοθεσία από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία ως η μέγιστη συγκέντρωση συνολικού φωσφόρου για διάθεση

των επεξεργασμένων αποβλήτων σε ευαίσθητες περιοχές [75]. Από την άλλη μεριά, όταν η συγκέντρωση φωσφόρου στην εισροή είναι υψηλότερη (μεγαλύτερη από 6 mg/L) η απομάκρυνση φτάνει μόνο στο 50% και τα επίπεδα φωσφόρου στην εκροή είναι αρκετά υψηλότερα από τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια που ορίζει η νομοθεσία [73,74]. Τέλος, το είδος του φυτού τόσο στην περίπτωση των υβριδικών υγροβιότοπων (*Typha angustifolia* και *Pistia stratiotes*) όσο και στην περίπτωση των υγροβιότοπων κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής (*Cyperus Papyrus* και *Phragmites Australis*) φαίνεται να μην έχει επίπτωση στο ποσοστό απομάκρυνσης του φωσφόρου [74,75].

Πίνακας 5.4: Απομάκρυνση φωσφόρου από αστικά λύματα.

Είδος υγροβιότοπου	Είδος φυτού	Παράμετρος	Εισροή (mg/L)	Εκροή (mg/L)	Ποσοστό απομάκρυνσης (%)	Βιβλιογραφία
Τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής	<i>Typha domingensis</i>	TP	19	13.3	30	[73]
Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής	<i>Cyperus Papyrus</i>	TP	6.4	3.14	51	[74]
	<i>Phragmites Australis</i>	TP	6.4	3.21	50	
Υβριδικό σύστημα τεχνητών υγροβιότοπων (κάθετη ροή ακολουθούμενη από οριζόντια ροή)	<i>Typha angustifolia</i>	TP	1.4	0.25	86	[75]
	<i>Pistia stratiotes</i>	TP	1.4	0.3	83	

5.5 Απομάκρυνση Παθογόνων Μικροοργανισμών

Τα αστικά λύματα περιλαμβάνουν και παθογόνους μικροοργανισμούς όπως βακτήρια, ιούς και πρωτόζωα. Για να προσδιοριστούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί στο νερό χρησιμοποιούνται κάποιοι δείκτες παθογένειας όπως είναι κολοβακτηρίδια, *Escherichia Coli* (E-Coli), τα *Enterobacter Aerogenes*, τα κολοβακτηρίδια περιττωματικής προέλευσης (Fecal Coliforms, FC) και το σύνολο των κολοβακτηριδίων (Total Coliforms, TC). Οι μικροοργανισμοί αυτοί απομακρύνονται σε ένα βαθμό στους τεχνητούς υγροβιότοπους με διάφορες φυσικές, χημικές, και βιολογικές διεργασίες όπως καθίζηση, προσρόφηση, ακτινοβολία, ξήρανση, εμπλοκή, ανταγωνιστικές επιδράσεις, φυσική φθορά και γενικά έκθεση σε άλλες αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες (Πίνακας 5.5) [55].

Πίνακας 5.5: Μηχανισμοί απομάκρυνσης παθογόνων σε τεχνητούς υγροτόπους [63].

Μηχανισμός Απομάκρυνσης	Διαδικασία	Παράμετρος
Φυσικοχημικός	Καθίζηση	Παράμετροι συστήματος, τύπος υποστρώματος
	UV ακτινοβολία από το ηλιακό φως	Παράμετροι συστήματος
	Διύλιση	Παράμετροι συστήματος, τύπος υποστρώματος
	Οξειδωση	Παράμετροι συστήματος, παρουσία φυτών
	Έκθεση σε φυτικά βιοκτόνα	Είδος φυτών
	Προσρόφηση σε οργανική ύλη	Χαρακτηριστικά αποβλήτου
Βιολογικός	Δραστηριότητα αρπακτικών	Μικροβιακή οικολογία
	Έκθεση σε εκκρίματα ρίζας	Είδος φυτών

	Βιοχημικές διεργασίες	Μικροβιακή οικολογία
	Κατακράτηση στο βιοφίλμ	Μικροβιακή οικολογία
	Φυσική αποσύνθεση	Υδραυλικός χρόνος παραμονής

Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης παθογόνων μικροοργανισμών από αστικά απόβλητα με την χρήση διάφορων τύπων υγροβιότοπων. Όσον αφορά τον πιο αποτελεσματικό τύπο υγροβιότοπου για την απομάκρυνση των παθογόνων έχει αναφερθεί ότι οι υγροβιότοποι κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής είναι πιο αποτελεσματικοί από αυτούς της οριζόντιας ροής λόγω των υψηλότερων συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου οι οποίες ευνοούν την απομάκρυνση των παθογόνων [63]. Οι λιγότερο αποτελεσματικοί είναι οι υγροβιότοποι επιφανειακής ροής [63]. Πολλά είδη φυτών έχουν χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών, ωστόσο όπως παρατηρείται στον πίνακα 5.6 δεν φαίνεται να έχουν καμία σημαντική επίδραση στην απομάκρυνση των παθογόνων. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο η απομάκρυνση των παθογόνων με την χρήση των τεχνητών υγροβιότοπων φαίνεται να φτάνει σε υψηλά ποσοστά (έως και 99%).

Πίνακας 5.6: Απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών από αστικά λύματα.

Είδος υγροβιότοπου	Είδος φυτού	Παράμετρος	Εισροή (CFU/100 mL)	Ποσοστό απομάκρυνσης (%)	Βιβλιογραφία
Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής	-	TC	10^2 - 10^4	20	[79]
	<i>L. minor</i>		10^3 - 10^5	99	[80]
Τεχνητός υγροβιότοπος	<i>V. zizanioides</i> , <i>M. giganteus</i> ,	FC	1.7×10^6 -	99	[81]

οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής	A. donax , P. australis		1.3×10^9		
	P. karka	TC	2×10^6	93	[82]
		FC	10^6	98	
	V. zizanioides , M. giganteus, A. donax , P. australis	TC	10^6	99	[83]
	Typha spp., Scirpus spp., Juncus spp.	FC	10^8	99	[84]
	Phragmites spp., Phalaris spp., Glyceria spp.	TC	10^{14}	96	[85]
P. australis	TC	4×10^7	99	[86]	
Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής	Phragmites spp.	FC	$3 \times 10^6-10^7$	91-99	[87]
	P. australis	TC	10^5	99	[88]
	Cyperus Papyrus	TC	5.4×10^{10}	98	[74]
		FC	1.7×10^{10}	95	
	Phragmites Australis	TC	5.4×10^{10}	96	
		FC	1.7×10^{10}	93	
	Canna spp., P. australis, C. papyrus	TC	2.8×10^7	94-99	[89]
FC		2.3×10^6	94-99		
Z. mays	FC	3×10^6	99	[90]	
Υβριδικό σύστημα τεχνητών υγροβιότοπων (κάθετη ροή ακολουθούμενη από οριζόντια ροή)	B. reptans, T. portulacastrum	FC	1630	84	[91]
	P. australis	TC	7×10^6	96	[92]
	-	TC	6×10^4	99	[93]
	Z. aethiopica , S. reginae, A. andreaenum , A.	TC	5×10^6	97	[94]

	africanus				
--	-----------	--	--	--	--

5.6 Απομάκρυνση Μετάλλων

Τα αστικά λύματα περιλαμβάνουν και κάποια μέταλλα όπως χαλκός (Cu), ψευδάργυρος (Zn), χρώμιο (Cr), κάδμιο (Cd), σίδηρος (Fe), μόλυβδος (Pb), μαγγάνιο (Mn), υδράργυρος (Hg), νικέλιο (Ni), και άργυρος (Ag). Ο συνηθέστερος τρόπος παρουσίας τους είναι ως αδιάλυτα αιωρούμενα στερεά και ως διαλυμένες ουσίες στο υγρό. Για τις σωματιδιακές μορφές, οι μέθοδοι απομάκρυνσης του μοιάζουν με αυτούς που εφαρμόζονται στα αιωρούμενα στερεά. Τα αδιάλυτα είδη υπάρχει περίπτωση να επαναδιαλυθούν ανάλογα με το pH και το δυναμικό οξειδοαναγωγής. Οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης μετάλλων από το απόβλητα στους τεχνητούς υγροβιότοπους είναι η προσρόφηση, η χημική κατακρήμνιση, η ιονανταλλαγή, η διύλιση και η πρόσληψή τους από τις ρίζες των φυτών [55]. Η υδραυλική φόρτιση καθώς και οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στην είσοδο είναι δυο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των τεχνητών υγροβιότοπων στην απομάκρυνση των μετάλλων [28].

Όπως παρατηρείται από τον πίνακα 5.7 η απομάκρυνση των μετάλλων συμβαίνει σε διάφορους βαθμούς με τους ρυθμούς απομάκρυνσης των μετάλλων να μειώνεται ως εξής: Hg>Cb>Pb=Cr> Cu=Zn>Ni>As>Se [95]. Γενικά παρατηρείται υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης, το οποίο έχει τονιστεί ότι ενισχύεται από την χρήση φυτών όπως *P. australis*, *P. canadensis*, *Potamogeton* spp., *Acorus* spp., *L. salicaria*, *I. pseudacorus*, *Schoenoplectus* spp., *E.crassipes*, *H. reticulatum*, *C. demersum*, and *P. stratiotes* [95].

Πίνακας 5.7: Απομάκρυνση μετάλλων από αστικά λύματα.

Είδος υγροβιότοπου	Μέταλλα	Ποσοστό απομάκρυνσης (%)	Βιβλιογραφία
Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής	Cu	78-85	[96,97]
	Zn	81-88	
	Pb	71-73	
	Cr	82	[98-99]
	Ni	69-72	
	Fe	61	
Τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής	Zn	80	[100-101]
	Pb	97	
	Cr	85	
	As	38	
	Ni	53	
	Cd	90	
Τεχνητός υγροβιότοπος κάθετης υποεπιφανειακής ροής	Cr	90	[102]
	Zn	50-80	
	As	50	
	Se	10-30	
	Hg	90-99	

5.7 Απομάκρυνση Παρασιτοκτόνων

Τα παρασιτοκτόνα είναι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στις γεωργικές καλλιέργειες για την καταπολέμηση εντόμων, αγριόχορτων και μυκήτων, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την παραγωγικότητα της καλλιέργειας. Τα αστικά λύματα περιλαμβάνουν μικρές

ποσότητες παρασιτοκτόνων. Η κατανομή φυτοφαρμάκων μεταξύ νερού, εδάφους και φυτών αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία η οποία εξαρτάται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των φυτοφαρμάκων. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η υδατοδιαλυτότητα, ο συντελεστής κατανομής εδάφους/νερού (K_{oc}), ο συντελεστής κατανομής οκτανόλης/νερού (K_{ow}), χρόνος ημιζωής φυτοφαρμάκου στο έδαφος και στο νερό [64].

Τα φυτοφάρμακα είναι ανθεκτικά και τοξικά με αποτέλεσμα να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην βιοποικιλότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν την ικανότητα να απομακρύνουν μερικώς τα φυτοφάρμακα. Οι κύριοι μηχανισμοί στην απομάκρυνση των παρασιτοκτόνων αφορούν τη φυσική εναπόθεση, τη χημική υδρόλυση, την φωτόλυση, την καθίζηση, τη βιολογική διάσπαση, και την πρόσληψη από τα φυτά [64]. Η έκταση των διεργασιών αυτών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, η περιεκτικότητα σε άργιλο, η ποιότητα του υλικού διήθησης, το pH, οι συνθήκες οξειδοαναγωγής, η παρουσία ή/και η απουσία νερού, ο χρόνος κατακράτησης, η ποσότητα του φυτοφαρμάκου στην εισροή, η παρουσία και τύπος μακροφύτων, και ο τύπος του υγροβιότοπου. Έχει αναφερθεί σε μελέτες ότι η ενσωματωμένη ανακυκλοφορία σε τεχνητούς υγροβιότοπους βοήθησε την απομάκρυνση του chlorpyrifos, του endosulfan, του fenvalerate και του diuron [65]. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην απομάκρυνση των ουσιών αυτών [65].

Ο τύπος του τεχνητού υγροβιότοπου επηρεάζει τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής παρουσιάζουν κατά κύριο λόγο αερόβιες συνθήκες κοντά στην επιφάνεια του υγρού με τις αναερόβιες να επικρατούν στο κάτω μέρος του συστήματος που αποσυντίθενται τα φυτά. Σε αυτούς τους υγροβιότοπους επικρατεί

αποικοδόμηση των φυτοφαρμάκων μέσω αερόβιας υδρόλυσης και φωτόλυσης στο πάνω μέρος και καθίζηση και αναερόβια διάσπαση στο κάτω μέρος. Ταυτόχρονα είναι η πιθανή η προσρόφηση στα φυτά καθώς τέτοιοι τύποι υγροβιότοπων χρησιμοποιούν το έδαφος ως υπόστρωμα. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής παρουσιάζουν κυρίως ανοξικές/αναερόβιες συνθήκες λόγω της συνεχούς βύθισης της κλίνης διήθησης. Η φωτόλυση και η αερόβια υδρόλυση που παρατηρούνται στους υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής είναι περιορισμένες καθώς η στάθμη του νερού διατηρείται κάτω από την επιφάνεια. Στους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής η έκθεση των φυτοφαρμάκων στις ρίζες των φυτών είναι υψηλή με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα πρόσληψης τους από τα φυτά.

Τα παρασιτοκτόνα είναι μία από τις πολλές κατηγορίες ρύπων στα οικιακά απόβλητα που προέρχονται από την φροντίδα των κήπων, την καλλιέργεια, και τον καθαρισμό. Τα απόβλητα περιέχουν ένα ευρύ φάσμα παρασιτοκτόνων (Πίνακας 5.8) και οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν μια λύση για τη μερική απομάκρυνσή τους πριν φτάσουν στους υδάτινους αποδέκτες [103]. Αρκετές έρευνες έχουν αναφερθεί για την απομάκρυνση παρασιτοκτόνων με υγροβιότοπους επιφανειακής ροής και οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής και λιγότερες στην απομάκρυνση με χρήση κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής [104].

Πίνακας 5.8: Κατάλογος παρασιτοκτόνων [103].

Ζιζανιοκτόνα: Acetochlor, aclonifen, alachlor, ametryn, atrazine, bentazone, chlorotoluron, dicamba, dichlorprop, diflufenican, diuron (and its degradation product 3,4-DCA), ethofumesate, fluometuron, fluroxypyr, gluphosinate, glyphosate (and its degradation product AMPA), isoproturon, isoxaben, linuron, MCPA, mecoprop, mefenpyr-diethyl, metamitron, metazachlor,
--

metolachlor, metribuzin, napropamide, pendimethalin, pentachlorophenol, propachlor, prosulfocarb, simazine, terbuthylazine, 2,4-D
Εντομοκτόνα: Aldicarb, azinphos-methyl, bifenthrin, chlorpyrifos, cyfluthrin, λ-cyhalothrin, cypermethrin, diazinon, dimethoate, endosulfan, esfenvalerate, fipronil, flufenoxuron, imidacloprid, indoxacarb, lindane, methyl parathion, mevinphos, omethoate, parathion, pentachlorophenol, permethrin, prothiofos, thiacloprid, triflumuron
Μυκητοκτόνα: Azoxystrobin, carbendazim, chlorothalonil, cyazofamid, cymoxanil, cyproconazole, cyprodinil, difenoconazole, dimethomorph, epoxiconazole, fenpropidine, fenpropimorph, fludioxamine iprodione, kresoxim methyl, metalaxyl, penconazole, pencycuron, penflufen, pentachlorobenzene, pentachlorophenol, propiconazole, pyrimethanil, spiroxamine, tebuconazole, tetraconazole, trifloxystrobin

Για τα παρασιτοκτόνα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8 αξίζει να αναφερθούν τα εξής[103]:

Σε σχέση με τα Ζιζανιοκτόνα επιτυγχάνονται οι ακόλουθες απομακρύνσεις [103]:

- Aclonifen (2-chloro-6-nitro-3-phenoxyaniline): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που αναστέλλει τη βιοσύνθεση καρροτενοειδών. Το aclonifen απορροφάται από τα φύλλα του ζιζανίου, και αρχίζει να κυκλοφορεί μέσα στο φυτό και φτάνει στις ρίζες του. Έχει αναφερθεί πλήρης απομάκρυνση του aclonifen σε τεχνητό υδροβιότοπο και 84% απομάκρυνση εκτός του ρεύματος.
- Alachlor (2-chloro-2',6'-diethyl-N-methoxymethylacetanilide): Αποτελεί έναν αναστολέα σύνθεσης λιπιδίων που απορροφάται από βλαστούς. Έχει παρατηρηθεί έως 80% απομάκρυνση του από αστικά λύματα με μείγμα φυτοφαρμάκων σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής. Αντίθετα σε τεχνητούς υγροβιότοπους

κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής η απομάκρυνση φτάνει μόνο το 51%.

- **Atrazine** (6-chloro-N2-ethyl-N4-isopropyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο πλατύφυλλων που αναστέλλει τη φωτοσύνθεση (φωτοσύστημα II) το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στις καλλιέργειες καλαμποκιού. Παρόλα αυτά έχει απαγορευτεί η χρήση του στην ΕΕ από το 2004. Μελέτες έδειξαν ότι ο χρόνος παραμονής επηρεάζει την απομάκρυνση του atrazine. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η απομάκρυνση σε φυτεμένους τεχνητούς υγροβιότοπους ήταν σημαντικά υψηλότερη από ό,τι σε μη φυτεμένους.
- **Chlorotoluron** (3-(3-chloro-p-tolyl)-1,1-dimethylurea): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που απορροφάται από τις ρίζες και το φύλλωμα και η δράση του είναι να αναστέλλει την φωτοσυνθετική μεταφορά ηλεκτρονίων. Η απομάκρυνσή του στους τεχνητούς υγροβιότοπους φτάνει το 84-86%.
- **Chlorothalonil** (tetrachloroisophthalonitrile): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που εμποδίζει τη βλάστηση των σπορίων και την κινητικότητα των ζωοσπορίων. Μελέτες έχουν δείξει απομάκρυνσή του σε ποσοστά 80% και άνω.
- **Diuron** (3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που απορροφάται από τις ρίζες και αναστέλλει έντονα τη φωτοσύνθεση. Η απομάκρυνσή του σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής είναι σχεδόν μηδενική ενώ αντίθετα σε υβριδικούς τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής που ακολουθούσαν από οριζόντια υποεπιφανειακή ροή φτάνει το 72% την άνοιξη.
- **Fluometuron** (1,1-dimethyl-3-(α,α,α-trifluoro-m-tolyl)urea): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που αναστέλλει τη φωτοσύνθεση. Λίγες μελέτες υπάρχουν για την απομάκρυνση του οπότε δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την απομάκρυνσή του από τεχνητούς υγροβιότοπους.

- Dicamba (3,6-dichloro-o-anisic acid): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που απορροφάται από τα φύλλα. Όσον αφορά την απομάκρυνση του, υπάρχει μεγάλη διαφορά στους διάφορους τύπους τεχνητών υγροβιότοπων. Πιο συγκεκριμένα, σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής η απομάκρυνση ήταν μόνο 3%, ενώ σε υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής η απομάκρυνση έφτανε το 80%.
- Glyphosate (*N*-(phosphonomethyl)glycine): Αποτελεί ένα μεταφωσφορικό ζιζανιοκτόνο το οποίο χρησιμοποιείται παγκοσμίως για τον έλεγχο των ζιζανίων σε γεωργικές, δασοκομικές και αστικές περιοχές. Τα ποσοστά απομάκρυνσής του είναι υψηλά και φτάνουν το 90-99%.
- Diflufenican (2',4'-difluoro-2-(α,α,α -trifluoro-*m*-tolylloxy)nicotinamide): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο επαφής που αναστέλλει τη βιοσύνθεση καροτενοειδών. Η απομάκρυνσή του είναι μέτριας κλίμακας με τεχνητούς υγροβιότοπους και ανέρχεται σε ποσοστά γύρω στα 60%.
- Isoproturon (3-(4-isopropylphenyl)-1,1-dimethylurea): Αποτελεί ένα συστηματικό ζιζανιοκτόνο που απορροφάται από τις ρίζες και τα φύλλα αναστέλλοντας τη φωτοσύνθεση (φωτοσυστήματος II). Η απομάκρυνσή του σε τεχνητούς υγροβιότοπους έχει αναφερθεί ότι φτάνει το 45-50%.
- Linuron (3-(3,4-dichlorophenyl)-1-methoxy-1-methylurea): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο το οποίο δρα με επαφή και υπολειμματική δράση αναστέλλοντας τη φωτοσύνθεση (φωτοσυστήμα II). Η απομάκρυνσή του στους τεχνητούς υγροβιότοπους είναι σχετικά χαμηλή και φτάνει μόλις το 30%.
- MCPA (4-chloro-o-tolylloxyacetic acid): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που μετατοπίζεται στο φυτό. Σε φυτεμένους υγροβιότοπους με *Phragmites australis* (καλάμια) η απομάκρυνσή του αγγίζει το 89.3% σε αντίθεση με μη φυτεμένους που είναι μόλις 52%. Επίσης, έχει

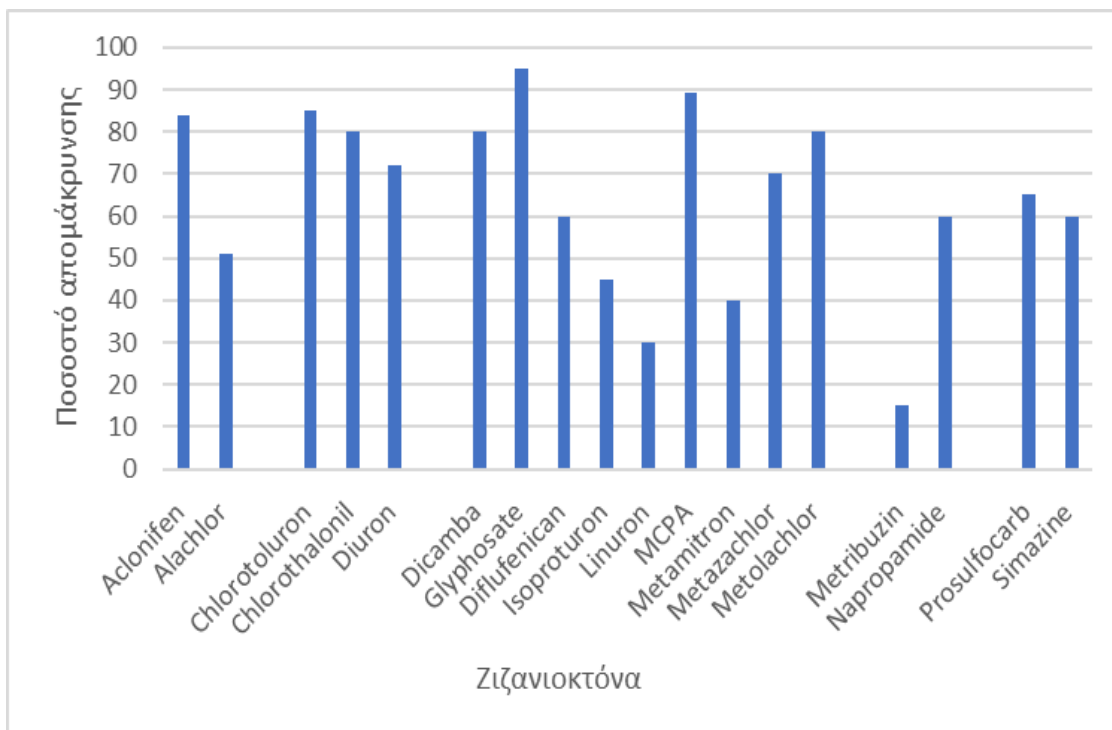
αναφερθεί ότι αυξάνοντας τον χρόνο παραμονής από 3 σε 6 ώρες η απομάκρυνση έφτασε το 97%.

- **Metamitron** (4-amino-4,5-dihydro-3-methyl-6-phenyl-1,2,4-triazin-5-one): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που απορροφάται κυρίως από τις ρίζες και μετατοπίζεται στο έδαφος ενώ ταυτόχρονα αναστέλλει τη φωτοσύνθεση (φωτοσύστημα II). Η απομάκρυνσή του θεωρείται μεσαίας κλίμακας και είναι της τάξεως του 35-50%.
- **Metazachlor** (2-chloro-*N*-(pyrazol-1-ylmethyl)acet-2',6'-xylidide): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που αναστέλλει την εργοστερόλη. Η απομάκρυνσή του στους τεχνητούς υγροβιότοπους είναι της τάξης του 70%.
- **Metolachlor** (2-chloro-*N*-(6-ethyl-*o*-tolyl)-*N*-[(1*RS*)-2-methoxy-1-methylethyl] acetamide): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που μειώνει τη βλάστηση των σπόρων και αναστέλλει τη μίτωση και την κυτταρική διαίρεση. Η απομάκρυνσή του φτάνει το 73-85% και έχει αναφερθεί ότι η βλάστηση επιτυγχάνει σχεδόν διπλάσια απομάκρυνση. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής είναι αυτοί στους οποίους παρατηρείται μεγάλη απομάκρυνση αυτού του ζιζανιοκτόνου.
- **S-Metolachlor**, μίγμα από: 80-100% (*aRS,1S*)-2-chloro-6'-ethyl-*N*-(2-methoxy-1-methylethyl)acet-*o*-toluidide και 20-0% (*aRS,1R*)-2-chloro-6'-ethyl-*N*-(2-methoxy-1-methylethyl)acet-*o*-toluidide: Αποτελεί ένα χρησιμοποιούμενο ζιζανιοκτόνο το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως και ελέγχει τα πλατύφυλλα ζιζάνια και τα χόρτα που απορροφώνται από τις ρίζες και τους βλαστούς. Λίγες μελέτες υπάρχουν για την απομάκρυνση του οπότε δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα σε σχέση την απομάκρυνσή του.
- **Metribuzin** (4-amino-6-tert-butyl-4,5-dihydro-3-methylthio-1,2,4-triazin-5-one): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο με υπολειμματική δράση που αναστέλλει τη φωτοσύνθεση

(φωτοσυστήματος II). Η απομάκρυνσή του σε τεχνητούς υγροβιότοπους είναι σχετικά χαμηλή φτάνοντας μόνο το 15%.

- Napropamide ((*RS*)-*N,N*-diethyl-2-(1-naphthoxy)propionamide): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που απορροφάται από τις ρίζες και μετατοπίζεται πάνω από το έδαφος. Δρα εμποδίζοντας την επιμήκυνση των κυττάρων της ρίζας που διαταράσσει την ανάπτυξη. Η απομάκρυνσή του με την χρήση τεχνητών υγροβιότοπων φτάνει το 50-70%.
- Propachlor (2-chloro-*N*-isopropylacetanilide): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που επηρεάζει τον σχηματισμό κυττάρων και τη σύνθεση πρωτεϊνών. Λίγες μελέτες υπάρχουν για την απομάκρυνσή του οπότε δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα.
- Prosulfocarb (*S*-benzyl dipropyl(thiocarbamate): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο που απορροφάται από τα φύλλα και τις ρίζες. Η απομάκρυνσή του με την χρήση τεχνητών υγροβιότοπων φτάνει το 65%.
- Simazine (6-chloro-*N*2,*N*4-diethyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine): Αποτελεί ένα ζιζανιοκτόνο το οποίο απορροφάται από τις ρίζες και το φύλλωμα και μεταφέρεται πάνω από το έδαφος και αναστέλλει τη φωτοσύνθεση (φωτοσύστημα II). Η απομάκρυνσή του σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής είναι μόλις 25%, ενώ αντίθετα σε υβριδικούς τεχνητούς υγροβιότοπους (επιφανειακής ροής που ακολουθούνταν από οριζόντιους υποεπιφανειακής ροής) φτάνει το 60% το καλοκαίρι.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης των ανωτέρω ουσιών:



Εικόνα 5.3: Ποσοστά απομάκρυνσης ζιζανιοκτόνων από τεχνητούς υγροβιότοπους[103]

Σε σχέση με την απομάκρυνση εντομοκτόνων με την εφαρμογή τεχνητών υγροβιότοπων παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- Chlorpyrifos (*O,O*-diethyl *O*-3,5,6-trichloro-2-pyridyl phosphorothioate): Αποτελεί ένα οργανοφωσφορικό εντομοκτόνο που αναστέλλει την ακετυλοχολινεστεράση και εφαρμόζεται τόσο στη γεωργία όσο και στις αστικές περιοχές. Έχει αναφερθεί ότι η απομάκρυνσή του με την χρήση των τεχνητών υγροβιότοπων φτάνει σε υψηλά επίπεδα έως και 96%. Πιο συγκεκριμένα, σε μια μελέτη παρατηρήθηκε συνολική απομάκρυνση του κατά 96,2% σε τεχνητούς υγροβιότοπους που είχαν υπόστρωμα πυριγενή πετρώματα και ήταν

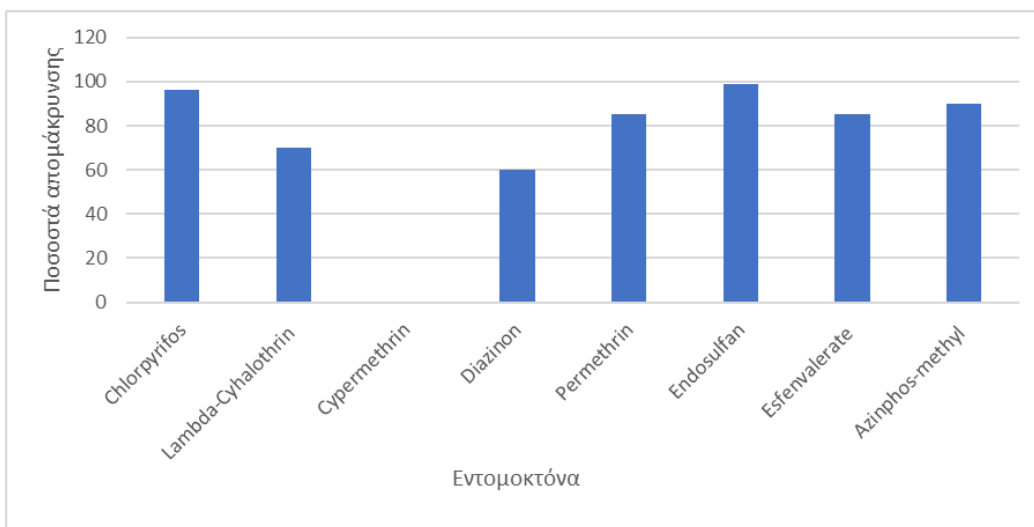
φυτεμένα με *Phragmites australis*.

- **Lambda-Cyhalothrin** (λ -cyano-3-phenoxybenzyl-3-(2-chloro-3,3,3-trifluoropropenyl)-2,2-dimethyl cyclopropanecarboxylate): Αποτελεί ένα εντομοκτόνο τέταρτης γενιάς που ρυθμίζει το κανάλι νατρίου. Μελέτες έχουν δείξει ποσοστά απομάκρυνσης πάνω από 70% και σε μερικές περιπτώσεις φτάνουν το 99%.
- **Cypermethrin** ((*RS*)- α -cyano-3-phenoxybenzyl (*1RS,3RS;1RS,3SR*)-3-(2,2-dichlorovinyl)-2,2-dimethylcyclopropanecarboxylate): Αποτελεί ένα εντομοκτόνο επαφής και δράσης του στομάχου που ρυθμίζει το κανάλι νατρίου. Λίγες μελέτες υπάρχουν για την απομάκρυνση του οπότε δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα σε σχέση με την απομάκρυνσή του από τεχνητούς υγροβιότοπους.
- **Diazinon** [O,O-diethyl-O-(2-isopropyl-6methyl-4-pyrimidinyl) phosphorothionate]: Αποτελεί ένα οργανοφωσφορικό εντομοκτόνο με αναπνευστική δράση και δράση επαφής που αναστέλλει την ακετυλοχολινεστεράση. Η απομάκρυνσή του σε τεχνητούς υγροβιότοπους δεν φτάνει μεγάλα ποσοστά, με την υψηλότερη αναφερόμενη απομάκρυνση να είναι της τάξης του 60%.
- **Permethrin** (3-phenoxybenzyl (*1RS,3RS;1RS,3SR*)-3-(2,2-dichlorovinyl)-2,2-dimethylcyclopropanecarboxylate): Αποτελεί ένα εντομοκτόνο ευρέος φάσματος με δράση επαφής και στομάχου και δρα ως ρυθμιστής διαύλων νατρίου. Η απομάκρυνσή του με χρήση τεχνητών υγροβιότοπων ξεπερνά το 85% και σε μερικές μελέτες σημειώθηκε έως και 94% απομάκρυνση.
- **Endosulfan** (1,4,5,6,7,7-hexachloro-8,9,10-trinorborn-5-en-2,3-ylenebismethylene sulfite): Αποτελεί ένα εντομοκτόνο επαφής και έχει αναφερθεί ότι η απομάκρυνσή του μπορεί να

φτάσει το 99% σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής.

- Esfenvalerate ((*S*)- α -cyano-3-phenoxybenzyl (*S*)-2-(4-chlorophenyl)-3-methylbutyrate): Αποτελεί ένα εντομοκτόνο επαφής και ρυθμιστής διαύλων νατρίου. Η απομάκρυνσή του σε τεχνητούς υγροβιότοπους φτάνει το 80-90%.
- Azinphos-methyl (*S*-3,4-dihydro-4-oxo-1,2,3-benzotriazin-3-ylmethyl *O,O*-dimethyl phosphorodithioate): Αποτελεί ένα εντομοκτόνο που αναστέλλει την ακετυλοχολινεστεράση. Μελέτες έχουν αναφέρει ότι η απομάκρυνσή του σε τεχνητούς υγροβιότοπους μπορεί να φτάσει και το 90%.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης των ανωτέρω ουσιών:

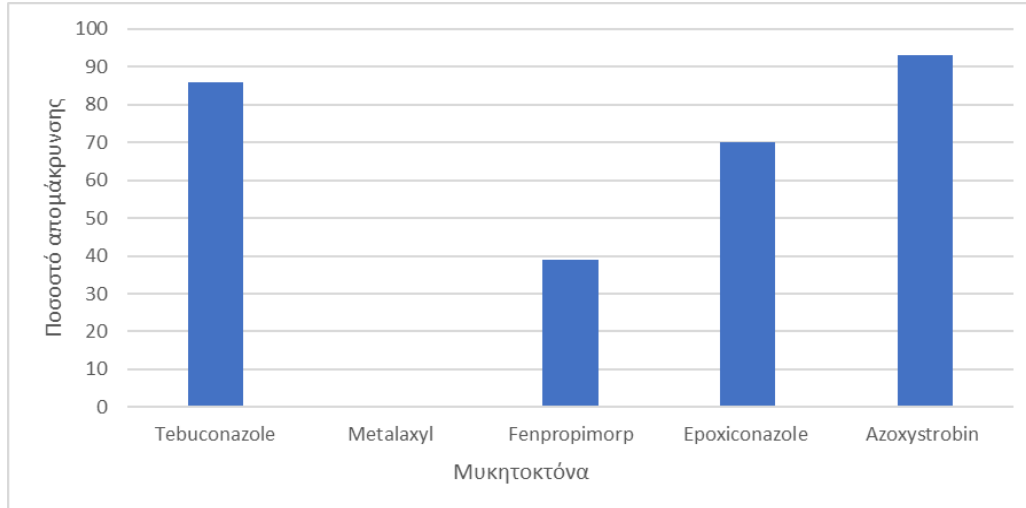


Εικόνα 5.4: Ποσοστά απομάκρυνσης εντομοκτόνων από τεχνητούς υγροβιότοπους

Σε σχέση με τα μυκητοκτόνα επιτυγχάνονται οι ακόλουθες απομακρύνσεις από τεχνητούς υγροβιότοπους [103]:

- Tebuconazole ((*RS*)-1-*p*-chlorophenyl-4,4-dimethyl-3-(1*H*-1,2,4-triazol-1-ylmethyl) pentan-3-ol): Αποτελεί ένα μυκητοκτόνο που διαταράσσει τη λειτουργία της μεμβράνης. Η απομάκρυνσή του είναι σε υψηλά επίπεδα τα οποία ξεπερνούν το 86 %.
- Metalaxyl (methyl *N*-(methoxyacetyl)-*N*-(2,6-xylyl)-*DL*-alaninate): Αποτελεί ένα μυκητοκτόνο που καταστέλλει τον σχηματισμό σποραγγείων και την ανάπτυξη των μικκυλίων. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι σύμφωνα με μελέτες δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην απομάκρυνσή του.
- Fenpropimorp (cis-4-[(**RS**)-3-(4-tert-butylphenyl)-2-methylpropyl]-2,6dimethylmorpholine): Αποτελεί ένα συστηματικό μυκητοκτόνο που διαταράσσει τη λειτουργία της μεμβράνης. Χρησιμοποιείται για προστατευτικούς και θεραπευτικούς σκοπούς. Η απομάκρυνση του στους τεχνητούς υγροβιότοπους δεν ξεπερνάει το 39%.
- Eproxiconazole ((*2RS,3SR*)-1-[3-(2-chlorophenyl)-2,3-epoxy-2-(4-fluorophenyl) propyl] -1*H*-1,2,4-triazole): Αποτελεί ένα μυκητοκτόνο που χρησιμοποιείται για προληπτική και θεραπευτική δράση. Η απομάκρυνσή του σε τεχνητούς υγροβιότοπους φτάνει το 70-80%.
- Azoxystrobin (methyl (*E*)-2-{2-[6-(2-cyanophenoxy) pyrimidin-4-yloxy]phenyl}-3-methoxyacrylate): Αποτελεί ένα μυκητοκτόνο που αναστέλλει την αναπνοή. Η απομάκρυνσή του μπορεί να φτάσει σε μεγάλα ποσοστά στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα υβριδικό τεχνητό υγροβιότοπο (επιφανειακής ροής που ακολουθούσαν από οριζόντια υποεπιφανειακή ροή) η απομάκρυνση έφτανε το 93% τους καλοκαιρινούς μήνες.

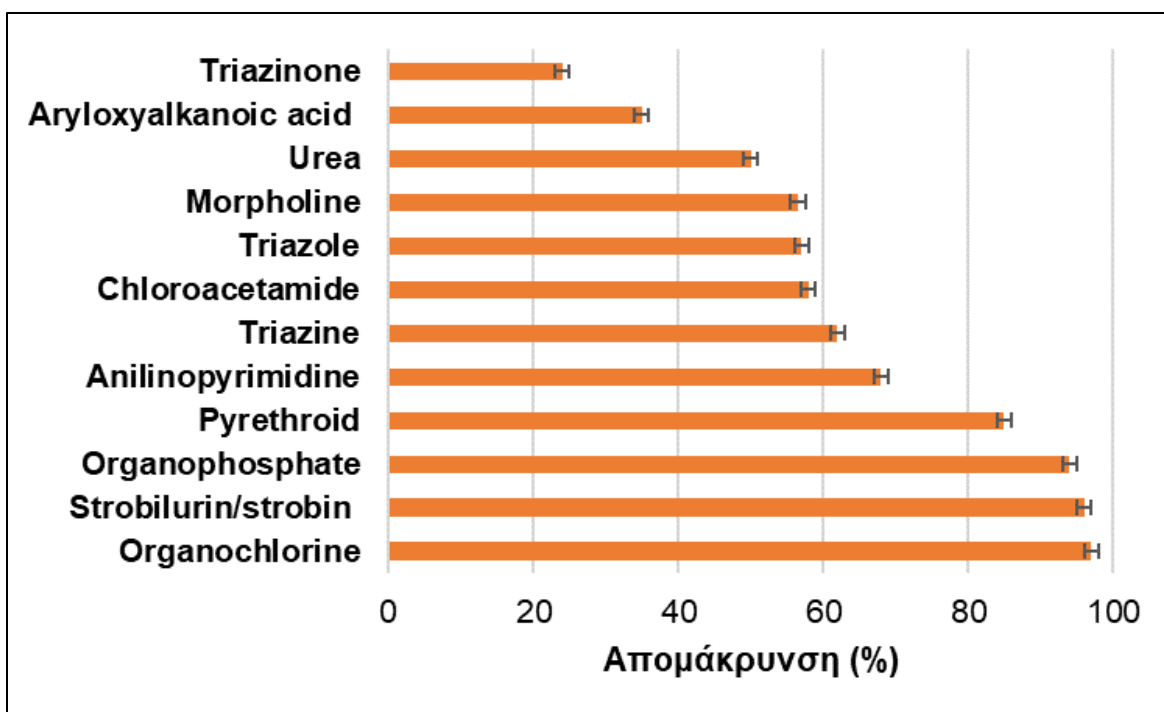
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης των ανωτέρω ουσιών:



Εικόνα 5.5: Ποσοστά απομάκρυνσης μυκητοκτόνων από τεχνητούς υγροβιότοπους

Τα παρασιτοκτόνα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε χημικές ομάδες όπως ομάδα organochlorine (endosulfan, pentachlorophenol), ομάδα strobilurin/strobin (kresoxim methyl, trifloxystrobin και azoxystrobin), ομάδα organophosphate (azinophos methyl, diazinon, dimethoate, glufosinate, chlorpyrifos, methyl parathion, mevinphos, omethoate, parathion, prothiofos), ομάδα pyrethroid (bifenthin, cyhalothrin, cypermethrin, esfenvalerate, permethrin), ομάδα anilinopyrimidine, ομάδα triazine, ομάδα chloroacetamide, ομάδα triazole, ομάδα morpholine, ομάδα urea (diuron, fluorometuron, chlorotoluron, isoproturon, linuron), ομάδα aryloxyalkanoic acid (dichlorprop, MCPA, mecoprop), και ομάδα triazinone (metamitron, metribuzin). Στην εικόνα 4.8 παρουσιάζεται το ποσοστό απομάκρυνσης για την κάθε μία από αυτές τις ομάδες παρασιτοκτόνων [103]. Την μεγαλύτερη μέση απομάκρυνση παρουσιάζει η ομάδα organochlorine (97% απομάκρυνση), η ομάδα strobilurin/strobin (96% απομάκρυνση)

και η ομάδα organophosphate (94% απομάκρυνση). Από την άλλη μεριά οι χαμηλότερες απομακρύνσεις παρατηρούνται στις ομάδες triazinone (24% απομάκρυνση), aryloxyalkanoic acid (35% απομάκρυνση), και urea (50% απομάκρυνση).

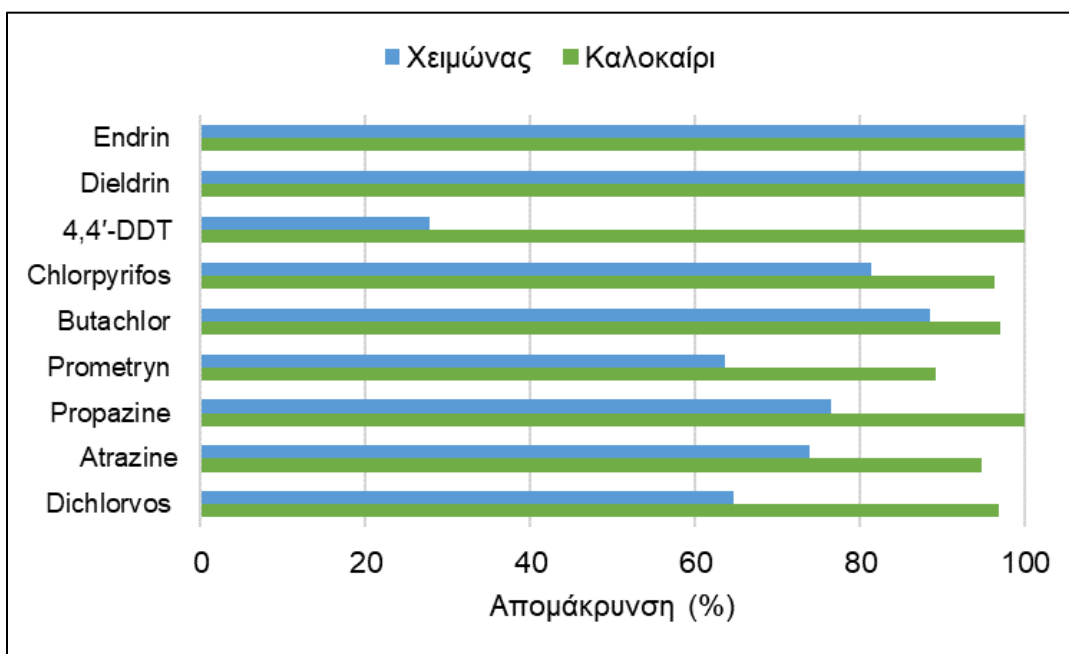


Εικόνα 5.6: Απομάκρυνση των παρασιτοκτόνων ανά χημική ομάδα [103].

Οι περισσότερες από τις ανωτέρω κατηγορίες παρουσιάζουν αρκετά χαμηλή διαλυτότητα, ενώ οι συντελεστές κατανομής εδάφους/νερού (K_{oc}) και κατανομής οκτανόλης/νερού (K_{ow}) κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα. Γενικότερα έχει επισημανθεί ότι τα φυτοφάρμακα με υψηλή τιμή K_{oc} ($> 1000 \text{ mg/l}$) μπορεί να προσροφηθούν με μεγαλύτερη

αποτελεσματικότητα στα σωματίδια του εδάφους και επομένως η απομάκρυνσή τους είναι υψηλή.

Έχει επίσης αναφερθεί ότι το καλοκαίρι και γενικότερα τα θερμά κλίματα ευνοούν την απομάκρυνση παρασιτοκτόνων όπως το dichlorvos, atrazine, propazine, chlorpyrifos, κ.α. [105]. Για παράδειγμα, η απομάκρυνση του dichlorvos με τη χρήση τεχνητών υδροβιότοπων το καλοκαίρι ήταν 97% και το χειμώνα 65%, του propazine ήταν 100% το καλοκαίρι και 76% το χειμώνα [105]. Σε κάποιες ουσίες ωστόσο όπως το dieldrin και το endrin δεν παρατηρήθηκε διαφορά μεταξύ καλοκαιριού και χειμώνα (Εικόνα 4.9). Η βιοποικιλότητα και η δραστηριότητα των μικροβιακών ειδών ήταν επίσης μεγαλύτερη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες κάτι το οποίο ευνοούσε την απομάκρυνση [105].



Εικόνα 5.7: Απομάκρυνση των παρασιτοκτόνων ανά εποχή [105].

Επιπρόσθετα, υπάρχουν πολλές μελέτες που τονίζουν ότι η παρουσία βλάστησης ενισχύει την απομάκρυνση παρασιτοκτόνων. Τα φυτά μπορεί να αυξήσουν την απομάκρυνση φυτοφαρμάκων είτε άμεσα μέσω της πρόσληψης είτε έμμεσα μέσω της συνεισφοράς του περιφύτου [103]. Μερικά ήδη φυτών που αποδεδειγμένα ενίσχυσαν την απομάκρυνση παρασιτοκτόνων είναι το μακρόφυτο *Hydrilla verticillata*, το *Elodea densa*, το *Ludwigia*, το *Elodea nuttallii*, το *Lemna gibba*, το *Phragmites australis*, το *Typha sp.*, το *Ceratophyllum demersum*, το *N. Odorata*, και το *P. distichum* [103]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκέντρωση των παρασιτοκτόνων στα φυτά αυξάνεται μετά την επαφή τους και παραμένει σταθερή ή και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου [103].

5.8 Απομάκρυνση Φαρμακευτικών Παραπροϊόντων και Προσωπικής Φροντίδας/ Υγιεινής Παραπροϊόντων (PPCPs)

Η ρύπανση των υδάτων με παραπροϊόντα από φαρμακευτικά σκευάσματα και παραπροϊόντα προσωπικής φροντίδας και υγιεινής είναι μια σοβαρή παγκόσμια ανησυχία. Οι ρύποι από φαρμακευτικά σκευάσματα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας και υγιεινής περιέχονται στα λύματα από απόβλητα νοικοκυριών, αγροκτημάτων, νοσοκομείων και βιομηχανιών. Παρόλου που η παρουσία τέτοιων ρύπων είναι σε χαμηλές συγκεντρώσεις, έρευνες αναφέρουν ότι μπορεί να προκαλέσουν κίνδυνο τόσο στο περιβάλλον όσο και στον ανθρώπινο οργανισμό [66]. Διάφορες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση

τέτοιων ρύπων όπως προηγμένες διαδικασίες οξείδωσης (οζόνωση και φωτοκατάλυση), φυσικές διεργασίες (ενεργός άνθρακας και μεμβράνες) και τεχνητοί υγροβιότοποι [66].

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν αποδειχτεί μία χαμηλού κόστους αλλά ταυτόχρονα αποτελεσματική λύση στην απομάκρυνση των ρύπων από φαρμακευτικά σκευάσματα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας και υγιεινής. Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης/αποδόμησης περιλαμβάνουν κυρίως φωτολυτική αποδόμηση, προσρόφηση, φυτοαποικοδόμηση και μικροβιακή αποδόμηση [67]. Μια σύνοψη των μηχανισμών αποδόμησης των φαρμακευτικών προϊόντων και των προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής παρουσιάζεται στον πίνακα 5.9 [67].

Πίνακας 5.9: Σύνοψη των μηχανισμών αποδόμησης των φαρμακευτικών προϊόντων και των προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής [67].

Είδος υγροβιότοπου	Είδος βλάστησης	Φαρμακευτικά προϊόντα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας/υγιεινής	Μηχανισμός απομάκρυνσης/αποδόμησης			
			Φωτολυτική αποικοδόμηση	Προσρόφηση	Φυτοαποικοδόμηση	μικροβιακή αποικοδόμηση
Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής	Typha sp. and Phragmites sp.	Ibuprofen, naproxen, diclofenac, ketoprofen, clofibric acid, carbamazepine, flunixin, galaxolide, tonalide, mecoprop, MCPA, terbutylazine	✓	✓	x	✓
	Phragmites australis and Typha	Ibuprofen, naproxen, diclofenac,	✓	x	x	x

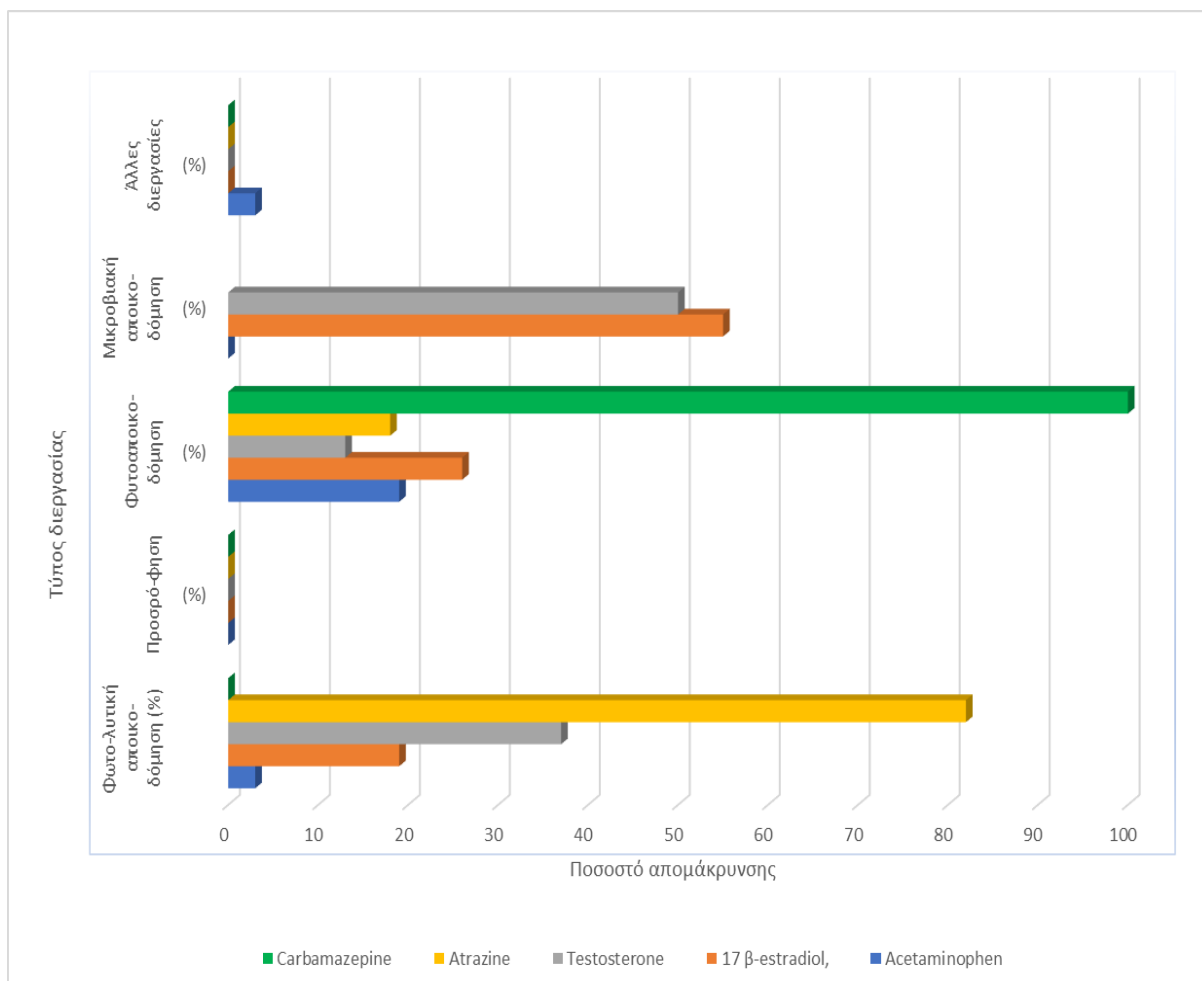
	latifolia	ketoprofen, galaxolide, tonalide				
Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης υποεπιφανεια κής ροής	Phragmites australis	Ibuprofen, diclofenac, acetaminophen, tonalide, oxybenzone, bisphenol A, triclosan, and ethinylestradiol	x	✓	x	✓
Υβριδικός τεχνητός υγροβιότοπος	Phragmites australis	Sulfamethoxazole, sulfathiazole, sulfamethazine, trimethoprim, tetracycline, oxytetracycline , chlortetracycline and enrofloxacin	✓	✓	✓	✓
Μέσης κλίμακας τεχνητός υγροβιότοπος	Typha angustifolia and Phragmites australis	Ketoprofen, naproxen, ibuprofen, diclofenac, salicylic acid, carbamazepine, caffeine, galaxolide, tonalide, and methyl dihydrojasmonate	✓	✓	✓	✓
	Typha angustifolia and Phragmites australis	Ibuprofen, ketoprofen, naproxen, diclofenac, salicylic acid, caffeine, carbamazepine, methyl dihydrojasmonate, galaxolide, tonalide, and 8 metabolites	✓	✓	✓	✓

Η φωτολυτική αποικοδόμηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά ενός υλικού χρησιμοποιώντας την πηγή του φωτός. Η απομάκρυνση των φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας και υγιεινής μέσω φωτολυτικής αποικοδόμησης εξαρτάται κυρίως από τις εποχιακές συνθήκες και τον εκάστοτε τεχνητό υγροβιότοπο όπως επίσης και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες της ένωσης. Η προσρόφηση αποτελεί τον πιο κοινό μηχανισμό απομάκρυνσης φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας και υγιεινής και εξαρτάται από την υδροφοβικότητα τους, τις καιρικές συνθήκες, τις συνθήκες ροής εντός των λυμάτων και τον τύπο του υποστρώματος [67]. Τα φυτά συμβάλλουν στην απομάκρυνση μέσω της φυτοαποικοδόμησης, η οποία αποτελείται από την πρόσληψη στις ριζόσφαιρα, την προσρόφηση στην επιφάνεια της ρίζας και τη μετατόπιση από τη ρίζα στο βλαστό [67]. Η μικροβιακή αποικοδόμηση αποτελείται από τρία στάδια όπως η ανοργανοποίηση, ο μετασχηματισμός σε πιο υδρόφοβες ενώσεις και ο μετασχηματισμός σε πιο υδρόφιλες ενώσεις [67].

Στον πίνακα 5.10 παρουσιάζεται η συνεισφορά κάθε μηχανισμού στην απομάκρυνση φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής. Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι η αρχική συγκέντρωση του φαρμακευτικού προϊόντος είχε επίδραση στην απομάκρυνση της διότι σε αυξημένες συγκεντρώσεις το φυτό και το υπόστρωμα αδυνατούσαν να την απορροφήσουν [106]. Επίσης, με αύξηση του ρυθμού οργανικής φόρτισης η φωτολυτική αποδόμηση μειώθηκε και η βιοαποικοδόμηση αυξήθηκε [107]. Ακόμα, ο τύπος του σκευάσματος (ρύπου) καθώς και οι περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν επίπτωση στην απομάκρυνση [108]

Πίνακας 5.10: Επίπεδα συμβολής των μηχανισμών απομάκρυνσης φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής.

Φαρμακευτικά προϊόντα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας/υγιεινής	Μηχανισμός απομάκρυνσης/αποδόμησης					Βιβλιογραφία
	Φωτολυτική αποικοδόμηση (%)	Προσρόφηση (%)	Φυτοαποικοδόμηση (%)	Μικροβιακή αποικοδόμηση (%)	Άλλες διεργασίες (%)	
Acetaminophen	3-32	-	19-68	-	3-41	[106]
17 β-estradiol,	19	-	26	55	-	[107]
Testosterone	37	-	13	50	-	
Atrazine	82	-	18	-	-	
Carbamazepine	-	-	100	-	-	



Εικόνα 5.8: Επίπεδα συμβολής των μηχανισμών απομάκρυνσης φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής.

Η επίπτωση της παρουσίας φυτική βλάστησης στους τεχνητούς υγροβιότοπους στην αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής έχει αναφερθεί σε διάφορες μελέτες. Πιο συγκεκριμένα όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5.11 φαίνεται πως οι αποδόσεις απομάκρυνσης μη στεροειδών αντιφλεγμονώδων φαρμάκων, βήτα αναστολέων, αντισπασμωδικών, και αρωμάτων είναι υψηλότερες στην περίπτωση φυτεμένου τεχνητού υγροβιότοπου συγκριτικά με του μη φυτεμένου. Έχει επίσης

τονιστεί ότι τα αναδύομενα φυτά διαδραματίζουν απαραίτητο ρόλο στην απομάκρυνση των φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής [108]. Η άμεση επίδραση των φυτών στην απομάκρυνση είναι σχετικά απλή σε σύγκριση με την έμμεση επίδραση, η οποία βασίζεται κυρίως στην απορρόφηση και μετασχηματισμό μέσα στα φυτά και στην κατακρήμνιση στην επιφάνεια της ρίζας. Επιπλέον, τα φυτά μπορούν έμμεσα να αυξήσουν την απομάκρυνση ενισχύοντας την μικροβιακή δραστηριότητα διότι παρέχουν υπόβαθρο για την ανάπτυξη των μικροβίων [108]. Από την άλλη μεριά, μελέτες δείχνουν ότι σε μερικές περιπτώσεις όπως τονωτικών, καθαριστικών, και χαπιών χολυστερίνης η παρουσία φυτού δεν είχε κάποια σοβαρή θετική επίπτωση στην απομάκρυνση. Τέλος, σε μια μελέτη που χρησιμοποιούσαν τεχνητούς υγροβιότοπους για την απομάκρυνση των αντιβιοτικών η παρουσία φυτού είχε ακριβώς τα αντίθετα αποτελέσματα [109]. Για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω διερεύνηση της χρήσης των φυτών στην απομάκρυνση αντιβιοτικών.

Πίνακας 5.11: Απομάκρυνση φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής από αστικά λύματα.

Φαρμακευτικά προϊόντα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας/ υγιεινής		Ποσοστό απομάκρυνσης		Βιβλιογραφία
Δράση	Ουσία	Παρουσία φυτού	Απουσία φυτού	
Μη στεροειδή αντιφλεγμονώδη φάρμακα	Diclofenac	74	68.5	[109]
	Ibuprofen	78	19	[110]
	Naproxen	62	52	[111]
	Ketoprofen	98	82	[112]
Αντιβιοτικά	Sulfamethoxazole	69	91	[109]

Τονωτικά	Caffeine	96	97	[111]
Βήτα-αναστολείς	Metoprolol	86	38	[110]
	Propranolol	85	50	
Αντισπασμωδικά	Carbamazepine	47	3	
		64	46	[113]
Αρώματα	Galaxolide	72	41	[111]
	Tonalide	72	36	
Καλλυντικά	Methy-dihydrojasmonate	87	85	
Καθαριστικά	Linear alkylbenzene sulphonate (LAS)	99	99	[114]
Χάπια χολυστερίνης	Clofibric acid	39	35	[112]

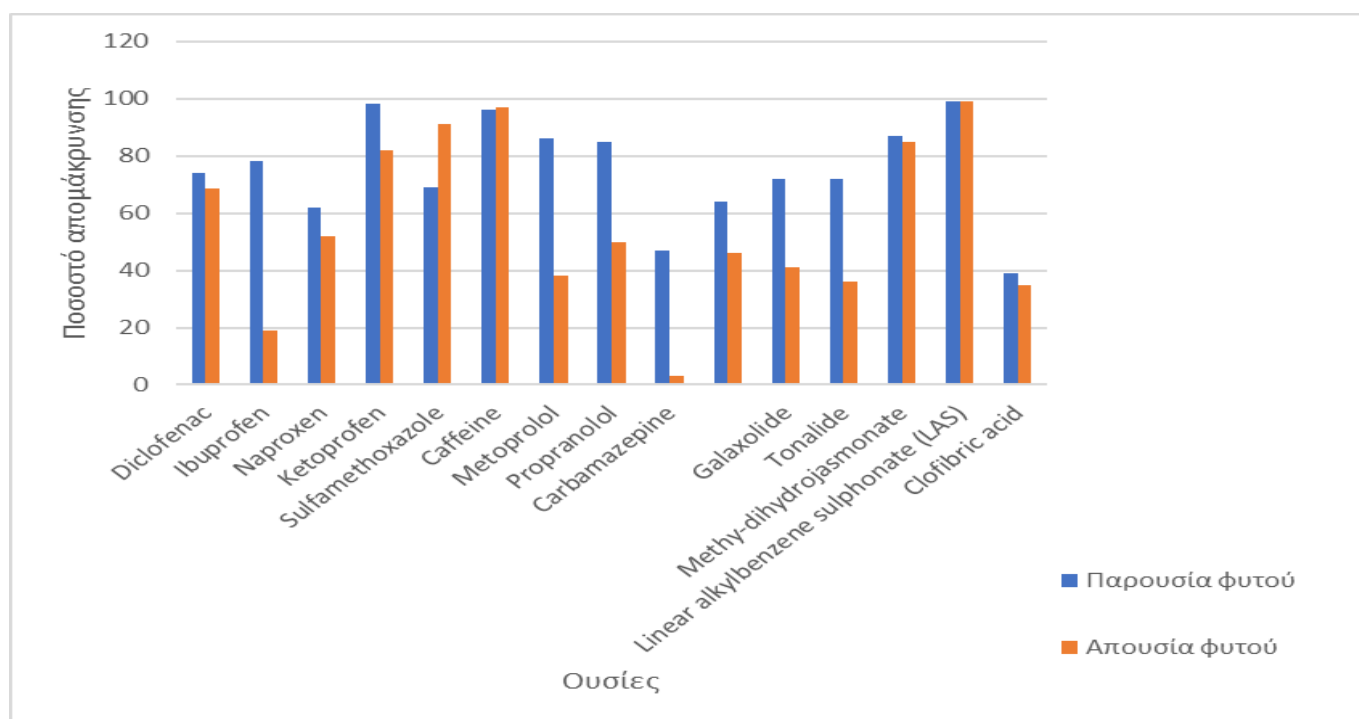
Τα φυτά που χρησιμοποιούνται συχνά για την απομάκρυνση φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής είναι τα *Typha* spp., *Typha angustifolia*, *Scirpus* spp, *Scirpus validus*, *Phragmites australis*, και *Typha* and *Phragmites* (Πίνακας 5.12). Αξίζει να σημειωθεί ότι μελέτες έχουν δείξει ότι χρησιμοποιώντας το είδος *Phragmites* συγκριτικά με το είδος *Typha*, η απομάκρυνση της caffeine, του ibuprofen, και του naproxen αυξήθηκε από 66%, 43.9%, και 48.3% σε 80.8%, 59.5%, και 63.5%, αντίστοιχα [116].

Πίνακας 5.12: Είδη που αναφέρθηκαν για απομάκρυνση φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής από αστικά λύματα [115].

Είδος φυτού	Ουσία
<i>Typha</i> spp.	Carbamazepine, clofibric acid, and ibuprofen,
<i>Typha angustifolia</i>	Ibuprofen, triclosan, diclofenac, caffeine, and methyl dihydrojasmonate

Scirpus spp	Carbamazepine, ibuprofen, naproxen, tramadol
Scirpus validus	Caffeine, Carbamazepine
Phragmites australis	Enrofloxacin, ceftiofur, tetracycline, ibuprofen, naproxen, diclofenac, tonalide, bisphenol A, caffeine, and methyl dihydrojasmonate
Typha and Phragmites	Clofibric acid, carbamazepine, caffeine, methyl dihydrojasmonate, galaxolide, tonalide, ibuprofen, naproxen, ketoprofen, and diclofenac

Η συμβολή της φύτευσης στην απομάκρυνση των προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής (PPCPs) παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9: Ποσοστά απομάκρυνσης προϊόντων σε φυτεμένους και μη φυτεμένους τεχνητούς υγροβιότοπους

Αναφορικά με τον τύπο του υγροβιότοπου που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής αναφορές υπάρχουν τόσο για επιφανειακής όσο και για υποεπιφανειακής ροής. Στην περίπτωση της υποεπιφανειακής ροής ωστόσο προτιμάται η κατακόρυφη ροή έναντι της οριζόντιας με την πρώτη να αποτελεί το 60% των καταγεγραμμένων διαμορφώσεων [116]. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί διότι τα απόβλητα στην υποεπιφανειακή ροή δυσκολεύονται να διαπεράσουν το υπόστρωμα ή το φίλτρο και η βαρύτητα τα βοηθάει να ξεπεράσουν αυτό το φράγμα. Στον πίνακα 5.13 παρουσιάζεται η απομάκρυνση διάφορων ουσιών σε διαφορετικούς τύπους υγροβιότοπων. Παρατηρείται ότι στους διαφορετικούς τύπους υγροβιότοπων οι διάφορες ουσίες έχουν διαφορετική απομάκρυνση [116]. Για παράδειγμα, η καφεΐνη απομακρύνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό στους υγροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, ενώ το Diclofenac απομακρύνεται περισσότερο στους υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής.

Πίνακας 5.13: Απομάκρυνση φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής από αστικά λύματα σε διαφορετικούς τύπους υδροβιότοπων [116].

Ουσία	Ποσοστό Απομάκρυνσης (%)		
	Υποεπιφανειακή ροή		Επιφανειακή ροή
	Οριζόντια	Κατακόρυφη	
Caffeine	49	76	80
Carbamazepine	18	7	23
Diclofenac	48	10	27

Ibuprofen	48	68	56
Ketoprofen	16	37	41
Naproxen	48	70	58

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο δίνονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

6.1 Περίληψη

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η σύγχρονη κοινωνία είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος. Ο ουσιαστικός έλεγχος της ρύπανσης είναι απαραίτητος για την προστασία τόσο του περιβάλλοντος όσο και της ανθρώπινης υγείας. Ένα σημαντικό πρόβλημα της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι η ρύπανση των υδάτων το οποίο καθιστά απαραίτητη τη σωστή διαχείριση των λυμάτων και την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επιτρέπουν την απομάκρυνση των ρύπων από τα αστικά λύματα. Τα αστικά λύματα περιέχουν επιβλαβείς ρύπους όπως τα αιωρούμενα σωματίδια, οργανικές ενώσεις, άζωτο και φώσφορος σε αξιόλογες συγκεντρώσεις. Επίσης περιέχουν σε μικρές συγκεντρώσεις οργανικούς ρύπους όπως είναι τα παρασιτοκτόνα, τα αντιβιοτικά, τα φαρμακευτικά, τα παραπροϊόντα προσωπικής φροντίδας και υγιεινής κλπ.

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια διότι αποτελούν μια φυσική λύση (nature-based solution) η οποία είναι οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον για τη διαχείριση υγρών αποβλήτων. Η τεχνολογία των τεχνητών υδροβιότοπων έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο σε σχέση με την απομάκρυνση των ρύπων, κυρίως λόγω της εφαρμογής των συστημάτων υποεπιφανειακής ροής.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της απομάκρυνσης των συμβατικών ρύπων και των μικρορύπων από αστικά λύματα με την χρήση τεχνητών υγροβιότοπων. Η διπλωματική αυτή εργασία προτείνει την χρήση διάφορων τύπων τεχνητών υγροβιότοπων για την απομάκρυνση των ρύπων που περιέχονται στα αστικά απόβλητα, αξιοποιώντας τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτά τα συστήματα.

6.2 Συμπεράσματα

Τα συμβατικά συστήματα επεξεργασία αποβλήτων (σύστημα ενεργού ιλύος) έχουν διάφορα μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας, και συντήρησης, υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, πολλά μηχανικά μέρη, παραγωγή ιλύος, απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού κ.α. Για τον λόγο αυτό τα φυσικά συστήματα έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Οι υγροβιότοποι είναι μια κατηγορία φυσικών συστημάτων οι οποία παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως είναι το χαμηλό ενεργειακό και ανθρακικό αποτύπωμα, η μηδενική παραγωγή ιλύος, το πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος, η δυνατότητα καλύτερης αντιμετώπισης πλημμυρικών επεισοδίων και η απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα.

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι απομακρύνουν μια πληθώρα ρύπων από τα λύματα με διεργασίες όμοιες με αυτές που λαμβάνουν χώρα στα φυσικά οικοσυστήματα. Οι μηχανισμοί καθώς και ο τρόπος με τον οποίο συμβαίνουν εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως η σύσταση των λυμάτων, η οργανική και η υδραυλική φόρτιση, το είδος του πληρωτικού υλικού υπόστρωμα, το είδος των φυτών του υγροβιότοπου, τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος και το κλίμα της περιοχής.

Η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών βασίζεται είτε στην κροκίδωση/καθίζηση (για επιφανειακούς τεχνητούς υγροβιότοπους) είτε στην διήθηση/κροκίδωση/καθίζηση των κολλοειδών σωματιδίων στους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής. Επιπλέον, και στα δύο είδη τεχνητών υγροβιότοπων τα οργανικά αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται με τη βιολογική αποδόμησή τους υπό αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες συνθήκες. Έχει αναφερθεί ότι η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου είναι ταχύτερη στους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής συγκριτικά με τους τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής. Η απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών σε όλους τους τύπους υγροβιότοπων είναι ικανοποιητική, παρόλα αυτά, στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης ροής υποεπιφανειακής ροής παρατηρείται το μεγαλύτερο ποσοστό απομάκρυνσης (έως και 97%).

Η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου μπορεί να οφείλεται είτε σε αερόβια διάσπαση είτε σε αναερόβια/ανοξική. Πιο συγκεκριμένα η απομάκρυνση του BOD₅ των υγροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής είναι πάνω από 75%, ενώ η απομάκρυνση του COD πάνω από 65%.

Η απομάκρυνση του αζώτου οφείλεται στις διεργασίες της αμμωνιοποίησης, νιτροποίησης, απονιτροποίησης, πτητικοποίησης, και πρόσληψης του αζώτου από τα φυτά που ως αποτέλεσμα επιτυγχάνουν στις περισσότερες περιπτώσεις ποσοστά απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου πάνω από 70%. Τα ποσοστά απομάκρυνσης αμμωνιακού αζώτου για τους υγροβιότοπους υποεπιφανειακής κατακόρυφης ροής είναι πολύ ικανοποιητικά λόγω των αερόβιων συνθηκών που επικρατούν μέσα στους πόρους του πληρωτικού υλικού. Η απομάκρυνση αζώτου στους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής δεν είναι ικανοποιητική λόγω της μειωμένης μεταφοράς οξυγόνου εντός της κλίνης που καθιστά αναποτελεσματική την διεργασία της νιτροποίησης.

Οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης του φωσφόρου σε τεχνητούς υδροβιότοπους είναι η προσρόφηση στο υπόστρωμα και χημική κατακρήμνιση, η αφομοίωση από το βιολογικό φιλμ (βιοφίλμ), και η πρόσληψη από τα φυτά.

Όσον αφορά τον πιο αποτελεσματικό τύπο υδροβιότοπου για την απομάκρυνση των παθογόνων, οι υδροβιότοποι κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής είναι πιο αποτελεσματικοί από αυτούς της οριζόντιας ροής λόγω των υψηλότερων συγκεντρώσεων διαλυμένου οξυγόνου στους κατακόρυφης ροής οι οποίες ευνοούν την απομάκρυνση των παθογόνων. Οι λιγότεροι αποτελεσματικοί είναι οι υδροβιότοποι επιφανειακής ροής.

Η απομάκρυνση των μετάλλων στους τεχνητούς υδροβιότοπους λαμβάνει χώρα με τέσσερις μηχανισμούς: (α) προσρόφηση στα ιζήματα, (β) καθίζηση ως αδιάλυτα άλατα, (γ) πρόσληψη από φυτά και τα βακτήρια, και (δ) εναπόθεση αιωρούμενων στερεών. Η απομάκρυνση των μετάλλων συμβαίνει σε διάφορους βαθμούς με τους ρυθμούς απομάκρυνσης των μετάλλων να μειώνεται ως εξής: Hg>Cb>Pb=Cr> Cu=Zn>Ni>As>Se.

Οι κύριοι μηχανισμοί για την απομάκρυνση των παρασιτοκτόνων αφορούν την βιοδιάσπασή τους, τη φυσική εναπόθεση, την υδρόλυση και την πρόσληψη από τα φυτά. Αρκετές έρευνες έχουν αναφερθεί για την απομάκρυνση παρασιτοκτόνων με υδροβιότοπους επιφανειακής ροής και οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής και λιγότερες στην απομάκρυνση με χρήση κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής.

Τέλος, οι μηχανισμοί απομάκρυνσης/αποδόμησης φαρμακευτικών παραπροϊόντων και προϊόντων προσωπικής φροντίδας/υγιεινής περιλαμβάνουν κυρίως φωτολυτική αποδόμηση, προσρόφηση, φυτοαποικοδόμηση και μικροβιακή αποδόμηση. Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι η αρχική συγκέντρωση του φαρμακευτικού προϊόντος είχε επίδραση στην

απομάκρυνση της διότι σε αυξημένες συγκεντρώσεις το φυτό και το υπόστρωμα αδυνατούσαν να την απορροφήσουν. Ακόμα, σημαντικό ρόλο στην απομάκρυνση παίζουν οι φυσικοχημικές ιδιότητες της εκάστοτε ουσίας καθώς και οι περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα του υδροβιότοπου. Για παράδειγμα παρατηρήθηκε ότι οι αποδόσεις απομάκρυνσης μη στεροειδών αντιφλεγμονώδων φαρμάκων, βήτα αναστολέων, αντισπασμωδικών, και αρωμάτων είναι υψηλότερες στην περίπτωση φυτεμένου τεχνητού υδροβιότοπου συγκριτικά με του μη φυτεμένου. Από την άλλη μεριά, μελέτες δείχνουν ότι σε μερικές περιπτώσεις όπως τονωτικών, καθαριστικών, και χαπιών χοληστερίνης η παρουσία φυτού δεν είχε κάποια σημαντική θετική επίπτωση στην απομάκρυνση.

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο η διπλωματική αυτή μελέτη δείχνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την εφαρμογή τεχνητών υδροβιότοπων στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, όσο αναφορά στην περίπτωση οργανικών ρύπων όπως φυτοφάρμακα και φαρμακευτικά παραπροϊόντα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας/υγιεινής τα καταγεγραμμένα ποσοστά απομάκρυνσης φαίνεται πως είναι ικανοποιητικά. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μελετήθηκαν οι κύριες μικροοργανικές ενώσεις και όχι τα παραπροϊόντα αποδόμησής τους τα οποία ενδέχεται να εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα και τοξικότητα στο περιβάλλον.

6.3 Προτάσεις

Σε συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προτείνονται οι ακόλουθες μελλοντικές κατευθύνσεις:

- Οι περισσότερες μελέτες για την απομάκρυνση των ρύπων σε συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων εστιάζουν στην απομάκρυνση αζώτου, φωσφόρου, και οργανικού φορτίου. Υπάρχει μεγάλη ανάλυση για τους μηχανισμούς απομάκρυνσης αυτών των ρύπων και οι κύκλοι του αζώτου, του φωσφόρου, και του οργανικού φορτίου έχουν αναλυθεί εκτενώς. Παρόλα αυτά ρύποι όπως παρασιτοκτόνα ή φαρμακευτικά παραπροϊόντα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας/υγιεινής δεν έχουν ερευνηθεί πλήρως. Υπάρχουν μερικές σύγχρονες μελέτες που διερευνούν τους μηχανισμούς και τα ποσοστά απομάκρυνσης τέτοιων ρύπων. Συνιστάται η επιπρόσθετη μελέτη τέτοιων ρύπων και κυρίως σε μεγάλη κλίμακα.
- Αν και πολλοί συγγραφείς έχουν μελετήσει τις πιθανές διεργασίες που εμπλέκονται στην απομάκρυνση μικροβίων, δεν έχουν διεξαχθεί συστηματικές αναλύσεις αυτών των διεργασιών και της τύχης των μικροβίων. Περαιτέρω ανάλυση και έρευνα είναι απαραίτητη στο κομμάτι αυτό.
- Αν και πολλές πρόσφατες μελέτες έχουν εξετάσει την κατανομή των μετάλλων σε διαφορετικά συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων, οι διαδικασίες απομάκρυνσης των μετάλλων δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως. Περισσότερες μελέτες απομάκρυνσης μετάλλων από υγρά απόβλητα είναι απαραίτητες για την πλήρη κατανόηση των μηχανισμών τους.
- Σε αρκετές πρόσφατες μελέτες τονίστηκε ότι σημαντικός παράγοντας που επηρέαζε την απομάκρυνση των οργανικών μικρορύπων ήταν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής. Συνιστώνται μελλοντικές μελέτες για την αξιολόγηση της συσχέτισης και προσδιορισμό στους βέλτιστους χρόνου παραμονής στα συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων. Από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στον τομέα της έρευνας των κατασκευασμένων υδροτόπων είναι η κλίμακα. Συνιστάται η χρήση τεχνητών υδροβιότοπων σε πλήρη κλίμακα για να μπορέσει να διερευνηθεί πλήρως το κόστος λειτουργίας και συντήρησης τέτοιων συστημάτων.

- Η μοντελοποίηση είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση των μηχανισμών απομάκρυνσης ρύπων στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Παρόλα αυτά η μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων συνεχίζει να αποτελείται από προσεγγίσεις μαύρου κουτιού. Ωστόσο, τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μηχανιστικά μοντέλα που θα βοηθήσουν στον καθορισμό των διαδικασιών και των πολλαπλών αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν στους υδροβιότοπους.
- Τα μηχανιστικά μοντέλα είναι αυτή τη στιγμή χρήσιμα εργαλεία για την κατανόηση ορισμένων διαδικασιών και είναι ικανά να επιδείξουν πολλές αλληλεπιδράσεις μέσα στο οικοσύστημα των υδροτόπων. Ωστόσο, κανένα από τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα δεν καταγράφει με επιτυχία όλες τις σχετικές υδραυλικές και βιογεωχημικές πολυπλοκότητες. Συνίσταται να συμφωνηθεί η χρήση ενός συγκεκριμένου μοντέλου, το οποίο θα μπορούσε στη συνέχεια να εφαρμοστεί σε πολυάριθμες περιπτώσιολογικές μελέτες.
-
-

Βιβλιογραφία:

1. Akrivopoulou, C. (2010),” Basic concepts - environmental law”, National School of public administration, Course: Environmental Law, WordPress. (Retrieved on Aug 2, 2023)
<https://akrivopoulouchristina.wordpress.com/2010/03/06/%CE%B2%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82-%CE%AD%CE%BD%CE%BD%CE%BF%CE%B9%CE%B5%CF%82-%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CE%BF-%CF%84%CE%BF%CF%85-%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%B2%CE%AC%CE%BB%CE%BB%CE%BF/>
2. Crites, R.W., Middlebrooks, E.J., & Reed, S.C. (2005). Natural Wastewater Treatment Systems (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420026443>.
3. Reed, S.C., Crites, R.W. and Middlebrooks, E.J. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. New York: 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc
4. Gopal, B. (1999), “Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems”, Water Sci. Technol. 40 (3), 27-35. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00468-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00468-0).
5. Evans, S.A. (1964). The Palace of Minos at Knossos: A comparative account of the successive stages of the early Cretan civilization as illustrated by the discoveries. Biblo and Tannen. 63 Fourth Ave, New York., USA.

6. MacDonald, C.F. and Driessen, J.M. (1988). The Drainage System of the Domestic Quarter in the Palace at Knossos. British School of Athens. 83, pp. 235-358. doi:10.1017/S006824540002075X.
7. Asano, T. (1994), "Irrigation with Treated Sewage Effluents. In: Tanji, K.K., Yaron, B. (eds) Management of Water Use in Agriculture". Adv. Agric. Sci. 22. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-78562-7_9.
8. Metcalf and Eddy, Inc. (1991), "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. New York: MacGraw-Hill, Inc.
9. Αγγελάκης, Α.Ν. και Tchobanoglous, G. (1995), "Υγρά Απόβλητα-Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επαναχρησιμοποίηση και Διάθεση Εκροών", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρητης, ISBN: 9789607309952.
10. Stefanakis, A.I., Akratos, C.S., and Tsihrintzis, V.A. (2014). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. 1st Edition: Elsevier. ISBN: 978-0-124-04612-2
11. Nivala, J., Boog, J., Headley, T., Aubron, T., Wallace, S., Brix, H., Mothes, S., van Afferden, M., & Müller, R. A. (2019). "Side-by-side comparison of 15 pilot-scale conventional and intensified subsurface flow wetlands for treatment of domestic wastewater", Sci. Total Environ. 658, 1500–1513. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.165>.
12. Hazra, M., & Durso, L. M. (2022). "Performance Efficiency of Conventional Treatment Plants and Constructed Wetlands towards Reduction of Antibiotic Resistance", Antibiotics (Basel, Switzerland), 11(1), 114. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11010114>.

13. Stefanakis, A.I. (2018), “Introduction to Constructed Wetland Technology”. In Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment, S. Alexandros (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119268376.ch0>.
14. National Geographic, “Wetland”. Retrieved from: <https://education.nationalgeographic.org/resource/wetland/> on August 3rd, 2023.
15. United States Environmental Protection Agency (EPA) (2023), “Wetlands”, Retrieved from: <https://www.epa.gov/wetlands/what-wetland> on August 3rd, 2023.
16. Bastian, R. & Shanaghan, P. & Thompson, B. (2020), “Use of Wetlands for Municipal Wastewater Treatment and Disposal–Regulatory Issues and EPA Policies”. 10.1201/9781003069850-26.
17. UN Climate Technology Center & Network (CTCN), UNFCCC Technology Mechanism, “Natural Wetlands”. Retrieved from: <https://www.ctc-n.org/technologies/natural-wetlands> (on August 4th, 2023).
18. IWA Publishing (2021) “Nature Based Solutions for Wastewater Treatment”, Edited by Cross, K. & Tondera, K. & Rizzo, A. & Andrews, L. & Pucher, B. & Istenič, D. & Karres N. & McDonald, R. ISBN: 9781789062250
19. Gardner, R.C. & Davidson, N.C. (2011), “The Ramsar Convention”, In: LePage, B. (eds) Wetlands. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0551-7_11.
20. The Global development Research Center, Agenda 21, Chapter 18: Protection of the Quality and Supply of Freshwater Resources. Retrieved from: <https://www.gdrc.org/uem/water/agenda21chapter18.html> on August 4th, 2023.
21. USA Environmental Protection Agency (EPA). (1995). A Handbook of Constructed Wetlands – Volume 1: General Considerations. USEPA-Region III with USDA, NRCS.

22. Vymazal, J. (2022), “The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment”, *Land 11*, 174. <https://doi.org/10.3390/land11020174>.
23. Brix, H. (1993), “Wastewater treatment in constructed wetlands: System design, removal processes, and treatment performance”, In *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, pp. 9–22.
24. Brix, H. (1987), “Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants—the root zone method”, *Water Sci. Technol.* 19, 107–118.
25. Vymazal, J. (2011), “Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review”, *Hydrobiologia* 2011, 674, 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>.
26. Vymazal, J. (2004), “Removal of phosphorus in constructed wetlands with sub-surface flow in the Czech Republic”, *Water Air Soil Pollut. Focus* 4, 657–670. <https://doi.org/10.1023/B:WAFO.0000028385.63075.51>.
27. Parde, D. & Patwa, A. & Shukla, A. & Vijay, R. & Killedar, D. J. & Kumar, R. (2021), “A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater”, *Environ. Technol. Innov.* 21, 101261, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>.
28. Kadlec, R.H. & Knight, R.L. (1996), “Treatment Wetlands”, CRC Press LLC: Boca Raton, FL, USA.
29. Akrotos, C.S. & Jerrentrup, H. & Pechlivanidis, I. & Sylaios, G.K. & Tsihrintzis, V.A. (2006), “A Free Water Surface Constructed Wetland for the Treatment of Agricultural Drainage Entering Vassova Lagoon”, Kavala, Greece. *Fresenius’ Environmental Bulletin* 15. 1553–1562.
30. EPA (US), “Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment”, Design Manual, Environmental Protection Agency, [USA 2002].

31. Brix, H. & Schierup, H.-H. (1989), “The use of aquatic macrophytes in water pollution control”, *Ambio* 18, 100–107.
32. Culley, D.D. Jr. & Epps, E.A. (1973), “Use of duckweed for waste treatment and animal feed”, *J. Water Pollut. Control Fed.* 45, 337–347.
33. Ozimek, T. & Czupryński, P. (2003), “Ten years’ experience of constructed wetlands in Poland”, *Publ. Inst. Geogr. Univ. Tartu.* 2003, 94, 163–169.
34. Denny, P. (1980), “Solute movement in submerged angiosperms”, *Biol. Rev.* 55, 65–92.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1980.tb00688.x>.
35. Toet, S. & Van Logtestijn, R.S.P. & Schreier, M. & Kampf, R. & Verhoeven, J.T.A. (2005), “The functioning of a wetland system used for polishing effluent from a sewage treatment plant”, *Ecol. Eng.* 2005, 25, 101–124. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.03.004>.
36. Reed, S.C.; Middlebrooks, E.J.; Crites, R.W. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, 2nd ed.; McGraw-Hill Book Company: New York, NY, USA, 1995.
37. De Jong, J. (1976), “The purification of wastewater with the aid of rush or reed ponds”, In *Biological Control of Water Purification*; Pierson, R.W., Ed.; Pennsylvania University Press: Philadelphia, PA, USA, pp. 133–139.
38. Lakatos, G. Hungary (1998), In *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*; Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R., Eds.; Backhuys Publishers: Leiden, The Netherlands, pp. 191–206.
39. 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, E. L. (2020), “Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis”, *Sci. Total Environ.* 714, 136776, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136776>.

40. Borne, K.E. & Fassman, E.A. & Tanner, C.C. (2013), “Floating treatment wetlands retrofit to improve stormwater pond performance for suspended solids, copper and zinc”, *Ecol. Eng.* 54, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.031>.
41. Tanner, C.C. & Headley, T.R. (2011), “Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants”, *Ecol. Eng.* 37, 474–486. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.12.012>.
42. GARCÍA, J. & ROUSSEAU, D. P. L. & MORATÓ, J. & LESAGE, E. & MATAMOROS, V. & BAYONA, J. M. (2010), “Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands: A Review *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 40:7, 561-661, <https://doi.org/10.1080/10643380802471076>.
43. Vymazal, J. (2005), “Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment’, *Ecol. Eng.* 25 (5), 478-490, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>.
44. Vymazal, J. & Kröpfelová, L. (2009), “Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of field experience”, *Sci. Total Environ.* 407, 3911–3922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.08.032>.
45. Vymazal, J. (2020), “Removal of nutrients in constructed wetlands for wastewater treatment through plant harvesting–Biomass and load matter the most”, *Ecol. Eng.* 155, 105962. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105962>.
46. Vymazal, J. (2007), “Removal of nutrients in various types of constructed wetlands”. *Sci. Total Environ.* 380, 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>.

47. Vohla, C. & Koiv, M. & Bavor, H.J. & Chazarenc, F. & Mander, Ü. (2011), “Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review”, *Ecol. Eng.* 37, 70–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.08.003>.
48. Standard DWA-A 262A (2018), “Principles for Dimensioning, Construction and Operation of Wastewater Treatment Plants with Planted and Unplanted Filters for Treatment of Domestic and Municipal Wastewater”, The German Association for Water—Wastewater and Waste: Hannef, Germany.
49. Καραμούζης, Δ. (2003), “Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων”. Τεύχος 1. Τεχνητοί Υγρότοποι. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Δωδώνη.
50. Tsihrintzis, V.A. (2017), “The use of Vertical Flow Constructed Wetlands in Wastewater Treatment”. *Water Resour Manage* 31, 3245–3270. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1710-x>.
51. Verma, V. & Soti, A. & Kulshreshtha, N. M. & Rampuria, A. & Brighu, U. & Gupta, A. B. (2022), “Strategies for enhancing phosphorous removal in Vertical Flow Constructed Wetlands, *J. Environ. Manage.* 317, 115406, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115406>.
52. Gkika, D. & Gikas, G. D. & Tsihrintzis, V. A. (2014), “Construction and operation costs of constructed wetlands treating wastewater”, *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 70(5), 803–810. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.294>.
53. Rahman, M. E. & Bin Halmi, M. I. E. & Bin Abd Samad, M. Y. & Uddin, M. K. & Mahmud, K. & Abd Shukor, M. Y. & Sheikh Abdullah, S. R. & Shamsuzzaman, S. M. (2020), “Design, Operation and Optimization of Constructed Wetland for Removal of Pollutant”, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17(22), 8339. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228339>.

54. Kadlec, R.H. & Knight, R.L. & Vymazal, J. & Brix, H & Cooper, P. & Haberl, R. (2000), "Constructed Wetlands for Pollution Control". Scientific and Technical Report, No 8. London, England: International Water Association Publishing.
55. Stottmeister, U. & Wiessner, A. & Kusch, P. & Kappelmeyer, U. & Kastner, M. & Bederski, O. & Muller, R.A. & Moormann, H. (2003), "Effects of Plants and Microorganisms in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment", *Biotechnol. Adv.* 22, 93– 117. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.010>.
56. Wang, Y. & Cai, Z. & Sheng, S. & Pan, F. & Chen, F. & Fu, J. (2020), "Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands", *Sci. Total Environ.* 701, 134736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134736>.
57. Manios, T. & Stentiford, E. I. & Millner P. (2003), "Removal of Total Suspended Solids from Wastewater in Constructed Horizontal Flow Subsurface Wetlands", *J. Environ. Sci. Health A* 38:6, 1073-1085. <https://doi.org/10.1081/ESE-120019865>.
58. Karathanasis, A. D. & Potter, C. L. & Coyne, M.S. (2003), "Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater", *Ecol. Eng.* 20 (2), 157-169. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(03\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(03)00011-9).
59. Vymazal, J. (2002), "The Use of Sub-surface Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in the Czech Republic: 10 Years' Experience", *Ecol. Eng.* 18, 633-646. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00025-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00025-3).
60. Zhuang, L.-L. & Yang, T. & Zhang, J. & Li, X. (2019), "The configuration, purification effect and mechanism of intensified constructed wetland for wastewater treatment from the aspect of nitrogen removal: A review", *Bioresour. Technol.* 293, 122086. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122086>.

61. Reddy, K. & Patrick, W. (1984), “Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments”, *C R C Critical Reviews in Environmental Control*, 13:4, 273-309, <https://doi.org/10.1080/10643388409381709>.
62. Machum, T. & Jenssen, P. & Warner, W. (1995), “Cold-climate constructed wetlands”, *Water Sci. Technol.* 32(2), 95-102. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00609-5](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00609-5).
63. Stefanakis, I. A. & Akratos, C.S. (2016), “Removal of Pathogenic Bacteria in Constructed Wetlands: Mechanisms and Efficiency”. In: Ansari, A., Gill, S., Gill, R., Lanza, G., Newman, L. (eds) *Phytoremediation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41811-7_17.
64. Braschi, I. & Blasioli, S. & Lavrnić, S. et al. (2022), “Removal and fate of pesticides in a farm constructed wetland for agricultural drainage water treatment under Mediterranean conditions (Italy)”, *Environ Sci Pollut Res* 29, 7283–7299. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16033-4>.
65. Tang X. & Yang Y. & Tao R. & Chen P. & Dai Y. & Jin C. & Feng X. (2016), “Fate of mixed pesticides in an integrated recirculating constructed wetland (IRCW)”, *Sci. Total Environ.* 571, 935–942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.079>.
66. Ghazal, H. & Koumaki, E. & Hoslett, J. & Malamis, S. & Katsou, E. & Barcelo, D. & Jouhara, H. (2022), “Insights into current physical, chemical and hybrid technologies used for the treatment of wastewater contaminated with pharmaceuticals”, *J. Clean. Prod.* 361, 132079. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132079>.
67. Vo, H. N. P. & Bui, X. T. & Nguyen, T. M. H. et al. (2018), “Insights of the Removal Mechanisms of Pharmaceutical and Personal Care Products in Constructed Wetlands”, *Curr Pollution Rep.* 4, 93–103. <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0086-8>.

68. Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 1991. Για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων.
69. Οδηγία 98/15/ΕΚ, της Επιτροπής της 27ης Φεβρουαρίου 1998. Για τροποποίηση της Οδηγίας 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου, όσον αφορά ορισμένες απαιτήσεις οι οποίες καθορίζονται στο Παράρτημα Ι αυτής.
70. Ν.1650/1986 (ΦΕΚ 160/Α'/16.10.1986). Για την προστασία τον περιβάλλοντος.
71. Κοινή Υπουργική Απόφαση 5673/400/1997 (ΦΕΚ 1969Β/14.3.1997). Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων.
72. Κοινή Υπουργική Απόφαση 145116/2011. Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις.
73. Schierano, M. C. & Panigatti, M. C. & Maine, M. A. & Griffa, C. A. & Boglione, R. (2020), “Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake”, *J. Environ. Manage.* 272, 111094. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111094>.
74. Fernando García-Ávila, F. (2020), “Treatment of municipal wastewater by vertical subsurface flow constructed wetland: Data collection on removal efficiency using *Phragmites Australis* and *Cyperus Papyrus*”, *Data in Brief*, 30, 105584. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105584>.
75. Haydar, S. & Anis, M. & Afaq, M. (2020), “Performance evaluation of hybrid constructed wetlands for the treatment of municipal wastewater in developing countries”, *Chin. J. Chem. Eng.* 28 (6), 1717-1724. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.02.017>.
76. Sgroi, M. & Pelissari, C. & Roccaro, P. & Sezerino, P. H. & García, J. & Vagliasindi, F. G. A. & Ávila, C. (2018), “Removal of organic carbon, nitrogen, emerging contaminants and

- fluorescing organic matter in different constructed wetland configurations”, *Chem. Eng. J.* 332, 619-627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.122>.
77. Saeed, T. & Haque, I. & Khan, T. (2019), “Organic matter and nutrients removal in hybrid constructed wetlands: Influence of saturation”, *Chem. Eng. J.* 371, 154-165. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.030>.
78. Asano, T. & Burtin, FL. & Leverenz, H. L. & Tsuchihashi, R. & Tchobanoglous, G. (2007), “Water reuse: issues, technologies, and applications”. MacGraw-Hill, New York.
79. Rachmadi, A.T. & Kitajima, M. & Pepper, I. L. & Gerba, C. P. (2016), “Enteric and indicator virus removal by surface flow wetlands”. *Sci Total Environ* 542, 976–982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.001>.
80. Hamaamin, Y.A. & Adhikari, U. & Nejadhashemi, P. & Harrigan, T. & Reinhold, D. M. (2014), “Modeling Escherichia coli removal in constructed wetlands under pulse loading”. *Water Res.* 50, 441–454. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.052>.
81. Azaizeh, H. & Linden, K. G. & Barstow, C. & Kalbouneh, S. & Tellawi, A. & Albalawneh, A. & Gerchman, Y. (2013), “Constructed wetlands combined with UV disinfection systems for removal of enteric pathogens and wastewater contaminants”, *Water Sci Technol* 67(3), 651–657. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.615>.
82. Mustaffa, A. (2013), “Constructed wetland for wastewater treatment and reuse: a case study of developing country”, *Int J Environ Sci Dev* 4(1), 20–24.
83. Toscano, A. & Marzo, A. & Milani, M. & Cirelli, G. L. & Barbagallo, S. (2015), “Comparison of removal efficiencies in Mediterranean pilot constructed wetlands vegetated with different plant species”. *Ecol Eng* 75, 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.12.005>.

84. Hench, K. R. & Bissonnette, G. K. & Sexstone, A. J. & Coleman, J. G. & Garbutt, K. & Skousen, J. G. (2003), "Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands", *Water Res* 37(4), 921–927. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00377-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00377-9).
85. Karimi, B. & Ehrampoush, M. H. & Jabary, H. (2014), "Indicator pathogens, organic matter and LAS detergent removal from wastewater by constructed subsurface wetlands", *J Environ Health Eng* 12, 52. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-52>.
86. Morato, J. & Codony, F. & Sánchez, O. & Pérez, L. M. & García, J. & Mas, J. (2014), "Key design factors affecting microbial community composition and pathogenic organism removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands", *Sci Total Environ.* 481, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.068>.
87. Weedon, C.M. (2010), "A decade of compact vertical flow constructed wetlands", *Water Sci Technol* 62(12), 2790–2800. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.041>.
88. Gikas, G.D. Tsihrintzis, V.A. (2012), "A small-size vertical flow constructed wetland for on-site treatment of household wastewater", *Ecol. Eng.* 44, 337–343. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.016>.
89. Abou-Elela, S. I. & Hellal, M. S. (2012), "Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with *Canna*, *Phragmites* and *Cyperus*", *Ecol. Eng.* 47, 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.044>.
90. García-Pérez, A. & Harrison, M. & Grant, B. & Chivers, C. (2011), "Microbial analysis and chemical composition of maize (*Zea mays*, L.) growing on a recirculating vertical flow constructed wetland treating sewage on-site", *Biosyst. Eng.* 114, 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.12.009>.

91. Sehar, S. & Naeem, S. S. & Perveen, I. & Ali, N. & Ahmed, S. (2015), “A comparative study of macrophytes influence on wastewater treatment through subsurface flow hybrid constructed wetland”, *Ecol. Eng.* 81, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.009>.
92. Headley, T. & Nivala, J. & Kassa, K. & Olsson, L. & Wallace, S. & Brix, H. & van Afferden, M. & Müller, R. (2013), “*Escherichia coli* removal and internal dynamics in subsurface flow ecotechnologies: effects of design and plants”, *Ecol. Eng.* 61, 564–574. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.062>.
93. García, J.A. & Paredes, D. & Cubillos, J. A. (2013), “Effect of plants and the combination of wetland treatment type systems on pathogen removal in tropical climate conditions”, *Ecol. Eng.* 58, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.010>.
94. Zurirta, F. & De Anda, J. & Belmont, M. A. (2009), “Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands”, *Ecol. Eng.* 35, 861–869. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.026>.
95. Marchand, L. & Mench, M. & Jacob, D. L. & Otte, M. L. (2010), “Metal and metalloid removal in constructed wetlands, with emphasis on the importance of plants and standardized measurements: A review”, *Environ. Poll.* 158 (12), 3447-3461. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.08.018>.
96. Crites, R.W. & Dombeck, G.D. & Watson, R.C. & Williams, C.R. (1997), “Removal of metals and ammonia in constructed wetlands”, *Water Environ. Res.* 69, 132-135. <https://doi.org/10.2175/106143097X125272>.
97. Nelson, E. & Specht, W. & Knox, A. (2006), “Metal Removal from Water Discharges by a Constructed Treatment Wetland”, *Eng. Life Sci.*, 6, 26-30. <https://doi.org/10.1002/elsc.200620112>.

98. Hadad, H. R. & Maine, M. A. & Bonetto, C.A. (2006), “Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment”, *Chemosphere* 63 (10), 1744-1753. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.09.014>.
99. Maine, M. A. & Suñe, N. & Hadad, H. & Sánchez, G. & Bonetto, C. (2009), “Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland”, *J. Environ. Manage.* 90 (1), 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.10.004>.
100. Lim, P. E. & Mak, K. Y. & Mohamed, N. & Md. Noor, A. (2003), “Removal and speciation of heavy metals along the treatment path of wastewater in subsurface-flow constructed wetlands”, *Water Sci. Technol.* 48 (5), 307–313. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0337>.
101. He, H. & Duan, Z. & Wang, Z. *et al.* (2017), “The removal efficiency of constructed wetlands filled with the zeolite-slag hybrid substrate for the rural landfill leachate treatment”, *Environ. Sci. Pollut. Res.* **24**, 17547–17555. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9402-x>.
102. Dorman, L. & Castle, J. W. & Rodgers, J. H. (2009), “Performance of a pilot-scale constructed wetland system for treating simulated ash basin water”, *Chemosphere* 75 (7), 939-947. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.012>.
103. Vymazal, J. & Březinová, T. (2015), “The use of constructed wetlands for removal of pesticides from agricultural runoff and drainage: A review”, *Environ. Int.* 75, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.026>.
104. Lyu, T. & Zhang, L. & Xu, X. & Arias, C. A. & Brix, H. & Carvalho, P. N. (2018), “Removal of the pesticide tebuconazole in constructed wetlands: Design comparison, influencing factors and modelling”, *Environ. Poll.* 223, 71-80.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.040>.

105. Chen, C. & Luo, J. & Bu, C. & Zhang, W. & Ma, L. (2022). “Efficacy of a large-scale integrated constructed wetland for pesticide removal in tail water from a sewage treatment plant”, *Sci. Total Environ.* 838 (4), 156568. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156568>.
106. Phong, V. H.N. & Koottatep, T. & Chapagain, S. K. & Panuvatvanich, A. & Polprasert, C. & Ahn, K.-H. (2016), “Removal of acetaminophen from wastewater by constructed wetlands with *Scirpus Validus*”, *Environ. Eng. Res.* 2016;21(2):164–70. <https://doi.org/10.4491/eer.2015.132>.
107. Sharif, F. & Westerhoff, P. & Herckes, P. (2014), “Impact of hydraulic and carbon loading rates of constructed wetlands on contaminants of emerging concern (CECs) removal”, *Environ. Pollut.* 185, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.001>.
108. Hu, X. & Xie, H. & Zhuang, L. & Zhang, J. & Hu, Z. & Liang, S. & Feng, K. (2021), “A review on the role of plant in pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) removal in constructed wetlands”, *Sci. Total Environ.* 780, 146637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146637>.
109. Sochacki, A. & Nowrotek, M. & Felis, E. & Kalka, J. & Ziemińska-Buczyńska, A. & Bajkacz, S. & et al., (2018), “The effect of loading frequency and plants on the degradation of sulfamethoxazole and diclofenac in vertical-flow constructed wetlands”, *Ecol. Eng.* 122, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.003>.
110. He, Y. & Sutton, N.B. & Lei, Y. & Rijnaarts, H. H. M. & Langenhoff, A. A. M. (2018), “Fate and distribution of pharmaceutically active compounds in mesocosm constructed wetlands”, *J. Hazard. Mater.* 357, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.05.035>.

111. Hijosa-Valsero, M. & Reyes-Contreras, C. & Dominguez, C. & Becares, E. & Bayona, J. M. (2016), “Behaviour of pharmaceuticals and personal care products in constructed wetland compartments: influent, effluent, pore water, substrate and plant roots”, *Chemosphere* 145, 508–517. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.090>.
112. Zhang, D. & Ni, W. & Gersberg, R. M. & Ng, W.J. & Tan, S. K. (2015a), “Performance characterization of pharmaceutical removal by horizontal subsurface flow constructed wetlands using multivariate analysis”, *Clean–Soil, Air, Water* 43, 1181–1189. <https://doi.org/10.1002/clen.201400294>.
113. Yan, Q. (2014), “Transportation and Distribution of Typical Pharmaceutically Active Compounds in the Water System of City and their Removal in Constructed Wetland System (CWS)”, Chongqing University, Doctor.
114. Thomas, R. & Gough, R. & Freeman, C. (2017), “Linear alkylbenzene sulfonate (LAS) removal in constructed wetlands: the role of plants in the treatment of a typical pharmaceutical and personal care product”, *Ecol. Eng.* 106, 415–422. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.015>.
115. Ferreira, A.R. & Ribeiro, A. & Couto, N. (2017), “Remediation of Pharmaceutical and Personal Care Products (PPCPs) in Constructed Wetlands: Applicability and New Perspectives”, In: Ansari, A. & Gill, S. & Gill, R. R. & Lanza, G. & Newman, L. (eds) *Phytoremediation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52381-1_9.
116. Rabello, V.M. & Teixeira, L. C. R. S. & Gonçalves, A. P. V. et al. (2019), “The Efficiency of Constructed Wetlands and Algae Tanks for the Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs): a Systematic Review”, *Water Air Soil Pollut.* 230, 236. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4304-9>.

117. Gill, L., Doran, C., Misstear, D., Sheahan, B., 2009. The use of recycled glass as a filter media for on-site wastewater treatment. *Desalin. Water Treat.* 4, 198–205.
118. [Shubiao Wu](#) 2016. Sanitation in constructed wetlands: A review on the removal of human pathogens and fecal indicators
119. Jan Vymazal 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review
120. Pradeep Kumar, 2013. Sharma Effects of load fluctuations on treatment potential of a hybrid sub-surface flow constructed wetland treating milking parlor waste water
121. Suwasa Kantawanichkul 2009. Treatment of high-strength wastewater in tropical vertical flow constructed wetlands planted with *Typha angustifolia* and *Cyperus involucratus*
122. M.M. Mufarrege 2019. Nitrogen and phosphorus removal and *Typha domingensis* tolerance in a floating treatment wetland
123. Andrzej Białowiec 2011. Nitrogen removal from wastewater in vertical flow constructed wetlands containing LWA/gravel layers and reed vegetation