



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΠΟΥΔΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ
ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ
ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ

ΣΟΦΙΑΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 2011057254

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΟΓΕΡΑΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΜΕΛΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ: ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΞΕΚΟΥΚΟΥΛΩΤΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Χανιά, Μάιος 2016

Η παρούσα διπλωματική είναι
αφιερωμένη στην οικογένεια μου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Κατ' αρχάς θα ήθελα να δώσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή Κ. Καλογεράκη Νικόλαο για την ανάθεση της εργασίας και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Στην υποψήφια Δρ. Μπαμπατσούλη Παναγιώτα για την συνεργασία μας και την βοήθεια της για την εκπόνηση των πειραμάτων.

Στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Διαμαντόπουλο Ευάγγελο και κ. Ξεκουκουλωτάκη Νικόλαο για τον χρόνο που διέθεσαν στην αξιολόγηση της εργασίας αυτής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όσους στάθηκαν δίπλα μου όλα τα χρόνια της φοίτησης μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης προσφέροντας μου την αμέριστη συμπαράσταση τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ	9
1. ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΚΑΙ ΑΛΟΦΥΤΑ	12
1.1 Ριζόσφαιρα	12
1.2 Βλαστός και Φύλλα	13
1.3 Αλόφυτα	14
1.4 Βούρλα (<i>Juncus acutus</i>)	15
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ	16
2.1 Σχεδιασμός συστημάτων φυτοεξυγίανσης	17
2.1.1 Είδος φυτού	17
2.1.2 Απαιτούμενη λίπανση	18
2.1.3 Πυκνότητα φύτευσης.....	18
2.1.4 Απαιτούμενη άρδευση και συντήρηση.....	18
2.1.5 Ανάγκη εναλλαγής καλλιεργειών	19
2.1.6 Διαχείριση παραγόμενων «αποβλήτων»	19
2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της Φυτοεξυγίανσης.....	20
3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	22
4. ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ	26
4.1 Ορισμός	26
4.2 Κατηγορίες φυσικών συστημάτων	26
4.3 Φυσικοί Υγροβιότοποι	32
4.4 Τεχνητοί Υγροβιότοποι	34
4.4.1 Τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής (FWS)	38
4.4.2 Τεχνητοί υγροβιότοποι υπόγειας ροής (SFS)	42
5. ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ	49
5.1 Παρουσίαση τεχνητών υγροβιότοπων σε παγκόσμια κλίμακα.....	49
5.2 Παρουσίαση τεχνητών υγροβιότοπων στην Ελλάδα.....	51
6. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟΥΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ	56
ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ	56

6.1 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΦΣΟΡΟΥ (P-PO₄)	57
6.2 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΖΩΤΟΥ	60
6.2.1 Αμμωνιακό Άζωτο (NH ₄ ⁺ -N)	61
6.2.2 Νιτρικό Άζωτο (NO ₃ ⁻ -N)	61
7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	62
7.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	62
7.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	63
7.3 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΦΣΟΡΟΥ	65
7.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΜΜΩΝΙΑΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NH ₄ -N)	67
7.5 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΝΙΤΡΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO ₃ -N)	70
7.6 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ COD	72
7.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
8. ΠΗΓΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	76
8.1 Ελληνική	76
8.2 Ξένη	78
8.3 Επιστημονικά άρθρα	79
8.4 Σελίδες στο Διαδύκτιο	81

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική διατριβή εκπονήθηκε στο εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής & Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Σκοπός της εν λόγω εργασίας ήταν η μελέτη ενός φυσικού συστήματος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων υψηλής αλατότητας.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένας πιλοτικός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής, κατασκευασμένος από μια ζαρντινέρα πληρωμένη με χαλίκι τριών διαφορετικών μεγεθών. Έπειτα έγινε η φύτευση δυο αλόφυτων *Juncus acutus* που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος. Αρχικά το νερό που χρησιμοποιήθηκε ήταν πόσιμο και με την πάροδο του χρόνου γινόταν σταδιακή ανάμειξη του με θαλασσινό νερό ως το σημείο που χρησιμοποιήθηκε μόνο θαλασσινό νερό, ώστε τα φυτά να προσαρμοστούν σταδιακά στην αυξημένη αλατότητα. Μέσω μιας κατάλληλα τοποθετημένης αντλίας και δύο μεγάλων βαρελιών είχαμε την συνεχή τροφοδοσία του συστήματος μας με θαλασσινό νερό εμπλουτισμένο με θρεπτικά, ήτοι πηγές άνθρακα, ανόργανου αζώτου και φωσφόρου. Το ζητούμενο της παρούσας διπλωματικής ήταν να ποσοτικοποιήσουμε την απομάκρυνση του άνθρακα, του αζώτου και του φωσφόρου από λύματα υψηλής αλατότητας στο πιλοτικό σύστημα υγροβιότοπου.

ABSTRACT

This thesis was elaborated in chemical process engineering and laboratory wastewater treatment Department of environmental engineering of Technical University of Crete.

The purpose of this work was the study of a natural wastewater treatment system in saline wastewater environment.

For the conduction of the experiments there was used a surface flow wetland, self-made, made from a window box, paid with three different grit sizes in this wetland was the planting of two sharp rushes (*Juncus acutus*) that were used during the experiment. Initially the water used was drinking and over time became gradual mixing with seawater as the point used only sea water in order to gradually adapt to increased salinity. Through pump and a properly placed two large barrels had a continuous supply of our system with seawater enriched with sources carbon, inorganic nitrogen and phosphorus. The aim of this project was to find the removal of carbon, nitrogen and phosphorus from our system.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχής επέμβαση του ανθρώπου στο περιβάλλον ανέτρεψε τις φυσικές διεργασίες της μετακίνησης και μεταβολής της μορφής των στοιχείων και της ενέργειας, ενώ οι βιογεωλογικές μεταβολές του περιβάλλοντος ήταν πολύ αργές ή ακόμη και σε δυναμική ισορροπία. Ως αποτέλεσμα της παρέμβασης αυτής είναι η υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών, η διάβρωση και αποσταθεροποίηση τους, και η σημαντική συμμετοχή με οποιονδήποτε τρόπο στην ερημοποίηση του περιβάλλοντος.

Ως περιβάλλον ορίζουμε το σύνολο των συνθηκών και των παραγόντων που επιδρούν σε κάποιον ή κάτι, ή πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση μας, το σύνολο των φυσικών συνθηκών και παραγόντων μέσα στο οποίο δημιουργούνται, υπάρχουν και αναπτύσσονται οι ζωντανοί οργανισμοί. Ρύπος ή αλλιώς και ρυπαντής ονομάζεται η οποιαδήποτε μη οργανική ουσία που ρυπαίνει το περιβάλλον.

Η εξυγίανση των εδαφών που έχουν ρυπανθεί με ανόργανες χημικές ουσίες ή στοιχεία μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους μηχανικούς και τεχνικούς τρόπους, όπως εκσκαφή των ρυπασμένων εδαφών και η περαιτέρω επεξεργασία τους, υγειονομική ταφή, φυσικοχημικές μέθοδοι διαχωρισμού των ρυπαντών, ηλεκτροχημικές διεργασίες και αποτέφρωση (Gabriel, 1992).

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης των εδαφών παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ως εναλλακτική μέθοδος εξυγίανσης μολυσμένων εδαφών. Η φυτοεξυγίανση βασίζεται στη ιδιότητα των φυτών να προσλαμβάνουν και να διασπούν ή να αδρανοποιούν τοξικές ανόργανες ουσίες από το έδαφος και επομένως μπορεί υπό προϋποθέσεις να χρησιμοποιηθεί για την οικονομική αντιμετώπιση του προβλήματος της υποβάθμισης των εδαφών.

ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

Υγροβιότοπος ονομάζεται κάθε περιοχή που καλύπτεται εποχικά ή μόνιμα από ρηχά νερά, ή που δεν καλύπτεται ποτέ από νερά, αλλά το υπόστρωμά της είναι υγρό για μεγάλο χρονικό διάστημα μέσα στο έτος. Το υπόστρωμα των υγροτόπων μπορεί να είναι έδαφος, άμμος, χαλίκια κ.λπ. Οι υγροβιότοποι έχουν ιδιαίτερη οικολογική σημασία, η οποία οφείλεται στην ποικιλότητα των ειδών και στις πυκνότητες των πληθυσμών που κατοικούν σε αυτούς, στη συνήθως υψηλή τους παραγωγικότητα και στα ιδιαίτερα ενδιαιτήματα που περικλείουν.

Σύμφωνα με τον επίσημο ορισμό της Σύμβασης Ραμσάρ, υγροβιότοποι είναι φυσικές ή τεχνητές περιοχές αποτελούμενες από έλη με ξυλώδη βλάστηση, από μη αποκλειστικώς ομβροδίαιτα έλη με τυρφώδες υπόστρωμα, από τυρφώδεις γαίες ή από νερό. Οι περιοχές αυτές κατακλύζονται μονίμως ή προσωρινώς με νερό, το οποίο είναι στάσιμο ή ρέον, γλυκό, υφάλμυρο ή αλμυρό. Σ' αυτές περιλαμβάνονται και εκείνες που καλύπτονται με θαλασσινό νερό, το βάθος του οποίου κατά τη ρηχία (ρηχία: η φάση της παλίρροιας κατά την οποία η στάθμη της θάλασσας λαμβάνει το κατά την αμπώτιδα ελάχιστο ύψος) δεν υπερβαίνει τα έξι μέτρα. Κατά την ίδια σύμβαση, στους υγροτόπους μπορούν να ενταχθούν και οι παρόχθιες ή παράκτιες ζώνες που γειτονεύουν με υγροτόπους ή με νησιά ή με θαλάσσιες υδατοσυλλογές και που είναι βαθύτερες μεν από έξι μέτρα κατά τη ρηχία, αλλά βρίσκονται μέσα στα όρια του υγροτόπου. [lsg.ucy.ac.cy]

Με τους υδροβιότοπους μπορούμε να επιτύχουμε τα ακόλουθα:

α. Εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων

Η κίνηση του νερού προς τον υδροφορέα προκαλεί εμπλουτισμό. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον εμπλουτισμό είναι οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του γεωλογικού υποβάθρου (διηθητικότητα, διαπερατότητα) του υδροτόπου, το κλίμα, τα γνωρίσματα της λεκάνης απορροής, οι χρήσεις γης κλπ. Οι παράκτιοι υδροβιότοποι γλυκών νερών είναι ιδιαίτερα σημαντικοί ιδίως όταν ασκείται υπεράντληση από μεγάλα βάθη. Αυτό οδηγεί στην αλάτωση των υδροφορέων, μια κατάσταση που δύσκολα αντστρέφεται.

β. Τροποποίηση πλημμυρικών φαινομένων

Οι υδροβιότοποι σε μια περιοχή μπορούν να μειώσουν τις πλημμύρες, είτε μειώνοντας το συνολικό όγκο του νερού, είτε καθιστώντας την πλημμύρα λιγότερο ορμητική. Αποθηκεύουν κάποια ποσότητα του νερού, μέρος της οποίας εξατμίζεται ή μπορεί να εισχωρήσει στο έδαφος ή μειώνουν την ορμή τους με τη περιβάλλουσα φυσική βλάστηση.

γ. Παγίδευση ιζημάτων και άλλων ουσιών

Όταν υπάρχει πυκνή βλάστηση υποβοηθείται η καθίζηση των φερτών υλικών που μπορεί να επηρεάζουν (αποτελούν θρεπτικά υλικά) ή μπορεί και όχι. Τα υλικά που παρασύρει το νερό μπορεί να είναι και ανθρωπογενή όπως χημικές ουσίες, απόβλητα βιομηχανιών και λύματα οικισμών τα οποία αποτίθενται και κατακρατούνται στον υδροβιότοπο.

δ. Αποθήκευση και ελευθέρωση θερμότητας

Οι ιδιότητες του νερού όπως μεγάλη ειδική θερμότητα και θερμική αγωγιμότητα, καθιστούν τους ωκεανούς και τις βαθιές λίμνες και λιγότερο τις ρηχές λίμνες και τα έλη, αποθήκες θερμότητας, διότι τη θερμή περίοδο του έτους αποθηκεύουν θερμότητα και την ελευθερώνουν το χειμώνα.

Αποτέλεσμα είναι οι μικρές διαφορές στη θερμοκρασία του αέρα χειμώνα – καλοκαιριού και μέρας – νύχτας σε περιοχές κοντά σε υγρό στοιχείο.

ε. Απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα

Ένα μέρος διοξειδίου του άνθρακα δεσμεύεται στην ατμόσφαιρα και έτσι ρυθμίζει το κλίμα. Οι υδάτινες μάζες μπορούν να απορροφήσουν μεγάλη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Οι υδρόβιοι αυτότροφοι οργανισμοί και τα ιζήματα δεσμεύουν ένα μέρος της ποσότητας αυτής.

ζ. Δέσμευση ηλιακής ακτινοβολίας και στήριξη τροφικών πλεγμάτων

Οι αυτότροφοι φυτικοί οργανισμοί που ζουν στους υγρότοπους, όπως μικροσκοπικά φύκη (φυτοπλαγκτόν), αλλά και τα ανώτερα φυτά αποτελούν τους παραγωγούς του οικοσυστήματος. Η καθαρή πρωτογενής παραγωγικότητα είναι η βάση της δευτερογενούς παραγωγικότητας του οικοσυστήματος σε ετερότροφους οργανισμούς (καταναλωτές). Η απ' ευθείας κατανάλωση των φυκών και των φυτών, αλλά και η παροχή στους καταναλωτές οργανισμούς εκτός από τροφή, ενδιαειήματα για αναπαραγωγή, φώλιασμα, ξεκούραση και προστασία από αντίξοες συνθήκες. Τα τροφικά πλέγματα που στηρίζουν τους υγροτόπους είναι πολύπλοκα και πολλές φορές έχει κάποια ενεργειακή διασύνδεση με άλλα υγροτοπικά οικοσυστήματα, όπως για παράδειγμα τα μεταναστευτικά πουλιά που συνδέουν τα τροφικά πλέγματα υγροτόπων που απέχουν μεταξύ τους χιλιάδες χιλιόμετρα.

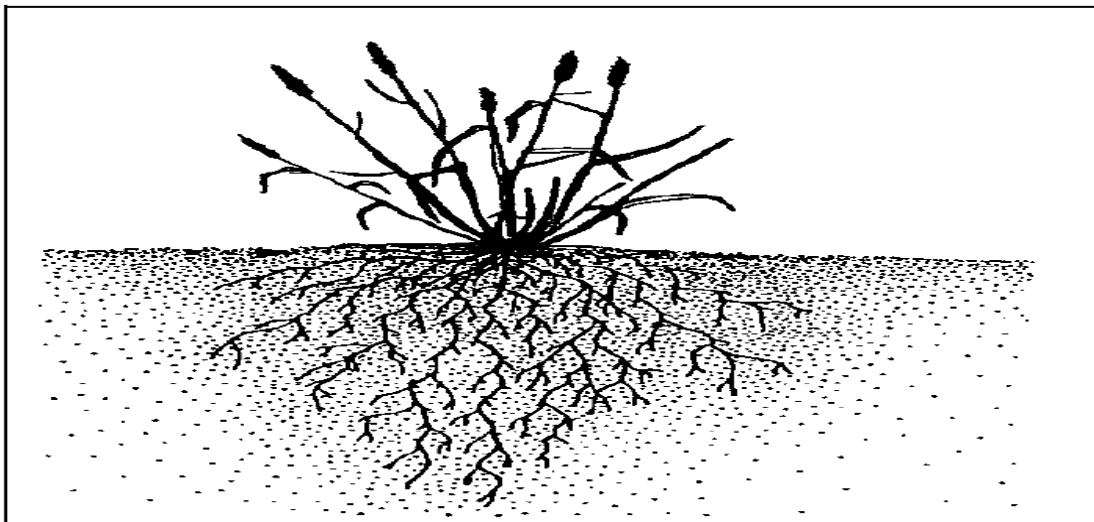
Στην παρούσα διπλωματική μελετήσαμε υγροβιότοπους που περιείχαν αλόφυτα του γένους *Juncus acutus* ώστε να γίνει επεξεργασία των λυμάτων σε περιβάλλον υψηλής αλατότητας. Αξιόλογες ανάλογες εργασίες περιλαμβάνουν την πτυχιακή εργασία της Καλλιόπης Καλογιαννάκη με τίτλο ‘‘Επεργασία υγρών αποβλήτων με μικροάλγη’’, τη διατριβή της Δανηιλίδου Ελένης ‘‘Πειραματική καλλιέργεια φυτών με στόχο εφαρμογές για την προστασία του περιβάλλοντος’’ και το paper με τίτλο ‘‘ Tidal salt marsh sediment in California, USA. Part 1: Occurrence and sources of organic contaminants’’ [Hwang, Green, Young, 2006].

Στο συγκεκριμένο paper έγινε λήψη και ανάλυση δειγμάτων απο διάφορους υγροβιότοπους ώστε να βρεθεί η ποσότητα οργανικών ρύπων και να διερευνηθεί η σχέση τους με την χρήση γης, και της κατανομής τους στις περιοχές αυτές.

1. ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΚΑΙ ΑΛΟΦΥΤΑ

1.1 Ριζόσφαιρα

Η ριζόσφαιρα [Εικόνα 1.1] (η περιοχή γύρω από το ριζικό σύστημα των φυτών), επηρεάζεται άμεσα από τις εκκρίσεις των διαφόρων ουσιών του ριζικού συστήματος και στην οποία παρατηρείται έντονη μικροβιακή δραστηριότητα [Walton et al, 1994]. Στη ριζόσφαιρα απαντώνται βακτήρια, μύκητες και πρωτόζωα, τα οποία λαμβάνουν τις απαραίτητες για την ανάπτυξη τους θρεπτικές ουρίες από τις εκκρίσεις των ριζών. Με την σειρά τους, οι μικροοργανισμοί βοηθούν τα φυτά μεταβάλλοντας το pH και επεκτείνοντας την ενεργό ζώνη απορρόφησης των θρεπτικών ουσιών από τις ρίζες [Δανηλίδου, 2010].



Εικόνα 1.1. Η ριζόσφαιρα των φυτών, περιοχή έντονης μικροβιακής δραστηριότητας (πηγή: Walton et al., 1994)

Γενικά, η ανάπτυξη των μικροοργανισμών στη περιοχή της ριζόσφαιρας οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυτικές ρίζες εκκρίνουν διάφορες ουσίες στο έδαφος. Μεταξύ των ουσιών αυτών συγκαταλέγονται σάκχαρα, αμινοξέα, οργανικά οξέα, τα οποία χρησιμοποιούνται από τους μικροοργανισμούς για την ανάπτυξη τους [Brix, 1997].

Ο μικροβιακός πληθυσμός της ριζόσφαιρας διαφέρει από τον αντίστοιχο πληθυσμό που αναπτύσσεται μακριά από αυτήν. Οι διαφορές είναι τόσο ποιοτικές (είδος μικροοργανισμού), όσο και ποσοτικές (πυκνότητα του πληθυσμού). Έχει βρεθεί ότι η πυκνότητα και η ποιοτική σύνθεση του μικροβιακού πληθυσμού της ριζόσφαιρας ποικίλει ανάλογα με το είδος του φυτού και τις εδαφικές συνθήκες [Walton et al, 1994].

1.2 Βλαστός και Φύλλα

Ο βλαστός του φυτού λειτουργεί ως βάση στήριξης των φύλλων, των λουλουδιών και των καρπών του φυτού. Η ανάπτυξη του συνήθως είναι τέτοια ώστε να διευκολύνει το φυτό στη συλλογή ηλιακής ενέργειας αλλά και στην ευκολότερη ανταλλαγή αερίων από τα στομάτια με την ατμόσφαιρα.

Τα φύλλα είναι τα κύρια όργανα της φωτοσύνθεσης και της σύνθεσης οργανικών ουσιών από ανόργανα στοιχεία. Όμως, βοηθούν και σε μια ακόμη λειτουργία του φυτού, την διαπνοή, δηλαδή την διαχείριση και την εξοικονόμηση του νερού μέσα στο φυτό.

Η εσωτερική κατασκευή των φύλλων διαφέρει από οικογένεια σε οικογένεια, αλλά και μεταξύ ειδών. Γενικά, η επιδερμίδα αποτελείται από τα επιδερμικά κύτταρα, τα καταφρακτικά και παραφρακτικά κύτταρα των στοματίων και διάφορα τριχώματα. Τα στομάτια αποτελούν πόρους οι οποίοι σχηματίζονται μεταξύ δύο εξειδικευμένων κυττάρων, των καταφρακτικών και παραφρακτιών κυττάρων.

Η σημαντικότερη ανατομική ιδιομορφία τους είναι η χαρακτηριστική ανομοιόμορφη πάχυνση των τοιχωμάτων τους, ενώ η σημαντικότερη φυσιολογική διαφορά από τα υπόλοιπα επιδερμικά κύτταρα είναι η ύπαρξη χλωροπλαστών [Δανιηλίδου, 2010].

1.3 Αλόφυτα

Τα αλόφυτα ή αλόφιλα είναι φυτά των οποίων η ανάπτυξη δεν παρεμποδίζεται αλλά αντίθετα ευνοείται κάτω από συνθήκες υψηλής εδαφικής αλατότητας. Είναι επομένως κατάλληλα για παραθαλάσσιους κήπους και πάρκα, για δενδροστοιχίες κοντά στη θάλασσα και για φυτεύσεις σε εδάφη τα οποία αρδεύονται με νερό υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα. Κατά κανόνα, τα προβλήματα αλατότητας οφείλονται σε αυξημένες συγκεντρώσεις χλωριούχου νατρίου (NaCl) στο νερό άρδευσης και στο έδαφος. Σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις όμως, προβλήματα μπορούν να δημιουργήσουν και τα θειικά και ανθρακικά άλατα του ασβεστίου. Τα αλόφυτα διαθέτουν εξειδικευμένους μηχανισμούς, οι οποίοι επιτρέπουν στους φυτικούς ιστούς τους να συσσωρεύουν άλατα σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις χωρίς να προκαλούνται συμπτώματα τοξικότητας και χωρίς να μειώνεται ο ρυθμός αύξησης τους. Λόγω αυτής της ικανότητας τους, τα αλόφυτα προσλαμβάνουν άλατα από το περιβάλλον των ριζών τους και τα χρησιμοποιούν για να αυξήσουν το ωσμωτικό δυναμικό των φύλλων τους σε τιμές υψηλότερες από το ωσμωτικό δυναμικό του εδαφικού νερού. Με τον τρόπο αυτόν τα αλόφυτα μπορούν να προσλαμβάνουν νερό από το περιβάλλον των ριζών απρόσκοπτα, παρά το υψηλό ωσμωτικό δυναμικό του εδαφικού νερού.

Τα γνήσια αλόφυτα, δηλαδή τα φυτά που αναπτύσσονται μόνο σε αλατούχα εδάφη ανήκουν κυρίως στις οικογένειες Aizoaceae, Caryophyllaceae, Frankeniaceae, Gramineae, Juncaceae, Plumbaginaceae, Portulacaceae, Rhizophoraceae, Tamaricaceae και Zygophyllaceae. Ορισμένα αλόφυτα προτιμούν ξηρά αλατούχα εδάφη και ονομάζονται ξηροαλόφυτα (π.χ. *Atriplex confertifolia*), ενώ άλλα προτιμούν υγρά εδάφη με υφάλμυρο νερό (π.χ. *Suaeda* sp.). Αλόφυτα θεωρούνται η αμιλιά (*Atriplex halimus*), το αλμυρίκι (*Tamarix* sp.), το Βούρλο (*Juncus acutus*), ο ελαίαγνος (*Elaeagnus angustifolia*), η στατική (*Statice* sp.), το λιμόνιο (*Limonium* sp.) κ. α. [Van Oosten, Maggio, 2015]

1.4 Βούρλα (Juncus acutus)

Το φυτό βούρλο, του οποίου η επιστημονική ονομασία είναι *Juncus acutus*, ανήκει στην οικογένεια Juncaceae, στην οποία ανήκουν 400 περίπου είδη ταξινομημένα σε 8 γένη (*Andesia*, *Distichia*, *Juncus*, *Lisula*, *Marsippospermum*, *Oxychloe*, *Prionium*, *Rostkovia*).

Η οικογένεια αυτή εξαπλώνεται κυρίως στις εύκρατες και τις ψυχρές έως πολύ ψυχρές κλιματικές ζώνες και μόνο σε μεγάλα υψόμετρα ορισμένων βουνών της τροπικής ζώνης. Τα βούρλα συγκαταλέγονται στο γένος *Juncus* αυτής της οικογένειας, η πλειονότητα των οποίων απαρτίζεται από μια πυκνή ομάδα ανθοφόρων στελεχών, χωρίς γόνατα και φύλλα, τα οποία μερικές φορές ξεπερνούν και το ύψος του ενός μέτρου. Το βούρλο (εικόνα 1.4) ευδοκimeί σε αλμυρά έλη και συμβάλλει στη μείωση της διάβρωσης του εδάφους. Ακόμα, διακρίνεται για την ανθεκτικότητα του στις περιβαλλοντικές πιέσεις, όπως αλατότητα, ξηρασία, υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες και μπορεί να αναπτυχθεί σε ρυπασμένες περιοχές. [Brown, Brooks, 2002]



Εικόνα 1.4. Βούρλο (*Juncus acutus*) (πηγή: <http://nathistoc.bio.uci.edu>)

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

Αν και ο όρος φυτοεξυγίανση είναι σχετικά πρόσφατος μια πρόδρομη εφαρμογή της μεθόδου φαίνεται να είχε γίνει πριν από αρκετούς αιώνες στην Γερμανία στις αρχές του 17ου αιώνα στο πρώτο σύστημα επεξεργασίας αστικών λυμάτων βασισμένο στη χρήση φυτών [Hartman, 1975].

Στις μέρες μας η εξυγίανση ρυπασμένων εδαφών με τη χρήση φυτών δεν έχει μελετηθεί επαρκώς τόσο σε εργαστηριακά πειράματα όσο και σε πειράματα πεδίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους [Salt et al., 1998]:

1. Δεν έχουν θεσπιστεί κρίσιμες συγκεντρώσεις τοξικότητας των διαφόρων ρυπαντών για το έδαφος από τους περιβαλλοντικούς οργανισμούς, σε αντίθεση με το νερό.
2. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει το εδαφικό σύστημα και των εξαιρετικά δύσκολων αναλυτικών τεχνικών που απαιτούνται.

2.1 Σχεδιασμός συστημάτων φυτοεξυγίανσης

Οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να προσδιοριστούν κατά την εφαρμογή της φυτοεξυγίανσης σε ένα πεδίο είναι οι εξής [Χατάς, 2013]:

2.1.1 Είδος φυτού

Η επιλογή του κατάλληλου φυτού για την αποκατάσταση ενός ρυπασμένου πεδίου είναι το πιο καθοριστικό βήμα για την επιτυχία της όλης διεργασίας της φυτοεξυγίανσης. Ο προσδιορισμός του βασίζεται στις παρακάτω παραμέτρους:

- α) Την συμβατότητα του επιλεχθέντος φυτού με το προς εξυγίανση πεδίο (γενικά προτιμάται η χρήση τοπικών φυτών με στόχο την όσο το δυνατόν ελάχιστη διατάραξη του φυσικού οικοσυστήματος της περιοχής)
- β) Τα χαρακτηριστικά του επιλεχθέντος φυτού (αν πρόκειται για υπερ-συσσωρευτή θα παρουσιάζει μικρούς ρυθμούς ανάπτυξης και θα έχει μικρό μέγεθος, ενώ αν πρόκειται για απλό φυτό θα έχει μικρότερη δυνατότητα συσσώρευσης ρύπων-μετάλλων)
- γ) Τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της υφιστάμενης ρύπανσης (αν πρόκειται για σχετικά βαθύ ρυπασμένο έδαφος απαιτείται η χρήση φυτών με μεγάλες ρίζες, ενώ σε αντίθετη περίπτωση είναι δυνατή η χρήση φυτών με μικρές ρίζες).

2.1.2 Απαιτούμενη λίπανση

Όπως κάθε είδους καλλιέργεια, έτσι και στην περίπτωση της φυτοεξυγίανσης τα χρησιμοποιούμενα φυτά θα πρέπει να φροντίζονται κατάλληλα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ανάπτυξη και συντήρηση τους. Η παροχή βασικών θρεπτικών στοιχείων, όπως αζώτου και φωσφόρου, θεωρείται μεν αναγκαία αλλά παράλληλα θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά, καθώς όπως έχει αποδειχθεί η παρουσία αυτών των στοιχείων μπορεί να επηρεάσει τη δυνατότητα εξυγίανσης του πεδίου από τα φυτά, μεταβάλλοντας τα χημικά χαρακτηριστικά του εδάφους (π.χ. το pH και κατ' επέκταση τη διαλυτότητα των μετάλλων στο έδαφος κ.α.).

2.1.3 Πυκνότητα φύτευσης

Η πυκνότητα με την οποία θα φυτευτούν τα επιλεγθέντα φυτά στο προς εξυγίανση πεδίο παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο στην απόδοση της φυτοεξυγίανσης, επηρεάζοντας την απομάκρυνση του εκάστοτε ρύπου ανά φυτό και ανά στρέμμα. Γενικά, έχει αποδειχθεί ότι μεγάλη πυκνότητα φυτών ελαχιστοποιεί την πρόσληψη ρύπου ανά φυτό και μεγιστοποιεί την απομάκρυνση ρύπου ανά στρέμμα. Φυσικά, η πυκνότητα των χρησιμοποιούμενων φυτών επηρεάζει και άλλες εξίσου σημαντικές παραμέτρους, όπως τη δυνατότητα πρόσληψης θρεπτικών συστατικών από τα φυτά, την ανάπτυξη των ριζών τους και γενικότερα την επιβίωση τους, καθιστώντας αναγκαία τη λεπτομερή μελέτη της τελικής χωροθέτησης τους.

2.1.4 Απαιτούμενη άρδευση και συντήρηση

Η αναγκαία ποσότητα νερού για την ανάπτυξη και τη διαβίωση των επιλεγμένων φυτών ενός συστήματος φυτοεξυγίανσης πρέπει να προσδιοριστεί με πολύ προσοχή, καθώς παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην απόδοση του. Το παρεχόμενο νερό πρέπει να είναι αρκετό για να διατηρεί την αναγκαία υγρασία του εδάφους και να αναπληρώνει τις απώλειες νερού, λόγω εξάτμισης και αναπνοής των φυτών.

Σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί σημαντικός περιορισμός τη ανάπτυξης των ριζών και της απομάκρυνσης των εδαφικών ρύπων, καθώς επίσης και αύξηση του συνολικού κόστους.

Όσον αφορά τη συντήρηση των χρησιμοποιούμενων φυτών αυτή περιλαμβάνει κυρίως την προστασία τους από ζιζάνια ή άλλα φυτά (αγριόχορτα) που είναι δυνατόν να περιορίσουν την ανάπτυξη τους και την απόδοση τους ως προς την απομάκρυνση των υφιστάμενων εδαφικών ρύπων.

2.1.5 Ανάγκη εναλλαγής καλλιεργειών

Όπως έχει αποδειχθεί από την επιστήμη της γεωπονίας, η καλλιέργεια ενός συγκεκριμένου είδους φυτού στο ίδιο πεδίο επί μεγάλο χρονικό διάστημα σταδιακά καθίσταται αναποτελεσματική, λόγω της εξάπλωσης των υφιστάμενων ζιζανίων και αγριόχορτων, τα οποία αποκτούν «ανοσία» στις χρησιμοποιούμενες ουσίες καταπολέμησης τους, καθώς επίσης και λόγω της σημαντικής τους μείωσης των απαιτούμενων για την ανάπτυξη των φυτών συστατικών του εδάφους.

Κατ' αντιστοιχία, στην περίπτωση εφαρμογής της φυτοεξυγίανσης (η οποία έχει αποδειχθεί να απαιτεί διαστήματα εξυγίανσης μεγαλύτερα από 2-3 χρόνια) κρίνεται αναγκαία η χρήση διαφορετικών ειδών φυτών ανά χρονιά, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η συνολική απόδοση της τεχνολογίας.

2.1.6 Διαχείριση παραγόμενων «αποβλήτων»

Τα παραγόμενα απόβλητα της τεχνολογίας της φυτοεξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών είναι τα ίδια τα φυτά, τα οποία έχουν δεσμεύσει μέσα τους μεγάλες ποσότητες ρύπων. Η ανάγκη συλλογής και ειδικής επεξεργασίας τους θεωρείται αδιαμφισβήτητη.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, εξετάζονται διάφορες τεχνολογίες επεξεργασίας και διάθεσης, μεταξύ των οποίων είναι η αποτέφρωση, η διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής επικινδύνων αποβλήτων ή ακόμη και η κατάλληλη επεξεργασία με στόχο την ανάκτηση των περιεχόμενων μετάλλων.

2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της Φυτοεξυγίανσης

Τα συστήματα φυτοεξυγίανσης παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα όπως και μειονεκτήματα σχετικά με την εφαρμογή τους. Μερικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι: [Alexander, 1994, Ewais, Ergas, Chang, Schroeder, 1998]

- Ότι παράγονται λιγότερα δευτερογενή απόβλητα από ότι σε άλλες τεχνολογίες,
- Η φυτοεξυγίανση εφαρμόζεται επί τόπου (in situ) και δεν είναι αναγκαία μία εκσκαφή ή άντληση για περαιτέρω επεξεργασία. Για αυτό το λόγο δε διαταράσσεται καθόλου το φυσικό τοπίο της μολυσμένης περιοχής,
- Είναι οικονομική επεξεργασία ιδιαίτερα για μεγάλους όγκους χώματος ή νερού, που είναι μολυσμένα με μικρές ποσότητες τοξικών ρυπαντών,
- Επιτυγχάνεται η συγκέντρωση των τοξικών ουσιών σε πολύ μικρούς όγκους,
- Μπορεί να παρουσιάσει σχετικά γρήγορους χρόνους αποκατάστασης, ανάλογα πάντα με το είδος και την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων φυτών, το είδος και τον αριθμό των υφιστάμενων ρύπων, καθώς επίσης και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους,
- Είναι αποτελεσματική στην αντιμετώπιση μεγάλης ποικιλίας ρύπων,
- Αποτρέπει την εξάπλωση των υφιστάμενων ρύπων, προστατεύοντας παράλληλα το έδαφος από τον άνεμο, τη βροχή και γενικότερα την διάβρωση.

Παρόλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου συναντάμε και κάποια μειονεκτήματα όπως: [Alexander, 1994, Ewais, Ergas, Chang, Schroeder, 1998]

- τους ιδιαίτερα αργούς ρυθμούς φυτοεξυγίανσης. Πιο συγκεκριμένα την ανάγκη καλλιέργειας πολλών διαφορετικών ειδών για την αντιμετώπιση των ρύπων και η συνεχόμενες περιόδους καλλιέργειας των φυτών μέχρι να εξυγιανθεί τελείως το περιβάλλον από τους ρυπαντές,
- αποτελέσματα φέρνει, όταν το βάθος της μόλυνσης δε ξεπερνά το 1m στο έδαφος και τα 3m στον υδροφόρο ορίζοντα,
- Μετάδοση τοξικών ουσιών στην τροφική αλυσίδα μετά από πιθανή βοσκή των φυτών από ζώα,
- Οι κλιματικές ή οι υδρολογικές συνθήκες στην μολυσμένη περιοχή μπορεί να μην επιτρέπουν την καλλιέργεια και ανάπτυξη των κατάλληλων για την φυτοεξυγίανση φυτών,
- Πρόβλημα εναπόθεσης των ρυπασμένων φυτών μετά τη συγκομιδή τους,
- Υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων στο έδαφος μπορεί να έχουν τοξική επίδραση στα χρησιμοποιούμενα φυτά, καθιστώντας αδύνατη την εφαρμογή της τεχνολογίας,
- Το κόστος της μπορεί να αυξηθεί, λόγω της ανάγκης ειδικής επεξεργασίας και διάθεσης των χρησιμοποιούμενων φυτών,
- Δεν είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση προσροφημένων στα εδαφικά σωματίδια ρύπων,
- Είναι δυνατόν να προκαλέσει μεταφορά ρύπων από το ένα περιβαλλοντικό μέσο στο άλλο (π.χ. από το έδαφος στον αέρα).

3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Όσον αφορά στην ιστορική ανάπτυξη των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι Μινωίτες υδραυλικοί γνώριζαν βασικές αρχές της υδραυλικής και υγειονομικής μηχανικής κατασκευάζοντας εγκαταστάσεις αποχέτευσης στα Μινωικά Παλάτια (3000 έως 1100 π.Χ.) με υψηλά κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Επίσης, διατυπώνεται η άποψη ότι κατά το Μινωικό πολιτισμό γινόταν

εφαρμογή υγρών αποβλήτων στο έδαφος με σκοπό την άρδευση και την επεξεργασία τους. Ουσιαστικά, η εφαρμογή φυσικών συστημάτων επεξεργασίας στις ΗΠΑ και άλλες χώρες χρονολογείται από τη δεκαετία του 1870. Όπως στην Ευρώπη, έτσι και στις ΗΠΑ και άλλες περιοχές η «γεωργία με λύματα» (sewage farming) έγινε γνωστή ως μια πρώτη προσπάθεια ελέγχου της υδατικής ρύπανσης. Στο πρώτο μισό του εικοστού αιώνα, αυτά τα συστήματα αντικαταστάθηκαν είτε με επιτόπια συστήματα επεξεργασίας είτε με:

- α) εφαρμογή σε ειδικές γεωργικές εκμεταλλεύσεις (φάρμες), όπου οι επεξεργασμένες εκροές χρησιμοποιούνταν για φυτική παραγωγή,
- β) συστήματα άρδευσης διαφόρων περιβαλλόντων και κοινόχρηστων χώρων
- και γ) εγκαταστάσεις εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων.

Αυτά τα σχετικά νέα συστήματα επεξεργασίας τείνουν να επικρατήσουν κυρίως στις δυτικές και νότιες πολιτείες των ΗΠΑ, όπου η αξία του νερού των υγρών αποβλήτων αποτελούσε ένα πρόσθετο πλεονέκτημα. Με την ψήφιση νομοθεσίας στις ΗΠΑ που αφορά στο καθαρό νερό στις αρχές της δεκαετίας του 1970 το ενδιαφέρον για τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, που βασίζονται στο έδαφος, έχει αναθεωρηθεί σημαντικά, ως αποτέλεσμα της έμφασης που δίνεται στην επαναχρησιμοποίηση του νερού, της ανακύκλωσης του νερού, των θρεπτικών στοιχείων και τη χρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων για την άρδευση φυτικών καλλιεργειών.

Συγχρόνως, άρχισε να παρέχεται νομοθετικά οικονομική υποστήριξη για έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογίας στα αντικείμενα των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας. Αυτό οδήγησε στην ισότιμη αναγνώρισή της, ως τεχνικής διαχείρισης στον τομέα μηχανικής υγρών αποβλήτων.

Στη χώρα μας στην αρχή του 20ου αιώνα, μερικές πόλεις και βιομηχανίες άρχισαν να αναγνωρίζουν ότι η απόρριψη των λυμάτων άμεσα σε ρεύματα προκαλούσε εκτός από προβλήματα υγείας, την υποβάθμιση υδατικών πόρων και αυτό οδήγησε στην κατασκευή εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων. Στην ίδια χρονική περίοδο, η σηπτική δεξαμενή εισήχθη ως μέσο διαχείρισης των οικιακών λυμάτων από τις μεμονωμένες οικογένειες τόσο στις προαστιακές όσο και στις αγροτικές περιοχές. Εντούτοις, και λόγω των αρκετά μεγάλων κοινωνικών και οικονομικών προβλημάτων και της απουσίας δημόσιας αντίληψης στα περιβαλλοντικά ζητήματα, κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού του 20ού αιώνα, λίγοι δήμοι και βιομηχανίες προέβλεπαν επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

Οι πρώτες προσπάθειες να χρησιμοποιηθεί η βλάστηση υγροβιότοπων για την απομάκρυνση διάφορων ρύπων από το νερό διεξήχθησαν από τον Seidel στη Γερμανία στις αρχές του 1950. Ο πρώτος πλήρους κλίμακας ελεύθερης επιφάνειας (FWS, surface flow) τεχνητός υγροβιότοπος κατασκευάστηκε στην Ολλανδία για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων από τοποθεσία κατασκευ-νώσεων κατά τη διάρκεια της περιόδου 1967-1969. Εντός πολλών ετών, κατασκευάστηκαν περίπου 20 τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής στην Ολλανδία [Σωτηροπούλου, 2010].

Εντούτοις, οι υγροβιότοποι επιφανειακής ροής δε διαδόθηκαν σε ολόκληρη την Ευρώπη, αλλά αυτοί με οριζόντια υπόγεια ροή έγιναν ο κύριος τύπος τεχνητών υγροβιότοπων στην Ευρώπη. Ο πρώτος πλήρους κλίμακας οριζόντιας υπόγειας ροής τεχνητός υγροβιότοπος κατασκευάστηκε το 1974 στο Othfresen στη Γερμανία.

Οι πρώτοι τεχνητοί υδροβιότοποι οριζόντιας ροής στη Γερμανία και τη Δανία χρησιμοποίησαν επικρατέστερα βαρέα εδάφη, συχνά με υψηλό περιεχόμενο αργίλου.

Αυτά τα συστήματα έχουν πολύ υψηλή αποτελεσματικότητα επεξεργασίας, αλλά λόγω της χαμηλής υδραυλικής διαπερατότητας, συμβαίνουν εμφράξεις σε σύντομο χρονικό διάστημα και τα συστήματα μοιάζουν περισσότερο ή λιγότερο με συστήματα ελεύθερης επιφάνειας.

Στο τέλος της δεκαετίας του 1980 στο Ηνωμένο Βασίλειο, το έδαφος αντικαταστάθηκε με χοντρά υλικά (χαλίκι που είχε υποστεί απόπλυση) και αυτή η δομή θεωρείται επιτυχημένη από τότε. Τη δεκαετία του 1980, η τεχνολογία επεξεργασίας τεχνητών υδροβιότοπων ταχύτατα διαδόθηκε σε όλο τον κόσμο. Τη δεκαετία του 1990, η αυξανόμενη απαίτηση για απομάκρυνση θρεπτικών από υγρά απόβλητα οδήγησαν σε μεγαλύτερη χρήση κατακόρυφης ροής τεχνητών υδροβιότοπων που εξασφαλίζουν μεγαλύτερο βαθμό οξυγόνωσης της κλίνης φίλτρανσης και απορρέουσα απομάκρυνση αμμωνίας μέσω νιτροποίησης.

Στα τέλη του 1990, η ανικανότητα να παρουσιάζεται ταυτόχρονα νιτροποίηση και απονιτροποίηση σε ένα απλό οριζόντιας ή κατακόρυφης ροής τεχνητό υδροβιότοπο και κατά συνέπεια η ελλιπής απομάκρυνση ολικού αζώτου οδήγησε στην χρήση υβριδικών συστημάτων που συνδυάζουν διάφορους τύπους τεχνητών υδροβιότοπων. Η γενική ιδέα του συνδυασμού διαφόρων τύπων κλινών φίλτρανσης στην πραγματικότητα προτάθηκε από το Seidel στη Γερμανία τη δεκαετία του 1960, μόνο ελάχιστα πλήρους κλίμακας συστήματα κατασκευάσθηκαν (π.χ. Saint Bohaire στη Γαλλία ή Oaklands Park στο Ηνωμένο Βασίλειο) τη δεκαετία του 1980 και στις αρχές του 1990. Στις μέρες μας, υβριδικοί τεχνητοί υδροβιότοποι συνήθως χρησιμοποιούνται σε ολόκληρη την Ευρώπη, όπως και σε άλλα μέρη του κόσμου. Η κύρια δομή που εμφανίζεται είναι συνδυασμός κατακόρυφης– οριζόντιας ροής (VF– HF). Επίσης χρησιμοποιείται ο συνδυασμός οριζόντιας – κατακόρυφης ροής (HF–VF), ενώ και οι ελεύθερης επιφάνειας τεχνητοί υδροβιότοποι χρησιμοποιούνται σε υβριδικά συστήματα.

Τις δεκαετίες του 1970 και 1980, οι τεχνητοί υδροβιότοποι κατασκευάζονταν σχεδόν αποκλειστικά για την επεξεργασία οικιακών ή δημοτικών αποβλήτων. Από τη δεκαετία του 1990, χρησιμοποιούνται για όλα τα είδη υγρών αποβλήτων που περιλαμβάνουν στραγγίσματα εδαφικών εκτάσεων, απορροές (π.χ. αστικές, από δρόμους και αγροτικές), τροφικές διαδικασίες (π.χ. οινοποίηση, παραγωγή τυριού και γάλακτος), βιομηχανικά (π.χ. χημικά, εργοστάσια χαρτοποίησης και διυλιστήρια πετρελαίου), αγροκτήματα, αποστραγγίσεις ορυχείων ή αφυδάτωση ιλύος. Ο κύριος στόχος της επεξεργασίας ρυπασμένων υδάτων είναι γενικά να επιτραπεί η απόρριψη των δημοτικών, βιομηχανικών, αγροτικών αποβλήτων χωρίς τον κίνδυνο στην ανθρώπινη υγεία ή κάποια अपαράδεκτη βλάβη και υποβάθμιση στο περιβάλλον. Η διαχείριση των ρυπασμένων υδάτων και μέσω της επεξεργασίας και μέσω της επαναχρησιμοποίησης, είναι μια προϋπόθεση για την προστασία και βιώσιμη χρήση των υδατικών πόρων. Εάν οι μικρές κοινωνίες πρόκειται να καλύψουν τις απαιτήσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων του μέλλοντος, πρέπει να έχουν τα συστήματα επεξεργασίας που είναι όχι μόνο αποτελεσματικά και αξιόπιστα, αλλά και απλά και ανέξοδα, όσον αφορά στην κατασκευή και στη λειτουργία τους [www.wastreat.gr].

4. ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

4.1 Ορισμός

Φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ονομάζονται αυτά, που η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου διενεργείται με φυσικά μέσα και διεργασίες δηλαδή με την αλληλεπίδραση του νερού, του εδάφους, της ατμόσφαιρας, των φυτικών και ζωικών οργανισμών.

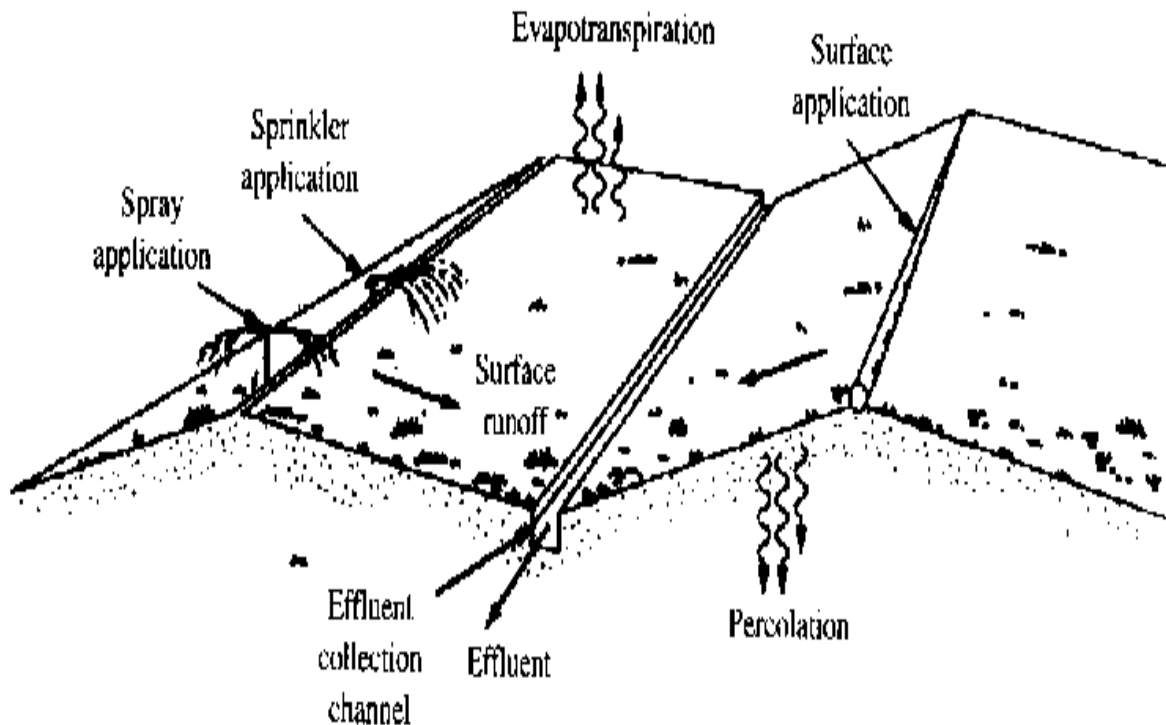
4.2 Κατηγορίες φυσικών συστημάτων

Τα φυσικά συστήματα κατατάσσονται σε πέντε βασικές κατηγορίες:

A) Τα *συστήματα των σηπτικών δεξαμενών ή βόθρων ή επιτόπια συστήματα* (septic tanks or on site systems). Τα συστήματα αυτά είναι τα πλέον διαδεδομένα για αραιοκατοικημένους μικρούς ή μεγαλύτερους οικισμούς, καθώς και για παραθεριστικές κατοικίες, όταν υπάρχει ικανοποιητικός κατάλληλος χώρος στο οικόπεδο κάθε κατοικίας. Σήμερα για λόγους μεγαλύτερης προστασίας των υπόγειων νερών, τα συστήματα αυτά έχουν αντικατασταθεί από στεγανούς βόθρους και εφαρμόζονται, για πολύ μικρές παροχές λυμάτων. Η μελέτη και κατασκευή τους γίνεται με βάση τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό και τις τοπικές συνθήκες, που αφορούν κυρίως τη διαπερατότητα των εδαφών [Αμπαδίνη, 2009].

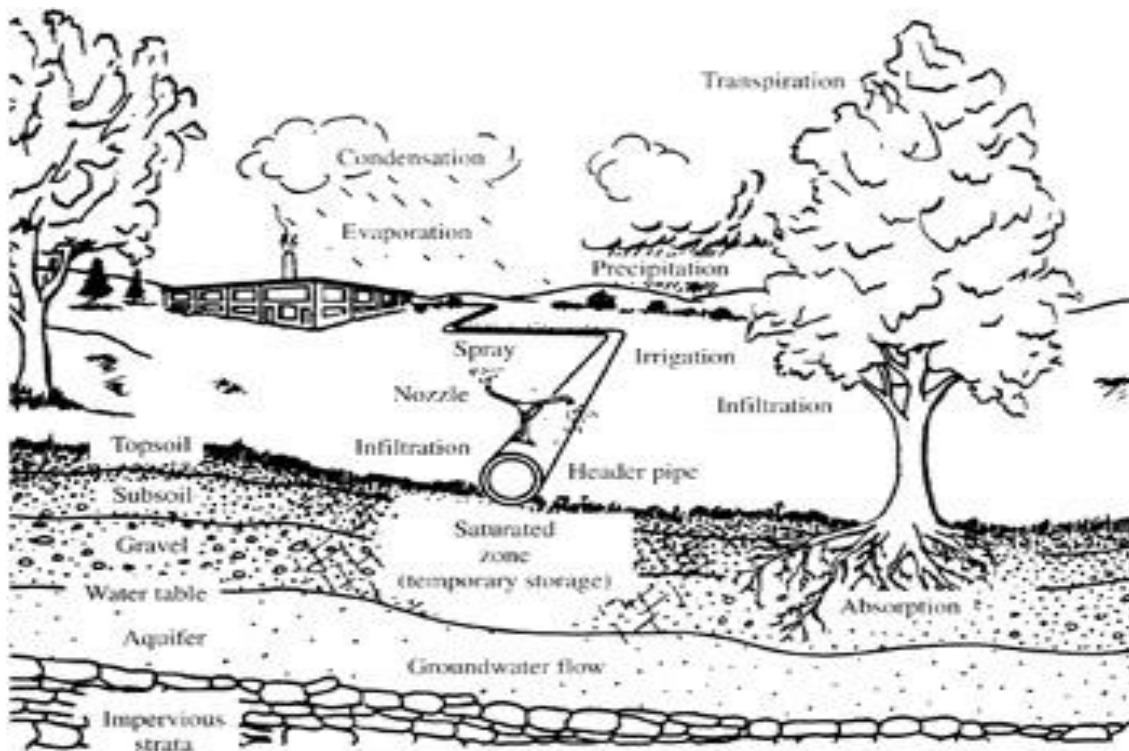
Β) Τα *εδαφικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων* (Land treatment wastewater systems). Στα συστήματα αυτά τα λύματα, μετά την προεπεξεργασία τους, εφαρμόζονται στην επιφάνεια του εδάφους. Στη συνέχεια επιτυγχάνεται περαιτέρω επεξεργασία με τις διάφορες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον έδαφος ή υδροφορέας - ατμόσφαιρα - λύματα. Τα συστήματα αυτά διακρίνονται στους εξής επιμέρους τύπους:

1) Στα συστήματα *βραδείας διήθησης ή εφαρμογής* (Slow Rate Systems – S.R.S., Εικόνα 1)



Εικόνα 1. Σύστημα βραδείας εφαρμογής. (πηγή: Αμπαδίνη, 2009)

2) στα συστήματα επιφανειακής απορροής (Overland Flow Systems – O.F.S., Εικόνα. 2),



Εικόνα 2. Σύστημα επιφανειακής απορροής. (πηγή: Αμπαδίνη, 2009)

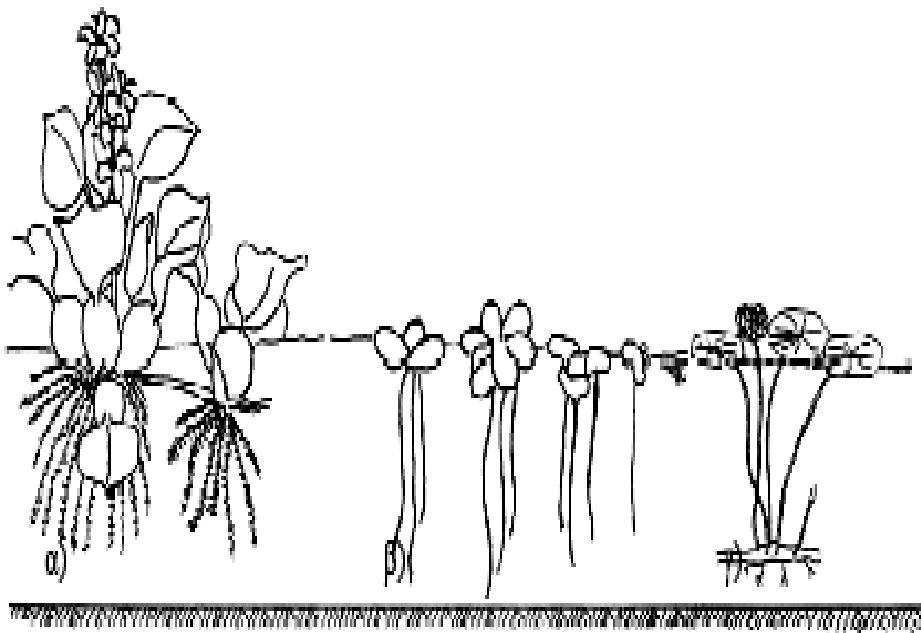
Γ) Τα **συστήματα δεξαμενών σταθεροποίησης** για την επεξεργασία λυμάτων (wastewater stabilization ponds systems – S.P.S.). Η επεξεργασία των λυμάτων στα συστήματα αυτά αποδίδεται στις διάφορες διεργασίες οι οποίες λαμβάνουν χώρα και οφείλονται στη μικροβιακή ζωή καθώς και στα κατώτερα φυτά και ζώα που αναπτύσσονται στο σύστημα. Τα συστήματα των δεξαμενών σταθεροποίησης απαιτούν, για την κατασκευή των διαφόρων επιμέρους έργων τους, μικρότερη έκταση από τα εδαφικά συστήματα και περιλαμβάνουν τους επιμέρους τύπους:

1. τις αερόβιες δεξαμενές (aerobic ponds),
2. τις επαμφοτερίζουσες δεξαμενές (facultative ponds),
3. τις μερικής ανάμειξης αεριζόμενες δεξαμενές (partial-mix aerated ponds), και

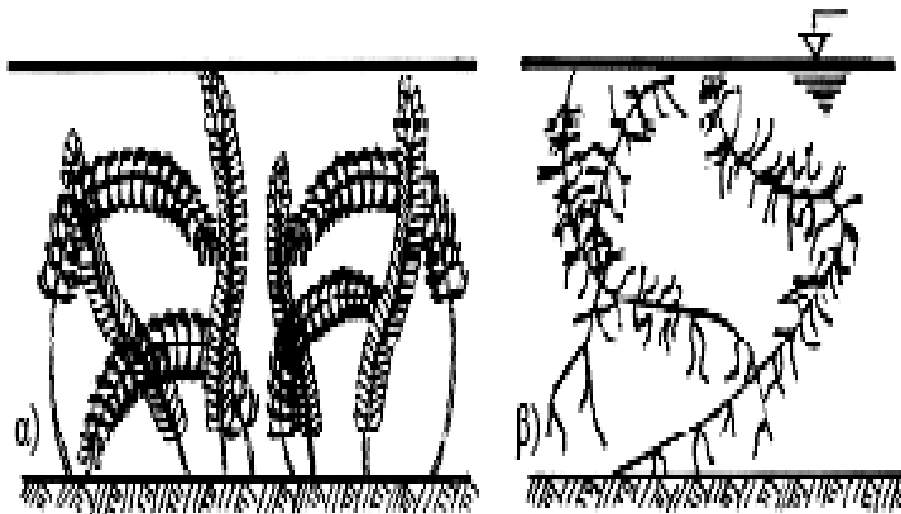
4. τις αναερόβιες δεξαμενές (anaerobic ponds). Οι δεξαμενές σταθεροποίησης χρησιμοποιούνται για ένα ευρύ φάσμα καιρικών συνθηκών, από μόνες τους ή σε συνδυασμό με άλλα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων [Αμπαδίνη, 2009].

Δ) Τα **συστήματα υδροχαρών φυτών** για την επεξεργασία λυμάτων (aquatic plants treatment systems – A.P.S.). Τα συστήματα αυτά είναι παρόμοια με τα συστήματα των δεξαμενών σταθεροποίησης, με τη διαφορά ότι στις δεξαμενές καλλιεργούνται υδροχαρή φυτά, για περαιτέρω επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Διακρίνονται σε δύο επιμέρους τύπους συστημάτων:

1. τα συστήματα με επιπλέοντα υδροχαρή φυτά (Εικόνα 3), και
2. τα συστήματα με βυθισμένα υδροχαρή φυτά (Εικόνα 4)



Εικόνα 3. Επιπλέοντα υδροχαρή φυτά α)υδροχαρείς νάκινθοι, β)λέμνα, γ) νούφαρα (πηγή: Αμπαδίνη, 2009)



Εικόνα 4. Βυθισμένα υδροχαρή φυτά α)υδροφίλη β) άλγη,

Ε) Τα **συστήματα φυσικών και τεχνητών υγροβιότοπων**. Ως υγροβιότοποι ορίζονται περιοχές οι οποίες είτε πλημμυρίζουν από επιφανειακό νερό, είτε τα εδάφη τους βρίσκονται σε κατάσταση κορεσμού λόγω της υψηλής στάθμης του υπόγειου νερού, τόσο συχνά και με τέτοια διάρκεια, ώστε να έχουν χαρακτηριστικά εδάφη, να υποστηρίζουν βλάστηση που έχει προσαρμοσθεί σε υγρές συνθήκες και να λαμβάνουν χώρα σε αυτές τις περιοχές βιολογικές λειτουργίες και δραστηριότητες προσαρμοσμένες στο υγρό περιβάλλον [Εικόνα 5].

Θεωρούνται μεταξύ των σπουδαιότερων οικοσυστημάτων του πλανήτη, καθώς παρέχουν το περιβάλλον διαβίωσης για μια μεγάλη ποικιλία ειδών πανίδας και χλωρίδας, επιτρέπουν την πραγματοποίηση πολύτιμων διεργασιών των υδρολογικών και χημικών κύκλων με τελικό αποτέλεσμα τον καθαρισμό των ρυπασμένων υδάτων, συμβάλλουν στην αποτροπή πλημμύρων, στην προστασία των ακτογραμμών και στην επαναφόρτιση των υπόγειων υδροφορέων, παρουσιάζοντας σημαντική οικονομική αξία στην παραγωγή τροφής και ενέργειας [Prescott and Tsanis, 1997].

Οι υγροβιότοποι αποτελούν τμήματα του εδάφους κατακλυσμένα με νερό, συνήθως μικρού βάθους (μικρότερο των 0,6 m), στα οποία αναπτύσσονται διάφορα είδη φυτών, όπως: καλάμια, διάφορα είδη κύπερης, βούρλων, ψαθιού και αφράτου. Η φυτική βλάστηση προσφέρει το βασικό υπόστρωμα ανάπτυξης των βακτηριακών μεμβρανών, βοηθά στη διήθηση και την προσρόφηση συστατικών των αποβλήτων, μεταφέρει οξυγόνο στη μάζα του νερού και περιορίζει την ανάπτυξη αλγών με τον έλεγχο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Στην επεξεργασία των ρυπασμένων υδάτων έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο τεχνητοί, όσο και φυσικοί υγροβιότοποι.

Οι φυσικοί όμως υγροβιότοποι έχουν περιορισμένη χρήση που συνίσταται στην αποδοχή και/ ή περαιτέρω επεξεργασία εκροών δευτεροβάθμιας ή ακόμη προωθημένης επεξεργασίας [Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995].



Εικόνα 5: Φυσικός Υγροβιότοπος (πηγή: Ευαγγελίδης, Ο υγροβιότοπος Άγρα-Βρυττών-Νησίου)

4.3 Φυσικοί Υδροβιότοποι

Οι φυσικοί υδροβιότοποι θεωρούνται από τα πιο σημαντικά οικοσυστήματα του πλανήτη. Εντούτοις, η σπουδαιότητά τους δεν αναγνωρίστηκε παρά μόνο τα τελευταία χρόνια, ενώ παλαιότερα συχνά καταστρέφονταν με σκοπό την επέκταση αστικών και αγροτικών περιοχών. Έτσι, έχει χαθεί ένα μεγάλο μέρος τους, κάτι που επέφερε δραματικές επιπτώσεις και στην εξαιρετική ποικιλία πανίδας και χλωρίδας που αναπτύσσεται σε αυτούς [Τσιχριντζής, 2000].

Στις ΗΠΑ υπολογίζεται ότι έχει καταστραφεί το 35 έως το 50% των φυσικών υδροβιότοπων λόγω αποστράγγισης ή επιχωμάτωσης της επιφάνειας έκτασης που καταλάμβαναν. Τα τελευταία έτη, οι φυσικοί υδροβιότοποι προστατεύονται μέσω διεθνών συμβάσεων, όπως είναι η συνθήκη Ramsar [www.ramsar.org] και η διάσκεψη του Ρίο για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (Agenda 21)

[www.un.org], οι οποίες έχουν προσυπογραφεί από την

Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα. Έτσι, η οποιαδήποτε μετατροπή της υδρολογικής κατάστασης κάποιου φυσικού υδροβιότοπου είναι εξαιρετικά δύσκολο να λάβει χώρα [Τσιχριντζής 2000]. Οι περισσότεροι φυσικοί υδροβιότοποι είναι συστήματα επιφανειακής ροής που περιλαμβάνουν βαλτώδη βλάστηση (βασική βλάστηση βρύων, βλάστηση γρασιδιού και αναδυόμενα μικρόφυτα) [US.EPA, 2002]. Οι φυσικοί υδροβιότοποι μπορούν να θεωρηθούν ως υδατικοί αποδέκτες. Υπάρχουν σχετικά λίγα παραδείγματα φυσικών υδροβιότοπων για επεξεργασία ρυπασμένου ύδατος στις ΗΠΑ. Επειδή κάθε εκροή σε ένα φυσικό υδροβιότοπο πρέπει να ικανοποιεί τα όρια του Εθνικού Μολυσματικού Συστήματος Απαλλαγής Αποβολών (NPDES), αυτοί οι υδροβιότοποι χρησιμοποιούνται τυπικά για προχωρημένη επεξεργασία [US.EPA,2002].

Τροποποιήσεις σε υπάρχοντες υδροβιότοπους με σκοπό τη βελτίωση των συνθηκών επεξεργασίας πρέπει γενικά να αποφεύγονται, γιατί είναι πιθανόν να προξενήσουν προβλήματα στο οικοσύστημα [Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995].

Στην πλειονότητα των Πολιτειών των ΗΠΑ δε γίνεται διάκριση μεταξύ ενός υδροβιότοπου και των γειτονικών επιφανειακών νερών και παρουσιάζονται οι ίδιες απαιτήσεις και στα δύο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, από οικονομικής απόψεως δεν ευνοείται η χρησιμοποίηση φυσικών υδροβιότοπων στη διαδικασία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, αφού η βασική επεξεργασία πρέπει παρασχεθεί πριν την απόρριψη στον υδροβιότοπο [Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995].

Η χρήση φυσικών υδροβιότοπων για άμεση επεξεργασία λυμάτων επιπλέον δημιουργεί προβλήματα μηχανικής απόψεως, έχοντας επιπτώσεις στην απόδοση του συστήματος. Το υδραυλικό καθεστώς στους περισσότερους φυσικούς υδροβιότοπους έχει αναπτυχθεί για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μπορεί να είναι «υγρό».

Όμως λόγω της δημιουργίας καναλιών στη ροή, το μεγαλύτερο κομμάτι της ροής διαμέσου του υδροβιότοπου εμφανίζεται διαμέσου ενός σχετικά μικρού μέρους της συνολικής περιοχής. Στην ακραία περίπτωση, μόνο το 10% της επιφάνειας του υδροβιότοπου ίσως έλθει σε επαφή με τα λύματα που εισάγονται στον υδροβιότοπο, οπότε μόνο το 10% της συνολικής περιοχής μπορεί να θεωρηθεί ως αποτελεσματικό στην επεξεργασία. Θεωρείται απίθανο να διορθωθεί το πρόβλημα αυτό με ισοπέδωση του εδάφους ή κάποια άλλη δραστηριότητα του μηχανικού και να συνεχίζει να συντηρείται η αξία που είχε αρχικά ο φυσικός υδροβιότοπος [Βαρκάς, 2007].

4.4 Τεχνητοί Υδροβιότοποι

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, που βασίζεται στη χρησιμοποίηση φυτών που αναφύονται, όπως: νεροκάλαμα, βούρλα και ψαθί. Σε τέτοια συστήματα η εφαρμογή αποβλήτου λαμβάνει χώρα πάνω ή κάτω από την επιφάνεια του εδάφους [Reed et al.,1984].

Η δημιουργία και η απόδοση των υδροβιότοπων πρέπει να πραγματοποιείται μέσω οικολογικά υγιών τρόπων. Η δημιουργία υδροβιότοπου αναφέρεται στην κατασκευή του σε μια περιοχή όπου δεν υπήρχε υδροβιότοπος προηγουμένως. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι δεν έχουν υπολογισθεί με ακρίβεια στις ΗΠΑ, αλλά πιθανότατα είναι χιλιάδες [Mitsch, 1992].

Οι υδροβιότοποι θεωρούνται χαμηλού κόστους εναλλακτικές λύσεις για την επεξεργασία δημοτικών, βιομηχανικών και αγροτικών υγρών αποβλήτων. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι προτιμώνται επειδή έχουν περισσότερα μηχανικά συστήματα και είναι ευκολότερο να ελεγχθούν [Kadlec and Knight 1995; Ayaz and Akca, 2001].

Αυτή η νέα αναπτυσσόμενη τεχνολογία μπορεί να παρέχει χαμηλό κόστος και μικρές απαιτήσεις συντήρησης στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα σημαντικά στις αναπτυσσόμενες χώρες [Haberl et al., 1995; Hammer,1989; Ayaz and Akca, 2001].

Η κατασκευή ενός υδροβιότοπου σε μια περιοχή, επιτρέπει την αποφυγή ρυθμίσεων και περιβαλλοντικών εμπλοκών που συνδέονται με τη διάθεση εκροών σε φυσικά οικοσυστήματα (όπως θεωρούνται οι φυσικοί υδροβιότοποι) και επιτρέπουν το σχεδιασμό του υδροβιότοπου με αποκλειστικό σκοπό τη βέλτιστη επεξεργασία των ρυπασμένων υδάτων.

Τυπικά, ένας τεχνητός υδροβιότοπος αποδίδει περισσότερο σε σχέση με ένα φυσικό ίσης έκτασης, εφόσον το έδαφος έχει προσεκτικά ισοπεδωθεί και στο υδραυλικό καθεστώς του συστήματος πραγματοποιείται σωστός έλεγχος.

Η αξιοπιστία ενός τεχνητού υδροβιότοπου αυξάνεται εφόσον η βλάστηση και τα άλλα μέρη του συστήματος μπορούν να υποστούν την απαραίτητη διαχείριση, ώστε η απόδοσή του να βελτιστοποιηθεί [Bendoricchio et al., 2000].

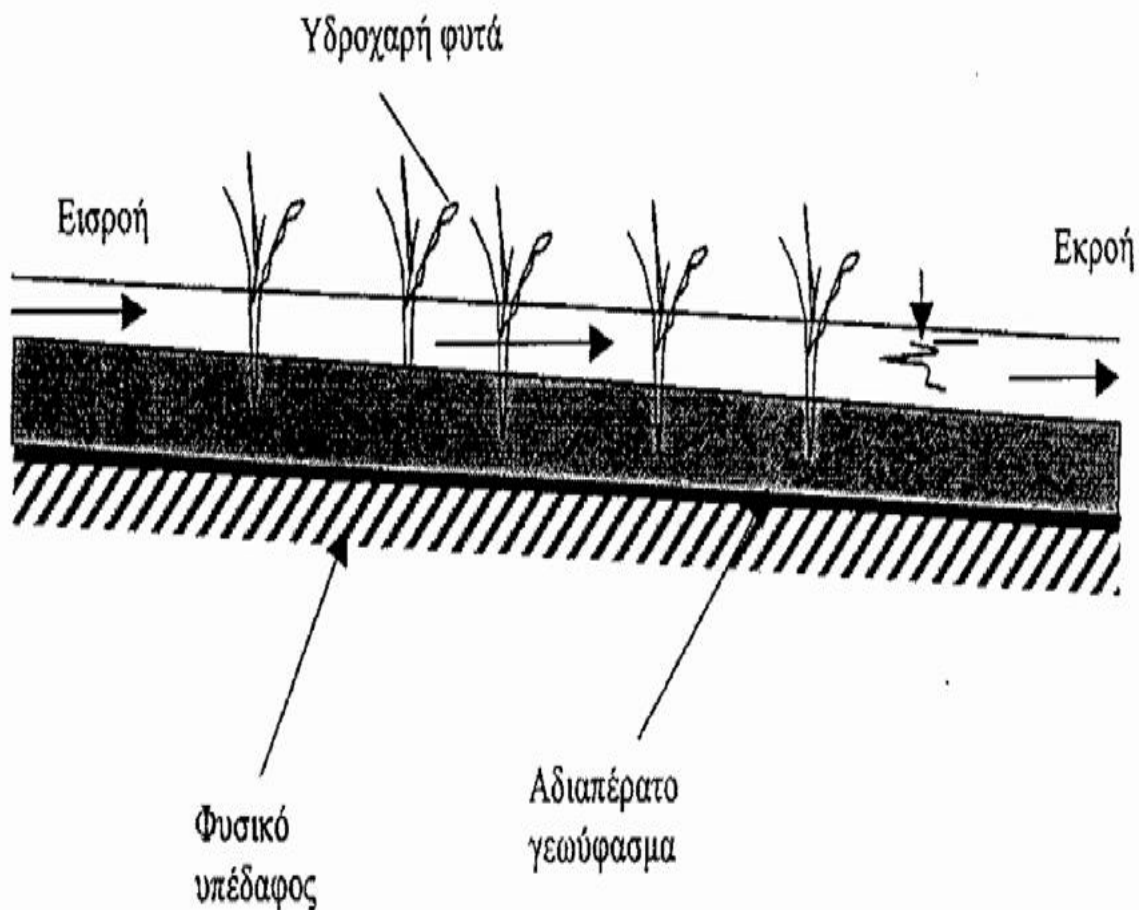
Οι τεχνητοί υδροβιότοποι, όπως όλα τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, βασίζονται (σε μικρό ή μεγάλο βαθμό) στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, περιλαμβάνοντας την ηλιακή ακτινοβολία, την κινητική ενέργεια του ανέμου, την ενέργεια του νερού της βροχής, το επιφανειακό νερό, το έδαφος και την αποθήκευση ενδεχόμενης ενέργειας σε βιομάζα στα εδάφη [Ζουραράκη, 2002].

Οι τεχνητοί υδροβιότοποι σήμερα χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων, αποστραγγίσεων ορυχείων, αστικών απορροών, κτηνοτροφικών αποβλήτων, σηπτικών δεξαμενών που έχουν αστοχήσει, αγροτικών απορροών και διαφόρων βιομηχανικών αποβλήτων. Τέτοια συστήματα επεξεργασίας εντοπίζονται σε περιοχές που βρίσκονται στο επίπεδο της θάλασσας έως περιοχές υψομέτρου 1500 μέτρων και από τροπικές έως αρκτικές περιοχές, όπως στο Οντάριο των ΗΠΑ και σε σκανδιναβικές χώρες. Αφού η λειτουργία τους βασίζεται σε χημικές και βιολογικές διεργασίες, η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων μειώνεται σε κάποιο βαθμό κατά τη διάρκεια χαμηλών θερμοκρασιών, αλλά τα επίπεδα εκροής παραμένουν ικανοποιητικά κάτω από τα επιτρεπτά όρια [Hammer, 1992].

Για την επεξεργασία ρυπασμένων υδάτων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί δύο τύποι τεχνητών υδροβιότοπων: α) Τεχνητοί υδροβιότοποι ελεύθερης επιφάνειας ή επιφανειακής ροής (free water surface systems- FWS) (Σχήμα 4.4.α και 4.4.β) και β) Τεχνητοί υδροβιότοποι υπό-επιφανειακής (ή υπόγειας) ροής (subsurface flow systems- SFS) (Σχήμα 2.3.γ). Επίσης, οι τεχνητοί υδροβιότοποι υπόγειας ροής χωρίζονται περαιτέρω σε:

α) κατακόρυφης και β) οριζόντιας ροής.

Τα φυσικά συστήματα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα. Από τα 300 έργα που λειτουργούν σήμερα στη χώρα το 10% είναι φυσικά συστήματα και ειδικότερα τεχνητοί υγροβιότοποι. Ο αριθμός των τεχνητών υγροβιότοπων έχει αυξηθεί πολύ τα τελευταία χρόνια διότι έχει αποδειχτεί σαν μια αξιόπιστη λύση για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε οικισμούς κάτω των 5.000 ισοδυνάμων κατοίκων (ι.κ.) [Βαρκάς 2007].



Σχήμα 4.4.α Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής
(Πηγή: Μάρκου, 2000).



Σχήμα 4.4.β Σύστημα υγροβιότοπου FWS
(Πηγή: www.tankonyvtar.hu, 60,bmp)



Σχήμα 4.4.γ Τεχνητός υγροβιότοπος υπόγειας -οριζόντιας ροής
(Πηγή: www.sswm.info)

4.4.1 Τεχνητοί υδροβιότοποι επιφανειακής ροής (FWS)

Τα συστήματα επιφανειακής ροής FWS (Σχήμα 4.4.1) αποτελούνται, συνήθως, από παράλληλες λεκάνες, κανάλια ή τάφρους με αδιαπέραστους πυθμένες, με αναφυόμενη φυτική βλάστηση και μικρό βάθος νερού (0,1-0,6 m). Σε τέτοια συστήματα εφαρμόζονται συνεχώς προεπεξεργασμένα απόβλητα και η περαιτέρω επεξεργασία τους διενεργείται, καθώς η εφαρμοζόμενη εκροή ρέει με μικρή ταχύτητα διαμέσου των στελεχών και ριζωμάτων της υφιστάμενης φυτικής βλάστησης και του υφιστάμενου υποστρώματος.

Επίσης, τα συστήματα αυτά μπορούν να σχεδιάζονται με σκοπό την ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για την αποδοχή υδροβιότοπων ή ενίσχυση υφιστάμενων φυσικών υδροβιότοπων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, αναπτύσσεται ένας συνδυασμός υδατικών επιφανειών, με βλάστηση και ανοικτών και μικρών νησίδων με την κατάλληλη βλάστηση και ενίσχυση της ροής του νερού [Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995].

Στα συστήματα FWS κύρια πηγή οξυγόνου είναι η ελεύθερη επιφάνειά του, αλλά η ύπαρξη βιολογικής βλάστησης παρεμποδίζει τον επιφανειακό επαναερισμό, που είναι δυνατό να διενεργείται με τον άνεμο. Γι' αυτό θα πρέπει να εφαρμόζονται μικρά οργανικά φορτία. Αντίθετα, η ύπαρξη τους επιδρά ανασταλτικά στην ανάπτυξη αλγών. Η απομάκρυνση στερεών σε αιώρηση οφείλεται κυρίως στο μηχανισμό της καθίζησης και διενεργείται, κυρίως, σε μικρές αποστάσεις από το σημείο εισροής του αποβλήτου στο σύστημα. Η απομάκρυνση του αζώτου οφείλεται, κυρίως, στις διεργασίες νιτροποίησης - απονιτροποίησης και λιγότερο στην πρόσληψή του από τα φυτά και γι' αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα εφαρμογής του οργανικού φορτίου και το χρόνο συγκράτησης. Ακόμη και όταν τα φυτά που χρησιμοποιούνται συγκομίζονται περιοδικά, η απομάκρυνση του αζώτου η οφειλόμενη στην πρόσληψή του από τα φυτά, αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό 10-15% της συνολικής απομάκρυνσής του.

Τέλος, η απομάκρυνση του φωσφόρου σε τέτοια συστήματα είναι περιορισμένη, εξαιτίας της περιορισμένης επαφής του αποβλήτου με το έδαφος [Σωτηροπούλου, 2010].

Τα τελευταία χρόνια έχει αποδειχθεί ότι οι τεχνητοί υδροβιότοποι αποτελούν αξιόπιστη τεχνολογία για την επεξεργασία ρυπασμένου ύδατος, ειδικά για περιοχές με μικρό πληθυσμό. Συγκρινόμενοι με τα συμβατικά συστήματα βιολογικού καθαρισμού οι τεχνητοί υδροβιότοποι επιφανειακής ροής παρουσιάζουν συγκεκριμένα πλεονέκτημα [US.EPA, 2000]:

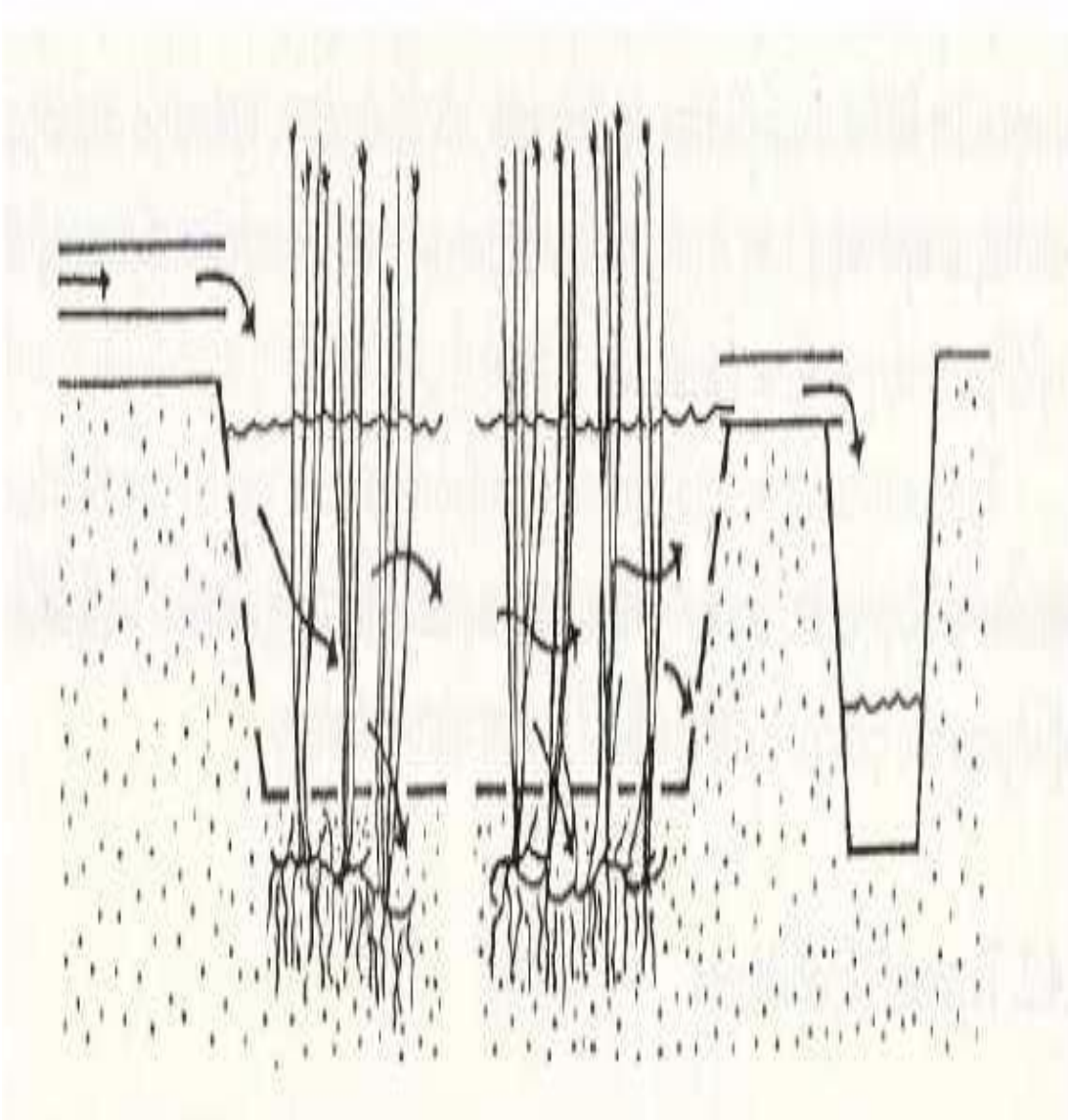
- Τα συστήματα υδροβιότοπων επιφανειακής ροής παρέχουν αποτελεσματική επεξεργασία με παθητικό τρόπο, ελαχιστοποιώντας το μηχανικό εξοπλισμό, την ενέργεια και εξειδικευμένους εξοπλισμούς για τον χειριστή.
- Τα συστήματα υδροβιότοπων επιφανειακής ροής είναι λιγότερο ακριβά στην κατασκευή και κοστίζουν λιγότερο στο χειρισμό και στη συντήρηση.
- Η λειτουργία τους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για δευτερογενή επεξεργασία είναι πιθανή σε όλους τους κλιματικούς τύπους, εκτός των ιδιαίτερα ψυχρών κλιμάτων. Η λειτουργία τους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για προχωρημένη ή τριτογενή επεξεργασία είναι πιθανή σε θερμά έως μέτρια κλίματα.
- Τα συστήματα αυτά εξασφαλίζουν πολύτιμη προσθήκη στο «πράσινο» σε μια κοινωνία και περιέχουν τη συγχώνευση περιβάλλοντος και επαρκή ψυχαγωγία του κοινού.
- Δεν παράγουν υπολείμματα βιοστερεών ή ιλύος που απαιτούν επιπρόσθετη επεξεργασία ή απόθεση.
- Η σύλληψη και η κατασκευή μικρών ΜΕΑΛ (Μονάδες Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων) με φυσικά συστήματα, χρησιμοποιώντας τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής ροής (FWS), μπορεί να θεωρηθεί σαν μια

αξιόπιστη λύση για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε οικισμούς κάτω των 5.000 ι.κ. και επιτυχημένη για τις περιπτώσεις που έχει εφαρμοστεί και σε τοπικό επίπεδο.

Ωστόσο, παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα [US.EPA, 2000]:

- Η έκταση της γης που απαιτείται για υδροβιότοπους επιφανειακής ροής πρέπει να είναι μεγάλη, ειδικά όταν απαιτείται απομάκρυνση αζώτου ή φωσφόρου. Η απαίτηση έκτασης για διαφορετικές διατάξεις και διαφορετικούς σκοπούς επεξεργασίας (απομάκρυνση BOD, νιτροποίηση, κτλ.) έχει προσδιορισθεί από τους Cooper and Findlater (1990) ότι κυμαίνεται από 1,3 έως 10,3 m²/άτομο (1 m²/άτομο για απομάκρυνση BOD και 2 m²/άτομο για απομάκρυνση BOD και νιτροποίηση).
- Η απομάκρυνση BOD, COD και αζώτου είναι βιολογικές διαδικασίες και κατά βάση διαρκώς ανανεώνονται. Ο φώσφορος, τα μέταλλα και ορισμένα επίμονα οργανικά απομακρυνόμενα από το σύστημα κατευθύνονται στα ιζήματα του υδροβιότοπου και συσσωρεύονται με το πέρασμα του χρόνου.
- Σε ψυχρά κλίματα, οι χαμηλές χειμερινές θερμοκρασίες περιορίζουν το ρυθμό απομάκρυνσης του BOD και τις βιολογικές αντιδράσεις που είναι υπεύθυνες για νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Ο αυξημένος χρόνος κράτησης μπορεί να αντισταθμίσει αυτό, αλλά τότε το ιδιαίτερα μεγάλο μέγεθος του υδροβιότοπου πιθανόν να είναι αναποτελεσματικό όσον αφορά το κόστος ή να είναι τεχνικά ανέφικτο.
- Το μεγαλύτερο μέρος του νερού στην πλειονότητα των συστημάτων είναι κατά βάση ανοξικό, κάτι που περιορίζει την τάση για ταχεία βιολογική νιτροποίηση της αμμωνίας.
- Κουνούπια και άλλα έντομα που είναι φορείς ασθενειών μπορούν να αποτελέσουν πρόβλημα.

- Ο πληθυσμός των πτηνών σε ένα τεχνητό υγροβιότοπο μπορεί να επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις σε περίπτωση που βρίσκεται αεροδρόμιο κοντά.



Σχήμα 4.4.1 Σχηματική παρουσίαση συστημάτων επιφανειακής ροής (FWS)
(Πηγή: Metcalf & Eddy, 1991)

4.4.2 Τεχνητοί υγροβιότοποι υπόγειας ροής (SFS)

Οι υγροβιότοποι τύπου SFS (Σχήμα 4.4.2) σχεδιάζονται με σκοπό την επίτευξη δευτεροβάθμιας ή προωθημένης επεξεργασίας. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται επίσης συστήματα «ριζόσφαιρας» ή «φίλτρων εδάφους-καλαμιών» και αναπτύσσονται μέσα σε κανάλια ή τάφρους με σχετικά στεγανούς πυθμένες που περιέχουν άμμο ή άλλα γήινα μέσα υποστήριξης της αναπτυσσόμενης (επιφανειακά) φυτικής βλάστησης. Στα συστήματα αυτά η επιφάνεια του νερού διατηρείται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή του χρησιμοποιούμενου μέσου. Η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου οφείλεται σε φυσικές και βιοχημικές αποκρίσεις του μέσου, καθώς επίσης στην επαφή του με το ριζικό σύστημα των φυτών. Τα επίπεδα απομάκρυνσης των ρυπαντών είναι ισοδύναμα των συστημάτων FWS και παρουσιάζουν μειωμένα προβλήματα, σχετικά με την ανάπτυξη κουνουπιών και δυσάρεστων οσμών. Για την κατασκευή των υποστρώματων χρησιμοποιείται κυρίως έδαφος, άμμος και διάφορα άλλα χονδρόκοκκα ή ακόμη και πλαστικά ή άλλα αδρανή υλικά.

Η απομάκρυνση BOD και στερεών συστατικών σε αιώρηση διενεργείται με διήθηση, καθίζηση και αποδόμηση από αερόβιους και αναερόβιους μικροοργανισμούς. Η απομάκρυνση του αζώτου σε τέτοια συστήματα, διενεργείται με τους μηχανισμούς νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Η απομάκρυνση του φωσφόρου εξαρτάται, κυρίως, από το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα. Η απομάκρυνση μετάλλων ποικίλλει και επιτυγχάνεται, κυρίως, με κατακρήμνιση και προσρόφησή τους. Τέλος η απομάκρυνση των παθογόνων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του υποστρώματος και την ταχύτητα ροής [Σωτηροπούλου, 2010].

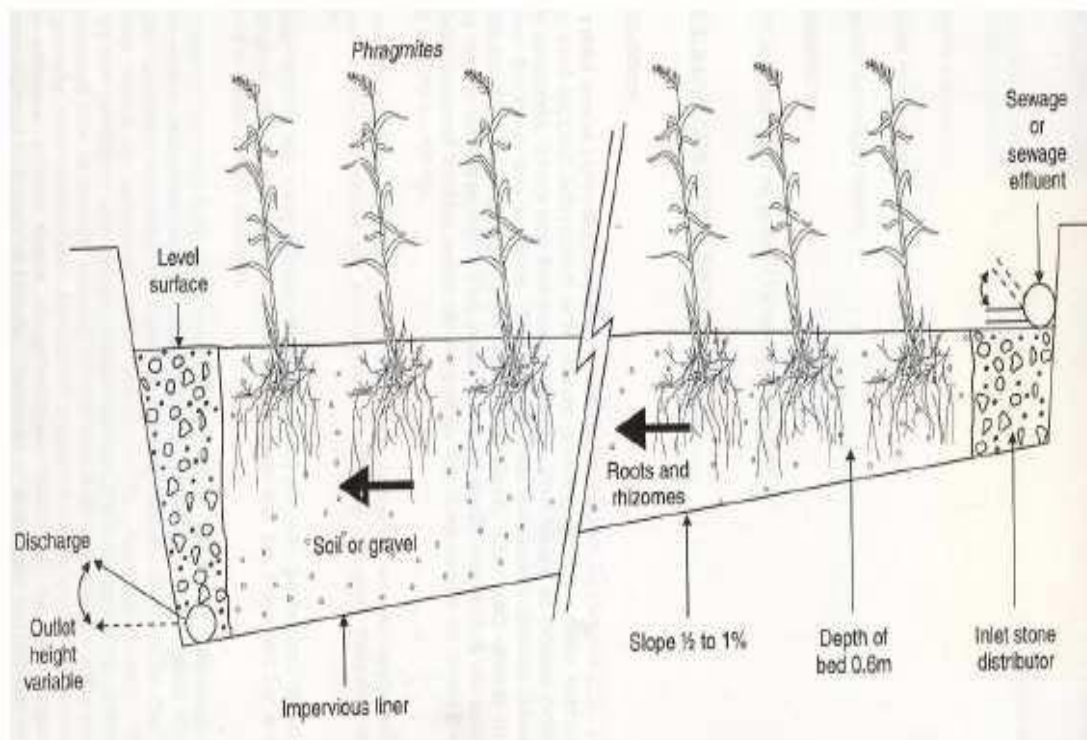
Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας εγκατάστασης μπορούν να συνοψιστούν στα εξής [EPA, 2002]:

- Χαμηλό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης (δευτεροβάθμια & τριτοβάθμια επεξεργασία)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (30 έως 50 χρόνια)
- Απλότητα στην λειτουργία
- Ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας (το 10% ενός συμβατικού Βιολογικού)
- Ελάχιστο κόστος συντήρησης (δεν απαιτείται η παρουσία μόνιμου προσωπικού)
- Η έλλειψη απαίτησης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού
- Δυνατότητα επέκτασης οποιαδήποτε χρονική στιγμή (ευελιξία στη διαστασιολόγηση)
- Σταθερή διαδικασία καθαρισμού ακόμα και σε ακραίες καιρικές συνθήκες
- Δεν παρατηρούνται δυσάρεστες οσμές, ούτε προβλήματα με κουνούπια λόγω της υπόγειας διάθεσης και επεξεργασίας
- Αρμονική προσαρμογή στο φυσικό τοπίο

- Το σύστημα αφ' εαυτού εμπεριέχει και τριτοβάθμια επεξεργασία με ποσοστό απολαβής το 60% του νερού, έτοιμου για άρδευση, οπότε εξασφαλίζεται και η δυνατότητα κατάργησης της χλωρίωσης
- Η σημαντική μείωση της ποσότητας της παραγόμενης ιλύος

Ενώ τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι [EPA, 2002]:

- Η μεγάλη απαιτούμενη επιφάνεια
- Η έλλειψη εμπειρίας στη χώρα μας για την κατασκευή τέτοιων εγκαταστάσεων.



Σχήμα 4.4.2 Σχηματική παρουσίαση συστημάτων υπόγειας ροής
(Πηγή: Metcalf & Eddy, 1991)

4.4.2.1 Τεχνητοί υγροβιότοποι κατακόρυφης υπόγειας ροής (*Vertical flow subsurface constructed wetlands*)

Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από την κατακόρυφη ροή των προς επεξεργασία λυμάτων μέσα από τις εδαφικές στρώσεις των λεκανών τους. Η λειτουργία τους προσομοιάζει αρκετά με το περιοδικό πότισμα μιας γλάστρας στην οποία το νερό αρχικά πλημμυρίζει τη λεκάνη και εν συνεχεία αφήνεται να στραγγίσει. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στο συνδυασμό της δράσης του εδάφους, των ριζών και των μικροοργανισμών. Οι λεκάνες στα συστήματα αυτά κατασκευάζονται με ένα βάθος περίπου 0,90 έως 1,20 m, με μια μέση κλίση πυθμένα περίπου 1%. Ο πυθμένας και τα πρανή τους καλύπτονται από γεωμεμβράνη ή κατασκευάζονται από σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, γίνεται πλήρωση των λεκανών με αδρανή υλικά συνολικού βάθους μέχρι ενός μέτρου, μειούμενης κοκκομετρίας από τον πυθμένα προς την επιφάνεια. Το επιφανειακό στρώμα της λεκάνης, βάθους 10 έως 30 cm, καλύπτεται με άμμο, μέσα στην οποία φυτεύονται και αναπτύσσονται είδη καλαμιών. Για τη λειτουργία αυτού του συστήματος οι λεκάνες κατακλύζονται περιοδικά με μεγάλες παροχές λυμάτων και η ροή γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους τεχνητού υγροβιότοπου έναντι των υπολοίπων είναι η απαίτηση μικρότερης έκτασης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και η διατήρηση αερόβιων συνθηκών επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, εξαιτίας της περιοδικής ανάπαυσης και ως εκ τούτου και περιοδικής ξήρανσης κάθε λεκάνης. Αυτό το πλεονέκτημα των υγροβιότοπων με περιοδική κατάκλιση αποδίδεται, κυρίως, στις συνθήκες ακόρεστης ροής και επιπρόσθετα στο μεγαλύτερο πάχος της εδαφικής στρώσης των λεκανών, με το οποίο επιτυγχάνεται ένα επιπρόσθετο φιλτράρισμα των υγρών αποβλήτων [Καραμούζης, 2003].

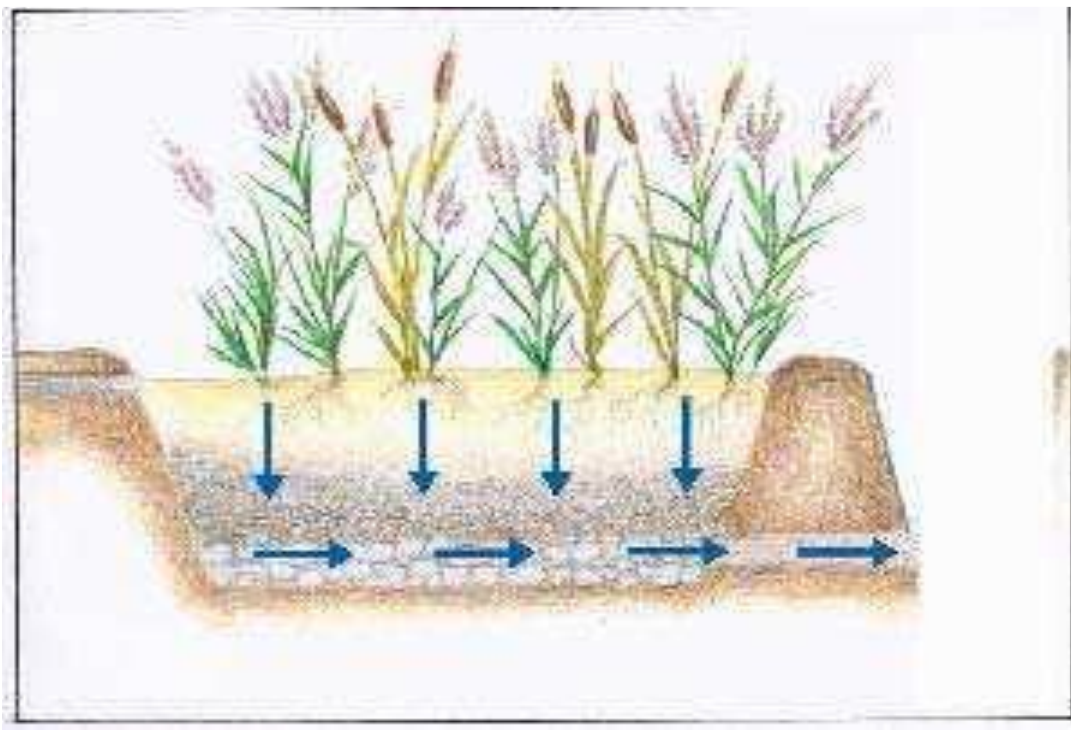
Τα απόβλητα, τα οποία υφίστανται μηχανική προεπεξεργασία σε μια σηπτική δεξαμενή με τρεις ή τέσσερις θαλάμους, διοχετεύονται με ένα σύστημα ειδικών σωληνώσεων σε ένα εδαφικό σώμα που αποτελείται από διαδοχικά στρώματα άμμου και χαλικιού και είναι φυτεμένο με μια συγκεκριμένη ποικιλία καλαμιών του είδους *Phragmites australis*, φυτά αυτοφυή στη χώρα μας. Το σύστημα σωληνώσεων εγγυάται την ισομερή διάθεση των λυμάτων στο εδαφικό σώμα για την αποτελεσματικότερη διήθησή τους. Το ριζικό σύστημα των φυτών εξασφαλίζει συνεχή αερισμό του εδάφους μέσω του συστήματος των αγγείων τους, αλλά και εξαιτίας της μείωσης της συνοχής των εδαφικών υλικών με την ανάπτυξη των διακλαδώσεων τους. Οι μικρο-οργανισμοί, που φιλοξενούνται στις ρίζες, διασπούν το οργανικό φορτίο των αποβλήτων σε τέτοιο βαθμό ώστε ακόμη και πολύπλοκες, δύσκολα διασπώμενες ενώσεις να αποικοδομούνται. Καμία ενσωμάτωση ξένων ουσιών δεν παρατηρείται στα φυτά, ούτε συμβαίνει συμφόρηση στο έδαφος.

Εν συνεχεία, το επεξεργασμένο νερό συλλέγεται σε συλλεκτήριους σωλήνες, στο κατώτερο μέρος του εδαφικού σώματος, και οδηγείται σε ένα φρεάτιο ελέγχου όπου μπορεί να ελεγχθεί. Από εκεί, μπορεί να διοχετευτεί στη θάλασσα, σε ποτάμι, λίμνη ή στο έδαφος χωρίς καμία επιβάρυνση στο περιβάλλον, ή, ακόμα, και να αξιοποιηθεί για στάγδην άρδευση [Σωτηροπούλου, 2010].

Στις μέρες μας, οι κατακόρυφης ροής τεχνητοί υγροβιότοποι (Σχήμα 2.3.2.1) με διακοπτόμενη τροφοδοσία χρησιμοποιούνται συχνά στην Ευρώπη λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν σε σχέση με τους άλλους σχεδιασμούς. Οι κατακόρυφης ροής τεχνητοί υγροβιότοποι παρουσιάζουν περισσότερο ισοδύναμη κατανομή ριζών και επαφή ριζών-νερού και λιγότερα προβλήματα κακοσμίας και πολλαπλασιασμού εντόμων, αφού δεν έχουν ελεύθερη επιφάνεια νερού.

Ακόμη κι αν οι κατακόρυφης ροής τεχνητοί υγροβιότοποι χρησιμοποιούνται κυρίως για απομάκρυνση COD, TSS και κολοβακτηριδίων, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον στη χρήση τους [Σωτηροπούλου, 2010].

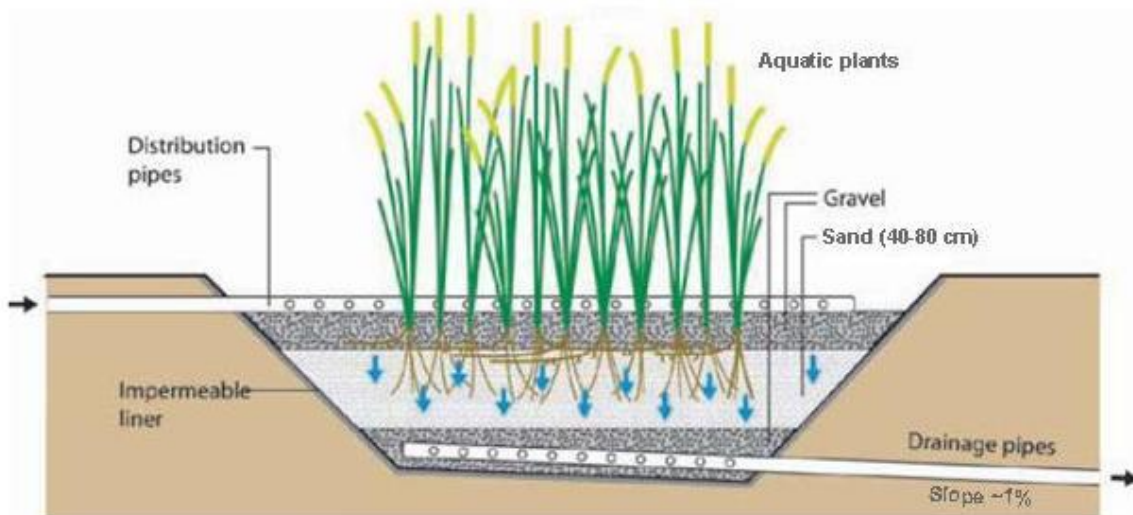
Για τέτοιες διαδικασίες, τα υποστρώματα (κορεσμένα μέσα των τεχνητών υγροβιότοπων) θεωρούνται επίσης πολύ σημαντικά. Με σκοπό τη βελτίωση κατακράτησης φωσφόρου, υποστρώματα με μεγαλύτερη ικανότητα προσρόφησης φωσφόρου, μεγαλύτερο περιεχόμενο σε ασβέστιο, σίδηρο και αργίλιο, μεγαλύτερη επιφάνεια σωματιδίων και κατάλληλη υδραυλική αγωγιμότητα χρησιμοποιούνται ευρέως. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές υγροβιότοπων έχουν ξεκινήσει να χρησιμοποιούν βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως μικρού βάρους τσιμεντολάσπη (LWA, LECA κτλ.) και απορρίμματα από βιομηχανίες, όπως και φυσικά υλικά με υψηλή ικανότητα προσρόφησης [Βαρκάς 2007].



Σχήμα 4.4.2.1 Τεχνητός υγροβιότοπος υπόγειας -κατακόρυφης ροής
(Πηγή: www.uvm.edu).

4.4.2.2 Τεχνητοί υγροβιότοποι οριζόντιας υπόγειας ροής (*Vertical flow subsurface constructed wetlands*)

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υπόγειας ροής ισχύει ότι και σε αυτούς της κατακόρυφης ροής, με την διαφορά ότι στους πρώτους, τα λύματα εισέρχονται στον υγροβιότοπο με κατεύθυνση οριζόντια σε σχέση με το έδαφος. Η απομάκρυνση των ρυπαντών γίνεται μέσω προσρόφησης στο υλικό πλήρωσης (π.χ χαλίκι, άμμος), διήθησης, καθίζησης και αποικοδόμησης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι υγροβιότοποι κατακόρυφης ροής χρησιμοποιούνται συχνότερα σε αντίθεση με αυτούς της οριζόντιας ροής.



Σχήμα 4.2.2 Τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υπόγειας ροής (πηγή: *environmentalconsultingohio*)

5. ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ

5.1 Παρουσίαση τεχνητών υγροβιότοπων σε παγκόσμια κλίμακα

ΗΠΑ και Καναδάς

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι δεν παρουσιάζουν ευρεία διαδεδομένη χρήση ως συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Μια επισκόπηση του 1996 στις ΗΠΑ και τον Καναδά κατέδειξε 176 περιοχές υγροβιότοπων επεξεργασίας σε χρήση. Οι περισσότεροι από αυτούς (116) βρίσκονταν σε υποτροπικές ή θερμές ζώνες (υψηλών θερμοκρασιών). Εντούτοις, η Πολιτεία με το μεγαλύτερο αριθμό εγκαταστάσεων είναι η χαμηλών θερμοκρασιών Νότια Ντακότα (40 περιοχές). Η πλειονότητα των υγροβιότοπων σε ζώνες χαμηλών θερμοκρασιών ήταν τύπου επιφανειακής ροής (FWS) [www.fujitaresearch.com]

.

Ευρώπη

Πολλές Ευρωπαϊκές χώρες έχουν τα τελευταία χρόνια δείξει αυξανόμενο ενδιαφέρον για μικρές εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι φαίνεται να είναι πρακτικά καλή επιλογή για επεξεργασία επιτόπου λόγω της απλής τους κατασκευής και της μεγάλης ικανότητας αποθήκευσης. Ένας αριθμός διαφορετικών σχεδιασμών βρίσκεται σε λειτουργία στην Ευρώπη, κυρίως συστήματα υπόγειας ροής, που βρίσκονται σε χρήση για τριάντα έτη. Πρώτα, τα συστήματα οριζόντιας ροής επιλέγονταν περισσότερο, αλλά οι αυστηροί νομικοί κανόνες έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη υψηλής απόδοσης κατακόρυφης ροής τα τελευταία χρόνια. Με σκοπό να επιτευχθούν οι μεγαλύτερες απαιτήσεις < 0.12 μικρών και πολύ ευαίσθητων αποδεκτών, συνδυασμένα συστήματα (π.χ. τεχνητοί υγροβιότοποι και συμβατικές βιολογικές εγκαταστάσεις) αποδεικνύουν ότι είναι επιτυχή [Haberl et al., 1995].

Βόρεια Ευρώπη

Στη Βόρεια Ευρώπη, η Δανία είναι η κορυφαία χώρα στην εφαρμογή τεχνητών υδροβιότοπων υπόγειας ροής. Στη χώρα υπάρχουν τουλάχιστον 130 τεχνητοί υδροβιότοποι, οι περισσότεροι από τους οποίους επεξεργάζονται δημοτικά υγρά απόβλητα. Συγκριτικά, η Σουηδία και η Νορβηγία έχουν επιδείξει πολύ λιγότερο ενδιαφέρον σε τέτοια συστήματα και καμία κυβέρνηση δεν έχει δώσει τελική έγκριση χρήσης τεχνητών υδροβιότοπων για νομοθετημένη επεξεργασία νερού. Το 1996, η Σουηδία είχε 6 επιφανειακής ροής και 8 υπόγειας ροής υδροβιότοπους για επεξεργασία δημοτικών ή οικιακών αποβλήτων. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις εγκαταστάθηκαν μόνο με σκοπό να βοηθήσουν στην απομάκρυνση αζώτου ή να καθαρίσουν στην εντέλεια το νερό που είχε επεξεργασθεί προηγουμένως με άλλα μέσα. Η Νορβηγία έχει σχεδόν δώδεκα υδροβιότοπους, η πλειονότητα των οποίων είναι εγκαταστάσεις υπόγειας ροής [www.fujitaresearch.com].

Ανατολική Ευρώπη

Η διάδοση των τεχνητών υδροβιότοπων είναι μεγαλύτερη στην Τσεχία. Μεταξύ 1989 και 1996, 26 συστήματα κατασκευάστηκαν. Ως αποτέλεσμα της επιτυχίας που σημείωσαν, 54 επιπλέον συστήματα κατασκευάζονται από τότε. Όλα τα συστήματα είναι οριζόντιας υπόγειας ροής και επεξεργάζονται δημοτικά υγρά απόβλητα (μετά από αρχική προεπεξεργασία). Η Ουγγαρία και η Εσθονία είναι γνωστό ότι κατασκευάζουν τεχνητούς υδροβιότοπους, αλλά δεν είναι διαθέσιμοι αριθμοί [www.fujitaresearch.com].

5.2 Παρουσίαση τεχνητών υγροβιότοπων στην Ελλάδα

Τεχνητός υγροβιότοπος Βάσσοβας

Στα πλαίσια του προγράμματος LIFE για τον ποταμό Νέστο, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής στη λιμνοθάλασσα Βάσσοβα με σκοπό να δέχεται την αγροτική απορροή από παρακείμενο αποστραγγιστικό κανάλι (T-1) και, μετά από επεξεργασία για την αφαίρεση θρεπτικών αλάτων, να φορτίζει τη λιμνοθάλασσα με γλυκό νερό, αποκαθιστώντας έτσι την είσοδο γλυκού νερού στη λιμνοθάλασσα που είχε διακοπεί. Ο τεχνητός υγροβιότοπος κατασκευάστηκε σε συνολική έκταση 38400 m² δίπλα στη λιμνοθάλασσα και είναι χωρισμένος κατά μήκος σε τρία κελιά, μέσω αναχωμάτων από περατό χαλίκι, ώστε να πραγματοποιείται ομοιόμορφη ροή σε όλο το πλάτος του υγροβιότοπου. Ο χώρος του υγροβιότοπου διαμορφώθηκε κατάλληλα ως προς την κλίση και φυτεύτηκε. Μετά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας, από τα αποτελέσματα συχνών δειγματοληψιών που πραγματοποιήθηκαν στον υγροβιότοπο, φαίνεται ότι ο σκοπός επετεύχθη, αφού τα θρεπτικά άλατα (νιτρικά, νιτρώδη και φωσφορικά) απομακρύνονται ικανοποιητικά [Ακράτος, 2006].

Τεχνητός υγροβιότοπος Μαδύτου

Η μονάδα κατασκευάστηκε στην κοινότητα Ν. Μαδύτου σε μια επιφάνεια γης περίπου 2,5 ha και εξυπηρετεί τους οικισμούς Ν. Μαδύτου και Μοδιού. Το σύστημα τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούνιο του 1995. Η μονάδα σχεδιάστηκε με χρονικό ορίζοντα 20 ετών για να εξυπηρετεί 3000 κατοίκους, ενώ σήμερα εξυπηρετεί 2500. Τα λύματα προωθούνται στην εγκατάσταση μέσω αντλιοστασίου προώθησης των ακαθάρτων που αποτελείται από δύο αντλίες υγρού τύπου (βυθισμένες) παροχής 90 m³/h και μανομετρικού 20 m. Στην είσοδο της εγκατάστασης τα λύματα οδηγούνται σε δύο δεξαμενές Imhoff, όπου και υφίστανται πρωτοβάθμια καθίζηση.

Η ιλύς, η οποία συγκεντρώνεται στο χαμηλότερο τμήμα της δεξαμενής, οδηγείται με αγωγούς σε τακτά χρονικά διαστήματα σε κλίνες ιλύος για αφυδάτωση. Κάθε μία από τις κλίνες αυτές έχει επιφάνεια 140 m², με τέσσερις στρώσεις διαφορετικών υλικών πλήρωσης.

Στη συνέχεια, τα λύματα οδηγούνται σε κλίνες τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής (1ο στάδιο επεξεργασίας) συνολικής έκτασης 1360 m². Από τη μέχρι τώρα λειτουργία της εγκατάστασης γίνεται εμφανές ότι λειτουργεί ικανοποιητικά όσον αφορά την απομάκρυνση των ρύπων. Η απομάκρυνση BOD₅ και COD είναι της τάξεως του 90% και 80% αντιστοίχως και του TKN και της αμμωνίας περίπου 85%. Η απομάκρυνση ολικού φωσφόρου είναι σχετικά χαμηλή (22%). Επιπλέον, τα ολικά αιωρούμενα στερεά και τα ολικά κολοβακτηρίδια αφαιρούνται ικανοποιητικά (90% και 98% αντίστοιχα) [Ακράτος, 2006].

Τεχνητός υγροβιότοπος Γοματίου

Μια άλλη εγκατάσταση που λειτουργεί στη Βόρεια Ελλάδα είναι αυτή της κοινότητας Γοματίου του Δήμου Παναγιάς του Νομού Χαλκιδικής. Η εγκατάσταση σχεδιάστηκε για να εξυπηρετεί 1000 κατοίκους, ενώ σήμερα ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός είναι 800. Η εγκατάσταση αποτελείται από: εσχάρωση, πρωτοβάθμια καθίζηση, χώνευση ιλύος, κλίνες τεχνητού υγροβιότοπου ξήρανσης ιλύος, 1ο στάδιο κλινών τεχνητού υγροβιότοπου κατακόρυφης ροής, 2ο στάδιο κλινών τεχνητού υγροβιότοπου κατακόρυφης ροής, 3ο στάδιο τεχνητού υγροβιότοπου υπόγειας ροής. Η εσχάρωση επιτυγχάνεται με κυκλικό αυτοκαθαριζόμενο περιστρεφόμενο τύμπανο με οπές. Κατόπιν, το λύμα εισέρχεται στη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης ολικού όγκου 48 m³, όπου παραμένει εκεί για τρεις μήνες και μετά οδηγείται στις κλίνες τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής για επεξεργασία ιλύος, οι οποίες είναι κυκλικής διατομής αποτελούμενες από 4 όμοια διαμερίσματα, έκτασης 60 m² το καθένα (συνολική έκταση 240 m²).

Το υγρό απόβλητο, μετά τη δεξαμενή καθίζησης, εισέρχεται περιοδικά στο 1ο στάδιο τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής μέσω ενός σίφωνα.

Το στάδιο αυτό αποτελείται από 4 κελιά με επιφάνεια 160 m² το καθένα (συνολική έκταση 640 m²). Κάθε κελί φορτίζεται περιοδικά κάθε δύο ημέρες. Η εκροή του εισέρχεται στο 2ο στάδιο τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής, το οποίο είναι σχεδόν όμοιο με το 1ο με μόνη διαφορά ότι το κάθε κελί έχει έκταση 90 m² (συνολική έκταση 360 m²). Τελικά, το απόβλητο εισέρχεται στον τεχνητό υγροβιότοπο οριζόντιας υπόγειας ροής, ο οποίος έχει συνολική έκταση 800 m². Η εκροή της εγκατάστασης καταλήγει σε παρακείμενο ρέμα.

Από τα δύο πρώτα χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης του Γοματίου είναι εμφανές ότι αυτή λειτουργεί ικανοποιητικά για την απομάκρυνση των ρύπων. Παρατηρείται ότι η μέση απομάκρυνση BOD₅ και COD είναι πάνω από 90% και του TKN και της αμμωνίας περίπου 85%. Επίσης, τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) και τα ολικά κολοβακτηρίδια (TC) αφαιρούνται ικανοποιητικά (93% και 99% αντιστοίχως), ενώ η αφαίρεση ορθοφωσφορικών και ολικού φωσφόρου είναι, όπως αναμένεται, σε μικρότερα ποσοστά (48% και 60% αντίστοιχα) [Ακράτος, 2006].

Τεχνητός υγροβιότοπος Πόμπιας

Ο τεχνητός υγροβιότοπος που λειτουργεί στην Πόμπια της Κρήτης είναι επιφανειακής ροής, αποτελούμενος από δύο κελιά σε σειρά έκτασης 4300 m² και 1200 m² [Ακράτος, 2006]. Το απόβλητο πριν την είσοδο στον υγροβιότοπο αποθηκεύεται σε σηπτική δεξαμενή. Η εκροή από τον υγροβιότοπο καταλήγει στο φρεάτιο επανακυκλοφορίας όπου με αντλία επανακυκλοφορεί στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση των αποδόσεων του υγροβιότοπου. Η στάθμη της εκροής στον υγροβιότοπο ρυθμίζεται από τα φρεάτια ρύθμισης στάθμης. Η απολύμανση επιτυγχάνεται με υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Τα δύο κελιά είναι φυτεμένα με δύο είδη καλαμιών (*Phragmites australis* και *Arundo donax*).

Η εγκατάσταση ξεκίνησε τη λειτουργία της τον Αύγουστο του 1999, βρίσκεται ακόμη σε λειτουργία και εξυπηρετεί 1200 ισοδύναμους κατοίκους (p.e.). Η μέση ημερήσια παροχή είναι $144 \text{ m}^3/\text{d}$ και ο χρόνος παραμονής κυμάνθηκε από 5 έως 14 ημέρες (ανάλογα με την εποχή), ενώ η θερμοκρασία του αποβλήτου κυμάνθηκε από 10°C έως 22°C το καλοκαίρι. Η γενική αίσθηση για έναν επισκέπτη είναι ότι το σύστημα αυτό λειτουργεί σαν φυσικό έλος και φυσικό περιβάλλον πουλιών και άγριων ζώων. Οι μέσες αποδόσεις αφαίρεσης ρύπων για μια περίοδο λειτουργίας τριών χρόνων ήταν για το BOD5 94,4%, για το COD 96,1%, για τα TSS 95,5%, για το TKN 52,5% και για τον ολικό φώσφορο 53,1% [Ακράτος, 2006].

Τεχνητός υδροβιότοπος Θεσσαλονίκης

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε με σκοπό να εξετασθεί η επίδραση του κλίματος στην ικανότητα ενός τεχνητού υδροβιότοπου στην απορρύπανση δημοτικών υγρών αποβλήτων. Οι στόχοι του έργου αυτού ήταν: α) Η παρακολούθηση των εποχιακών μεταβολών στη μείωση πληθυσμών κολοβακτηριδίων σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο, β) η μελέτη της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην ικανότητα του τεχνητού υδροβιότοπου να περιορίσει τη συγκέντρωση των ολικών κολοβακτηριδίων (total coliforms - TC) και γ) να εκτιμηθεί εφόσον η ικανότητα του υδροβιότοπου να απομακρύνει *Salmonella* spp. μπορεί να προβλεφθεί από τη συγκέντρωση των TC στην εκροή του υδροβιότοπου. Για το λόγο αυτό, ένας πρωτότυπος τεχνητός υδροβιότοπος κατασκευάστηκε το 1996 κοντά στο Γαλλικό ποταμό στη Θεσσαλονίκη και λειτουργεί από τον Απρίλιο του 1997. Ο υδροβιότοπος χρησιμοποιείται για δευτερογενή επεξεργασία παροχής $100 \text{ m}^3/\text{day}$ πρωτογενώς επεξεργασμένων δημοτικών λυμάτων και αποτελείται από τέσσερις παράλληλες κλίνες επιφανειακής ροής (φυτεμένες με *Typha latifolia*), μια λίμνη σταθεροποίησης και δύο κλίνες υπόγειας ροής (φυτεμένες με *Phragmites communis*).

Ο τεχνητός υγροβιότοπος απομάκρυνε επιτυχώς τα ολικά κολοβακτηρίδια κατά τη διάρκεια της άνοιξης, του φθινοπώρου και του καλοκαιριού. Η ποσοστιαία μείωση των κολοβακτηριδίων ήταν σημαντικά μικρότερη κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε σύγκριση με τους υπόλοιπους μήνες.

Ένα μοντέλο παλινδρόμησης της εκατοστιαίας μείωσης κολοβακτηριδίων ως εξαρτημένης μεταβλητής και της θερμοκρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας ως ανεξάρτητες μεταβλητές παρουσίασε καλή προσαρμογή ($r^2 = 0,89$). Ιδιαίτερως, η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία είχαν θετική επίδραση στην εκατοστιαία μείωση κολοβακτηριδίων, με τη θερμοκρασία να έχει μικρότερη επιρροή [Anastasiadis et al., 2001].

Τεχνητός υγροβιότοπος Επισκοπής

Η συγκεκριμένη μονάδα επεξεργασίας αστικών λυμάτων (ΜΕΑΛ) καλύπτει τις ανάγκες των οικισμών Επισκοπής και Σγουροκεφαλίου του Δήμου Επισκοπής. Το έτος σχεδιασμού είναι το 2023, ενώ ορισμένες μονάδες όπως η σηπτική δεξαμενή και τα φρεάτια έχουν σχεδιασθεί έως το 2043. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή όλων των μονάδων προβλέπει παντού εφεδρείες και έχει συντελεστή ασφαλείας 20% σε περιπτώσεις υπερφόρτισης, βλάβης ή συντήρησης σε ένα τμήμα της ΜΕΑΛ. Η εγκατάσταση αποτελείται από μία σηπτική δεξαμενή, ακολουθούμενη από ένα αμμόφιλτρο ανακυκλοφορίας, λεκάνες τεχνητών υγροβιότοπων επιφανειακής ροής και απολύμανση της εκροής με υποχλωριώδες νάτριο NaOCl [Χαιρέτη, 2005].

6. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΟΥΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία του αποβλήτου στους τεχνητούς υγροβιότοπους είναι όμοιες με αυτές που συμβαίνουν στα φυσικά οικοσυστήματα. Η αποδόμηση της οργανικής ύλης μπορεί να προκύψει είτε μέσω αερόβιων είτε μέσω αναερόβιων διεργασιών. Η ισορροπία μεταξύ των διεργασιών αυτών εξαρτάται από το οργανικό φορτίο καθώς και από την παροχή οξυγόνου. Το οργανικό φορτίο προέρχεται κυρίως από την εισροή του αποβλήτου. Η παροχή του οξυγόνου γίνεται μέσω της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και των αλγών που είναι προσκολλημένα στην επιφάνεια των αναδεδυμένων φυτών. Σαν συνέπεια των παραπάνω, οι διεργασίες στη στήλη του νερού είναι αερόβιες κατά τη διάρκεια της μέρας, ενώ γίνονται αναερόβιες τη νύχτα. Η παροχή οξυγόνου στα ιζήματα του υγροβιότοπου είναι αρκετά χαμηλή και έτσι οι διεργασίες εκεί είναι κυρίως αναερόβιες. Παρόλα αυτά από τις ρίζες των φυτών διαρρέεται κάποια ποσότητα οξυγόνου. Όπου η πυκνότητα των ριζών είναι υψηλή η διαρροή αυτή συνεισφέρει στην παροχή οξυγόνου και στα επιφανειακά στρώματα εδάφους. Σε σύγκριση όμως με το BOD του αποβλήτου η ροή οξυγόνου από τις ρίζες είναι μικρή και δεν είναι ο κύριος μηχανισμός αποδόμησης των φορτίων του άνθρακα. Η παραγωγή οξυγόνου από τη φυτική ριζόσφαιρα μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική σε άλλες διεργασίες όπως αυτή της νιτροποίησης. Πολλοί από τους μηχανισμούς επεξεργασίας είναι τουλάχιστον μερικώς διαδοχικοί. Για παράδειγμα σε απλές μικροβιακές καλλιέργειες, το μεγαλύτερο μέρος του BOD αποδομείται πριν ξεκινήσει η νιτροποίηση. Ένα από τα πλεονεκτήματα ενός πιο περίπλοκου συστήματος επεξεργασίας, όπως το σύστημα ενός τεχνητού υγροβιότοπου, είναι, ως ένα σημείο, ότι αυτοί οι διαδοχικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης μπορούν να συμπιεστούν στο χώρο και στο χρόνο [Σωτηροπούλου, 2010].

Παρακάτω ακολουθεί μια πιο λεπτομερής ανάλυση των μηχανισμών απομάκρυνσης κάθε ρυπαντή.

6.1 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ($P-PO_4$)

Ο φώσφορος στα φυσικά νερά και στα υγρά απόβλητα συναντάται κυρίως υπό τη μορφή φωσφορικών. Τα φωσφορικά ταξινομούνται σε ορθοφωσφορικά, συμπυκνωμένα (πυρο- μετα-, και πολύ-) φωσφορικά και οργανικά δεσμευμένα φωσφορικά και εμφανίζονται στο σύστημα τόσο σε σωματιδιακή μορφή, όσο και σε διαλυτή μορφή. Ο φώσφορος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία των οικοσυστημάτων. Συχνά αποτελεί το κυριότερο περιοριστικό θρεπτικό σε υδάτινα οικοσυστήματα. Έχει συνήθως την τάση να συσσωρεύεται στο ίζημα των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας και με αυτό τον τρόπο απομακρύνεται. Η επαύξηση των ανόργανων φωσφορικών και της βιομάζας στο ίζημα αποτελεί τον κυριότερο μηχανισμό απομάκρυνσης του φωσφόρου σε ένα σύστημα επεξεργασίας τεχνητού υγροβιότοπου επιφανειακής ροής [Kadlec, 1995].

Φυσικοί – Χημικοί διαχωρισμοί

Τα φωσφορικά που βρίσκονται υπό τη μορφή σωματιδίων μπορούν να εναποτεθούν στον πυθμένα του υγροβιότοπου μέσω της καθίζησης ή να παγιδευτούν στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης και να δεσμευτούν από το στρώμα των μικροοργανισμών. Τα διαλυμένα φωσφορικά μπορούν να δεσμευτούν από τα στρώματα των μικροοργανισμών που βρίσκονται στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης και στα κατάλοιπά της που επιπλέουν, ή που βρίσκονται στο ίζημα. Η ανταλλαγή των διαλυμένων φωσφορικών ανάμεσα στο νερό που είναι εγκλωβισμένο στους πόρους και στην υδάτινη στήλη διαμέσου της διάχυσης ή της ρόφησης / εκρόφησης αποτελεί την κύρια πηγή των διαλυμένων φωσφορικών.

Στο εγκλωβισμένο, στους πόρους, νερό του ιζήματος τα φωσφορικά αυτά μπορούν να κατακρημνιστούν ως αδιάλυτα σιδηρούχα, ασβεστούχα και αλουμινούχα φωσφορικά ή να προσροφηθούν σε σωματίδια ιλύος, οργανική τύρφη και σιδηρούχα και αλουμινούχα οξείδια και υδροξείδια. Τα φωσφορικά μπορούν να απελευθερωθούν από τα μεταλλικά σύμπλοκα ανάλογα με το οξειδοαναγωγικό δυναμικό του συστήματος. Επίσης, τα φωσφορικά απελευθερώνονται από τα σιδηρούχα και αλουμινούχα σύμπλοκα με υδρόλυση η οποία λαμβάνει χώρα κάτω από ανοξικές συνθήκες. Τα ροφημένα φωσφορικά στα σωματίδια ιλύος και ένυδρα οξείδια μπορούν επίσης να επιστρέψουν στην υδάτινη στήλη μέσω της ανταλλαγής ιόντων. Αν το pH του συστήματος μειωθεί, ως αποτέλεσμα του βιολογικού σχηματισμού οργανικών οξέων, νιτρικών ή θεικών, κάποια ποσότητα φωσφορικών μπορεί να εκλυθεί. Με την πάροδο του χρόνου ένα σημαντικό μέρος των φωσφορικών που έχουν απομακρυνθεί, δεσμεύεται στο ίζημα και με αυτό τον τρόπο απομακρύνεται από το σύστημα. Κατά την αρχική περίοδο προσαρμογής ενός συστήματος FWS μέχρις ότου αυτό σταθεροποιηθεί παρατηρείται μεγάλου βαθμού απομάκρυνση λόγω των αρχικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στον πυθμένα του υγροβιότοπου [Reed et al., 1995].

Βιολογικοί μετασχηματισμοί φωσφορικών

Τα διαλυμένα οργανικά φωσφορικά και τα μη διαλυμένα οργανικά και ανόργανα φωσφορικά δεν είναι συνήθως διαθέσιμα για τη βλάστηση μέχρις ότου μετασχηματιστούν σε διαλυτή ανόργανη μορφή. Οι μετασχηματισμοί αυτοί πραγματοποιούνται στη στήλη του νερού από αιωρούμενους μικροοργανισμούς, από τα στρώματα των μικροοργανισμών στην επιφάνεια των φυτών και στα ιζήματα. Η λήψη από τους μικροοργανισμούς αποτελεί ένα γρήγορο κυκλικό μηχανισμό.

Με το θάνατο και την αποσύνθεση της βλάστησης η μεγαλύτερη ποσότητα των φωσφορικών επιστρέφει πίσω στην υδάτινη στήλη, ενώ κάποια ποσότητα απομακρύνεται στα καινούρια σχηματιζόμενα ιζήματα. Η λήψη φωσφορικών από τα μακρόφυτα πραγματοποιείται μέσω του ριζικού συστήματος. Η λήψη πραγματοποιείται κατά την περίοδο ανάπτυξης της βλάστησης ενώ κάποια ποσότητα φωσφορικών αποδεσμεύεται κατά τη γήρανση των φυτών κατά το τέλος του καλοκαιριού ή το φθινόπωρο, συνοδευόμενη από την αποσύνθεση των φυτικών κατάλοιπων. Η μορφή των φωσφορικών, ο τύπος και η πυκνότητα της φυτικής βλάστησης, ο ρυθμός υδραυλικού φορτίου των φωσφορικών και οι κλιματικές συνθήκες καθορίζουν τον τύπο και την ποσότητα των φωσφορικών που απομακρύνονται από το σύστημα σε κάποια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η απομάκρυνση των φωσφορικών δια μέσου των φυτών λαμβάνει χώρα εποχιακά, καθώς κατά την περίοδο γήρανσης των φυτών, η μεγαλύτερη ποσότητα φωσφορικών που έχει απομακρυνθεί, ελευθερώνεται πίσω στην υδάτινη στήλη. Συνήθως σε υγροβιότοπους επεξεργασίας οι ευκαιρίες επαφής μεταξύ των υγρών αποβλήτων και του εδάφους είναι περιορισμένες, ενώ η απομάκρυνση της βλάστησης δεν πραγματοποιείται με ιδιαίτερα εύκολο τρόπο. Αποτελεσματική απομάκρυνση του φωσφόρου παρατηρείται ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των πρώτων 12- 24 μηνών. Όταν όλο το σύστημα φτάσει σε ένα επίπεδο ισορροπίας, η απομάκρυνση του φωσφόρου μειώνεται. Σε γενικές γραμμές με βάση διάφορες εκτιμήσεις και έρευνες, η ετήσια απομάκρυνση φωσφόρου από συστήματα FWS παρουσιάζεται περιορισμένη. Μια απομάκρυνση ολικού φωσφόρου (TP) 30 – 50% πραγματοποιείται συνήθως σε υγροβιότοπους με χρόνο συγκράτησης <10 μέρες. Σε κάποια συστήματα FWS με χρόνους παραμονής > 20 μέρες παρατηρήθηκαν εκροές < 4 mg/L με εισροή > 10 mg/L. Απαιτείται μεγάλη έκταση και επιπρόσθετη επεξεργασία για μεγάλου βαθμού απομάκρυνση του φωσφόρου σε τυπικά συστήματα υγροβιότοπων [Reed et al.,1995].

6.2 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΖΩΤΟΥ

Όλοι οι τύποι υγροβιότοπων παρουσιάζουν μεγάλη αποτελεσματικότητα όσον αφορά στην αφαίρεση αζώτου, η οποία επιτυγχάνεται με νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Γενικότερα η πρόσληψή του από τα φυτά αντιπροσωπεύει περίπου το 10% της συνολικής απομάκρυνσης του αζώτου. Η νιτροποίηση και απονιτροποίηση είναι μικροβιακές αντιδράσεις που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το χρόνο συγκράτησης. Οι οργανισμοί για την νιτροποίηση απαιτούν οξυγόνο και επαρκή επιφάνεια ώστε να αναπτυχθούν και γι' αυτό δεν είναι παρόντες σε μεγάλους αριθμούς, ιδιαίτερα όταν το οργανικό φορτίο είναι ιδιαίτερα υψηλό σε συστήματα σχετικά νέα με ατελή κάλυψη φυτικής βλάστησης [Kadlec, 1995].

Ο βαθμός αφαίρεσης του αζώτου είναι συνάρτηση της μορφής με την οποία το άζωτο εισέρχεται στο σύστημα (δηλαδή οργανικό άζωτο, ενώσεις αμμωνίου NH_4^+ , διαλυμένα αέρια αμμωνία NH_3 , νιτρικό NO_3 και νιτρώδες άζωτο NO_2), του pH, της θερμοκρασίας και του διαλυμένου οξυγόνου. Αυτές οι παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό [Reed et al., 1995]. Αν και η πρόσληψη αζώτου από τα φυτά λαμβάνει χώρα σε ένα σύστημα τεχνητών υγροβιότοπων, μόνο ένα μικρό μέρος του ολικού αζώτου μπορεί να απομακρυνθεί από το συγκεκριμένο μηχανισμό.

6.2.1 Αμμωνιακό Άζωτο ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)

Το αμμωνιακό άζωτο μπορεί να ακολουθεί διάφορους δίοδους απομάκρυνσης. Διαλυμένη αμμωνία μπορεί να απομακρυνθεί με εξάχνωσή της ως αέρια αμμωνία, κατ' ευθείαν στην ατμόσφαιρα. Το ποσοστό απομάκρυνσης με αυτή τη δίοδο είναι σχετικά μικρό (<10%). Το μεγαλύτερο ποσοστό εισερχόμενου και/ ή παραγόμενου αμμωνίου προσροφάται προσωρινά δια μέσου αντιδράσεων εναλλαγής ιόντων σε εδαφικά οργανικά και αργιλικά σωματίδια. Το προσροφημένο αμμώνιο είναι διαθέσιμο για πρόσληψή του από τα φυτά και μικροοργανισμούς ή για μετατροπή του σε νιτρικό άζωτο δια μέσου της βιολογικής νιτροποίησης. Επειδή το δυναμικό προσρόφησης του αμμωνίου σε φυσικά συστήματα είναι πεπερασμένο είναι απαραίτητη η νιτροποίησή του για περαιτέρω απελευθέρωσή του και αναγέννηση νέων περιοχών προσρόφησης [Reed et al., 1995].

6.2.2 Νιτρικό Άζωτο ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)

Το νιτρικό άζωτο φέρει αρνητικό φορτίο, δε συγκρατείται με αντιδράσεις εναλλαγής και συνήθως παραμένει σε διάλυση και μεταφέρεται με τη ροή του νερού. Το νιτρικό άζωτο προσλαμβάνεται από τα φυτά, αλλά η απομάκρυνσή του με αυτή τη διεργασία συμβαίνει μόνο στην περιοχή ανάπτυξης των ριζών και σε περιόδους ενεργούς φυτικής βλάστησης. Η κύρια απομάκρυνση από το σύστημα επιτυγχάνεται με τη συγκομιδή και απομάκρυνση από το σύστημα σημαντικού ποσοστού της παραγόμενης φυτικής βλάστησης. Αντίθετα, όταν η φυτική βλάστηση παραμένει στο σύστημα, το άζωτο που περιέχεται σε αυτήν επανεισάγεται στο σύστημα κυρίως ως οργανικό άζωτο [Reed et al., 1995].

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Οι αναλύσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο σύστημα αφορούσαν την αποδοτικότητα του συστήματος, που σχετιζόταν με την απομάκρυνση των παραμέτρων COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, PO_4^{3-} σε διάφορες αναλογίες C/N του τροφοδοτούμενου αποβλήτου

7.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Ο πιλοτικός υδροβιότοπος επιφανειακής ροής που χρησιμοποιήθηκε, ήταν κατασκευασμένος από μια ζαρντινιέρα διαστάσεων X, Y Z cm, πληρωμένη με χαλίκι τριών διαφορετικών μεγεθών. Στον συγκεκριμένο υδροβιότοπο έγινε η φύτευση των δυο αλόφυτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος. Αρχικά το νερό που χρησιμοποιήθηκε ήταν πόσιμο και με την πάροδο του χρόνου γινόταν σταδιακή ανάμειξη του με θαλασσινό νερό ως το σημείο που χρησιμοποιήθηκε μόνο θαλασσινό νερό, ώστε να προσαρμοστεί σταδιακά στην αυξημένη αλατότητα. Μέσω μιας κατάλληλα τοποθετημένης αντλίας και δύο μεγάλων βαρελιών είχαμε την συνεχή τροφοδοσία του συστήματος μας με θαλασσινό νερό εμπλουτισμένο με πηγές άνθρακα, ανόργανου αζώτου και φωσφόρου.



Συνολική εικόνα του συστήματος



Τροφοδοσία στην είσοδο του υγροβιότοπου



Συνολική εικόνα του συστήματος

7.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Αρχικά στην δεξαμενή τροφοδοσίας του συστήματος προστέθηκε πόσιμο νερό και στην συνέχεια για περίοδο 1 μήνα γινόταν σταδιακή ανάμειξη του με θαλασσινό νερό για την αποφυγή του σοκ της καλλιέργειας, έως ότου να κυκλοφορεί μόνο θαλασσινό νερό στο σύστημα. Η διαδικασία αυτή ξεκίνησε 1 μήνα πριν την έναρξη των πειραμάτων.

Μετά την πάροδο του 1 μήνα και καθώς υπήρχε μόνο θαλασσινό νερό στο σύστημα, καθημερινά πραγματοποιούνταν προσθήκη συνθετικού αποβλήτου, το οποίο προσομοίωνε την έξοδο των υδατοκαλλιεργειών, ώστε να αναπτυχθεί η απαιτούμενη μικροβιακή κοινότητα. Το συνθετικό απόβλητο που χρησιμοποιήθηκε περιείχε ζάχαρη εμπορίου ως τη πηγή άνθρακα, θειικό αμμώνιο $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ και νιτρικό νάτριο (NaNO_3) ως ανόργανες πηγές αζώτου, διβασικό φωσφορικό κάλιο (K_2HPO_4) και δισόξινο φωσφορικό κάλιο (KH_2PO_4) ως ανόργανες πηγές φωσφόρου.

Η λειτουργία του αντιδραστήρα εξετάστηκε χρησιμοποιώντας 2 τύπους συνθετικού αποβλήτου που διέφεραν μεταξύ τους στην οργανική τους φόρτιση δηλαδή ένα χαμηλής οργανικής φόρτισης με $\text{COD}=100 \text{ mg/l}$ και ένα μεσαίας οργανικής φόρτισης με $\text{COD}=200 \text{ mg/l}$.

Όσον αφορά στα αμμωνιακά είχαμε δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ($\text{NH}_4^+ -\text{N}$), μια 50 mg/l και μία 100 mg/l , και στα νιτρικά μια σταθερή 10 mg/l καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Τέλος η συγκέντρωση των PO_4^{3-} διατηρήθηκε σταθερή στα 5 mg/l . Τα δείγματα συλλέγονταν 1 φορά την ημέρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα, από την είσοδο και την έξοδο του συστήματος. Μετά τη συλλογή τους τοποθετούνταν απευθείας σε ψυγείο όπου παρέμεναν μέχρι και την στιγμή της επεξεργασίας τους. Η ανάλυση που έγινε στα δείγματα ήταν μετά από διήθησή τους από φίλτρο $0,45 \mu\text{m}$. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο περιόδους Ιούνιο και Ιούλιο και Σεπτέμβριο μέχρι Νοέμβριο του έτους 2013. Οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν στα δείγματα της εισόδου και της εξόδου είναι οι εξής: χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand –COD), αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4^+ -\text{N}$), νιτρικό άζωτο ($\text{NO}_3 -\text{N}$), και φώσφορος φωσφορικών ($\text{PO}_4 -\text{P}$).

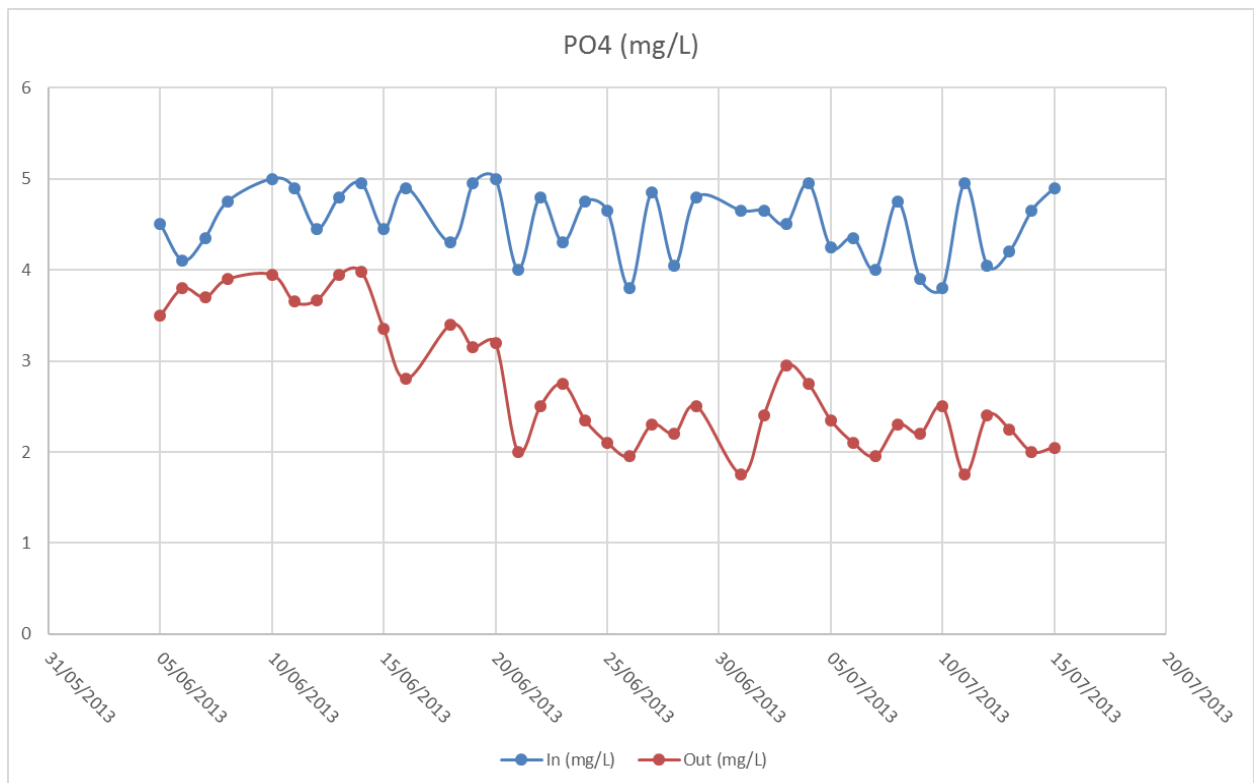
7.3 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

Ο προσδιορισμός των φωσφορικών έγινε με τη μέθοδο PhosVer 3 (8048) της Hach με εύρος συγκεντρώσεων από 0,02 έως 2,50 mg/l PO₄³⁻.

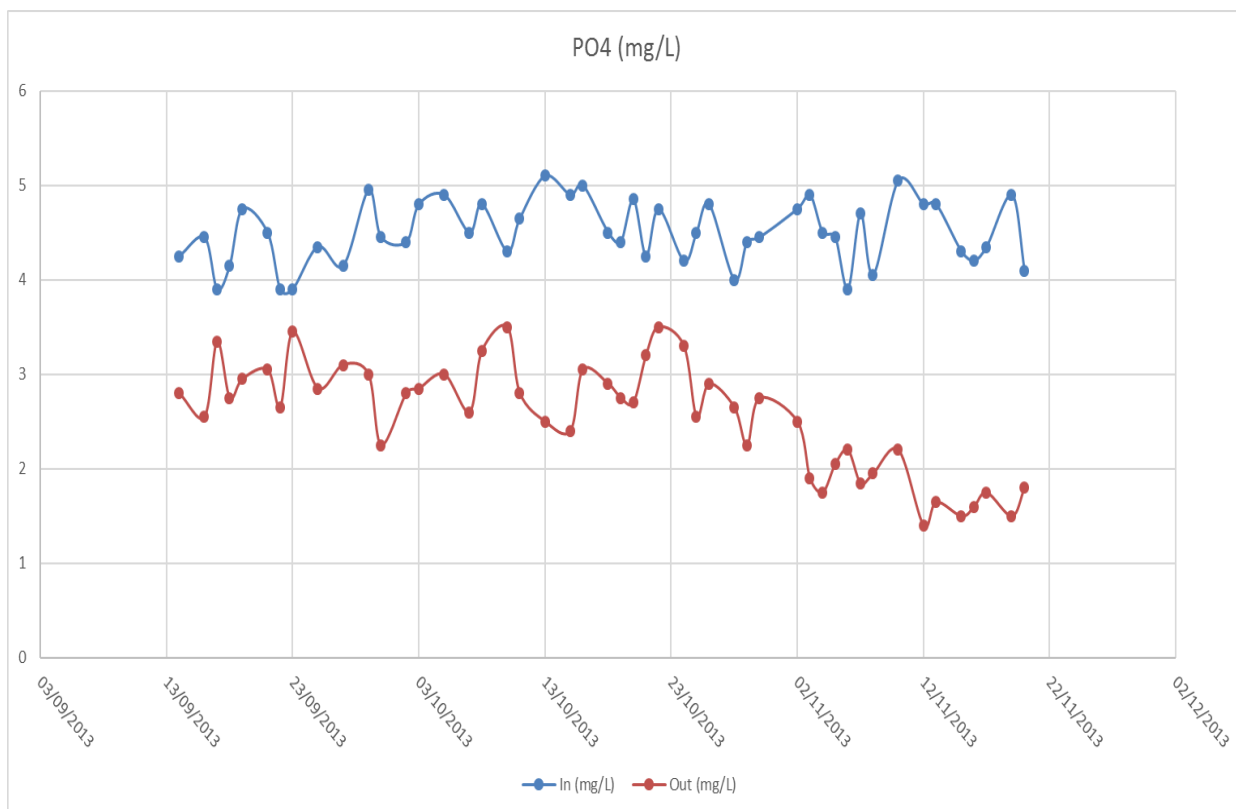
Αρχικά το δείγμα διηθείται από μεμβράνη 0,45 µm (Sartorius). Ένα μικρό μπουκαλάκι των 25 ml γεμίζεται με 10 ml δείγμα (ή αραιωμένο με απιονισμένο νερό) και προστίθεται σε αυτό το περιεχόμενο ενός PhosVer 3 phosphate Powder Pillow. Το μπουκάλι καπακώνεται και αναδεύεται για 30 δευτερόλεπτα, ώστε να αναμιχθεί το περιεχόμενό του και αφήνεται για άλλα 2 λεπτά να γίνει η αντίδραση.

Η συγκέντρωση P-PO₄ μετράται στο φασματοφωτόμετρο της Hach DR/2800. Σαν τυφλό δείγμα χρησιμοποιήθηκε επίσης απιονισμένο νερό.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των δειγμάτων μας φαίνονται στα παρακάτω δύο διαγράμματα. Επίσης πρέπει να ειπωθεί ότι κατά το πρώτο σκέλος των πειραμάτων το COD ήταν 100 mg/l, ενώ κατά το δεύτερο 200 mg/l.



Σχήμα 7.3.1 Απομάκρυνση Φωσφορικών



Σχήμα 7.3.2 Απομάκρυνση Φωσφορικών

Παρατηρήθηκε ότι κατά την πρώτη περίοδο των μετρήσεων έχοντας μια είσοδο μέσου όρου 4,5-5 mg/L η απομάκρυνση ήταν της τάξης του προς το τέλος του πρώτου σκέλους των μετρήσεων έφτασε στα 2mg/L ενώ προς το τέλος του δεύτερου σκέλους έφτασε κάτω από τα 2mg/L. (βλ. Σχ. 7.3.1, 7.3.2)

Σίγουρα ρόλο στην μεγαλύτερη απομάκρυνση των φωσφορικών έπαιξε και η αύξηση του διαθέσιμου οργανικού άνθρακα στο απόβλητο.

Κατά την δεύτερη περίοδο των πειραμάτων λοιπόν παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη μείωση στην συγκέντρωση των φωσφορικών στην έξοδο. Μπορεί να ειπωθεί ότι η απομάκρυνση των φωσφορικών από το σύστημά, έγινε σε αρκετά ικανοποιητικό επίπεδο.

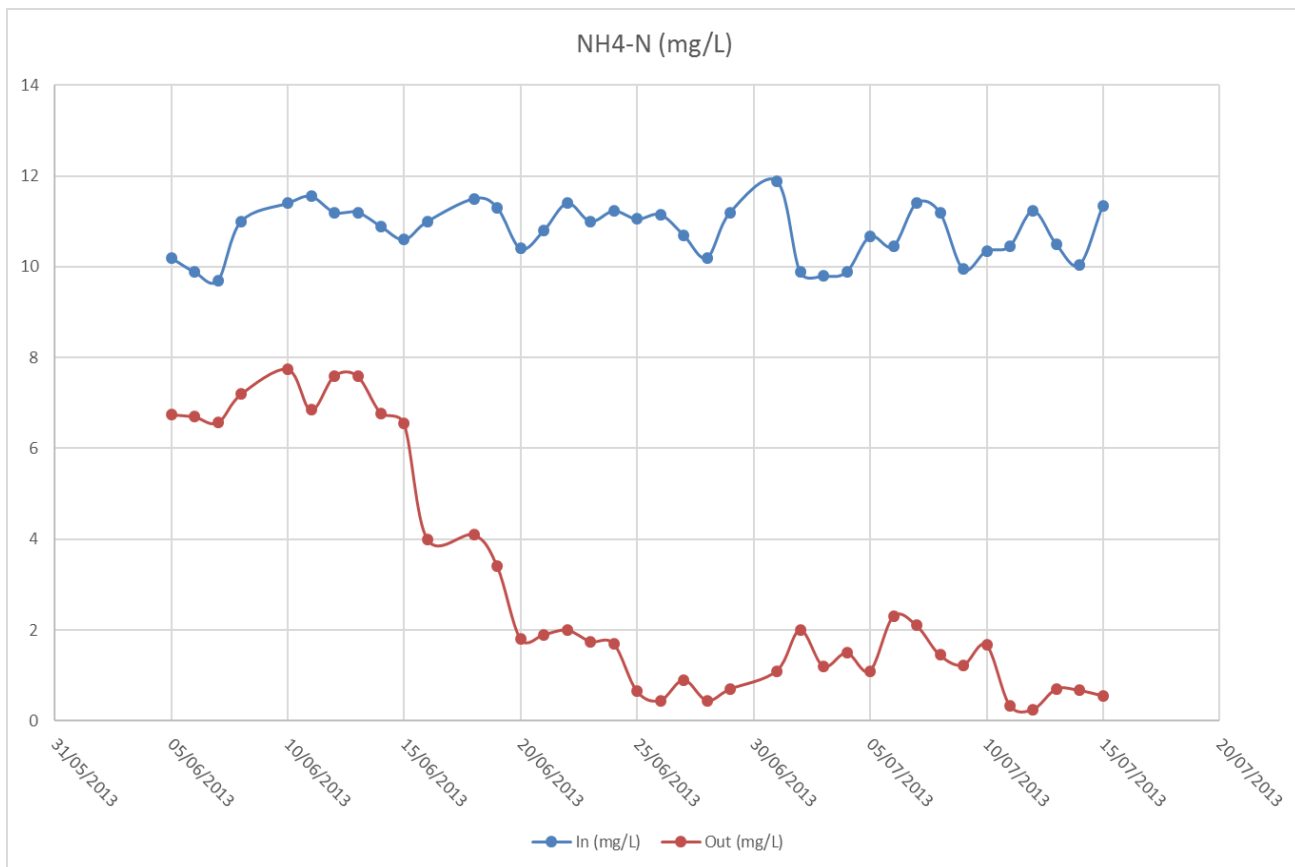
7.4 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΜΜΩΝΙΑΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NH₄-N)

Η μέτρηση του NH₄⁺-N πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Nessler της Hach με εύρος συγκεντρώσεων από 0,02- 2,50 mg/l NH₄⁺-N. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ακόλουθη:

1. Γεμίζεται ένας διαβαθμισμένος κύλινδρος των 25 ml με 10 ml (2 ml δείγματος και 8 ml απιονισμένου νερού) δείγμα το οποίο έχει διηθηθεί από μεμβράνη 0,45 μm
2. Προστίθενται 10 σταγόνες mineral stabilizer και το μείγμα ανακινείται.
3. Προστίθενται 1 σταγόνες Polyvinyl Alcohol και το μείγμα ανακινείται.
4. Προστίθεται 0,4 ml αντιδραστήριο Nessler.
5. Μετά από 1 λεπτό αντίδρασης η συγκέντρωση NH₄⁺-N μετράται στο φασματοφωτόμετρο της Hach DR/2800.
6. Τέλος έχουμε 2 τυφλά δείγματα με απιονισμένο νερό όπου επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία και τα χρησιμοποιούμε στον τύπο υπολογισμού.

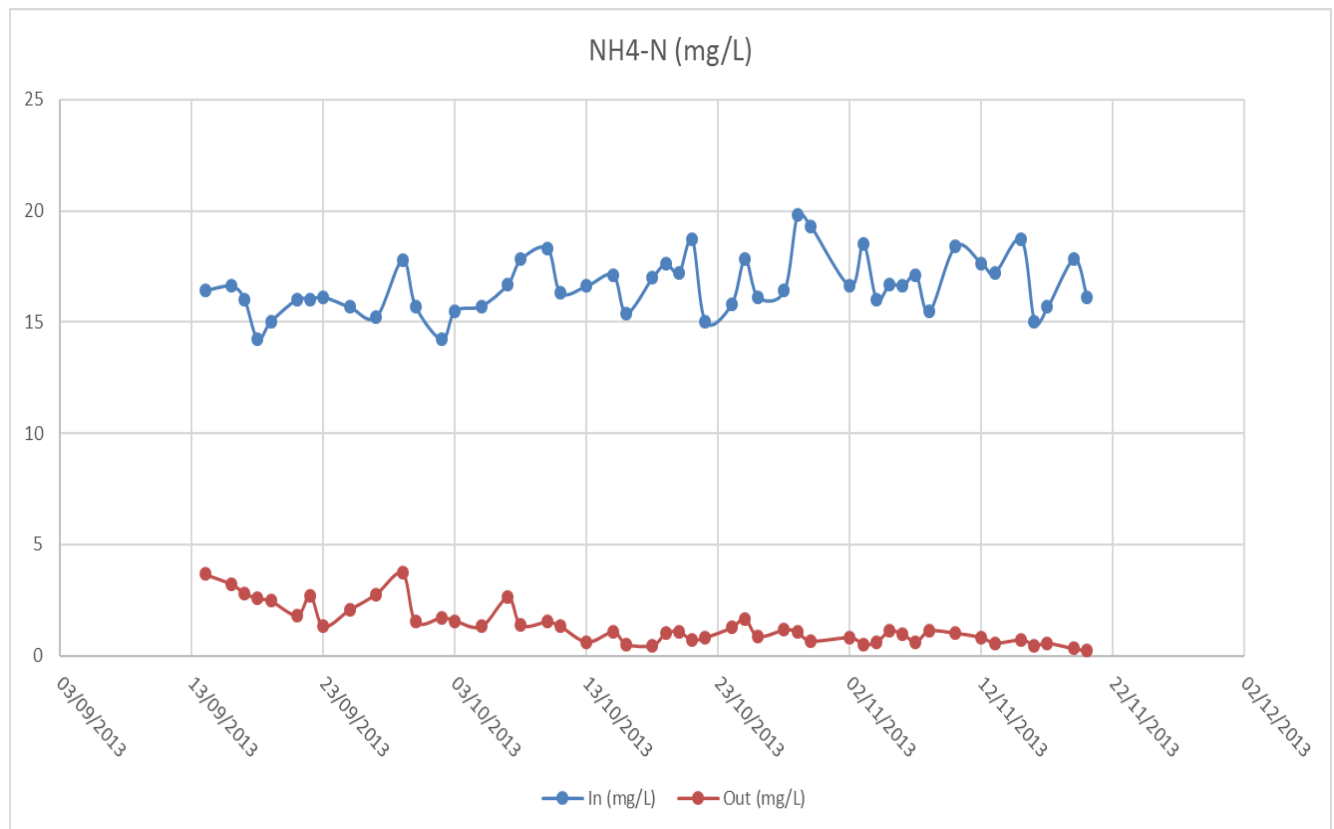
Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν μετά από την ανάλυση των δειγμάτων μας φαίνονται στα παρακάτω δύο διαγράμματα.

Απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου για συγκέντρωση $\text{NH}_4 + \text{-N}$ 50 mg/L



Σχήμα 7.4.1 Απομάκρυνση Αμμωνιακού Αζώτου

Απομάκρυνση αμμωνιακού αζώτου για συγκέντρωση $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 100 mg/L

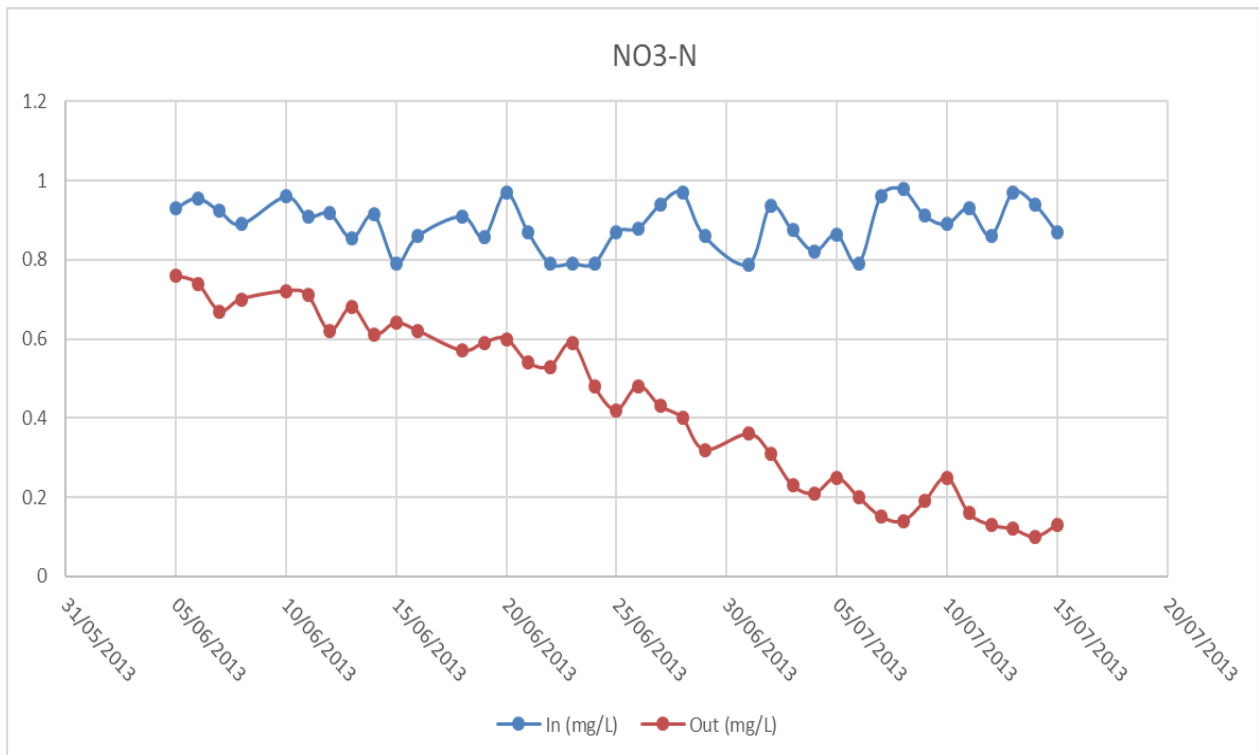


Σχήμα 7.4.2 Απομάκρυνση Αμμωνιακού Αζώτου

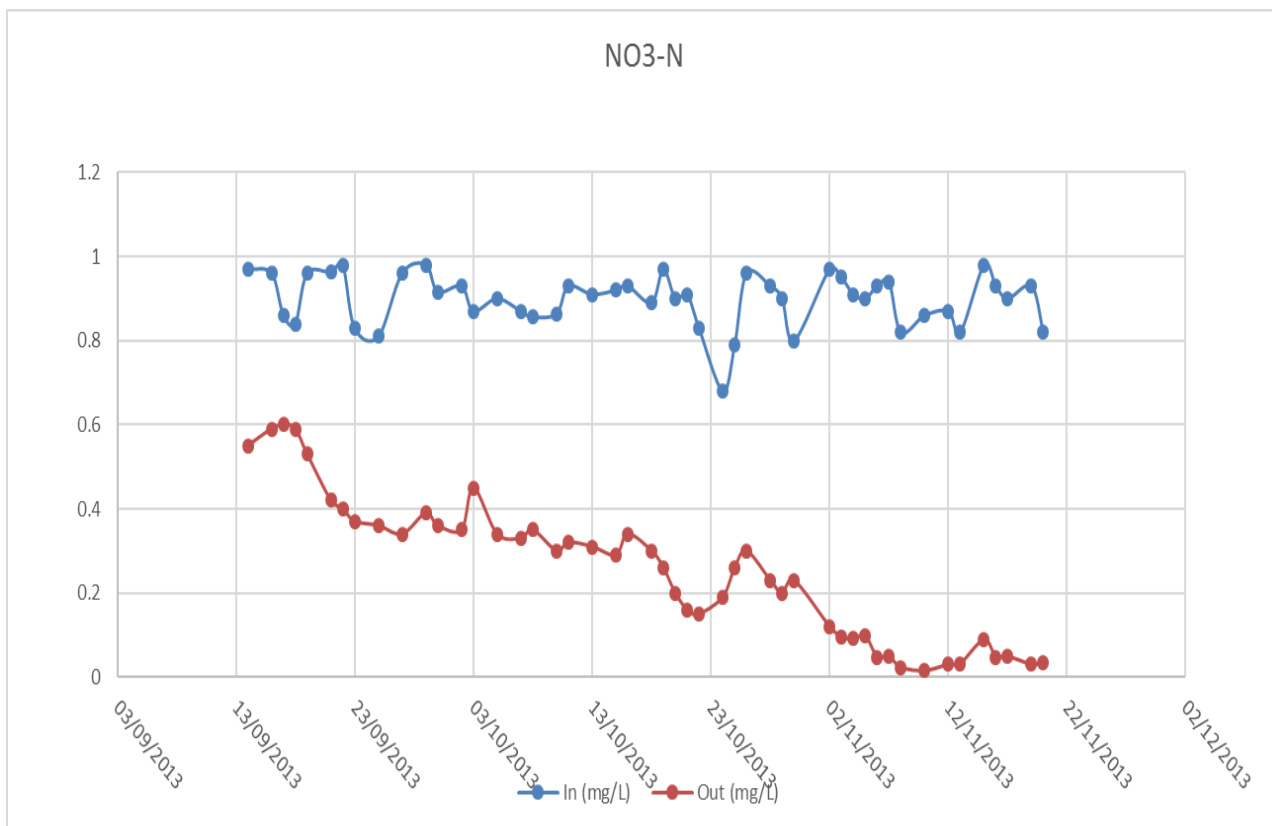
Κατά την πρώτη περίοδο των μετρήσεων μας και ενώ η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου ήταν 50 mg/L παρατηρήθηκε η σταδιακή μείωση του μέχρι και τις τάξεις των 0,5 mg/L. Στο δεύτερο σκέλος του πειράματος η ποσότητα του αμμωνιακού αζώτου διπλασιάστηκε και παρόλα αυτά τα αποτελέσματα στην έξοδο του συστήματος έδειξαν συγκεντρώσεις της τάξης των 4 mg/L ενώ προς το τέλος των πειραμάτων η απομάκρυνση ήταν πλήρης. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ρίζες των συγκεκριμένων βούρλων κάνουν πλήρη κατακράτηση του αμμωνιακού αζώτου μετά το πέρας μερικών εβδομάδων.

7.5 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΝΙΤΡΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ($\text{NO}_3\text{-N}$)

Το νιτρικό άζωτο $\text{NO}_3\text{-N}$ προσδιορίστηκε με έτοιμα αντιδραστήρια της Hach, στα οποία προστίθετο κάθε φορά το προς ανάλυση δείγμα έχοντας την κατάλληλη αραίωση με απιονισμένο νερό. Στην συνέχεια γίνεται ανάδευση του δείγματος για 1 λεπτό και έπειτα ακινητοποίηση του για 5 λεπτά, πριν το δείγμα εισέλθει στο φασματοφωτόμετρο για την μέτρηση της απορρόφησης του. Ο μηδενισμός του φασματοφωτόμετρου έγινε με την χρήση απιονισμένου νερού σαν τυφλό δείγμα. Τα συγκεκριμένα αντιδραστήρια έχουν όριο ανίχνευσης 0.23-13.50 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$. Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις μας φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 7.5.1 Απομάκρυνση Νιτρικού Αζώτου



Σχήμα 7.5.2 Απομάκρυνση Νιτρικού Αζώτου

Η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου κρατήθηκε σταθερή και για τις δύο περιόδους του πειραμάτος. Στην πρώτη περίοδο η απομάκρυνση ξεκίνησε από τα 0,8 mg/L και σταδιακά έφτασε μέχρι τα 0,18 mg/L σε διάστημα περίπου δύο εβδομάδων. Κατά την δεύτερη περίοδο είχαμε απομάκρυνση σχεδόν 0,4 mg/L κατά τις πρώτες μετρήσεις και έφτασε όπως και στην πρώτη περίοδο σχεδόν στο 90% μετά το πέρας των δυο εβδομάδων, οδηγώντας στο συμπέρασμα όπως και με την περίπτωση του αμμωνιακού αζώτου ότι οι ρίζες του συστήματος κάνουν σχεδόν πλήρη κατακράτηση του νιτρικού αζώτου. Οπότε θα μπορούσε να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο φυτό είναι ιδανικό για την περίπτωση της απομάκρυνσης του αζώτου.

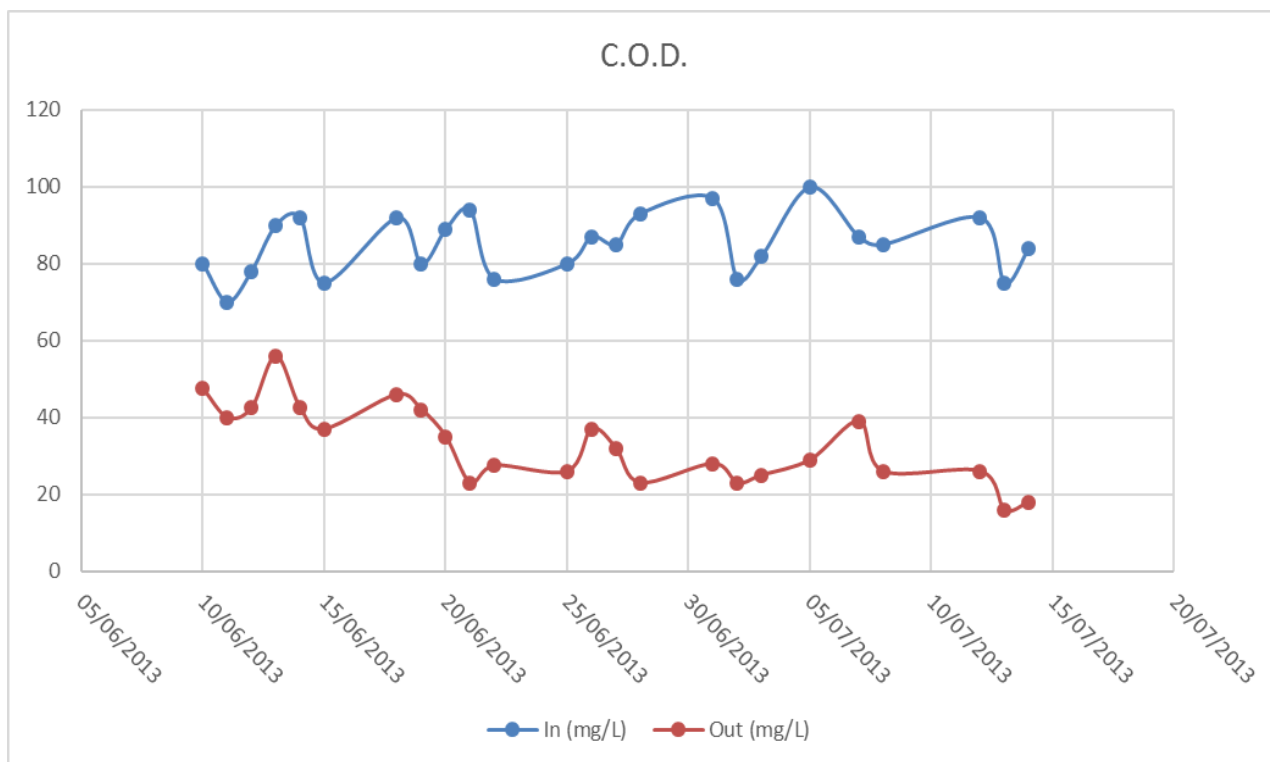
7.6 ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ COD

Ο προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου έγινε σύμφωνα με τους Vyrides & Stuckey 2009. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η παρακάτω:

1. Προετοιμασία διαλύματος χώνευσης: Σε 500 ml διαλύματος προστίθενται: 3 g διχρωμικού καλίου ($K_2Cr_2O_7$), τα οποία προηγουμένως έχουν ξηρανθεί για 2h στους 1030C, 167 ml συμπυκνωμένου θειικού οξέος (H_2SO_4) και 33.3 g θειικού υδραργύρου (Hg_2SO_4). Το διάλυμα αφήνεται να έλθει σε θερμοκρασία δωματίου και αραιώνεται έως τα 1000 ml.
2. Δημιουργία καμπύλης βαθμονόμησης με όξινο φθαλικό κάλιο (Potassium hydrogen phthalate - KHP). 425 mg KHP διαλύονται σε θαλασσινό νερό σε τελικό όγκο 1000 ml αφού έχουν ξηρανθεί στους 1100C, ώστε το διάλυμα που προκύπτει να έχει θεωρητικό COD ίσο με 500 mg/l. Από το διάλυμα αυτό ετοιμάζονται οι ακόλουθες συγκεντρώσεις: 20, 50, 90, 140, 190 και 230 mg/l, για την δημιουργία της καμπύλης βαθμονόμησης.
3. Σε 3 ml δείγματος προστίθενται 1,1 g θειικού υδραργύρου (20:1 H_2SO_4 :Cl-1) και το μείγμα αναδεύεται με σκοπό την καταβύθιση των χλωριόντων.
4. Μετά την καταβύθιση του χλωριούχου υδραργύρου ($HgCl_2$) σε γιάλινα φιαλίδια προστίθενται: 2 ml από το υπερκείμενο δείγμα, 1,2 ml διαλύματος χώνευσης και 2,8 ml αντιδραστήριο θειικού οξέος που περιέχει θειικό άργυρο (6,6 g Ag_2SO_4 /1000 ml H_2SO_4). Τα φιαλίδια αναδεύονται και τοποθετούνται σε ειδικό φούρνο στους 1500C για 2h.

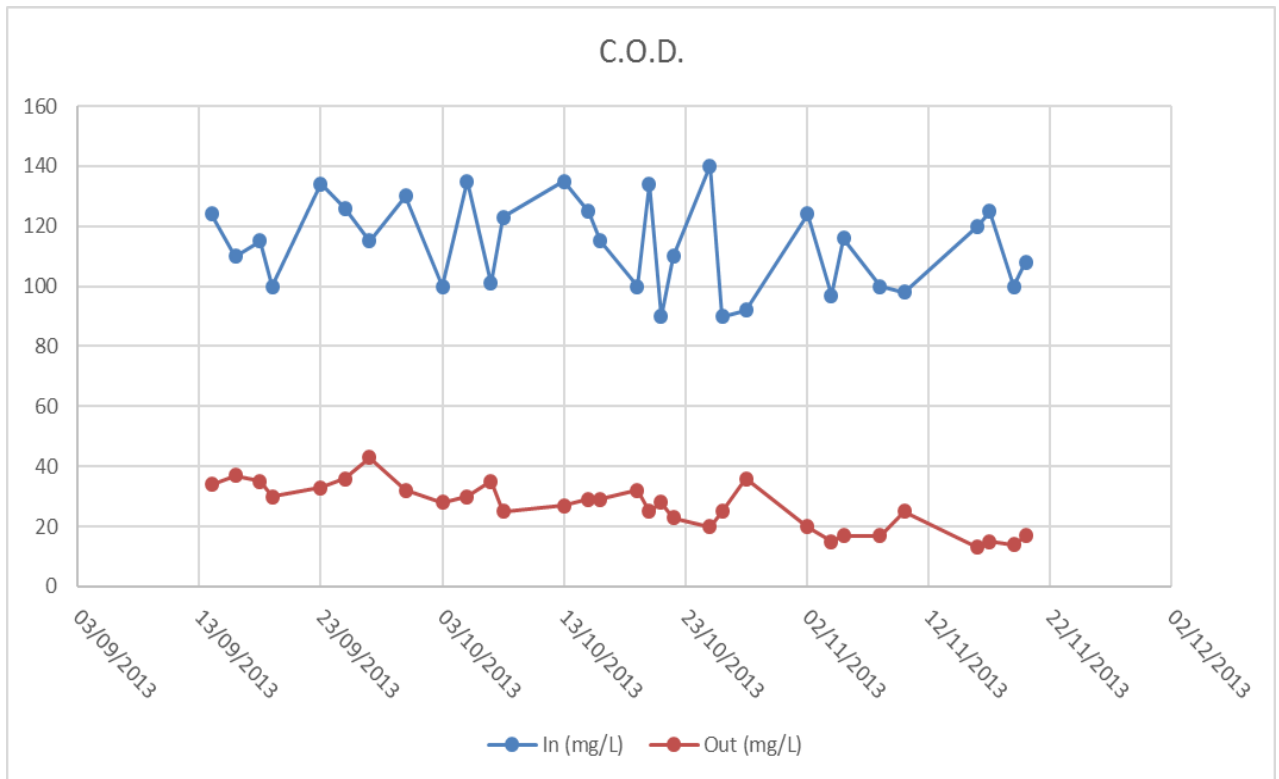
Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις μας φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Απομάκρυνση άνθρακα με συγκέντρωση COD = 100 mg/l



Σχήμα 7.6.1 Απομάκρυνση COD

Απομάκρυνση άνθρακα για συγκέντρωση COD = 200 mg/l



Σχήμα 7.6.2 Απομάκρυνση COD

Κατά την πρώτη περίοδο των μετρήσεων και καθώς η συγκέντρωση COD ήταν 100 mg/L, η απομάκρυνση του COD ξεκίνησε από 50 mg/L και έφτασε μέχρι τα 20 mg/L στο τέλος της πρώτης φάσης, ενώ κατά την δεύτερη φάση και ενώ διπλασιάστηκε η ποσότητα του COD στην είσοδο στο τέλος των μετρήσεων η απομάκρυνση έφτασε να είναι κάτω από τα επίπεδα των 20 mg/L. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ήταν αρκετά ικανοποιητικά τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις αναλύσεις σχετικά με την κατακράτηση του COD από τις ρίζες των φυτών που χρησιμοποιήθηκαν.

7.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υψηλές απομακρύνσεις COD και $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ (100%) επιτεύχθηκαν σε υδραυλικό χρόνο παραμονής μόνο λίγων ωρών. Η αναλογία C/N δεν είχε μεγάλη επίδραση στην απομάκρυνση του $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ (τουλάχιστον στις μικρές αρχικές συγκεντρώσεις $\text{NH}_4^+ -\text{N}$). Το ίδιο όμως δεν συνέβαινε και για την απομάκρυνση $\text{NO}_3^- -\text{N}$ και PO_4^{3-} , η οποία παρουσίαζε ισχυρή εξάρτηση από το COD. Τα αποτελέσματα της έρευνας είναι ενθαρρυντικά για την εφαρμογή του συγκεκριμένου συστήματος στην επεξεργασία ενός αποβλήτου μεγάλης αλατότητας, με υψηλές συγκεντρώσεις σε άζωτο και φώσφορο. Σίγουρα πρέπει να ελεγχθούν και διαφορετικές συγκεντρώσεις των οργανικών ρυπαντών και σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα με μεγάλη επαναληψιμότητα των μετρήσεων ώστε να βγουν ακόμα πιο ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα σχετικά με την καταλληλότητα των συγκεκριμένων υδροβιότοπων στην επεξεργασία ρυπασμένων λυμάτων, καθώς τα συστήματα αυτά είναι ακόμη σε πιλοτικά στάδια.

8. ΠΗΓΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

8.1 Ελληνική

1. Αγγελάκης Α. και Tchobanoglous G. *‘Υγρά Απόβλητα -Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επαναχρησιμοποίηση και διάθεση Εκροών’*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο [1995].
2. Ακράτος, Χ.Σ., *‘Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Σχεδιασμού Τεχνητών Υδροβιότοπων Υπόγειας Ροής με Χρήση Πιλοτικών Μονάδων’*, Διδακτορική Διατριβή, Εκδόσεις Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης, [Θράκη 2006].
3. Αμπαδίνη Ελένη, *‘Φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων’*, Διπλωματική Εργασία, Κοζάνη [2009].
4. Βαρκάς Αργύριος, *‘Κατασκευή και λειτουργία συστημάτων τεχνητών υδροβιότοπων κατακόρυφης ροής πιλοτικής κλίμακας για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων’*, μεταπτυχιακή διατριβή Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μητυλίνη, [2007].
5. Δανηλίδου Ελένη, *‘Πειραματική Καλλιέργεια Φυτών με Στόχο Εφαρμογές για την προστασία του περιβάλλοντος’*, Πανεπιστήμιο Πατρών [2010].
6. Ζαμπετάκης, Λ., Μάνιος, Θ., Καρατζάς, Γ. *‘Καινοτομικές μεθόδους εξυγίανσης ρυπασμένων εδαφών και υπογείων υδάτων. Η τεχνολογία της φυτοεξυγίανσης’*, [2005]

7. Ζουραράκη, Ε., ‘*Σχεδιασμός και Λειτουργία Τεχνητών Υγροβιότοπων Επεξεργασίας Λυμάτων*’, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εκδόσεις Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης, [2002].
8. Καραμούζης Ν. Διαμαντής, ‘*Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων (Τεύχος Ι: Τεχνητοί Υγρότοποι)*’, Εκδόσεις Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, [2003].
9. Σοφιανός, Σπυρίδων, ‘*Έλεγχος απολύμανσης νερού και λυμάτων με χρήση φωτοκαταλυσης και Φωτοηλεκτροκαταλυσης*’, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, [2011].
10. Σωτηροπούλου, Αγαθονίκη, ‘*Συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων*’, Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Δυτ. Μακεδονίας, Κοζάνη, [2010].
11. Τσιχριντζής, Β.Α., ‘*Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία , Τόμος Ι (Διαχείριση Απορροής, Ρύπων και Φερτών) και Τόμος ΙΙ (Φυσικές Μέθοδοι Επεξεργασίας Αποβλήτων - Πρόληψη Ρύπανσης)*’, Εκδόσεις Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης, [2000].
12. Χαιρέτη, Ο., ‘*Επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων με τεχνητό υγροβιότοπο και δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των εκροών για την εγκατάσταση της Επισκοπής*’, Πτυχιακή Εργασία Ηράκλειο Κρήτης [2005].
13. Χατάς, Ι., ‘*Ριζοδιάσπαση Δισφαινόλης Α (BPA) από αλόφυτα*’, Πτυχιακή Εργασία Πολυτεχνείο Κρήτης [2013].

8.2 *Ξένη*

1. EPA (US), ‘*Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment*’, Design Manual, Environmental Protection Agency, [USA 2002].
2. Alexander, M. ‘*Biodegradation and Bioremediation*’, Academic Press Inc. [1994]
3. Brown K., Brooks K., ‘*Bushland Weeds: A practical guide to their management*’, Environmental Weeds Action Action Network, Greenwood, WA, [2002].
4. Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P. Y., and Schroeder, E. D. ‘*Bioremediation principles*’, McGraw-Hill), [1998]
5. Hartman W. J., ‘*An evaluation of land treatment of municipal wastewater and physical sitting facility installations*’, Washington D.C., [1975]
6. Kadlec R., and Knight R., ‘*Treatment Wetlands*’, Lewis Publishers, New York, [1995].
7. Metcalf and Eddy, ‘*Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, (Third Edition)*’, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, [1991].
8. Reed S.C., and Crites R.W., ‘*Handbook of Land Treatment Systems for Industrial and Municipal Wastes*’, Noyes Publications, Park Ridge, [1984].

8.3 Επιστημονικά άρθρα

1. Ayaz, S.C. and Akca, L., ***‘Treatment of Wastewater by Natural Systems’***, Environmental International, Vol. 26, pp.189-195.
Dialynas, G., Kefalakis, N., Dialynas, M. and Angelakis, A., 2002, ***‘Performance of an Innovative FWS Constructed Wetland in Crete, Greece’***, Water Science and Technology, Vol. 46 (4-5), [2001].
2. Anastasiadis, M., Zdragas, A., Katsavouni, S., Eskridge, K., Takavakoglou, V. And Zalidis, G., ***‘Municipal Wastewater Disinfection Using a Constructed Wetland’***, 4th Management Committee Meeting of Cost Action 837, 18-19 May, Larnaca, Cyprus, [2004].
3. Bendoricchio, G., Cin, L.D. and Persson J., ***‘Guidelines for Free Water Surface Wetland Design’***, EcoSys Bd., Vol. 8, [2000].
4. Brix, H., ***‘Do macrophytes play a role in constructed wetlands?’*** Wat. Sci.Tech.Vol. 35, pp. 11-17, 1997.
5. Cunningham, S. D., Anderson, T. A., Schwab, A. P., and Hsu, F. C., ***‘Phytoremediation of soil contaminated with organic pollutants’***. Advances in Agronomy ,Vol. 56, pp. 55- 114, [1996].
6. Haberl, R., Perfeler, R. and Mayer, H., ***‘Connstructed Wetlands in Europe’***, Water Science and Technology, Vol. 32, [1995].
7. Hammer, D.A., ***‘Designing constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint source pollution’***, Ecological Engineering, Vol. 1, [1989].

8. Mitsch, W.J., ‘***Landscape Design and the Role of Created, Restored, and Natural Riparian Wetlands in Controlling Nonpoint Source Pollution***’, Ecological Engineering, Vol. 1, [1992].
9. Prescott, K.L. and Tsanis, I.K. ‘***Mass balance modeling and wetland restoration***’, Ecological Engineering, Vol. 9, pp. 1-18. Langergraber, G., Haberl, R., Laber, J. and Pressl, A., 2003, “Evaluation of Substrate Clogging Processes in Vertical Flow Constructed Wetlands”, Water Science Technology, Vol. 48 (5), [1997].
10. Raskin, I., Balshaw, K., Lowe, D. F., Oubre, C. L., and Ward, C. H. ‘***Innovative bioremediation technologies: The DOD/AATDE contribution. In Global Environmental Biotechnology***’, D. L. Wise, ed. Kluwer Academic Publishers), pp. 365-376, [1998].
11. Salt, D. E., Smith, R. D., and Raskin, I., ‘***Phytoremediation***’. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol., Vol. 49, pp. 643-668, [1998].
12. Shannon, M. J. R., and Uterman, R., ‘***Evaluating bioremediation: Distinguishing fact from fiction***’. Ann. Rev. Microbiology, Vol. 47, pp. 715-738, [1993].
13. Oosten M.J., Maggio A., ‘***functional biology of halophytes in the phytoremediation of heavy metal contaminated soils***’
14. Walton, B. T., Guthrie, E. A., and Hoylman, A. M., ‘***Toxicant degradation in the rizosphere. In Bioremediation through rhizosphere technology***’, T. A. Anderson and J. R. Coats, eds.: (ACS Symposium Series), pp. 11-26, 1994

8.4 Σελίδες στο Διαδύκτιο

1. www.wastreat.gr
2. www.ramsar.org
3. www.un.org
4. www.tankonyvtar.hu
5. www.uvm.edu
6. www.fujitaresearch.com