



**Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σύζευξη τεχνολογιών τεχνητών υδροβιότοπων και
νανοφυσολιδων αέρα για την επεξεργασία αστικών
λυμάτων**

Φώτιος Καψής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθ. Καλογεράκης Νικόλαος (Επιβλέπων)

Επικ. Καθ. Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Δρ. Μανουσάκη Ελένη

Φεβρουάριος 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Καλογεράκη για την τιμή που μου έκανε να μου εμπιστευθεί το θέμα της εργασίας και για τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, καθώς επίσης και τον κ. Νικόλαο Παρανυχιανάκη που δέχτηκε να είναι στην εξεταστική επιτροπή και να αξιολογήσει την παρούσα εργασία.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Ελένη Μανουσάκη για τη βοήθεια της, τις συμβουλές της και κυρίως για την υπομονή και επιμονή που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας, καθώς επίσης και όλα τα μέλη του εργαστηρίου Βιοχημικής Μηχανικής και Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης για την άψογη συνεργασία όλον αυτό τον καιρό.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με στόχο την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της σύζευξης 2 υπάρχοντων τεχνολογιών, οι οποίες ξεχωριστά χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία λυμάτων, των τεχνητών υγροβιοτόπων και των νανοφυσολιδων αέρα, ως προς την επεξεργασία αστικών λυμάτων και πιο συγκεκριμένα τη μείωση του οργανικού φορτίου. Επίσης, ερευνήθηκε και η συμβολή των νανοφυσολιδων αέρα στη φυσιολογία και ανάπτυξη των φυτών.

Για το σκοπό, αυτό, δημιουργήθηκε μια πειραματική διάταξη που προσομοιάζει τη λειτουργία ενός τεχνητού υγροβιότοπου, χρησιμοποιώντας ειδικά κατασκευασμένα ποτήρια ζέσεως. Τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αλόφυτα, και πιο συγκεκριμένα το αλόφυτο *Juncus acutus* L., το οποίο έχει αποδειχθεί ότι είναι ιδανικός υποψήφιος για φυτοεξυγίανση αστικών λυμάτων εξαιτίας της αντοχής του στην πρόσληψη τοξικών ρύπων, όπως τα βαρέα μέταλλα. Το σύστημα ήταν εγκατεστημένο στο θερμοκήπιο του εργαστηρίου Βιοχημικής Μηχανικής και Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας με λειτουργικό όγκο 125,5 ml ανά πειραματικό ποτήρι και υπόστρωμα από λεπτό χαλίκι που κάλυπτε καλά τις ρίζες των φυτών.

Το πείραμα είχε διάρκεια 20 ημέρες, κατά τις οποίες γινόταν καθημερινή προσθήκη του κατάλληλου διαλύματος εισροής ανάλογα την ομάδα μελέτης και στη συνέχεια, μετριόταν ο όγκος του διαλύματος εκροής για τον έλεγχο των δειγμάτων και της εξατμισοδιαπνοής. Επίσης, ανά 2 ημέρες γινόταν έλεγχος των μετρήσεων pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας, δυναμικού οξειδοαναγωγής, διαλυμένου οξυγόνου καθώς και των COD, ολικού αζώτου και ολικού φωσφόρου. Στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας έγιναν μετρήσεις για τον έλεγχο της ολικής, α- και β-χλωροφύλλης, της ενζυμικής δραστηριότητας της καταλάσης στις ρίζες των φυτών, της βιομάζας, του περιεχόμενου νερού και του αριθμού των φύλλων των φυτών.

Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν μετά από συνεχή λειτουργία του συστήματος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η σύζευξη αυτών των 2 τεχνολογιών, αρχικά, είχε παρόμοια απόδοση σε σχέση με την ομάδα με το λύμα, δείχνοντας βέβαια μια τάση να επεξεργάζεται καλύτερα το οργανικό φορτίο προς το τέλος της πειραματικής διαδικασίας, χωρίς όμως να υπάρχει στατιστική διαφορά. Παρόμοια αποτελέσματα βγήκαν και από τη φυσιολογική και αναπτυξιακή απόδοση των φυτών, όπου η σύζευξη των τεχνολογιών έδειξε να βοηθάει τα φυτά προς το τέλος του πειράματος καλύτερα από την ομάδα με το λύμα, όχι αρκετή διαφορά όμως για να υπάρξει στατιστική διαφορά. Στατιστική διαφορά υπάρχει μόνο στο περιεχόμενο νερό.

ABSTRACT

The present thesis was aimed at evaluating the effectiveness of bridging 2 existing technologies, which separately used for wastewater treatment, constructing wetlands and air nanobubbles, for wastewater treatment and in particular in organic load reduction. The contribution of air nanobubbles to plant physiology and growth was also investigated.

For this purpose, an experimental display was created that simulates the operation of a constructed wetland, using specially designed beakers. The plants used were halophytes, and in particular the *Juncus acutus* L. species, which has been proven to be an ideal candidate for municipal wastewater treatment due to its resistance to the absorption of toxic pollutants, such as heavy metals. The system was installed in the greenhouse of the Laboratory of Biochemical Engineering and Environmental Biotechnology with a working volume of 125.5 ml per experimental pot and a thin gravel substrate that covered the roots of the plants.

The experiment lasted for 20 days, with the appropriate intake solution being added daily to the study group and then the volume of the outlet solution was checked to control the samples and evaporation. In addition, pH, electrical conductivity, redox potential, dissolved oxygen, COD, total nitrogen and total phosphorus were measured every 2 days. At the end of the experimental procedure, measurements were made to control the total, a- and b- chlorophyll, enzyme activity of catalase in plant roots, biomass, water content and leaf number of plants.

From the results obtained after continuous operation of the system, we conclude that the bridging of these two technologies initially had a similar performance to that of the wastewater group, indicating, of course, a tendency to process the organic load better in the end of the experimental procedure, but with no statistical difference. Similar results were obtained from physiological and developmental performance of the plants, where bridging technologies showed that the plants were better at the end of the experiment than the wastewater group, but not enough to make a statistical difference. There is only statistical difference in the water content.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	9
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	10
2.1. ΛΥΜΑΤΑ	10
2.1.1. ΓΕΝΙΚΑ	10
2.1.2. ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	10
2.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ	12
2.2.1. ΓΕΝΙΚΑ	12
2.2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ	13
2.3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ	14
2.3.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ	14
2.3.1.1. Γενικά	14
2.3.1.2. Μηχανισμός σταθεροποίησης νανοφυσολογικών	16
2.3.1.3 Μέτρηση νανοφυσολογικών	16
2.3.1.4. Παραγωγή νανοφυσολογικών	17
2.3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ	18
2.3.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ	19
2.4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ	20
2.4.1. ΟΡΙΣΜΟΣ	20
2.4.2. ΤΥΠΟΙ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ	20
2.4.3. Η ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΩΣ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	22
2.4.4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ	22
2.5. ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ	23
2.5.1. ΓΕΝΙΚΑ	23
2.5.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ	25
2.5.3. ΤΥΠΟΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ	30
2.5.4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	32
2.6. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΦΥΤΟΥ	33
2.6.1. ΑΛΟΦΥΤΑ	33
2.6.2. <i>JUNCUS ACUTUS</i> L.	34
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	35
3.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	35
3.1.1. ΣΥΛΛΟΓΗ ΦΥΤΩΝ	35
3.1.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	35
3.2. ΚΥΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	38
3.2.1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ	40
3.2.1.1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ pH, EC, ORP, DO	40
3.2.1.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ (COD)	40
3.2.1.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (TN) ΚΑΙ ΟΛΙΚΟΥ ΦΩΣΦΟΡΟΥ (TP)	41
3.2.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ	41
3.2.2.1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ	41
3.2.2.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΝΖΥΜΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΦΥΤΩΝ (ΚΑΤΑΛΑΣΗ)	42

3.2.2.3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΥΞΗΣΗΣ ΦΥΤΟΥ, ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΦΥΛΛΩΝ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ	43
3.2.3. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	43
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	44
4.1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ΑΕΡΑ ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	44
4.2. ΚΥΡΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΕΞΟΔΟΥ	45
4.2.1. ΡΗ, EC, ORP ΚΑΙ DO ΣΤΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΕΞΟΔΟΥ	46
4.2.2. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ COD	46
4.2.3. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΖΩΤΟΥ	48
4.2.4. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ	50
4.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ	52
4.3.1. ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗ	52
4.3.2. ΕΝΖΥΜΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΑΣΗΣ ΣΤΙΣ ΡΙΖΕΣ	53
4.3.3. ΒΙΟΜΑΖΑ ΦΥΤΩΝ	54
4.3.4. ΑΥΞΗΣΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΦΥΛΛΩΝ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ	56
4.3.5. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΣΤΟΥΣ ΦΥΤΙΚΟΥΣ ΙΣΤΟΥΣ	56
4.3.6. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΡΙΖΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	57
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1 Τυπική σύσταση ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων (Metcalf & Eddy, 1991)	11
Πίνακας 2 Χαρακτηριστικές τιμές BOD_5 ($mg\ O_2/L$) (Ψυλλάκη, 2014)	12
Πίνακας 3 Νομοθετικά όρια επεξεργασμένων λυμάτων σε mgO_2/L (Ψυλλάκη, 2014)	12
Πίνακας 4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυτοεξυγίανσης	23
Πίνακας 5 Πειραματικός σχεδιασμός	37
Πίνακας 6 Καθημερινές εισροές	39
Πίνακας 7 Τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας	40
Πίνακας 8 Τιμές μεγέθους ως προς τον αριθμό και ως προς τη διάμετρο φυσαλίδας	44
Πίνακας 9 Αύξηση αριθμού φύλλων του φυτού <i>Juncus acutus</i> L. Οι τιμές αναφέρονται σε μέσους όρους ($n=6$).	56

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1 Ύπαρξη νανοφουσαλίδων σε σύγκριση με μικροφουσαλίδες και μακροφουσαλίδες σε ένα υγρό (Narayan, 2014)	15
Εικόνα 2 Παραγωγή νανοφουσαλίδων από κατάρρευση μικροφουσαλίδων (Tsuge, 2014)	16
Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση ενός Venturi σωλήνα παραγωγής φυσαλίδων (Hashim et al., 2015) .	18
Εικόνα 4 Τύποι φυτοεξυγίανσης (Μανουσάκη, 2008)	21
Εικόνα 5 Φυσικός υγροβιότοπος στις Η.Π.Α	23
Εικόνα 6 Τεχνητός υγροβιότοπος στη Γερμανία	24
Εικόνα 7 Στοιχεία του νερού και σχετική ορολογία (Kadlec et al., 2000)	29
Εικόνα 8 Διάγραμμα FWS υγροβιότοπου που περιέχει επιπλέοντα φυτά (Kadlec et al., 2000).	31
Εικόνα 9 Διάγραμμα SFS υγροβιότοπου (Kadlec et al., 2000).	32
Εικόνα 10 <i>Juncus acutus</i> L.	34

Εικόνα 11 Σχηματική απεικόνιση της υδροπονικής διάταξης. Το υλικό μέσα στο ποτήρι είναι μεσαίου μεγέθους χαλίκι. Από την πιπέτα γινόταν εισαγωγή του δείγματος, ενώ το σωληνάκι κατέληγε σε tubes που εκχυνόταν το επεξεργασμένο δείγμα.....	36
Εικόνα 12 Πειραματική διάταξη.....	37
Εικόνα 13 Στην αριστερή φωτογραφία φαίνονται φυτά από την Β ομάδα στην αρχή του πειράματος 1/4/2019 ενώ στη δεξιά φαίνονται τα ίδια φυτά στο τέλος του πειράματος 23/4/2019	38
Εικόνα 14 Διάγραμμα κατανομής νανοφουσαλίδων αέρα στο διάλυμα εισόδου κατά την 1 ^η πειραματική ημέρα	45
Εικόνα 15 Μετρήσεις pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας, δυναμικού οξειδοαναγωγής και διαλυμένου οξυγόνου του δείγματος, αντίστοιχα. Οι τιμές παρουσιάζονται ως μέσοι όροι.	46
Εικόνα 16 Διάγραμμα μέτρησης COD στο λύμα. Οι τιμές υποδεικνύουν τις μέσες τιμές (n=5). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα.	47
Εικόνα 17 Ποσοστό απομάκρυνσης COD.....	48
Εικόνα 18 Διάγραμμα μέτρησης ολικού αζώτου στο λύμα. Οι τιμές υποδηλώνουν μέσες τιμές (n=5). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα.	49
Εικόνα 19 Ποσοστό απομάκρυνσης ολικού αζώτου.....	50
Εικόνα 20 Διάγραμμα μέτρησης ολικού φωσφόρου. Οι τιμές υποδηλώνουν μέσες τιμές (n=5). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα.	51
Εικόνα 21 Ποσοστό απομάκρυνσης ολικού φωσφόρου	52
Εικόνα 22 Διάγραμμα περιεχόμενου χλωροφύλλης του φυτού <i>Juncus acutus</i> L. Οι τιμές υποδηλώνουν τις μέσες τιμές με (n=3). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα. Ο αστερίσκος υποδηλώνει στατιστική διαφορά ($p<0,05$) όταν συγκρίνεται με ομάδα σύμφωνα με τη μέθοδο 2 δειγμάτων t-test για μέσους όρους.	53
Εικόνα 23 Διάγραμμα ενζυμικής δραστηριότητας της καταλάσης στις ρίζες του φυτού <i>Juncus acutus</i> L. Οι τιμές υποδηλώνουν τις μέσες τιμές (n=3). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα. Ο αστερίσκος υποδηλώνει στατιστική διαφορά ($p<0,05$) όταν συγκρίνεται με ομάδα σύμφωνα με τη μέθοδο 2 δειγμάτων t-test για μέσους όρους.	54
Εικόνα 24 Διάγραμμα βιομάζας ξηρού βάρους του φυτού <i>Juncus acutus</i> L. Οι τιμές υποδηλώνουν μέσες τιμές με (n=3). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα. Ο αστερίσκος υποδηλώνει στατιστική διαφορά ($p<0,05$) όταν συγκρίνεται με ομάδα σύμφωνα με τη μέθοδο 2 δειγμάτων t-test για μέσους όρους.	55
Εικόνα 25 Διάγραμμα περιεχόμενου νερού στους φυτικούς ιστούς του φυτού <i>Juncus acutus</i> L. Οι τιμές υποδηλώνουν μέσες τιμές με (n=6). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα. Ο αστερίσκος υποδηλώνει στατιστική διαφορά ($p<0,05$) όταν συγκρίνεται με την ομάδα με το λύμα σύμφωνα με τη μέθοδο 2 δειγμάτων t-test για μέσους όρους.	56
Εικόνα 26 Ενδεικτικό δείγμα ριζικού συστήματος για κάθε ομάδα μετά το πέρας του πειράματος	58

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρύπανση του περιβάλλοντος από αστικά λύματα αποτελεί ανησυχητικό θέμα που απαιτεί άμεση αντιμετώπιση. Η περιβαλλοντική ρύπανση επικεντρώνεται, κυρίως, στους υδάτινους αποδέκτες, συνεπώς και στα νερά ύδρευσης και άρδευσης, στους οποίους εκβάλλονται μη επαρκώς επεξεργασμένα αστικά λύματα οδηγώντας σε φαινόμενα, όπως ο ευτροφισμός των υδάτων, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης φωσφόρου και αζώτου.

Η επιτακτική ανάγκη για την καλύτερη επεξεργασία των αστικών λυμάτων οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων και τεχνολογιών αποκατάστασης τους για την όσο το δυνατόν καλύτερη απομάκρυνση του οργανικού φορτίου σε τέτοια επίπεδα ώστε να μην θεωρούνται πλέον ρύποι. Τέτοιες τεχνολογίες εξυγίανσης των υγρών αποβλήτων είναι η μέθοδος της καθίζησης, η ηλεκτροδιάλυση, η μέθοδος απορρόφησης κτλπ. Οι τεχνολογίες αυτές, όμως, είναι ιδιαίτερα κοστοβόρες και μπορούν να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο υδάτινο οικοσύστημα, με αποτέλεσμα να μην γίνονται ευρέως αποδεκτές.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί καινούριες, πιο οικολογικές τεχνολογίες, όπως η φυτοεξυγίανση και οι τεχνητοί υγροβιότοποι. Οι τεχνολογίες, αυτές, θεωρούνται ελπιδοφόρες, καθώς είναι χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικά φιλικές, με αποτέλεσμα να προσελκύουν το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και να είναι αποδεκτές από το ευρύ κοινό. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι, ως τεχνολογία, βασίζονται στις λειτουργίες των φυσικών υγροβιότοπων και με τη βοήθεια της βλάστησης και των μικροοργανισμών που ζουν σε αυτά επιτυγχάνουν τη βελτίωση της ποιότητας του νερού και την επεξεργασία των λυμάτων.

Μεγάλη σημασία για να είναι επιτυχημένες αυτές οι τεχνολογίες είναι η σωστή επιλογή των φυτικών ειδών, τα οποία μπορούν να αναπτύσσονται στα ρυπασμένα αστικά λύματα και να αντέχουν την πρόσληψη τοξικών ρύπων, όπως τα βαρέα μέταλλα. Βάσει μελετών, τα αλόφυτα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην απομάκρυνση ρύπων και θεωρούνται ιδανικοί υποψήφιοι εξαιτίας της αντοχής που επιδεικνύουν στις διάφορες καταπονήσεις που υφίστανται.

Επίσης, έχει αναπτυχθεί μια καινούρια, καινοτόμος τεχνολογία, η τεχνική με νανοφυσολίδες αερίων. Η τεχνική, αυτή, έχει μελετηθεί για την επεξεργασία λυμάτων ως ενίσχυση της μεθόδου της επίπλευσης. Πολύ πρόσφατα, μελέτες έδειξαν ότι οι νανοφυσολίδες αερίων βοηθούν στην περαιτέρω ανάπτυξη φυτών και εργαστηριακών ποντικών. Με αυτές τις μελέτες, ως δεδομένο, προτάθηκε η

σύζευξη των τεχνολογιών τεχνητών υγροβιοτόπων και νανοφουσαλίδων αερίων για τη μείωση του οργανικού φορτίου στα αστικά λύματα. Η ιδέα αυτή, βασίστηκε στο γεγονός ότι οι νανοφουσαλίδες θα βοηθήσουν άμεσα στην επεξεργασία των λυμάτων, καθώς και εμμέσως μέσω καλύτερης ανάπτυξης των φυτών.

1.1. Στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αποτελεσματικότητας της σύζευξης των τεχνητών υγροβιοτόπων με τις νανοφουσαλίδες αέρα με χρήση αλόφυτων φυτών, και πιο συγκεκριμένα αλόφυτων του γένους *Juncus acutus* L. στη μείωση του οργανικού φορτίου στα αστικά λύματα.

Η σημαντικότητα της μελέτης αυτής έγκειται στο γεγονός ότι εξετάζεται μια εναλλακτική μέθοδος για την επεξεργασία μερικώς επεξεργασμένων λυμάτων, η οποία είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον και με χαμηλότερο κόστος. Η καινοτομία αυτής της μεθόδου μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη μια καινούριας βιολογικής μεθόδου, η οποία θα μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα της ρύπανσης των υδάτινων αποδεκτών στον ελλαδικό χώρο με τη χρήση των αλόφυτων.

Ειδικός στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση της δυνατότητας των τεχνητών υγροβιοτόπων σε συνέργεια με τις νανοφουσαλίδες αέρα να απομακρύνουν τα θρεπτικά στοιχεία του αζώτου και του φωσφόρου, καθώς επίσης και του COD από δευτερογενώς επεξεργασμένα αστικά λύματα. Επίσης, η παρούσα διπλωματική στοχεύει στη διερεύνηση της συμβολής των νανοφουσαλίδων αέρα στη φυσιολογία και ανάπτυξη του φυτού *Juncus acutus* L., μέσω της μελέτης της ολικής, α- και β- χλωροφύλλης, της ενζυμικής δραστηριότητας της καταλάσης στις ρίζες των φυτών, της βιομάζας, του περιεχόμενου νερού και τον αριθμό των φύλλων των φυτών. Ο απώτερος σκοπός της μελέτης αυτής είναι η συμβολή στην επιστημονική έρευνα που πραγματοποιείται για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων εισάγοντας μια νέα συζευγμένη τεχνολογία, αυτή της φυτοεξυγίανσης με νανοφουσαλίδες αέρα.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1. ΛΥΜΑΤΑ

2.1.1. Γενικά

Ως λύμα ορίζεται το νερό το οποίο έχει μολυνθεί από ανθρωπογενείς παράγοντες. Ανάλογα την προέλευσή τους τα λύματα χαρακτηρίζονται ως υγειονομικά, μαζικά, βιομηχανικά, γεωργικά ή επιφανειακής απορροής. Τα υγρά απόβλητα τα οποία προέρχονται από οικίες, γραφεία, νοσοκομεία, βιομηχανίες κλπ ονομάζονται αστικά λύματα. Αποτελούνται από 99% νερό και χαρακτηρίζονται βάσει όγκου ή ρυθμού ροής, φυσικής συνθήκης, χημικών συστατικών και βακτηριολογικών οργανισμών που μπορεί να περιέχουν. Μεταφέρονται μέσω αγωγών ή αγωγών διάθεσης υγρών αποβλήτων (Vrushali & Kaustav, 2014).

2.1.2. Υγρά απόβλητα

Τα συστατικά των αστικών λυμάτων είναι κυρίως λίπη, έλαια, πρωτεΐνες, οργανικές ουσίες σε διάλυση, ανόργανες ουσίες, ιοί, διαλυμένα αέρια, όπως αμμωνία (NH_3) και υδρόθειο (H_2S), καθώς και αιωρούμενα σωματίδια (Λουπασάκη, 2014). Οι βασικές παράμετροι ρύπανσης είναι το οργανικό φορτίο (COD , BOD_5), τα αιωρούμενα στερεά (TSS), οι ενώσεις φωσφόρου, οι ενώσεις αζώτου και τα κολοβακτηρίδια (Χουρδάκης, 2008). Το οργανικό φορτίο αποτελείται κυρίως από πρωτεΐνες, λίπη, υδρογονάνθρακες και μετράται κυρίως μέσω των παραμέτρων του Βιολογικός Απαιτούμενου Οξυγόνου (BOD_5) και του Χημικός Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD). Η διάθεση των λυμάτων στο περιβάλλον χωρίς προηγούμενη επεξεργασία, η βιολογική αποικοδομησή του μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη σηπτικών συνθηκών και στην ελλάτωση των φυσικών πηγών οξυγόνου. Τα αιωρούμενα στερεά μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών όπως και στην ανάπτυξη συσσωματωμάτων ιλύος όταν τα ανεπεξέργαστα απόβλητα διατίθενται σε υδάτινο περιβάλλον. Τόσο ο φώσφορος, όσο και το άζωτο, σε συνδυασμό με τον άνθρακα είναι τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη. Αυτά τα θρεπτικά συστατικά, όταν διατίθενται σε υδάτινο περιβάλλον οδηγούν σε ανάπτυξη ανεπιθύμητης υδροχαρούς βλάστησης. Ενώ, όταν διατίθενται σε μεγάλες ποσότητες στο έδαφος μπορούν να οδηγήσουν στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων (Μελίδης, 2015, Tchobanoglous & Burton, 1990).

Συστατικό	Συγκέντρωση (mg/l)		
	Ισχυρά	Μεσαία	Αδύνατα
Ολικά στερεά	1200	720	350
BOD ₅	400	220	110
COD	1000	500	250
TOC	290	160	80
Ολικό Άζωτο	85	40	20
Ολικός Φώσφορος	15	8	4
Χλωρικά	100	50	30
Θειικά	50	30	20
Αλκαλικότητα	200	100	50
Λίπη - Έλαια	150	100	50

Πίνακας 1 Τυπική σύσταση ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων (Metcalf & Eddy, 1991)

Τα υγρά αστικά απόβλητα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1 παρουσιάζουν κάποια χημικά χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή περιεκτικότητα σε αμμωνία και φώσφορο, καθώς και υψηλή αγωγιμότητα, εξαιτίας των διαλυμένων αλάτων και η τιμή του pH κυμαίνεται από 7 έως 8 (Τσώνης, 2004).

Επειδή, όλες οι φυσικές πλωτές οδοί περιέχουν βακτήρια και θρεπτικά συστατικά, σχεδόν όλες οι απορριπτόμενες ενώσεις που εισάγονται σε αυτές τις οδούς θα προκαλέσουν βιοχημικές αντιδράσεις. Οι βιοχημικές, αυτές, αντιδράσεις εκφράζονται μέσω της μετρούμενης παραμέτρου της βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου (BOD). Τέτοιες χημικές ουσίες είναι επίσης πιθανόν να διασπαστούν χρησιμοποιώντας ισχυρούς οξειδωτικούς παράγοντες και αυτές οι χημικές αντιδράσεις εκφράζονται μέσω της μετρούμενης παραμέτρου της χημικής ζήτησης οξυγόνου (COD). Και οι δύο δοκιμές BOD και COD είναι ένα μέτρο της σχετικής επίδρασης εξάντλησης οξυγόνου ενός μολυσματικού υλικού. Και οι δύο έχουν υιοθετηθεί ευρέως ως μέτρο της ρύπανσης. Η δοκιμή BOD μετρά τη ζήτηση οξυγόνου από βιοαποικοδομήσιμους ρύπους, ενώ η δοκιμή COD μετρά τη ζήτηση οξυγόνου από οξειδωτικούς ρύπους (Ψυλλάκη, 2014). Οποιοδήποτε οξειδωσιμο υλικό που υπάρχει σε αερόβια φυσική οδό ή σε βιομηχανικό απόβλητο θα οξειδωθεί τόσο με βιοχημικές (βακτηριακές) ή χημικές διεργασίες. Το αποτέλεσμα είναι ότι η περιεκτικότητα σε οξυγόνο του νερού θα μειωθεί (Clescerl, et al., 1999, Goldman, et al., 1983).

Νερό ποταμών	<1
Νερό ποταμών με σχετική ρύπανση	6-9
Νερό ποταμών με ιδιαίτερη ρύπανση	>10
Επεξεργασμένα λύματα	<25 (νομοθετικά όρια)
Ακατέργαστα αστικά λύματα	350
Βιομηχανία γάλακτος	500-4200
Βιομηχανία επεξεργασίας ξύλου	780
Βιομηχανία ζάχαρης	1800
Βαφεία	300-600
Σφαγεία	167000

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικές τιμές BOD₅ (mg O₂/L) (Ψυλλάκη, 2014)

BOD ₅	25
COD	125
TSS	35

Πίνακας 3 Νομοθετικά όρια επεξεργασμένων λυμάτων σε mgO₂/L (Ψυλλάκη, 2014)

Για την αντιμετώπιση του σοβαρού οικολογικού προβλήματος που δημιουργούσαν τα λύματα, κρίθηκε αναγκαία η επεξεργασία τους πριν καταλήξουν στο φυσικό αποδέκτη.

2.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ

2.2.1. Γενικά

Σκοπός της επεξεργασίας των λυμάτων είναι η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών πριν τα λύματα διοχετευθούν πίσω στο περιβάλλον. Η διάσπαση των στερεών υλικών γίνεται με τη βοήθεια του οξυγόνου. Το διαλυμένο οξυγόνο που υπάρχει στο νερό, περίπου 10 μέρη ανα εκατομμύριο στους 20° C, απαιτείται από την υδρόβια ζωή για την επιβίωση της. Στην Πρωτοβάθμια Επεξεργασία αφαιρείται περίπου το 60% των αιωρούμενων στερεών από τα λύματα. Επίσης, στην Πρωτοβάθμια Επεξεργασία περιλαμβάνεται ο αερισμός των λυμάτων, δηλαδή η επαφή των λυμάτων με το οξυγόνο. Κατά τη διάρκεια της Δευτεροβάθμιας Επεξεργασίας απομακρύνεται το 90% των αιωρούμενων στερεών (Λέκκα, 2013).

2.2.2. Μέθοδοι επεξεργασίας αστικών λυμάτων

Οι μέθοδοι επεξεργασίας στις οποίες κυριαρχούν οι φυσικές δυνάμεις ονομάζονται φυσικές διεργασίες. Οι μέθοδοι επεξεργασίας κατά τις οποίες επιτυγχάνεται απομάκρυνση ρυπογόνων ουσιών με βιολογικές και χημικές αντιδράσεις ονομάζονται βιολογικές και χημικές διεργασίες αντίστοιχα. Οι διεργασίες αυτές, ομαδοποιούνται σε στάδια ανάλογα το βαθμό επεξεργασίας των λυμάτων, τα οποία είναι γνωστά ως προεπεξεργασία, πρωτοβάθμια, προχωρημένη πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και προχωρημένη (τριτοβάθμια) επεξεργασία (Καλτέκης, 2019, Γκέκας & Πρωιμάκη, 2002).

Τα βασικά στάδια στην επεξεργασία των αστικών υγρών αποβλήτων είναι (Λουπασάκη, 2014, Καλτέκης, 2019, Γκέκας & Πρωιμάκη, 2002):

- Εσχάρωση: απομάκρυνση μεγάλων σωματιδίων από τη ροή αποβλήτων.
- Απομάκρυνση της άμμου με τη χρήση εξαρτημάτων
- Ανάμειξη και συσσωμάτωση: επιτυγχάνεται η συνεχής ανάμειξη υγρών αιωρημάτων και η συσσωμάτωση σωματιδίων στα υγρά απόβλητα.
- Διαχωρισμός με βαρύτητα (Καθίζηση): απομάκρυνση στερεών σε αιώρηση με καθίζηση λόγω βαρύτητας.
- Αερισμός: απομάκρυνση πτητικών (VOC)
- Επίπλευση: απομάκρυνση σωματιδίων με πυκνότητα μικρότερη του νερού (π.χ. έλαια) εισάγωντας αέρα μέσα στην υγρή φάση.
- Κροκίδωση: αποσταθεροποίηση των κολλοειδών και αύξηση μεγέθους των σωματιδίων.
- Χημική Καθίζηση: απομάκρυνση φωσφόρου και βαρέων μετάλλων.
- Βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας: μετατροπή διαλυμένων και σωματιδιακών βιοαποικοδομήσιμων συστατικών ώστε να κρίνονται αποδεκτά, δημιουργία βιολογικού συσσωματώματος από τα μη καθιζάνοντα και αιωρούμενα κολλοειδή στερεά, απομάκρυνση αμμωνίας, φωσφόρου, οργανικών και ανόργανων ενώσεων
- Προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα: απομάκρυνση οργανικών συστατικών που προκαλούν δυσάρεστες οσμές, καθώς επίσης και φιλτράρισμα τοξικών χημικών.
- Αντίστροφη Ώσμωση και Ηλεκτροδιάλυση: απομάκρυνση υψηλής συγκέντρωσης κολλοειδών, διαλυμένων οργανικών και ανόργανων στερεών και μικροοργανισμών

- Ανταλλαγή Ιόντων: ανταλλαγή ιόντων με στόχο την αποσκλήρυνση, απομάκρυνση νιτρικών, βαρέων μετάλλων και άλλων ανόργανων στοιχείων
- Υπερδιήθηση, Νανοδιήθηση και Μικροδιήθηση: διαχωρισμός και απομάκρυνση συστατικών με μεγάλο μοριακό βάρος. Μέσω πίεσης επιτρέπεται η διέλευση ορισμένων συστατικών του διαλύματος από ημιπερατές μεμβράνες, ενώ ταυτόχρονα κατακρατούνται άλλα συστατικά του υγρού.
- Απολύμανση: απομάκρυνση ή αδρανοποίηση παθογόνων μικροοργανισμών. Επιτυγχάνεται με τη χρήση χλωρίου και παραγώγων του, με χρήση όζοντος, ή με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας UV.

Τέλος, έχει γίνει απαραίτητη η εύρεση νέων τεχνολογιών, οι οποίες να είναι πιο προσιτές οικονομικά, φιλικότερες προς το περιβάλλον, καθώς και πιο αποτελεσματικές ως προς την επεξεργασία των λυμάτων, χωρίς να προκαλείται το κοινό αίσθημα. Μια από αυτές τις τεχνολογίες είναι οι τεχνητοί υγροβιότοποι, ενώ τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα τεχνολογία η οποία ενισχύει τη μέθοδο της επίπλευσης ως προς την επεξεργασία αστικών λυμάτων, η τεχνική των νανοφυσαλίδων αερίων.

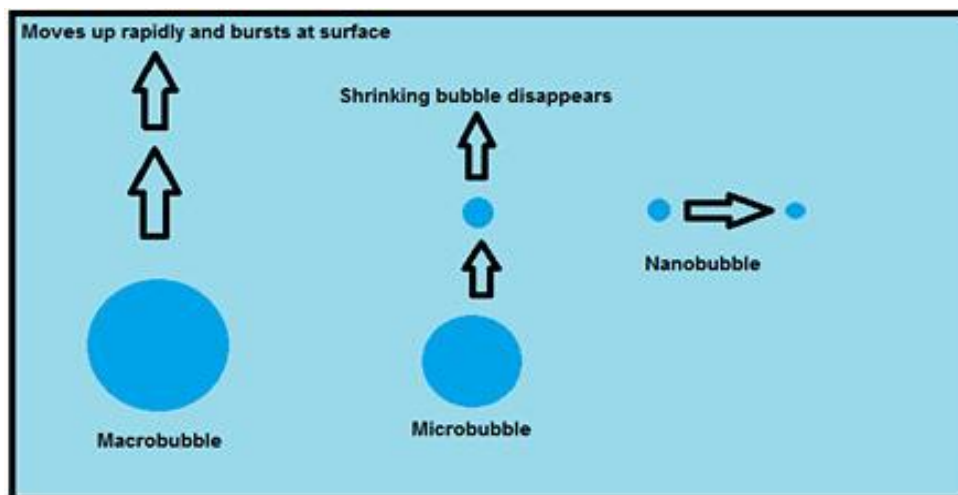
2.3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ

2.3.1. Γενικές πληροφορίες

2.3.1.1. Γενικά

Οι μικρο και νανο-φυσαλίδες (MNBs) είναι μικροσκοπικές φυσαλίδες με διάμετρο μερικών δεκάδων μικρομέτρων και νανομέτρων και εμφανίζουν μερικές μοναδικές φυσικές ιδιότητες. Μια από αυτές τις ιδιότητες τους είναι η χαμηλή ικανότητα επίπλευσης, η οποία τους δίνει τη δυνατότητα να παραμένουν στο διάλυμα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Οι νανοφυσαλίδες μπορούν να ενισχύσουν την υψηλή απόδοση μεταφοράς μάζας οξυγόνου καθώς η εσωτερική πίεση της φυσαλίδας είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους της φυσαλίδας. Επιπροσθέτως, οι νανοφυσαλίδες έχουν υψηλή ειδική περιοχή, η οποία εντείνει την αποδοτικότητα της μεταφοράς των μαζών εξαιτίας της μεγαλύτερης διεπαφής μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης (Gurunga, Dahla, & Jansson, 2016). Αναφέρεται, επίσης, ότι όταν οι νανοφυσαλίδες καταρρέουν υπάρχει παραγωγή ελευθέρων ριζών εξαιτίας της υψηλής πυκνότητας των ιόντων στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου λίγο πριν την κατάρρευση. Στα χαρακτηριστικά των μικρο-

νανοφουσαλίδων περιλαμβάνεται η μειωμένη τριβή, τα αρνητικά ή θετικά ζ-δυναμικά, η αυξημένη διαλυτότητα των αερίων στα υγρά και η παραγωγή ελευθέρων ριζών, τα οποία οδηγούν σε ελπιδοφόρες εφαρμογές, όπως η επεξεργασία των λυμάτων μολυσμένου νερού με επίπλευση αέρα, μειώνοντας την τριβή των ρέοντων υγρών (Ushikubo, et al., 2010). Παρακάτω παρατίθεται εικόνα με την παρουσία νανοφουσαλίδων, μικροφουσαλίδων και μακροφουσαλίδων μέσα σε ένα υγρό (Narayan, 2014, Ebina, et al., 2013).

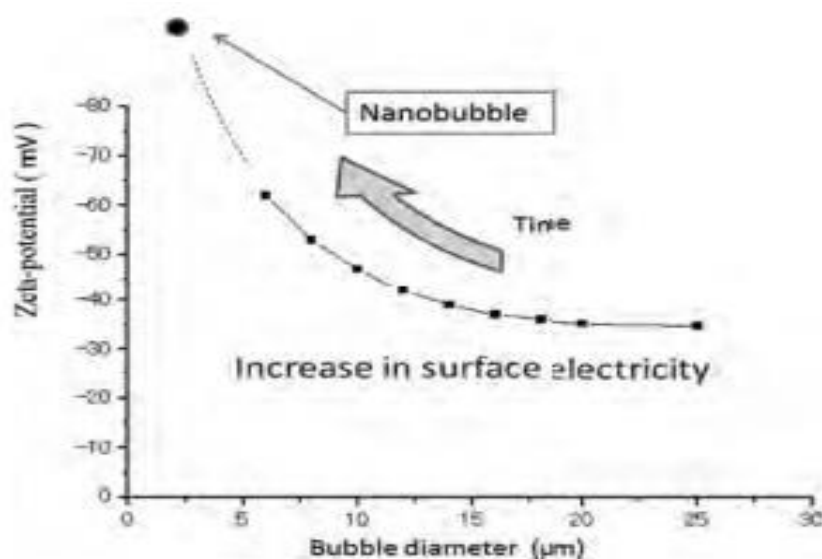


Εικόνα 1 Ύπαρξη νανοφουσαλίδων σε σύγκριση με μικροφουσαλίδες και μακροφουσαλίδες σε ένα υγρό (Narayan, 2014)

Οι μικροφουσαλίδες είναι φυσαλίδες με διάμετρο μικρότερη των 50 μm , οι οποίες μειώνονται σε μέγεθος και τελικά εξαφανίζονται, εξαιτίας της συρρίκνωσης που υπόκεινται λόγω της ταχείας διάλυσης του αέρα που βρίσκεται στο εσωτερικό τους, καθώς ανεβαίνουν προς την επιφάνεια του νερού (Εικόνα 1). Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος των φυσαλίδων τόσο αυξάνεται ο ρυθμός συρρίκνωσης τους με αποτέλεσμα οι φυσαλίδες με διαστάσεις νανομέτρων να εξαφανίζονται σχεδόν ακαριαία. Εντούτοις, έχει παρατηρηθεί μέσα από πειραματικές μελέτες ότι μπορούν να δημιουργηθούν σταθεροποιημένες νανοφουσαλίδες μέσω της κατάρρευσης των μικροφουσαλίδων σε υδατικά διαλύματα ηλεκτρολυτών (Tsuge, 2014). Αυτό βοήθησε στην ανακάλυψη αρκετών ιδιοτήτων των υδατικών διαλυμάτων μετά τη διασπορά μικροφουσαλίδων στο νερό (Μπίσδα, 2017, Li, Takahashi, & Chiba, 2009).

2.3.1.2. Μηχανισμός σταθεροποίησης νανοφυσολογίας

Επειδή η φυσαλίδα είναι ένα αέριο σώμα το οποίο περιβάλλεται από νερό, το εσωτερικό αέριο συμπιέζεται εξαιτίας της επιφανειακής τάσης της διεπαφής αερίου-νερού. Το εσωτερικό του αερίου μικρότερης φυσαλίδας είναι εντονότερα συμπιεσμένο, και οι μικροσκοπικές φυσαλίδες συρρικνώνονται κάτω από το νερό, εξαιτίας της διάλυσης του αερίου. Οπότε, είναι προφανές, από φυσική σκοπιά, ότι μια μικροσκοπική φυσαλίδα με διαστάσεις σε νανόμετρα εξαφανίζεται σχεδόν ακαριαία. Πολύ πρόσφατα, ξεκίνησαν να γίνονται αντιληπτές οι σταθεροποιημένες νανοφυσολογίες στα υδατικά διαλύματα μετά την κατάρρευση των μικροφυσολογίων (Tsuge, 2014). Η έρευνα, αυτήν την περίοδο στοχεύει στην αποκωδικοποίηση της επίδρασης των ιόντων που περιβάλλουν τη φυσαλίδα ως μηχανισμό σταθεροποίησης. Σε ένα κελί ηλεκτροφόρησης, οι μικροφυσολογίες κινούνται προς το ηλεκτρόδιο με αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο. Το επιφανειακό φορτίο της μικροφυσολογίας μπορεί να προσδιοριστεί από τη ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης της με την παρουσία ενός ηλεκτρικού δυναμικού και μπορεί να αξιολογηθεί από την αξία του ζ δυναμικού (Takahashi, 2005).



Εικόνα 2 Παραγωγή νανοφυσολογίων από κατάρρευση μικροφυσολογίων (Tsuge, 2014)

2.3.1.3 Μέτρηση νανοφυσολογίας

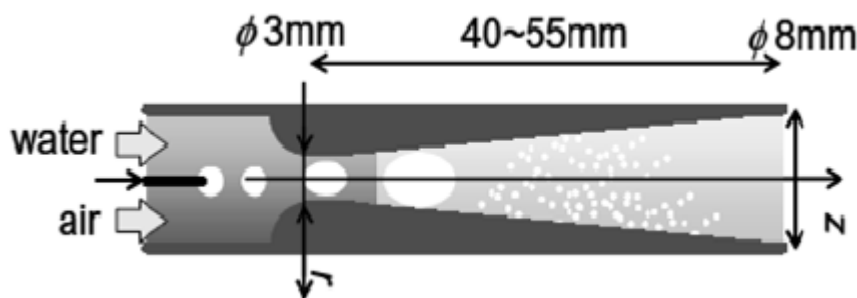
Εξαιτίας της εφαρμογής των νανοφυσολογίων σε μια ευρεία γκάμα πεδίων, είναι πολύ σημαντικό να καθοριστεί η μέθοδος μέτρησης των νανοφυσολογίων. Οι

νανοφουσαλίδες που δημιουργούνται από κατάρρευση μικροφουσαλίδων μπορούν να μετρηθούν με τη βοήθεια της περίθλασης λέιζερ ανάλογα την κατάσταση δημιουργίας τους. Η κορυφή μπορεί να επιβεβαιωθεί σε ένα επίπεδο από 300 nm έως 1 μm . Από την άλλη πλευρά, για φουσαλίδες που σταθεροποιούνται σε μικρότερο επίπεδο, χρειάζονται άλλες συσκευές μέτρησης όπως η Δυναμική Σκέδαση Φωτός (DLS) (Μπίσδα, 2017). Δυστυχώς όμως, αυτές οι συσκευές μέτρησης για νανοσωματίδια δεν μπορούν να διακρίνουν τα σταθερά σωματίδια από τα σωματίδια αέρα, οπότε πρέπει να παρθεί απόφαση από μια συνολική προοπτική, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις οπτικές μεθόδους αλλά επίσης και τις μετρήσεις άλλων φυσικών φαινομένων σχετικών με τις νανοφουσαλίδων (Tsuge, 2014).

2.3.1.4. Παραγωγή νανοφουσαλίδων

Κατά προτίμηση, οι νανοφουσαλίδες δημιουργούνται στην επιφάνεια υδρόφοβων σωματιδίων. Ο σχηματισμός των νανοφουσαλίδων μπορεί να προκληθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα τους εγγενείς ή εξωτερικούς παράγοντες. Συνήθως, οι νανοφουσαλίδες σχηματίζονται όταν η ομογενής υγρή φάση υφίσταται μια αλλαγή φάσης η οποία προκαλείται από μια ξαφνική μείωση της πίεσης κάτω από μια κριτική τιμή, η οποία ονομάζεται σπηλαίωση. Η σπηλαίωση μπορεί να προκληθεί από διέλευση υπερηχητικού κύματος (ακουστική σπηλαίωση) ή από υψηλής πίεσης διακυμάνσεις σε υγρό που ρέει (υδροδυναμική σπηλαίωση) (Gurunga, Dahla, & Jansson, 2016). Οι νανοφουσαλίδες μπορούν να σχηματιστούν από υπέρηχους ή μέσω χημικών αντιδράσεων όπως η ηλεκτρόλυση (Gurunga, Dahla, & Jansson, 2016, Takahashi, Miyahara, & Mochizuki, 1979).

Αρκετά διαδεδομένη για την παραγωγή νανοφουσαλίδων είναι η γεννήτρια τύπου Venturi, η οποία στο μηχανισμό υδροδυναμικής σπηλαίωσης. Το σύστημα Venturi συγκροτείται από 3 τμήματα, την εισροή, το σωληνάριο και την κωνική εκροή. Στο σωλήνα Venturi η μείωση της πίεσης μπορεί να συντελεστεί με αύξηση της ταχύτητας του υγρού στην κωνική συγκλίνουσα ζώνη του σωλήνα εξαιτίας της στενής διαμέτρου. Στο συγκεκριμένο σύστημα, αμφότερα και το αέριο και το υγρό περνάνε στιγμιαία μέσω του σωλήνα Venturi, έτσι ώστε να παραχθεί η φουσαλίδα (Gurunga, Dahla, & Jansson, 2016). Όταν εισάγεται πεπιεσμένο υγρό στο σωληνοειδές τμήμα, η ταχύτητα ροής του υγρού στον κυλινδρικό λαιμό γίνεται υψηλότερη, ενώ η πίεση γίνεται χαμηλότερη σε σύγκριση με το τμήμα εισόδου, με αποτέλεσμα την σπηλαίωση (Rahman, Ahmad, Mahmoud, & Maoming, 2014).



Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση ενός Venturi σωλήνα παραγωγής φυσαλίδων (Hashim et al., 2015)

2.3.2. Εφαρμογές των νανοφυσολογικών

Παρά τον αρχικό σκεπτικισμό, η ύπαρξη των νανοφυσολογικών έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά με ισχυρές τεχνικές όπως η Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης (AFM). Η αυξανόμενη σημαντικότητα της νανοτεχνολογίας, καθώς επίσης και οι ιδιαίτερες ιδιότητες των νανοφυσολογικών έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών τομέων, όπως η επιστημονική έρευνα, ο ιατρικός τομέας και ο τομέας τροφής (Gurunga, Dahla, & Jansson, 2016). Επίσης, η τεχνολογία των νανοφυσολογικών έχει εξερευνηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως ο αφρός επίπλευσης, επιφάνειες καθαρισμού χωρίς απορρυπαντικό και ορυκτό ή βιομοριακό διαχωρισμό (Fan & Tao, 2008). Στη βιολογία, η εφαρμογή τους προωθείται στο ρυθμό φύτρωσης σπόρων κριθαριού, η ανάπτυξη φυτών, ποντικών και ψαριών (Liu et al., 2013). Παρομοίως, στην ιατρική οι νανοφυσολογικές έχουν υψηλής αξίας χρήσεις καθώς χρησιμοποιούνται ως παράγοντας αντίθεσης για απεικόνιση υπερήχων και διαμεσολαβούμενη από υπερήχους χορήγησης φαρμάκου για τη θεραπεία του καρκίνου (Gurunga, Dahla, & Jansson, 2016).

Η εφαρμογή των νανοφυσολογικών έχει αποδειχθεί ότι είναι επωφελής σε πολλές εμπορικές διαδικασίες, όπως η βελτίωση μεταφοράς αερίων μαζών στη μηχανική διαχωρισμού και αντίδρασης, καθώς και βελτιωμένη ανάκτηση λεπτών σωματιδίων κατά την επίπλευση (Gurunga, Dahla, & Jansson, 2016). Επιπροσθέτως, μπορούν να βελτιώσουν την ανάκτηση του άνθρακα και των φωσφορικών αλάτων κατά 10-40% καθώς επίσης και τη βελτίωση στην επιλεκτικότητα επίπλευσης του επιθυμητού άνθρακα από την ανεπιθύμητη ορυκτή ύλη (Tao et al., 2008).

2.3.3. Εφαρμογή των νανοφυσολογικών στην επεξεργασία λυμάτων

Η τεχνική των νανοφυσολογικών στην επεξεργασία λυμάτων, έως σήμερα, έχει ερευνηθεί μόνο στα πλαίσια της επίπλευσης.

Βασικό βήμα για κάθε σύστημα επεξεργασίας λυμάτων είναι ο διαχωρισμός στερεού-υγρού, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους. Μια, από τις πιο κοινά αποδεκτές ως η πιο αξιόπιστη και πρακτική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση αιωρημάτων που περιέχουν λίπη, έλαια και γράσα αναμεμιγμένα με οργανικά αιωρούμενα στερεά χαμηλής πυκνότητας και κολλοειδή, είναι η επίπλευση. Αυτός ο μηχανισμός διαχωρισμού βασίζεται στην προσρόφηση φυσαλίδων αερίου (καθώς ανεβαίνουν) στην επιφάνεια των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων, τα οποία μειώνουν το δραστικό ειδικό βάρος των σωματιδίων και αναγκάζουν τις μολυσματικές ουσίες να ανέλθουν μέχρι την επιφάνεια (αύξηση της ανοδικής ταχύτητας των προσμείξεων) (Gurunga, Dahla, & Jansson, 2016). Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως στο διαχωρισμό εξαιρετικά λεπτών σωματιδίων ή σφαιριδίων από το διάλυμα, τα οποία δε διαθέτουν σημαντικό ρυθμό καθίζησης (Zouboulis & Avranas, 2000).

Ο Διαχωρισμός Αερίου Διαλύματος (DAF) και η Διασκορπισμένη (επαγόμενη) Επίπλευση Αέρα (IAF) είναι οι διαθέσιμες εμπορικές μέθοδοι επίπλευσης. Στο Διαχωρισμό Αερίου Διαλύματος, οι φυσαλίδες παράγονται όταν μειώνεται η πίεση νερού προκορεσμένου με αέρα σε πίεσεις υψηλότερες της ατμοσφαιρικής πίεσης, ενώ στη Διασκορπισμένη Επίπλευση Αέρα δημιουργούνται μηχανικά φυσαλίδες με συνδυασμό μηχανικού αναδευτήρα υψηλής ταχύτητας και συστήματος έγχυσης αέρα (Gurunga, Dahla, & Jansson, 2016, Couto, Nunes, Neumann, & França, 2009).

Τα τελευταία χρόνια υπήρξε μια συσσώρευση αποδεικτικών στοιχείων ότι η εφαρμογή των νανοφυσολογικών βελτίωσε αισθητά την επίδοση της επίπλευσης (Fan & Tao, 2008, Fan, Tao, Honaker, & Luo, 2010). Η συμβατική μέθοδος επίπλευσης ήταν αποτελεσματική για σωματίδια εντός μια στενής κλίμακας μεγέθους από 50 έως 600 μm για άνθρακα, ενώ για μέταλλα από 10 έως 100 μm (Feng & Aldrich, 1999). Πέρα από αυτό το βέλτιστο εύρος μεγέθους, η απόδοση επίπλευσης μειώνεται σημαντικά (Fan, Tao, Honaker, & Luo, 2010). Οι θεμελιώδεις λόγοι για το χαμηλό ποσοστό επίπλευσης των ορίων υψηλότερου και κατώτερου μεγέθους οφείλονται στην υψηλή πιθανότητα αποσύνδεσης φυσαλίδας-σωματιδίου και της χαμηλής πιθανότητας σύγκρουσης φυσαλίδας-σωματιδίου, αντίστοιχα. Έχει ανακαλυφθεί ότι η παρουσία νανοφυσολογικών μειώνει σημαντικά την ταχύτητα ανύψωσης της φυσαλίδας, καθώς και ότι οι νανοφυσολογικές σχηματίζονται κατά

προτίμηση σε υδρόφοβη επιφάνεια φωσφορικών αλάτων και σωματιδίων άνθρακα (Tao, 2005).

2.4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΥΤΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

2.4.1. Ορισμός

Ο όρος Φυτοεξυγίανση αναφέρεται σε κάθε σύστημα ή διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται φυτά για την *in situ* και *ex situ* αποκατάσταση ρυπασμένων εδαφών, υλικών καθιζήσεων, καθώς επίσης και για διάσπαση και σταθεροποίηση ρυπαντών (Μπλάνας, 2013, D.Cunningham, R.Berti, & W.Huang, 1995). Η φυτοεξυγίανση είναι μια άκρως αναπτυσσόμενη τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιεί διάφορα είδη φυτών για να αποικοδομήσει, εξάγει, περιορίσει, ή να ακινητοποιήσει τους ρύπους από το έδαφος και το νερό. Η τεχνολογία αυτή, που βασίζεται στα φυτά, μπορεί να εφαρμοστεί δυναμικά σε μια ποικιλία μολυσματικών ουσιών, όπως τα βαρέα μέταλλα, τους χλωριωμένους διαλύτες και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (Manousaki & Kalogerakis, 2011).

2.4.2. Τύποι φυτοεξυγίανσης

Σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. οι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη φυτοαποκατάσταση χωρίζονται στις εξής κατηγορίες (Βουλγαράκης, 2017, Μανουσάκη, 2008, Salt, Smith, & Raskin, 1998):

1. Αποδόμηση

- *Φυτοαποδόμηση (Phytodegradation):* πρόσληψη του ρύπου από το φυτό και διάσπαση ή αποδόμηση του στους ιστούς του.
- *Ρίζοαποδόμηση (Rhizodegradation):* βιοαποδόμηση του οργανικού ρύπου, στο χώμα, από μικροοργανισμούς στην περιοχή της ριζόσφαιρας.

2. Συσσώρευση

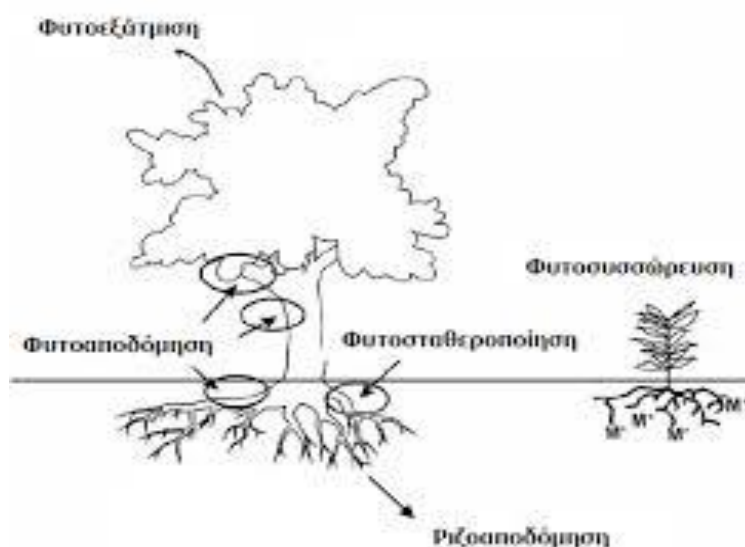
- *Φυτοσυσσώρευση (Phytoextraction):* πρόσληψη και μεταφορά του ρύπου για απομάκρυνση.
- *Ριζοδιήθηση (Rhizofiltration):* προσρόφηση του ρύπου στις ρίζες για συγκράτηση και/ή απομάκρυνση.

3. Διασκόρπιση

- **Φυτοεξάτμιση (Phytovolatilization):** πρόσληψη μετάλλων και οργανικών ενώσεων από τα φυτά, μετατροπή τους σε πτητικές μορφές και απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα.

4. Ακίνητοποίηση

- **Φυτοσταθεροποίηση (Phytostabilization):** ακίνητοποίηση του ρύπου στο έδαφος.
- **Υδραυλικός έλεγχος (Hydraulic Control):** Έλεγχος και απομάκρυνση των υπόγειων υδάτων μέσω της πρόσληψής τους από τα φυτά.



Εικόνα 4 Τύποι φυτοεξυγίανσης (Μανουσάκη, 2008)

Η φυτοαποκατάσταση εκμεταλλεύεται φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στα φυτά και οι οποίες περιλαμβάνουν την απορρόφηση του νερού και των χημικών ενώσεων, μεταβολισμό εντός του φυτού, απελευθέρωση οργανικών και ανόργανων ενώσεων στο έδαφος, βιολογικές και φυσικές επιδράσεις των ριζών του φυτού (Lone, He, Stoffella, & Yang, 2008). Τα φυτά χρειάζονται 13 ανόργανα θρεπτικά συστατικά, τα οποία είναι N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cl, Zn, Mn, Cu, B, Mo, για την ανάπτυξη τους τα οποία προσλαμβάνονται από τις ρίζες. Εκτός από τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, το φυτό μπορεί να προσλάβει και άλλα μη απαραίτητα ανόργανα συστατικά όπως ορισμένοι ανόργανοι (Pb, Cd, As, κ.λπ.) και οργανικοί ρύποι. Για να μπορέσει το φυτό να προσλάβει ένα χημικό συστατικό, χρειάζεται να είναι διαλυμένο είτε στο νερό του εδάφους είτε στο υπόγειο νερό. Το νερό απορροφάται από το εδαφικό διάλυμα στον εξωτερικό ιστό των ριζών και έτσι οι περιεχόμενοι στο νερό ρυπαντές μπορεί να μετακινηθούν στα διαφορετικά μέρη

του φυτού όπου μπορεί να απορροφηθούν, δεσμευθούν ή μεταβολισθούν (Πανταζίδου, Ξενίδης, & Παπασιώπη, 2006).

2.4.3. Η φυτοεξυγίανση ως μέθοδος εξυγίανσης οργανικών ρύπων

Το φυτό σε συνεργασία με τους σχετιζόμενους με αυτό μικροοργανισμούς μπορούν να αποδομήσουν αποτελεσματικά τους οργανικούς ρύπους, μέσω της ριζο- και της φυτοαποδόμησης. Οι τεχνικές αυτές, της αποδόμησης θεωρούνται οι επικρατέστερες για τη φυτοαποκατάσταση των οργανικών ρύπων. Τα φυτά προκειμένου να προστατευτούν από φαινόμενα φυτοτοξικότητας, είναι εφοδιασμένα με ένα πολύπλοκο και ευπροσάρμοστο σύστημα ενζύμων. Κατά τη φυτοαποδόμηση γίνεται διάσπαση των ρύπων από τα ένζυμα του φυτού, ενώ κατά τη ριζοαποδόμηση γίνεται ενζυματική διάσπαση στις ρίζες του. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν εξαχθεί και δημοσιευτεί αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα, αλλά τα περισσότερα φαίνεται να παραμένουν μακριά από το να εφαρμοστούν στην πράξη (Gerhardt et al., 2009).

2.4.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φυτοεξυγίανσης

Η εφαρμογή των συστημάτων φυτοεξυγίανσης παρουσιάζει πλεονεκτήματα καθώς και μειονεκτήματα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κάποια από αυτά (Αγιουτάντη, 2018, Δανιηλίδου, 2010):

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Το βασικότερο προτέρημα της μεθόδου αυτής είναι ότι παράγονται λιγότερα δευτερογενή απόβλητα από ότι σε άλλες τεχνολογίες	Ιδιαίτερα αργοί ρυθμοί φυτοεξυγίανσης, οι οποίοι συμπεριλαμβάνουν μερικές συνεχόμενες περιόδους καλλιέργειας των φυτών μέχρι να εξυγιανθεί τελείως το περιβάλλον από τους ρυπαντές
Η φυτοεξυγίανση εφαρμόζεται επί τόπου και δεν είναι αναγκαία μία εκσκαφή ή άντληση για περαιτέρω επεξεργασία. Για αυτό το λόγο δε διαταράσσεται καθόλου το φυσικό τοπίο της μολυσμένης περιοχής	Η φυτοεξυγίανση φέρνει μόνο αποτελέσματα, όταν το βάθος της μόλυνσης δε ξεπερνά το 1m στο έδαφος και τα 3m στον υδροφόρο ορίζοντα
Είναι οικονομική επεξεργασία ιδιαίτερα για μεγάλους όγκους χώματος ή νερού, που είναι μολυσμένα με μικρές ποσότητες τοξικών ρυπαντών	Δυνατότητα να μεταδοθούν οι τοξικές ουσίες στην τροφική αλυσίδα μετά από πιθανή βοσκή των φυτών από ζώα

Επιτυγχάνεται η συγκέντρωση των τοξικών ουσιών σε πολύ μικρούς όγκους	Οι κλιματικές ή οι υδρολογικές συνθήκες στην μολυσμένη περιοχή μπορεί να μην επιτρέπουν την καλλιέργεια και ανάπτυξη των κατάλληλων για την φυτοεξυγίανση φυτών
Είναι μια περιβαλλοντικά φιλική τεχνολογία	Πρόβλημα στην εναπόθεση των ρυπασμένων φυτών μετά τη συγκομιδή τους
Έχει μακροχρόνια εφαρμογή	Απαιτεί μεγάλες εκτάσεις γης για την εξυγίανση
Είναι αποτελεσματική στην αντιμετώπιση μεγάλης ποικιλίας ρύπων	Το κόστος της μπορεί να αυξηθεί λόγω της ανάγκης ειδικής επεξεργασίας και διάθεσης των χρησιμοποιούμενων φυτών

Πίνακας 4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυτοεξυγίανσης

2.5. ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

2.5.1. Γενικά

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν ένα περίπλοκο, ενοποιημένο σύστημα νερού, φυτών, ζώων, μικροοργανισμών και του περιβάλλοντος. Παρόλο που οι υγροβιότοποι θεωρούνται αξιόπιστα, αυτορυθμιζόμενα συστήματα, η κατανόηση του πως είναι δομημένοι οι φυσικοί υγροβιότοποι και πως λειτουργούν, αυξάνει την πιθανότητα της επιτυχημένης κατασκευής ενός τεχνητού υγροβιότοπου (ΕΡΑ, 1995). Χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αποβλήτων, όπως αστικά απόβλητα, αποστραγγίσεις ορυχείων, αστικές απορροές, κτηνοτροφικά απόβλητα, σπητικές δεξαμενές, οι οποίες έχουν αστοχήσει, αγροτικές απορροές και διάφορα βιομηχανικά απόβλητα (Αγιουτάντη, 2018, ΕΡΑ, 1993).



Εικόνα 5 Φυσικός υγροβιότοπος στις Η.Π.Α

Οι υγροβιότοποι είναι μεταβατικές περιοχές μεταξύ γης και νερού. Επομένως, τα όρια μεταξύ υγροβιοτόπων και ορεινών περιοχών ή βαθιά νερά δεν είναι πάντα διακριτά. Ο όρος "υγροβιότοποι" περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα υγρών περιβαλλόντων, ο οποίος περιλαμβάνει τα έλη, τους τυρφώνες, τους βάλτους, τα υγρά λιβάδια, τους παλιρροϊκούς υγροτόπους, τις πλημμυρικές και της κορδέλας (παρόχθιων) υγροτόπων κατά μήκος των διαύλων ροής (EPA, 1995, Carter, 1996).



Εικόνα 6 Τεχνητός υγροβιότοπος στη Γερμανία

Όλοι οι υγροβιότοποι, φυσικοί ή τεχνητοί, γλυκού ή αλμυρού νερού, έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: την περιοδική παρουσία επιφανειακού ή κοντά στην επιφάνεια νερού. Στους περισσότερους υγροβιοτόπους, οι υδρολογικές συνθήκες είναι τέτοιες έτσι ώστε το υπόστρωμα να είναι κορεσμένο για αρκετό διάστημα κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου για να δημιουργήσει συνθήκες κακής οξυγόνωσης στο υπόστρωμα. Η έλλειψη οξυγόνου έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία συνθηκών μείωσης (κακή οξυγόνωση) στο υπόστρωμα και περιορίζει τη βλάστηση στα είδη τα οποία είναι προσαρμοσμένα να αναπτύσσονται σε περιβάλλοντα με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο (EPA, 1995, Bassi et al., 2014).

Οι μικρές παροχές παρέχουν παρατεταμένη επαφή μεταξύ του νερού και των επιφανειών στο εσωτερικό του υγροβιότοπου. Η πολύπλοκη μάζα οργανικής και ανόργανης ύλης και οι διάφορες αντιδράσεις που γίνονται μεταξύ αερίων δημιουργούν μια ευρεία κοινότητα μικροοργανισμών που αποδομούν ή μετατρέπουν πολλές διαφορετικές ουσίες (Bassi et al., 2014).

Οι υδροβιοτόποι, κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, μπορούν να παράσχουν σημαντικές λειτουργίες στο περιβάλλον, όπως (Bassi et al., 2014, EPA, 1995):

- ❖ Αποθήκευση νερού μετά από πλημμύρες
- ❖ Βελτίωση ποιότητας νερού
- ❖ Ανακύλωση θρεπτικών ουσιών και άλλων υλικών
- ❖ Επηρεασμός της συχνότητας της βροχόπτωσης της περιοχής
- ❖ Ενδιαίτημα για άγρια ζωή και ψάρια
- ❖ Εκπαίδευση και έρευνα
- ❖ Χώρος αναψυχής και φυσικής ομορφιάς

2.5.2. Χαρακτηριστικά των τεχνητών υδροβιοτόπων

Οι τεχνητοί υδροβιοτόποι αποτελούνται από μια σχεδιασμένη λεκάνη, η οποία περιέχει νερό, ένα υπόστρωμα, και συνήθως, αγγειακά φυτά. Άλλες σημαντικές συνιστώσες των υδροβιοτόπων, όπως οι κοινότητες μικροβίων και ασπόνδυλων υδρόβιων, αναπτύσσονται φυσικά (EPA, 1995).

1. Νερό

Οι υδροβιοτόποι είναι πιο πιθανό να σχηματιστούν εκεί όπου σχηματίστηκε το άμεσο επιφανειακό νερό σε αβαθείς λεκάνες και όπου μια αδιαπέραστη υποεπιφάνεια εμποδίζει τα επιφανειακά νερά να εισχωρήσουν στο έδαφος. Ένας υδροβιοτόπος μπορεί να κατασκευαστεί σχεδόν οπουδήποτε στο τοπίο, με την προϋπόθεση ότι η επιφάνεια της γης θα διαμορφωθεί κατάλληλα έτσι ώστε να συλλέξει τα επιφανειακά ύδατα και να σφραγισθεί η λεκάνη για να μπορέσει να συγκρατήσει το νερό (Αγιουτάντη, 2018). Η υδρολογία είναι ο σημαντικότερος σχεδιαστικός παράγοντας στην κατασκευή ενός τεχνητού υδροβιοτόπου. Συνδέει όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους και είναι ο βασικότερος παράγοντας που καθορίζει την επιτυχημένη ή αποτυχημένη λειτουργία του. Παρόλο που η υδρολογία σε έναν τεχνητό υδροβιοτόπο δεν διαφέρει πάρα πολύ από την υδρολογία των επιφανειακών ή των υποεπιφανειακών νερών, έχει κάποιες διαφορές οι οποίες είναι σημαντικές για την εύρυθμη λειτουργία του (EPA, 1995, Barbier, 2007):

- Μικρές αλλαγές στην υδρολογία μπορούν να επιφέρουν μεγάλες επιπτώσεις στην αποτελεσματικότητα του υδροβιοτόπου
- η πυκνότητα της βλάστησης επηρεάζει έντονα την υδρολογία του, πρώτον, εμποδίζοντας τις διαδρομές ροής καθώς το νερό βρίσκει τον ελικοειδή δρόμο του μέσα από το δίκτυο των στελεχών, των φύλλων, των ριζών και

των ριζωμάτων και, δεύτερον, εμποδίζοντας την έκθεση στον άνεμο και τον ήλιο

- Εξαιτίας της μεγάλης υδάτινης επιφάνειας και του ρηχού βυθού, το σύστημα του υγροβιότοπου αλληλεπιδρά έντονα με την ατμόσφαιρα μέσω της βροχόπτωσης και της εξατμισοδιαπνοής

2. Υποστρώματα, ιζήματα και φυτικά απορρίμματα

Τα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υγροβιοτόπων περιλαμβάνουν έδαφος, άμμο, χαλίκι, πέτρες και οργανικά υλικά όπως το κομπόστ. Τα ιζήματα και τα απορρίμματα συσσωρεύονται στον υγροβιότοπο εξαιτίας των χαμηλών ταχυτήτων του νερού και της υψηλής παραγωγικότητας του. Τα υποστρώματα, τα ιζήματα, και τα απορρίμματα είναι σημαντικά για διάφορους λόγους (EPA, 1995, Wu, et al., 2015):

- Συντηρούν πολλούς από τους οργανισμούς του υγροβιότοπου
- Η διαπερατότητα του υποστρώματος επηρεάζει τη ροή του νερού μέσω του υγροβιότοπου
- Πολλές χημικές, βιολογικές και μικροβιακές δραστηριότητες λαμβάνουν μέρος στο υπόστρωμα
- Το υπόστρωμα κατακρατεί πολλούς ρύπους
- Η συσσώρευση των φυτικών απορριμμάτων αυξάνει την ποσότητα της οργανικής ύλης που υπάρχει στον υγροβιότοπο. Η οργανική ύλη παρέχει δυνατότητα για στοιχειακές ανταλλαγές και μικροβιακή ανάπτυξη και είναι πηγή άνθρακα, της βασικότερης δηλαδή πηγής ενέργειας που τροφοδοτεί τις πιο σημαντικές βιολογικές αντιδράσεις στους υγροβιότοπους

Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των εδαφών και άλλων υποστρωμάτων τροποποιούνται όταν πλημμυρίζουν. Σε ένα κορεσμένο υπόστρωμα, το νερό αντικαθιστά τον αέρα στους πόρους και ο μικροβιακός μεταβολισμός καταναλώνει το διαθέσιμο οξυγόνο (Αγιουτάντη, 2018). Δεδομένου ότι το οξυγόνο καταναλώνεται ταχύτερα από ό, τι μπορεί να αντικατασταθεί από διάχυση από την ατμόσφαιρα, τα υποστρώματα καθίστανται ανοξικά (χωρίς οξυγόνο). Αυτό το μειωτικό περιβάλλον είναι σημαντικό για την απομάκρυνση ρύπων όπως το άζωτο και τα μέταλλα (EPA, 1995).

3. Βλάστηση

Τα αγγειακά φυτά (τα ανώτερα φυτά) καθώς και τα μη αγγειακά φυτά (άλγη) είναι σημαντικά σε τεχνητούς υγροβιοτόπους. Η φωτοσύνθεση από τα φύκια αυξάνει την περιεκτικότητα σε διαλυμένο οξυγόνο του νερού, που με τη σειρά του επηρεάζει τις θρεπτικές και μεταλλικές αντιδράσεις. Τα αγγειακά φυτά και τα μακρόφυτα συμβάλλουν στην εξυγίανση των λυμάτων με πολλούς τρόπους (EPA, 1995, Wu, et al., 2015):

- Σταθεροποιούν το υπόστρωμα και περιορίζουν την διοχετευμένη ροή
- Μειώνουν τις υδάτινες ταχύτητες, επιτρέποντας έτσι στα σωματίδια να καθιζάνουν
- Απορροφούν άνθρακα και θρεπτικά στοιχεία τα οποία διαχέουν μέσω τους φυτικούς ιστούς τους
- Μεταφέρουν αέρια μεταξύ της ατμόσφαιρας και του υποστρώματος
- Η διαφυγή οξυγόνου από τα υποεπιφανειακά φυτά δημιουργεί οξυγονωμένο περιβάλλον για τις μικροβιακές κοινότητες στο εσωτερικό του υποστρώματος
- Το κοτσάνι καθώς και το ριζικό σύστημα των φυτών αποτελούν χώρους για ανάπτυξη μικροβιακής κοινότητας
- Δημιουργούν φυτικά απορρίμματα, όταν πεθαίνουν και αποσυντίθενται, που αποτελούν ιδανικές πηγές τροφής των μικροοργανισμών

Στους τεχνητούς υγροβιοτόπους συνήθως φυτεύονται μη ξυλώδη φυτά τα οποία αναπτύσσουν το ριζικό τους σύστημα κάτω από την επιφάνεια, στο υπόστρωμα, με το κοτσάνι τους και τα φύλλα τους να εξέχουν από το νερό. Συνηθισμένα είδη βλάστησης αποτελούν τα βούρλα, τα ψαθί και μια σειρά από πλατύφυλλα είδη (EPA, 1995).

4. Μικροοργανισμοί

Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό των υγροβιοτόπων είναι ότι η λειτουργία τους ρυθμίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από μικροοργανισμούς και την μεταβολική τους δραστηριότητα. Οι μικροοργανισμοί περιλαμβάνουν βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα και άλγη. Η μικροβιακή δραστηριότητα (EPA, 1995, Weber, 2016):

- Μετατρέπει ένα μεγάλο αριθμό οργανικών και ανόργανων ουσιών σε αβλαβής και αδιάλυτες ουσίες
- Μεταβάλλει τις αναγωγικές/οξειδωτικές συνθήκες που επικρατούν στο υπόστρωμα και έτσι επηρεάζει τις ικανότητες επεξεργασίας του υγροβιοτόπου
- Σχετίζεται με την ανακύκλωση των θρεπτικών ουσιών

Κάποιες μικροβιακές δραστηριότητες είναι αερόβιες, δηλαδή απαιτούν οξυγόνο για να πραγματοποιηθούν ενώ άλλες είναι αναερόβιες, δηλαδή λαμβάνουν χώρα σε ανοξικές συνθήκες. Πολλά είδη βακτηρίων είναι δυνητικά αναερόβια, δηλαδή είναι ικανά να λειτουργήσουν κάτω από αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες, όταν υπάρχει συνεχής αλλαγή περιβαλλοντικών συνθηκών (Weber, 2016).

Οι μικροβιακοί πληθυσμοί προσαρμόζονται στις αλλαγές που προκύπτουν λόγω νερού. Πληθυσμοί μικροβίων μπορούν να αναπτυχθούν πολύ γρήγορα όταν εκτίθενται στα κατάλληλα θρεπτικά υλικά. Όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι πλέον κατάλληλες, πολλοί μικροοργανισμοί γίνονται αδρανείς και μπορούν να παραμείνουν αδρανείς για χρόνια (EPA, 1995).

Η μικροβιακή κοινότητα ενός τεχνητού υγροβιοτόπου μπορεί να επηρεαστεί από τοξικές ουσίες, όπως εντομοκτόνα ή βαρέα μέταλλα. Είναι λοιπόν σημαντικό οι συγκεντρώσεις τέτοιων ουσιών που εισέρχονται στον υγροβιοτόπο να είναι ελεγχόμενες, ώστε να μην είναι καταστροφικές για τους μικροοργανισμούς (EPA, 1995).

5. Πανίδα

Οι τεχνητοί υγροβιοτόποι παρέχουν ενδιαίτημα σε μια μεγάλη ποικιλία ασπόνδυλων και σπονδυλωτών ζώων. Τα ασπόνδυλα ζώα, όπως είναι τα έντομα και τα σκουλήκια συμβάλλουν στην διαδικασία επεξεργασίας των λυμάτων θρυμματίζοντας απόβλητα και καταναλώνοντας οργανική μάζα. Οι προνύμφες πολλών εντόμων είναι υδρόβιες και καταναλώνουν σημαντικές ποσότητες υλικών σε αυτό το στάδιο της ανάπτυξης του, που μπορεί να διαρκεί και χρόνια. Τα ασπόνδυλα επίσης παίζουν ισχυρούς οικολογικούς ρόλους, για παράδειγμα η λιβελλούλα τρέφεται με τις προνύμφες κουνουπιών (EPA, 1995).

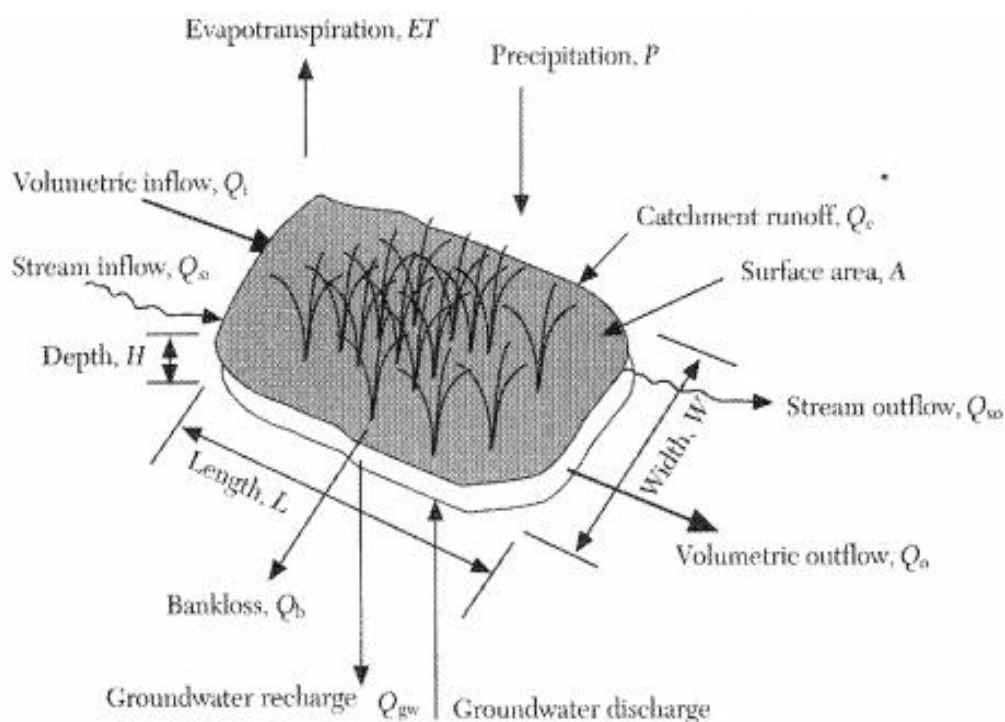
Παρόλο που τα ασπόνδυλα είναι τα πιο σημαντικά ζώα όσον αφορά την εξυγίανση του νερού, οι τεχνητοί υγροβιοτόποι ελκύουν μεγάλη ποικιλία αμφιβίων, ερπετών, πουλιών και θηλαστικών (Worrall, Peberdy, & Millett, 1997).

6. Τοπία και αισθητική

Παρόλο που ο πρωταρχικός σκοπός των τεχνητών υγροβιοτόπων είναι η επεξεργασία των αποβλήτων, αυξάνουν σημαντικά την αισθητική και την ομορφιά του τοπίου στην περιοχή που κατασκευάστηκαν. Όπως οι φυσικοί υγροβιοτόποι, έτσι και οι τεχνητοί προσφέρουν μια πολύ όμορφη και υγιή περιβαλλοντική εικόνα. Η πολυπλοκότητα του σχήματος, του χρώματος, του μεγέθους και της βλάστησης προσθέτουν ποιοτική ποικιλία σε ένα οικοσύστημα. Οι τεχνητοί υγροβιοτόποι μπορούν να κατασκευαστούν με τέτοια σχήματα που να ακολουθούν τις φυσικές ισοϋψείς της περιοχής, ενώ άλλοι υδροβιοτόποι μοιάζουν πανομοιότυποι με τους φυσικούς (Campbell & Ogden, 1999, Irvine, 2013).

Οι υγροβιότοποι για την εξυγίανση νερού χρησιμοποιούνται συνήθως σαν μια ειδική επεξεργασία, μετά από την δευτεροβάθμια ή την τριτοβάθμια επεξεργασία σε μια ΕΕΛ. Οι μηχανισμοί που διαθέτουν για την βελτίωση της ποιότητας του νερού είναι πολυάριθμοι και συνήθως συσχετισμένοι. Οι πιο αποτελεσματικοί υγροβιότοποι στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι αυτοί που εφαρμόζουν αυτούς τους μηχανισμούς. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν (EPA, 1995, Wu, et al., 2015):

- Την καθίζηση των αιωρούμενων σωματιδίων
- Την διήθηση και χημική κατακρήμνιση, μέσω της επαφής του νερού με το υπόστρωμα, τα ιζήματα και τα φυτικά απορρίμματα
- Χημικές αντιδράσεις
- Τις διεργασίες της προσρόφησης και της ιοντοεναλλαγής στις επιφάνειες των φυτών, στο υπόστρωμα, στα ιζήματα και στα φυτικά απορρίμματα
- Την διάσπαση και μετατροπή των ρύπων από τους μικροοργανισμούς και τα φυτά
- Την πρόσληψη και μετατροπή των θρεπτικών στοιχείων από τους μικροοργανισμούς και τα φυτά
- Την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών, λόγω φυσικών αιτιών ή λόγω κατανάλωσης τους από άλλους μικροοργανισμούς



Εικόνα 7 Στοιχεία του νερού και σχετική ορολογία (Kadlec et al., 2000).

Με βάση τα χαρακτηριστικά που δημιουργήθηκαν, οι τεχνητοί υγροβιότοποι χωρίζονται σε κατηγορίες.

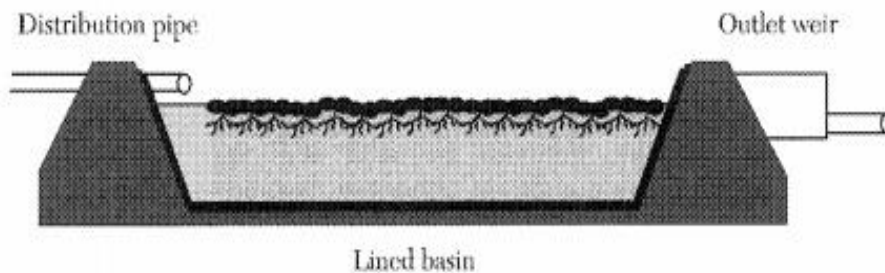
2.5.3. Τύποι τεχνητών υγροβιοτόπων

Για την επεξεργασία των ρυπασμένων υδάτων έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί δύο τύποι τεχνητών υδροβιοτόπων:

1. Τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής (Free water surface systems-FWS)

Οι υγροβιότοποι επιφανειακής ροής έχουν ως χαρακτηριστικό την κυρίως κίνηση του νερού πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, σε ύψος που καθορίζεται από τις λειτουργικές ανάγκες του συστήματος. Σε τέτοιους τύπους υγροβιοτόπων η βλάστηση έχει ρίζες στο υπόστρωμα και το φυτό αναπτύσσεται πάνω από την επιφάνεια του νερού (Kadlec, 2009). Αποτελούνται, συνήθως, από παράλληλες λεκάνες, κανάλια ή τάφρους με αδιαπέρατους πυθμένες, με αναφυόμενη φυτική βλάστηση και μικρό βάθος νερού (0,1-0,6 m). Σε τέτοιου είδους συστήματα εφαρμόζονται συνεχώς προεπεξεργασμένα απόβλητα και η περαιτέρω επεξεργασία τους διενεργείται, καθώς η εφαρμοζόμενη εκροή του ρέει με μικρή ταχύτητα δια μέσου των στελεχών και ριζωμάτων της φυτικής βλάστησης και του υποστρώματος (Στεφανόπουλος, 2006).

Στα συστήματα FWS κύρια πηγή οξυγόνου είναι η ελεύθερη επιφάνειά του, αλλά η ύπαρξη βιολογικής βλάστησης παρεμποδίζει τον επιφανειακό επαναερισμό, που είναι πιθανό να διενεργείται με τον άνεμο. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να εφαρμόζονται μικρά οργανικά φορτία. Αντίθετα, η ύπαρξη επιδρά ανασταλτικά στην ανάπτυξη αλγών (Αγιουτάντη, 2018, Vymazal, 2010). Η απομάκρυνση στερεών σε αιώρηση οφείλεται κυρίως στο μηχανισμό της καθίζησης και διενεργείται 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 (Στεφανόπουλος, 2006).



Εικόνα 8 Διάγραμμα FWS υγροβιοτόπου που περιέχει επιπλέοντα φυτά (Kadlec et al., 2000).

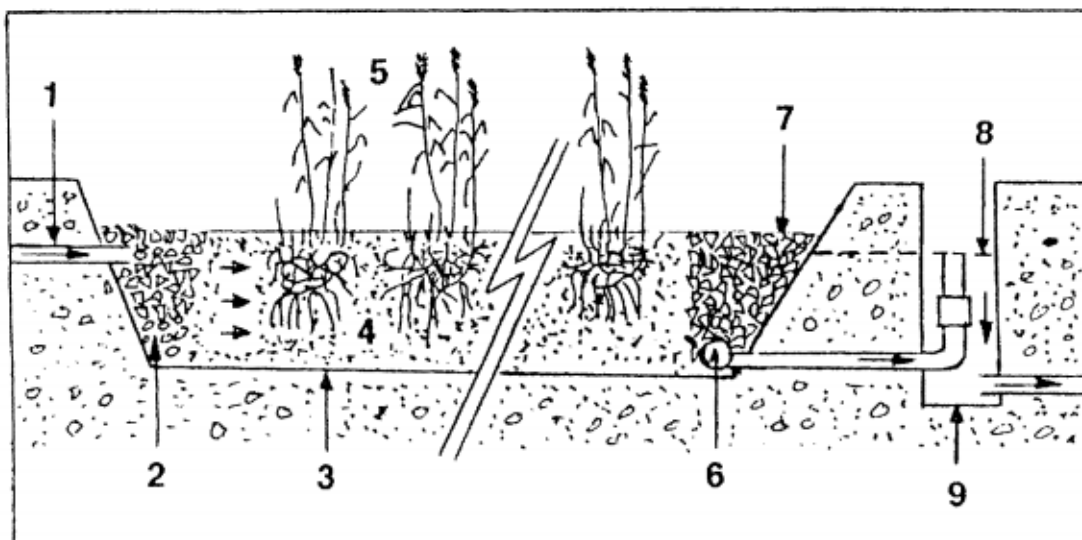
2. Τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής (ή υπόγειας) ροής (Subsurface flow systems-SFS)

Τα συστήματα αυτά έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την κίνηση του νερού κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής σχεδιάζονται με σκοπό την επίτευξη δευτεροβάθμιας ή προωθημένης επεξεργασίας (Αγιουτάντη, 2018). Αυτά τα συστήματα καλούνται επίσης συστήματα «ριζόσφαιρας» ή «φίλτρων εδάφους-καλαμιών» και αναπτύσσονται μέσα σε κανάλια ή τάφρους με σχετικά στεγανούς πορώδεις πυθμένες που περιέχουν άμμο ή άλλα γήινα μέσα υποστήριξης της αναπτυσσόμενης (επιφανειακά) φυτικής βλάστησης (Στεφανόπουλος, 2006, Jenssen, Mrehlum, & Krogstad, 1993).

Τα συστήματα SFS αποτελούνται χαρακτηριστικά από μια τάφρο ή μια κλίνη, που σφραγίζεται από μια στεγανή μεμβράνη για να εμποδιστεί η διαρροή και υπόστρωμα που είναι κορεσμένο με νερό που βοηθά την ανάπτυξη των φυτών. Στα συστήματα αυτά η επιφάνεια του νερού διατηρείται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή του χρησιμοποιούμενου μέσου (Haberl, et al., 2003). Η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου οφείλεται στις φυσικές και βιοχημικές αποκρίσεις του μέσου, καθώς επίσης και 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 υποστρωμάτων χρησιμοποιείται κυρίως έδαφος, άμμος και διάφορα άλλα χονδρόκοκκα ή ακόμη και πλαστικά ή άλλα αδρανή υλικά (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995, Wu et al., 2010).

Η απομάκρυνση BOD και στερεών συστατικών σε αιώρηση διενεργείται με διήθηση, καθίζηση και αποδόμηση από αερόβιους και αναερόβιους μικροοργανισμούς (Haberl, et al., 2003). 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 (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995, Αντωνόπουλος, 2003).



Εικόνα 9 Διάγραμμα SFS υγροβιοτόπου (Kadlec et al., 2000).

2.5.4. Μηχανισμοί απομάκρυνσης οργανικών ρύπων

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία του αποβλήτου στους τεχνητούς υγροβιοτόπους 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 (Σοφιανός, 2016).

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 αναδυόμενων 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 υγροβιοτόπου είναι αρκετά χαμηλή και έτσι οι διεργασίες εκεί είναι κυρίως αναερόβιες. Παρόλα αυτά από τις ρίζες των φυτών διαρρέεται κάποια ποσότητα οξυγόνου. Στα σημεία που 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 (Σωτηροπούλου, 2010, Cooper, Griffin, & Humphries, 1999, Duarte-Davidson & Jones, 1996).

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).

Σημαντικό ρόλο στη λειτουργία των τεχνητών υγροβιότοπων παίζει η κατάλληλη χρήση φυτού, ανάλογα το ρύπο που χρειάζεται να επεξεργαστεί.

2.6. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΦΥΤΟΥ

2.6.1 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 (Manousaki & Kalogerakis, 2011).

Τα αλόφυτα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς αναπτύσσονται φυσικά σε περιβάλλον το οποίο χαρακτηρίζεται από πληθώρα τοξικών ιόντων, όπως νάτριο και χλώριο. Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι αυτά τα φυτά μπορούν επίσης να αντέξουν την ύπαρξη βαρέων μετάλλων. Οι έρευνες αυτές έχουν βασιστεί στο εύρημα ότι η ανοχή τους στο αλάτι και στα βαρέα μέταλλα, οφείλεται μερικώς σε κοινούς φυσιολογικούς μηχανισμούς έναντι των αβιοτικών καταπονήσεων (Breckle, 2002, Manousaki & Kalogerakis, 2011, Popp, Larher, & Weigel, 1985). Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι τα φυτά που έχουν αντοχή στο αλάτι είναι ικανά να συσσωρεύουν και βαρέα μέταλλα. Συνεπώς, έχει δηλωθεί ότι για τα αλόφυτα είναι φυσικά πιο εύκολο να ανταπεξέλθουν σε περιβαλλοντικό στρες, συμπεριλαμβανομένου τα βαρέα μέταλλα, σε σχέση με φυτά που είναι ευαίσθητα στο αλάτι και επιλέγονται συνήθως σε διαδικασίες φυτοσυσσώρευσης. Έτσι τα δυνητικά αλόφυτα είναι ιδανικοί υποψήφιοι για φυτοσυσσώρευση ή φυτοσταθεροποίηση εδαφών που είναι ρυπασμένα με βαρέα μέταλλα και επιπλέον για εδάφη ρυπασμένα με

βαρέα μέταλλα που έχουν επηρεαστεί από αλατότητα (Manousaki & Kalogerakis, 2011).

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, επίσης, θεωρούνται η αμυλιά (*Atriplex halimus*), το αλμυρίκι (*Tamarix* sp.), το Βούρλο (*Juncus acutus*), ο ελαίαγνος (*Elaeagnus angustifolia*), η στατική (*Statice* sp.), το λιμόνιο (*Limonium* sp.) (Σοφιανός, 2016, Kapler, 2019).

2.6.2. *Juncus acutus* L.

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*) (Σοφιανός, 2016).

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 ευδοκιμεί 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 10 *Juncus acutus* L.

Το *J. acutus* είναι ένα φυτό που από την φύση του επιβιώνει σε αλατούχα εδάφη και ταυτόχρονα έχει εκδηλώσει την δυνατότητα να συσσωρεύει μέταλλα στους υπόγειους ιστούς του (Almeida, Mucha, & Vasconcelos, 2006). Επίσης, παρουσιάζει μια εξαιρετική συμπεριφορά ως προς την πρόσληψη βαρέων μετάλλων από αστικά λύματα, καθώς επίσης και της δισφαινόλης Α (BPA) και αντιβιοτικών χωρίς να καταστρέφεται ο φυτικός του ιστός. Το γεγονός αυτό, κάνει το *J. acutus* κατάλληλο υποψήφιο για τη χρήση του σε τεχνητούς υγροβιότοπους για την επεξεργασία αστικών λυμάτων (Christofilopoulos et al., 2016, Syranidou, et al., 2017).

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

3.1.1. Συλλογή φυτών

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το φυτό *Juncus acutus* L. που ανήκει στην οικογένεια των αλόφυτων. Επιλέχθηκε αυτό το είδος, εξαιτίας της μεγάλης του ανθεκτικότητας στις μεγάλες περιβαλλοντικές πιέσεις. Τα φυτά συλλέχθηκαν με προσοχή ώστε να μην καταστραφεί το ριζικό τους σύστημα από την παραλία της Σούδας (Χανιά, Κρήτη). Στη συνέχεια, για 1 εβδομάδα έμειναν ως είχαν σε νερό για μια πρώτη προσαρμογή και στη συνέχεια πλύθηκαν, για την απομάκρυνση χώματος, λάσπης και χαλικιών, στέγνωσαν και μετρήθηκε η φρέσκια βιομάζα τους. Επιλέχθηκαν φυτά ίδιας περιπού μάζας (15g) να τοποθετηθούν ομοιόμορφα στα ειδικά διαμορφωμένα ποτήρια ζέσεως.

3.1.2. Πειραματική διάταξη

Για το πείραμα παρασκευάστηκε συνθετικό λύμα σύμφωνα με τους Prochaska & Zouboulis, (2006) με διάλυση/ανάμιξη των 800 mg/l peptone (meat peptone), 550 mg/l meat extract, 1100 mg/l glucose monohydrate, 35 mg/l sodium chloride (NaCl), 285 mg/l ammonium chloride (NH₄Cl), 20 mg/l calcium chloride (CaCl₂), 10 mg/l magnesium sulphate (MgSO₄), 190 mg/l dipotassium hydrogen phosphate (K₂HPO₄), το οποίο τελικώς περιέχει σε 1000 mg/l οργανικού άνθρακα (\approx 2500 mg/l COD), 250 mg/l N και 40 mg/l P και αντιστοιχεί σε λύμα υψηλού οργανικού φορτίου.

Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκαν 24 ειδικά διαμορφωμένα ποτήρια ζέσεως, όγκου 400 ml, ύψους 12,5 cm και διαμέτρου 7,5 cm τα οποία διαθέτουν έξοδο υπερχειλίσσης σε σταθερό ύψος. Ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε λεπτό χαλίκι διαμέτρου 4-8 mm, το οποίο πλύθηκε, στέγνωσε και ζυγίστηκε στα 300 g ανά πειραματικό ποτήρι. Έπειτα, τοποθετήθηκε σε κάθε ποτήρι ζέσεως ένα φυτό, προστέθηκε το χαλίκι μέχρι λίγο πριν το ύψος του υπερχειλιστή. Ως είσοδο στο σύστημα χρησιμοποιήθηκε μια γυάλινη πιπέτα paster, όπου έφθανε έως τη βάση του πειραματικού ποτηριού. Τέλος, στο πάνω μέρος του ποτηριού τοποθετήθηκε μεμβράνη, για να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η εξάτμιση του πειραματικού διαλύματος, καθώς και αλουμινόχαρτο γύρω από το ποτήρι για την προστασία του ριζικού συστήματος των φυτών από τον ήλιο.



Εικόνα 11 Σχηματική απεικόνιση της υδροπονικής διάταξης. Το υλικό μέσα στο ποτήρι είναι μεσαίου μεγέθους χαλίκι. Από την πιπέτα γινόταν εισαγωγή του δείγματος, ενώ το σωληνάκι κατέληγε σε tubes που εκχυνόταν το επεξεργασμένο δείγμα

Έπειτα, τα ποτήρια χωρίστηκαν σε 4 ομάδες με 6 φυτά/ποτήρια ανά ομάδα, τοποθετήθηκαν σε γυάλινο θερμοκήπιο και προστέθηκαν 25 ml νερό βρύσης για να ξεκινήσει η 1^η περίοδος προσαρμογής των φυτών στις καινούριες συνθήκες για 4 ημέρες. Μετά το πέρας των 4 ημερών προστέθηκε στις ομάδες Β και Δ λύμα με ελαφρύ οργανικό φορτίο, COD 50 mg/l, για 3 ημέρες ως η 2^η περίοδος προσαρμογής πριν την έναρξη των πειραμάτων.

Ομάδα		Πειραματικό διάλυμα		
		Νερό	Λύμα	Νερό εμπλουτισμένο με νανοφουσαλίδες αέρα
A	Control	+	-	-
B	WW	-	+	-
C	NBs	-	-	+
D	WW & NBs	-	+	+

Πίνακας 5 Πειραματικός σχεδιασμός



Εικόνα 12 Πειραματική διάταξη



Εικόνα 13 Στην αριστερή φωτογραφία φαίνονται φυτά από την Β ομάδα στην αρχή του πειράματος 1/4/2019 ενώ στη δεξιά φαίνονται τα ίδια φυτά στο τέλος του πειράματος 23/4/2019

3.2. ΚΥΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κατά τη διάρκεια του κυρίως πειραματικού μέρους για την παραγωγή των νανοφυσαλίδων αέρα χρησιμοποιήθηκε το MK1 NANOBUBBLES της εταιρείας Fine Bubble Technologies. Το όργανο χρησιμοποιήθηκε στα 50 Hz και στους 25 °C για 30 λεπτά. Μετά το πέρας των 30 λεπτών που απαιτείται για την παραγωγή των νανοφυσαλίδων, το εμπλουτισμένο νερό τοποθετούνταν σε 3 φυαλίδια συνολικής χωρητικότητας 30 ml. Αρχικά, το νερό αφηνόταν να τρέξει και από τις 2 εξόδους, μια στο μέσο της δεξαμενής και άλλη μια στο κάτω μέρος, για λίγα δευτερόλεπτα, έτσι ώστε να απομακρυνθούν οι τυχόν μακροφυσαλίδες. Το νερό προσλαμβάνονταν και από τις δυο εξόδους για την όσο το δυνατόν καλύτερη πρόσληψη των νανοφυσαλίδων και τα φυαλίδια αφήνονταν να υπερχειλίσουν για λίγα δευτερόλεπτα για την απομάκρυνση του οξυγόνου και έπειτα σφραγίζονταν καλά. Ενώ αμέσως, γινόταν η μεταφορά τους στο θερμοκήπιο για είσοδο στην

πειραματική διάταξη. Ταυτόχρονα, άλλα 2 φυαλίδια με νερό εμπλουτισμένο με νανοφυσολογικές πήγαιναν για μέτρηση των νανοφυσολογικών αέρα. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο SALD-7500nano Αναλυτής Μεγέθους Σωματιδίων (Particle Size Analyzer) της SHIMADZU, όπου γινόταν προσδιορισμός της κατανομής των νανοφυσολογικών αέρα ως προς το μέγεθος αλλά και ως προς τον αριθμό τους της SHIMADZU.

Καθημερινά, σε συγκεκριμένη ώρα, γινόταν η εισαγωγή του διαλύματος εισόδου πρώτα στις ομάδες D, C, οι οποίες περιείχαν νερό εμπλουτισμένο με νανοφυσολογικές αέρα έτσι ώστε να αποφευχθεί η διάλυση των νανοφυσολογικών, και έπειτα στις ομάδες B και A. Το διάλυμα εισόδου εισαγόταν στο χαμηλότερο σημείο του ποτηριού με τη βοήθεια πιπέτας που είχε τοποθετηθεί, έτσι ώστε το δείγμα της προηγούμενης μέρας να ανέβει στον υπερχειλιστή και στη συνέχεια μέσω των σωλήνων να καταλήξει σε πλαστικό βαθμονομημένο φυαλίδιο συλλογής δείγματος εξόδου. Οι ομάδες C και D ποτίζονταν εναλλάξ, καθώς και τα ποτήρια ζέσεως ποτίζονταν εναλλάξ, για την όσο το δυνατόν καλύτερη διανομή των νανοφυσολογικών (Πίνακας 6).

Ομάδα		Διάλυμα εισόδου		
		Νερό βρύσης	Λύμα	Διάλυμα νερού βρύσης με νανοφυσολογικές αέρα
A	control	25 ml	0	0
B	WW	22,5 ml	2,5 ml	0
C	NBs	2,5 ml	0	22,5 ml
D	WW & NBs	0	2,5 ml	22,5 ml

Πίνακας 6 Καθημερινές εισροές

Η μέτρηση των όγκων των δειγμάτων εξόδου γινόταν καθημερινά με τη βοήθεια των βαθμονομημένων φυαλιδίων, ώστε να υπάρχει έλεγχος των δειγμάτων και της εξατμισοδιαπνοής. Τα δείγματα διαλύματος εξόδου μεταφέρονταν στο εργαστήριο για μετρήσεις εντός των επόμενων 2-3 ωρών. Επίσης, γίνονταν καθημερινές μετρήσεις της στιγμιαίας, της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας, καθώς και του ποσοστού της υγρασίας μέσα στο θερμοκήπιο. Η φωτοπερίοδος το μήνα Απρίλιο, που έλαβε χώρα το πείραμα, υπολογίστηκε ότι είναι περίπου 13 hrs/day.

3:30 μμ	Tmax (°C)	Tmin(°C)	Τστιγμ(°C)	Υγρασία(%)
12/4/2019	36,0	15,0		55,0
13/4/2019	32,0	13,0	23,0	41,5
14/4/2019	29,0	21,0	32,0	52,0
15/4/2019	36,0	10,0	22,0	43,5
16/4/2019	38,0	10,0	24,0	42,0
17/4/2019	31,0	12,0	30,0	45,0
18/4/2019	35,0	11,5	24,0	39,0

19/4/2019	36,0	10,0	37,0	35,5
20/4/2019	36,0	9,0	38,5	40,0
21/4/2019	35,0	10,0	33,0	44,0
22/4/2019	31,0	10,0	24,0	41,5
23/4/2019			34,0	

Πίνακας 7 Τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας

Από τα δείγματα διαλύματος εξόδου που λαμβάνονταν καθημερινά, γίνονταν μετρήσεις ανά 2 ημέρες των EC, ORP, pH, COD, ολικού φωσφόρου και ολικού αζώτου. Την τελευταία πειραματική ημέρα, έγιναν μετρήσεις για τον έλεγχο της φυσιολογίας και της ανάπτυξης των φυτών, της Ολικής, α και β χλωροφύλλης, της ενζυμικής δραστηριότητας της καταλάσης στις ρίζες των φυτών, καθώς και της βιομάζας, του περιεχόμενου νερού και του αριθμού φύλλων των φυτών.

3.2.1. Μέτρησεις δειγμάτων εξόδου

3.2.1.1. Μετρήσεις pH, EC, ORP, DO

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το φορητό πολύμετρο δυο καναλιών Hach® HQ40D field case. Με το πολύμετρο μετρήθηκαν το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), το διαλυμένο οξυγόνο (DO) και το δυναμικό οξειδοαναγωγής (ORP).

3.2.1.2. Προσδιορισμός του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD)

Για τον προσδιορισμό του COD ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία που συμπεριλαμβάνει φιαλίδια kit της HACH με όλα τα απαραίτητα αντιδραστήρια. Για τη μέθοδο αυτή απαιτείται η κατασκευή τυφλού διαλύματος (Εργαστηριακές Σημειώσεις Ελέγχου Ρύπανσης Νερών, 2018):

Αρχικά, γινόταν καλή ανακίνηση του φιαλιδίου με το αντιδραστήριο για να διαλυθεί το ίζημα στον πυθμένα.

1. Με αυτόματη πιπέτα μάρκας Eppendorf γινόταν προσθήκη 2 ml δείγματος στο φιαλίδιο που περιείχε τα αντιδραστήρια, δηλαδή το οξειδωτικό μέσο (διχρωμικό κάλιο $K_2Cr_2O_7$) και τον καταλύτη.

2. Ακολουθούσε ανακίνηση του φιαλιδίου και τοποθέτηση του στον θερμοαντιδραστήρα για οξείδωση στους $150^{\circ}C$ για 120 λεπτά.

3. Μετά το πέρας των 2 ωρών το δείγμα έπρεπε να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου για 30 λεπτά.

4. Στη συνέχεια, με χαρτί καθαριζόταν προσεκτικά το εξωτερικό μέρος του φυαλιδίου και μετριοτάνα το COD στο φορητό φασματοφωτόμετρο HACH με τη μέθοδο 620 COD HR, καθώς και με τη μέθοδο 430 COD LR. (Πρώτα μετριοτάνα το τυφλό που είχε φτιαχτεί με 2ml απιονισμένου νερού).

Τέλος, στις 2 πρώτες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν ως δείγμα η υπερχειλίση από 4 ποτήρια ζέσεως, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν από 3.

3.2.1.3. Προσδιορισμός ολικού αζώτου (TN) και ολικού φωσφόρου (TP)

Για τον προσδιορισμό του TN χρησιμοποιήθηκε το εργαστηριακό κιτ LCK 338 της HACH. Για τον προσδιορισμό του TP χρησιμοποιήθηκε το εργαστηριακό κιτ LCK 350 της HACH. Όπως και στη μέτρηση του COD, παραπάνω, στην αρχή χρησιμοποιήθηκαν 4 δείγματα, ενώ στη συνέχεια 3.

3.2.2. Μετρήσεις φυσιολογίας και ανάπτυξης του φυτού

3.2.2.1. Προσδιορισμός της χλωροφύλλης

Για τον προσδιορισμό των επιπέδων της χλωροφύλλης στα υπό εξέταση φυτά χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Harborne (1984). Από κάθε φυτό ελήφθησαν τυχαία δείγματα φύλλων, με μέση μάζα 0,2 g. Στη συνέχεια, τα δείγματα ομογενοποιήθηκαν με διάλυμα ακετόνης 80% κ.ο., τοποθετήθηκαν σε 4 σωληνάκια φυγοκέντρου 2 ml και φυγοκεντρήθηκαν για 1 λεπτό στις 16000 rcf. Έπειτα, το εκχύλισμα τοποθετήθηκε σε ογκομετρικό κύλινδρο και προστέθηκε διάλυμα ακετόνης έως τα 8 ml. Όπου χρειάστηκε, έγινε αραιώση 1:1 σε ένα δεύτερο ογκομετρικό κύλινδρο λόγω γραμμικότητας του φασματοφωτόμετρου UV-VIS. Τέλος, προστέθηκε το δείγμα σε κυψελίδα χαλαζία των 3 ml και μετρήθηκε η απορρόφηση στα 663 και 646 nm σε φασματοφωτόμετρο UV-VIS. Η συγκέντρωση της α,β και της ολικής χλωροφύλλης υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους:

$$\text{Ολική Χλωροφύλλη } \left[\frac{mg}{l} \right] = (17,34 * A_{646}) + (7,18 * A_{663})$$

$$\text{Χλωροφύλλη } \alpha \left[\frac{mg}{l} \right] = (12,21 * A_{663}) - (2,81 * A_{646})$$

$$\text{Χλωροφύλλη } \beta \left[\frac{mg}{l} \right] = (20,13 * A_{646}) - (5,03 * A_{663})$$

Όπου A_{663} και A_{646} η απορρόφηση στα 663 και 646 nm, αντίστοιχα.

3.2.2.2. Προσδιορισμός ενζυμικής δραστηριότητας σε δείγματα φυτών (καταλάση)

Για την εκχύλιση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Mishra et al. (2006) και παρασκευάστηκαν 2 ρυθμιστικά διαλύματα: το ρυθμιστικό διάλυμα Potassium Phosphate 100 mM με pH=7 και το ρυθμιστικό διάλυμα Potassium Phosphate 100 mM με pH=7, το οποίο περιέχει 0,1 mM EDTA και 1% (w/v) PVP.

Στη συνέχεια, κόπηκαν 0,5 g από το ριζικό σύστημα των φυτών, αφού πρώτα πλύθηκε με νερό βρύσης, απιονισμένο και υπερκάθαρο νερό και αποθηκεύτηκε σε ψυγείο, όχι περισσότερο από 1 ημέρα, και ομογενοποιήθηκε χρησιμοποιώντας γουδί και 2 ml ρυθμιστικού διαλύματος Potassium phosphate το οποίο περιέχει EDTA και PVP. Έπειτα, το δείγμα διηθήθηκε με γάζα 4 στρώσεων σε δοκιμαστικό σωλήνα με χωνί, αφού προστέθηκαν κι άλλα 1,5 + 1,5 ml δείγμα μετά από έκπλυση του γουδιού και του γουδοχέρι και το διήθημα αυτό προστέθηκε σε 3 σωληνάκια φυγόκεντρου των 2 ml και φυγοκεντρήθηκε στις 15000 rcf για 15 λεπτά.

Για τον προσδιορισμό της ενζυμικής δραστηριότητας της καταλάσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του H. Aebi (1984). Παρασκευάστηκαν 2 διαλύματα: ένα ρυθμιστικό διάλυμα 400 ml Sodium Phosphate 50 mM με pH=7 και ένα διάλυμα 100 ml 36 mM H_2O_2 .

Αρχικά, έγινε αραιώση 1:9 (1 ml εκχύλισμα + 9 ml Sodium Phosphate buffer) στο εκχύλισμα, έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλη ποσότητα απο καταλάσες και δημιουργηθούν πολλές φυσαλίδες O_2 στην κυψελίδα κατά τη μέτρηση. Έπειτα, χρησιμοποιούνται 2 κυψελίδες χαλαζία UV των 3 ml, η μια είναι η κυψελίδα blank, η οποία περιέχει 2 ml εκχυλίσματος με 10x αραιώση, και μια κυψελίδα δείγματος, η οποία περιέχει 2 ml εκχυλίσματος με 10x αραιώση καθώς και 1 ml H_2O_2 . Στα 240 nm μηδενίστηκε το όργανο με μια κυψελίδα blank και στη συνέχεια, εισάχθηκε η κυψελίδα του δείγματος. Η έναρξη της αντίδρασης γινόταν με την προσθήκη του διαλύματος H_2O_2 και η απορρόφηση στα 240 nm παρακολουθούνταν για τα επόμενα 3 λεπτά με μετρήσεις ανά 15 δευτερόλεπτα.

Τέλος, ο προσδιορισμός της δραστηριότητας της καταλάσης βασίζεται στη μείωση της απορρόφησης του υπεροξειδίου του υδρογόνου σε σχέση με το χρόνο σε θερμοκρασία δωματίου. Η ενζυμική ενεργότητα εκφράζεται ως τα μmoles του H_2O_2 που διασπώνται $\text{min}^{-1} \text{g}^{-1}$ φρέσκου βάρους.

3.2.2.3. Μέτρηση αύξησης φυτού, περιεχόμενου νερού και αριθμού φύλλων των φυτών

Για τις μετρήσεις βιομάζας και περιεχόμενου νερού, αρχικά χωρίστηκαν τα φύλλα και το ριζικό σύστημα των φυτών και στη συνέχεια πλήθυσαν με νερό βρύσης και αποιονισμένο νερό, αφέθηκαν να στεγνώσουν και μετρήθηκε το νωπό βάρος τους. Έπειτα, τοποθετήθηκαν σε φούρνο για 48 ώρες στους 70°C . Μετά το πέρας των 48 ωρών και αφού αφέθηκαν τα δείγματα να μειώσουν τη θερμοκρασία τους σε θερμοκρασία δωματίου, μετρήθηκε το ξηρό βάρος των ριζών και των φύλλων. Τα ξηρά βάρη χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της βιομάζας, ενώ το περιεχόμενο νερό μετρήθηκε από τα νωπά βάρη καθώς και από τα ξηρά όπως δείχνει ο παρακάτω τύπος:

$$WC = \frac{FW - DW}{FW} * 100\%$$

όπου WC το περιεχόμενο νερό, FW και DW το νωπό και ξηρό βάρος αντίστοιχα.

Όσον αφορά τη μέτρηση της αύξησης του φυτού οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η βιομάζα και η μέτρηση των φύλλων του φυτού. Η μέτρηση της βιομάζας έχει περιγραφεί στην παραπάνω παράγραφο, ενώ για τη μέτρηση των φύλλων, μετρήθηκε ο αριθμός των φύλλων κατά την έναρξη του πειράματος καθώς και στο τέλος αυτού.

Τέλος, την τελευταία μέρα του πειράματος, πάρθηκαν φωτογραφίες του ριζικού συστήματος των φυτών

3.2.3. Στατιστική ανάλυση

Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Δυο δειγμάτων t test για τη διαφορά των μέσων όρων με $p < 0,05$.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

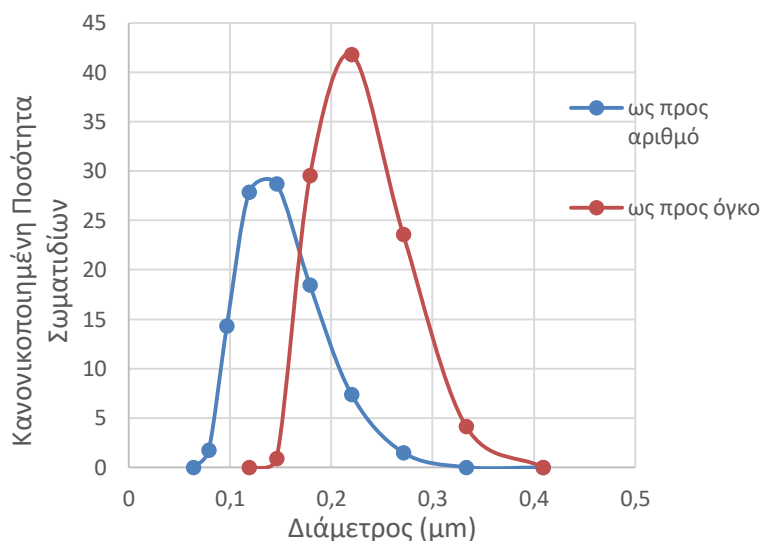
4.1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΝΑΝΟΦΥΣΑΛΙΔΩΝ ΑΕΡΑ ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Για την επιβεβαίωση της ύπαρξης νανοφυσολιδων αέρα αλλά και τον προσδιορισμό τους, κατά το δυνατό καλύτερα, στα καθημερινά διαλύματα εισόδου στις πειραματικές γλάστρες, όπως αναφέρθηκε και στο πειραματικό μέρος, γίνονταν μετρήσεις της κατανομής του μεγέθους των φυσαλίδων ως προς τον αριθμό και ως προς τον όγκο. Στον πίνακα παρατίθενται οι μετρήσεις μεγέθους ως προς τον αριθμό, με τις τιμές διαμέτρου φυσαλίδας να κυμαίνονται από 0,12 nm έως 0,25 nm.

Αριθμός δείγματος	Πειραματική ημέρα	Μέση διάμετρος (nm)	Μέση τιμή ± τυπική απόκλιση
1	1	0,178	0,179±0,077
2	2	0,163	0,168±0,134
3	6	0,173	0,179±0,127
4	7	0,247	0,26±0,137
5	8	0,254	0,274±0,175
6	9	0,137	0,139±0,113
7	10	0,124	0,125±0,112
8	13	0,12	0,124±0,114
9	14	0,124	0,125±0,112
10	17	0,208	0,217±0,126
Μέσοι όροι		0,1728	0,179

Πίνακας 8 Τιμές μεγέθους ως προς τον αριθμό και ως προς τη διάμετρο φυσαλίδας

Παρακάτω, παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα κατανομής ως προς τον όγκο και ως προς τον αριθμό, όπου είναι φανερό ότι η κατανομή των φυσαλίδων είναι μικρότερη του 1 nm και άρα επιβεβαιώνεται η ύπαρξη των νανοφυσολιδων αέρα. Το διάγραμμα αυτό είναι απολύτως ανάλογο με όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος.

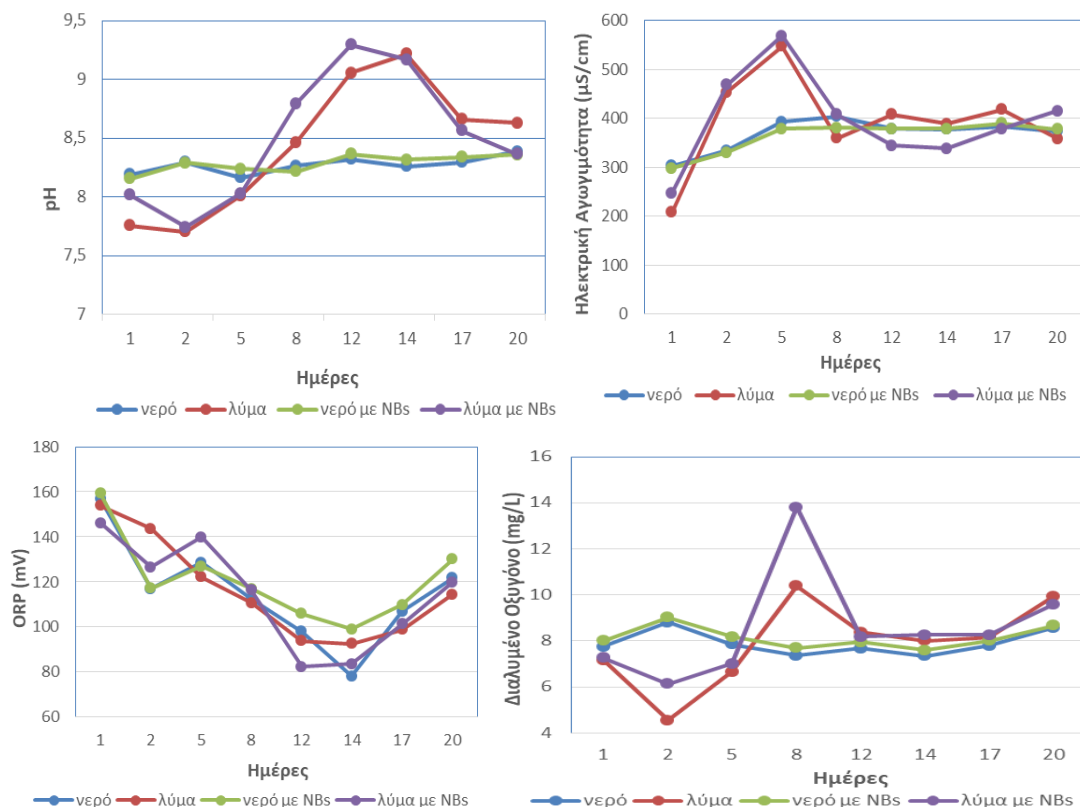


Εικόνα 14 Διάγραμμα κατανομής νανοφυσολιδων αέρα στο διάλυμα εισόδου κατά την 1^η πειραματική ημέρα

4.2. ΚΥΡΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΕΞΟΔΟΥ

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, και πιο συγκεκριμένα την 7^η ημέρα του πειράματος, στις ομάδες που περιείχαν το λύμα, ομάδες Β, D, εμφανίστηκαν δείγματα ευτροφισμού. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη στο λύμα φωσφόρου και αζώτου, τα οποία αποτελούν θρεπτικά συστατικά για τους μικροοργανισμούς που υπάρχουν στο δείγμα, σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες που υπήρχαν στο θερμοκήπιο, καθώς και των συνθηκών μειωμένου οξυγόνου, αφού το στόμιο του ποτηριού είχε καλυφθεί με ζελατίνη. Ο ευτροφισμός μειώθηκε δραστικά μετά την 13^η ημέρα του πειράματος σε όλα τα φυτά και των 2 ομάδων γεγονός που εκτός από την οπτική παρατήρηση, επιβεβαιώθηκε και από τις τιμές των μετρήσεων του COD, ολικού αζώτου και ολικού φωσφόρου των ημερών που ακολούθησαν.

4.2.1. pH, EC, ORP και DO στα διαλύματα εξόδου



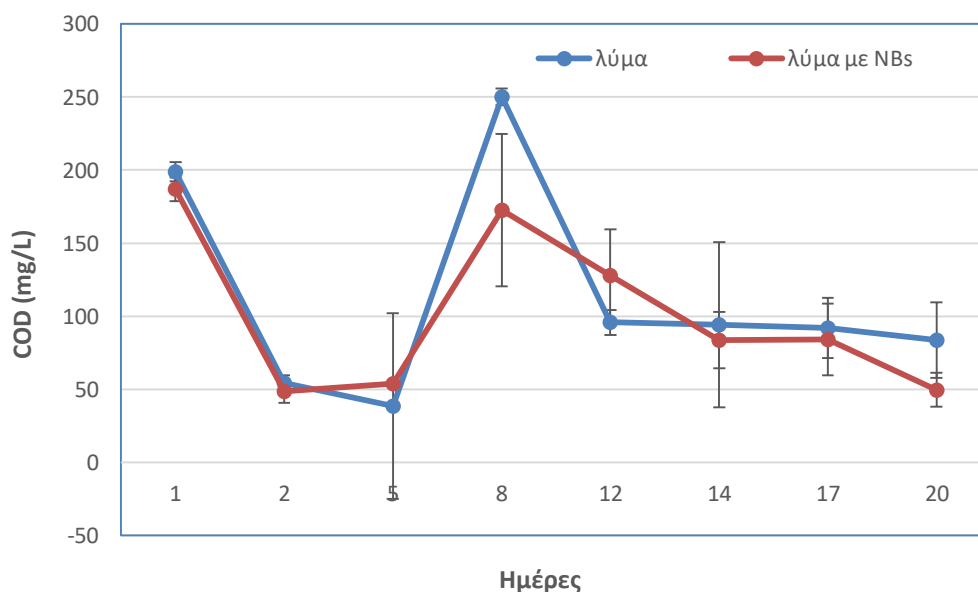
Εικόνα 15 Μετρήσεις pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας, δυναμικού οξειδοαναγωγής και διαλυμένου οξυγόνου του δείγματος, αντίστοιχα. Οι τιμές παρουσιάζονται ως μέσοι όροι.

Στα παραπάνω διαγράμματα (Εικόνα 16) παρουσιάζονται οι μετρήσεις του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, του δυναμικού οξειδοαναγωγής και του διαλυμένου οξυγόνου στα διαλύματα εξόδου από τα πειραματικά ποτήρια. Είναι φανερό, ότι οι ομάδες ανά δυο, δηλαδή με νερό και νερό με νανοφυσαλίδες αέρα και λύμα και λύμα με νανοφυσαλίδες αέρα, είχαν ανάλογη συμπεριφορά. Ίσως αξίζει ιδιαίτερο σχολιασμό τα δεδομένα του διαλυμένου οξυγόνου, όπου δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη διαφορά στις ομάδες με τις νανοφυσαλίδες αέρα από τις ομάδες χωρίς τις νανοφυσαλίδες, όπως θα ήταν αναμενόμενο.

4.2.2. Απομάκρυνση COD

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (Εικόνα 17) τα αποτελέσματα των ομάδων χωρίς λύμα δεν παρουσιάζονται μιας και ήταν σταθερά σε μηδενικά επίπεδα. Η αρχική τιμή του COD και στις 2 ομάδες είναι στα 200 mg/l και τις πρώτες 5 ημέρες υπάρχει μια παρόμοια μείωση στη συγκέντρωση του COD. Στη συνέχεια, η απότομη αύξηση της τιμής του COD στην ομάδα με το λύμα οφείλεται, όπως ειπώθηκε

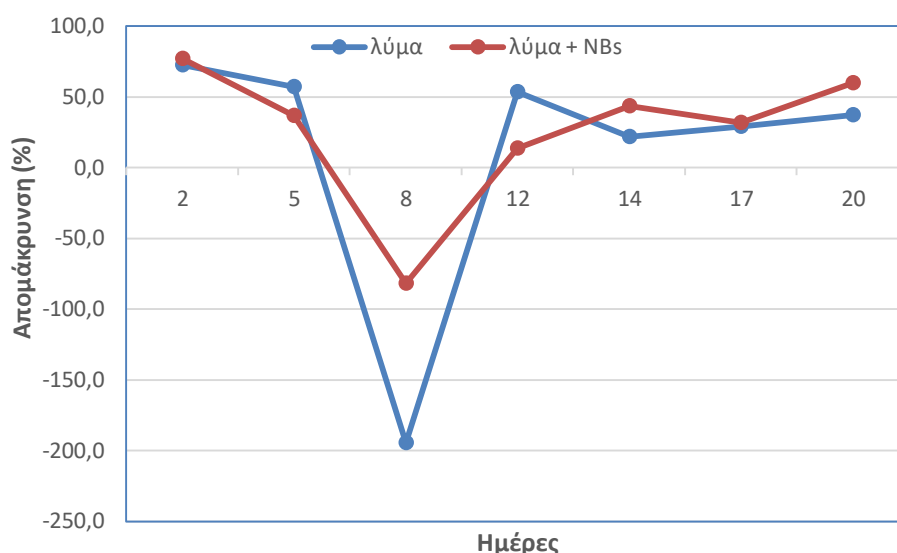
παραπάνω, στην ανάπτυξη ευτροφισμού, φτάνοντας στη μέγιστη τιμή του την 8^η ημέρα. Μετά το πέρας 4 ημερών, η τιμή μειώνεται γύρω στα 95 mg/l, όπου και μένει σχετικά σταθερή μέχρι το τέλος του πειράματος, με τελική τιμή τα 83 mg/l, δηλαδή υπήρξε μια μείωση του COD, αν παραλειφθεί η περίοδος του ευτροφισμού, της τάξης του 44,8%. Αντίστοιχα, στην ομάδα με τα NBs, υπάρχει μια σχετική αύξηση μετά την 5^η ημέρα, όχι τόσο μεγάλη όπως στην ομάδα με το λύμα, ίσως εξαιτίας της καθημερινής ανατροφοδότησης του συστήματος με αέρα μέσω εισαγωγής των νανοφουσαλίδων στα πειραματικά ποτήρια, με μέγιστη τιμή τα 172,5 mg/l και στη συνέχεια μια πτώση της τιμής στα 83,75 mg/l και μέχρι το τέλος του πειράματος η τελική τιμή του COD είναι 49,75 mg/l απομάκρυνση δηλαδή της τάξης του 51%, αν εξαιρεθεί η περίοδος του ευτροφισμού. Επίσης, στο διάγραμμα φαίνεται και οι 2 ομάδες να έχουν μια σχεδόν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τη συγκέντρωση του COD, με τις αποκλίσεις να υπάρχουν την περίοδο που εμφανίστηκε ο ευτροφισμός, εκεί που η ομάδα με τις νανοφουσαλίδες είχε μια καλύτερη αντιμετώπιση του ευτροφισμού, καθώς επίσης και στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας, όπου η ομάδα με τις νανοφουσαλίδες ξεκινάει να έχει μια μεγαλύτερη μείωση της συγκέντρωσης του COD από την ομάδα με το λύμα.



Εικόνα 16 Διάγραμμα μέτρησης COD στο λύμα. Οι τιμές υποδεικνύουν τις μέσες τιμές (n=5). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα.

Αντίστοιχες παρατηρήσεις σημειώνονται και στο διάγραμμα της απομάκρυνσης (Εικόνα 18), όπου φαίνεται ότι ο ευτροφισμός δεν επηρέασε στον ίδιο βαθμό τις 2 ομάδες, με καλύτερη αντιμετώπιση πάλι να υπάρχει στην ομάδα με τις

νανοφυσαλίδες, καθώς και στο τέλος του πειράματος, όπου ξεκινάει να φαίνεται μια καλύτερη απομάκρυνση του COD. Σύμφωνα με τους Santiago et al. (2016), οι οποίοι βασίστηκαν σε πρότερη βιβλιογραφία για τους υπόγειας ροής τεχνητούς υγροβιοτόπους, το ποσοστό απομάκρυνσης του COD φτάνει έως και 70%. Επίσης, σύμφωνα με την Zaimoglu (2006), η οποία έκανε πείραμα διάρκειας 12 μηνών με πιλοτικής κλίμακας, υπόγειας, συνεχούς ροής τεχνητό υγροβιοτόπο χρησιμοποιώντας 3 διαφορετικά φυτά, τα *Typha latifolia*, *Juncus acutus* και *Iris versicolor* βρήκε μέσο όρο ποσοστού απομάκρυνσης του COD στο 76,7%, με χαμηλότερη τιμή απομάκρυνσης το 53,7%. Όσο γνωρίζει ο συγγραφέας, δεν έχουν γίνει πειράματα με νανοφυσαλίδες αέρα σε αστικά απόβλητα για την απομάκρυνση COD.

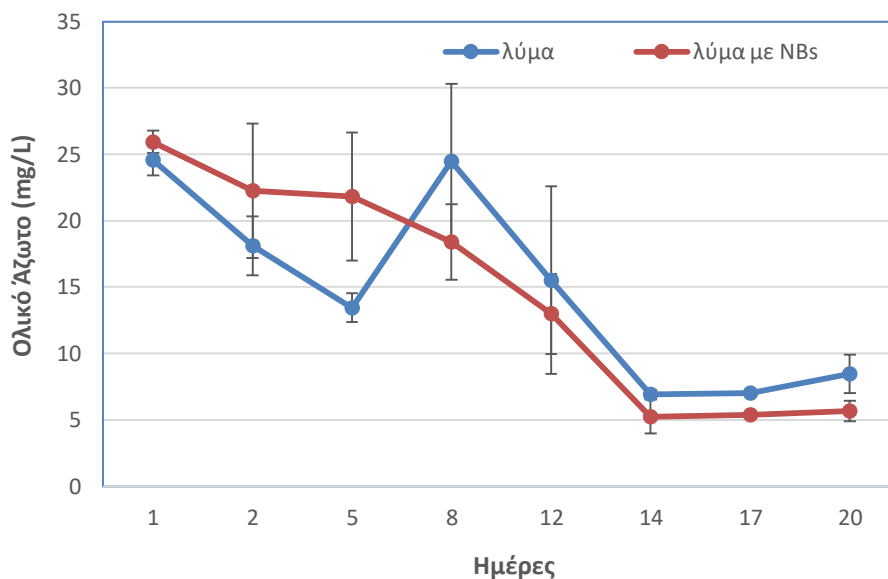


Εικόνα 17 Ποσοστό απομάκρυνσης COD

4.2.3. Απομάκρυνση αζώτου

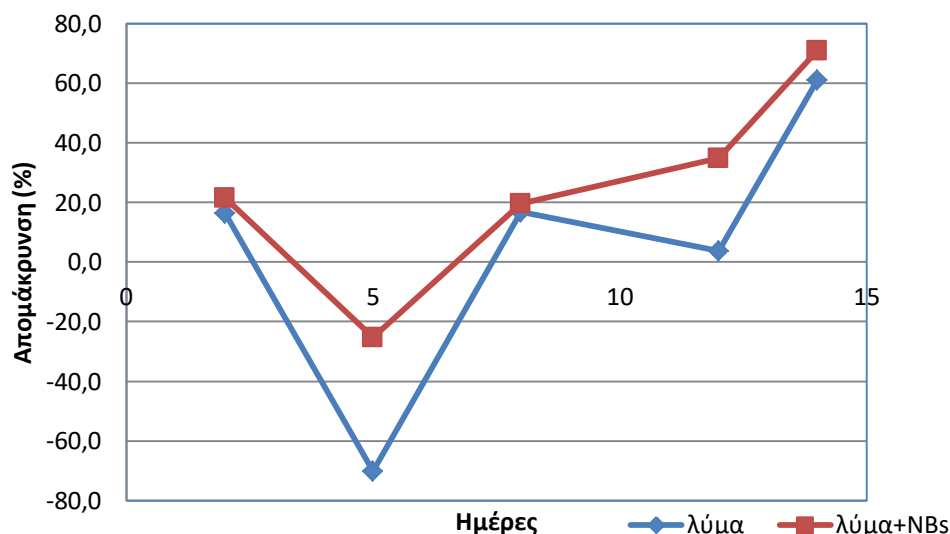
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Εικόνα 19) τα αποτελέσματα των ομάδων χωρίς λύμα δεν παρουσιάζονται μιας και ήταν σταθερά σε μηδενικά επίπεδα. Και στις 2 ομάδες η τιμή του ολικού αζώτου την 1^η ημέρα είναι στα 25 mg/l. Στην ομάδα με το λύμα η συγκέντρωση του αζώτου πέφτει μέχρι την 5^η ημέρα, όπου λόγω ευτροφισμού την 8^η ημέρα φτάνει στη μέγιστη τιμή της στα 24,5 mg/l και στη συνέχεια μειώνεται με την τελική του τιμή να είναι στα 8,5 mg/l, ένα μέσο όρο ποσοστού απομάκρυνσης, αν εξαιρεθούν οι ημέρες που παρατηρήθηκε ο ευτροφισμός, 42%. Από την άλλη πλευρά, η συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην ομάδα με το λύμα και τα NBs πέφτει σχεδόν ομαλά καθόλη τη διάρκεια του

πειράματος με τελική τιμή στα 5,7 mg/l, απομάκρυνση δηλαδή, αν εξαιρεθεί ο ευτροφισμός, της τάξης του 49,8%. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι αρχικά η ομάδα με το λύμα λειτουργεί καλύτερα από την ομάδα με τις νανοφουσαλίδες αέρα, ενώ στη συνέχεια η ομάδα με τις νανοφουσαλίδες να λειτουργεί καλύτερα τις ημέρες που υπήρχε ευτροφισμός στα δείγματα και καταλήγουν προς το τέλος του πειράματος να έχουν παρόμοια συμπεριφορά.



Εικόνα 18 Διάγραμμα μέτρησης ολικού αζώτου στο λύμα. Οι τιμές υποδηλώνουν μέσες τιμές (n=5). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα.

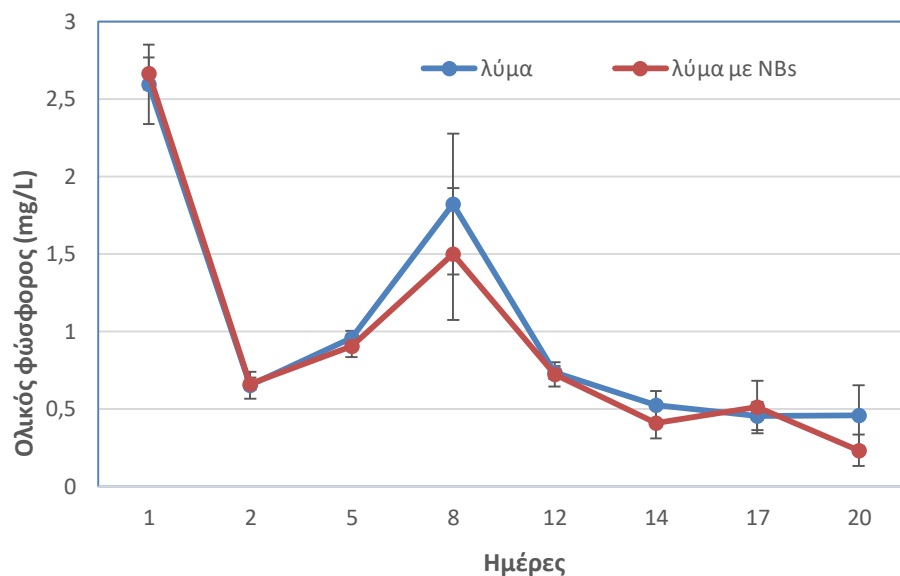
Παρ' όλα αυτά, το διάγραμμα της απομάκρυνσης (Εικόνα 20) δείχνει ότι και οι 2 ομάδες επηρεάστηκαν από τον ευτροφισμό και όσον αφορά την απομάκρυνση του ολικού αζώτου είχαν παρόμοια συμπεριφορά. Σύμφωνα με τους Temel et al. (2018) το ποσοστό απομάκρυνσης του ολικού αζώτου ήταν 78,94%, ενώ σύμφωνα με τον Nymazal (2002), ο οποίος βασίστηκε και πρότερες βιβλιογραφικές πηγές το ποσοστό της απομάκρυνσης τεχνητών υγροβιοτόπων οριζόντιας υπόγειας ροής με *Phragmites australis* υπολογίστηκε στο 41,6%, τιμή πολύ κοντινή στην απομάκρυνση που πραγματοποιήθηκε στο παρόν πείραμα. Όσο γνωρίζει ο συγγραφέας, δεν έχουν γίνει πειράματα με νανοφουσαλίδες αέρα σε αστικά απόβλητα για την απομάκρυνση του ολικού αζώτου.



Εικόνα 19 Ποσοστό απομάκρυνσης ολικού αζώτου

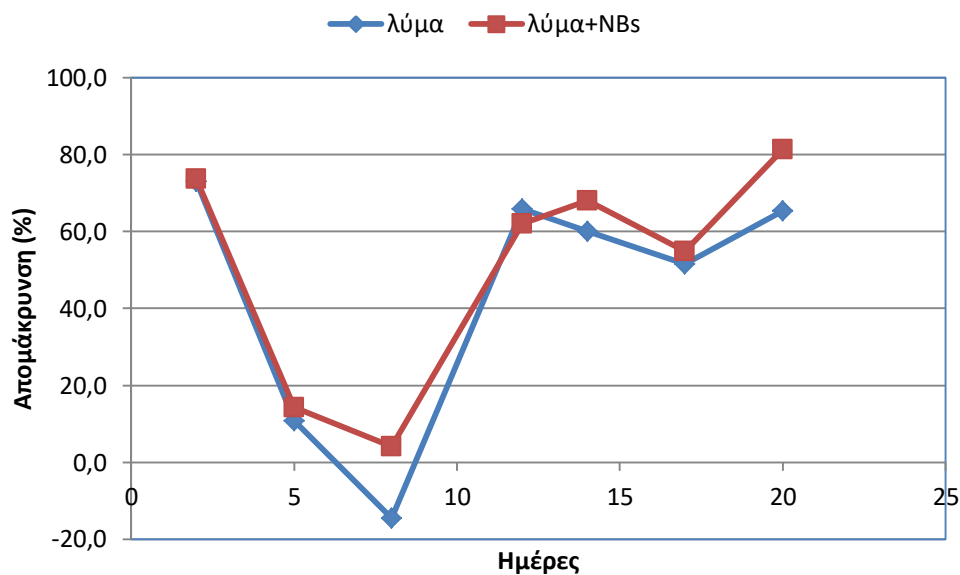
4.2.4. Απομάκρυνση φωσφόρου

Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα (Εικόνα 21), τα αποτελέσματα των ομάδων χωρίς λύμα δεν παρουσιάζονται μιας και ήταν σταθερά σε μηδενικά επίπεδα. Η τιμή του φωσφόρου και στις 2 ομάδες ξεκινάει από τα 2,6 mg/l και πέφτει στα 0,65 mg/l μέσα σε 2 μέρες. Στη συνέχεια, υπάρχει μια αύξηση, λόγω του ευτροφισμού, η οποία είναι μικρότερη στην ομάδα με τις νανοφουσαλίδες. Τέλος, μέχρι τη λήξη του πειράματος η τιμή του φωσφόρου δείχνει να μειώνεται με ελάχιστες διαφορές ανάμεσα στις 2 ομάδες με τελική τιμή για την ομάδα με το λύμα τα 0,46 mg/l, ποσοστό απομάκρυνσης, αν εξαιρεθεί η περίοδος του ευτροφισμού, της τάξης του 52,2% και για την ομάδα με το λύμα με νανοφουσαλίδες τα 0,23 mg/l, δηλαδή το ποσοστό απομάκρυνσης, αν εξαιρεθεί η περίοδος του ευτροφισμού, είναι 56,7%.



Εικόνα 20 Διάγραμμα μέτρησης ολικού φωσφόρου. Οι τιμές υποδηλώνουν μέσες τιμές (n=5). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα.

Στο διάγραμμα της απομάκρυνσης (Εικόνα 22) παρατηρείται ότι, αρχικά, οι απομακρύνσεις και των 2 ομάδων κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα και προς το τέλος του πειράματος η ομάδα με τις νανοφυσολίδες δείχνει μια τάση για καλύτερη απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου. Από πείραμα που έχει διενεργηθεί από τους Fountoulakis et al. (2017), σε τεχνητούς υγροβιότοπους κάθετης ροής με αλόφυτα βρέθηκε ποσοστό απομάκρυνσης του ολικού φωσφόρου της τάξης του 30%, ενώ σύμφωνα με τους Temel, Avcı, & Ardalı (2017), οι οποίοι χρησιμοποίησαν μεγάλης κλίμακας τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής με χρήση του φυτού *Juncus acutus* L., με διάρκεια πειράματος 7 μήνες, παρατηρήθηκε ποσοστό απομάκρυνσης της τάξης του 35%. Όσο γνωρίζει ο συγγραφέας, δεν έχουν γίνει πειράματα με νανοφυσολίδες αέρα σε αστικά απόβλητα με σκοπό την απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου.

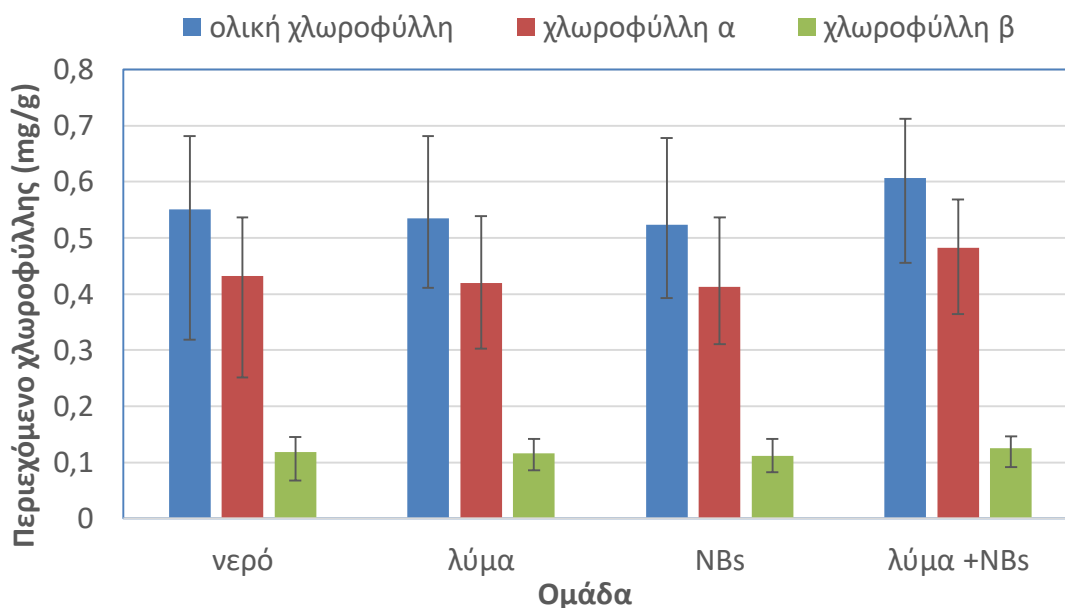


Εικόνα 21 Ποσοστό απομάκρυνσης ολικού φωσφόρου

4.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

4.3.1. Χλωροφύλλη

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Εικόνα 23) η ολική χλωροφύλλη είναι περίπου ίδια σε όλες τις ομάδες εκτός από την ομάδα με το λύμα και τις νανοφυσολίδες, όπου φαίνεται ότι είναι ελαφρώς αυξημένη. Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να εξαχθούν και για την α- και β- χλωροφύλλη, όπου εκτός από την ομάδα με το λύμα και τις νανοφυσολίδες αέρα που ο συνδυασμός τους δείχνει να βοηθάει το φυτό περισσότερο και κατά συνέπεια να δείχνει μια αυξητική τάση του περιεχόμενου της χλωροφύλλης, οι υπόλοιπες ομάδες είναι περίπου στα ίδια επίπεδα. Παρ' όλα αυτά η διαφορά αυτή και για την ολική και για την α- και β- χλωροφύλλη δεν είναι τόσο σημαντική ώστε να υπάρξει στατιστική διαφορά.

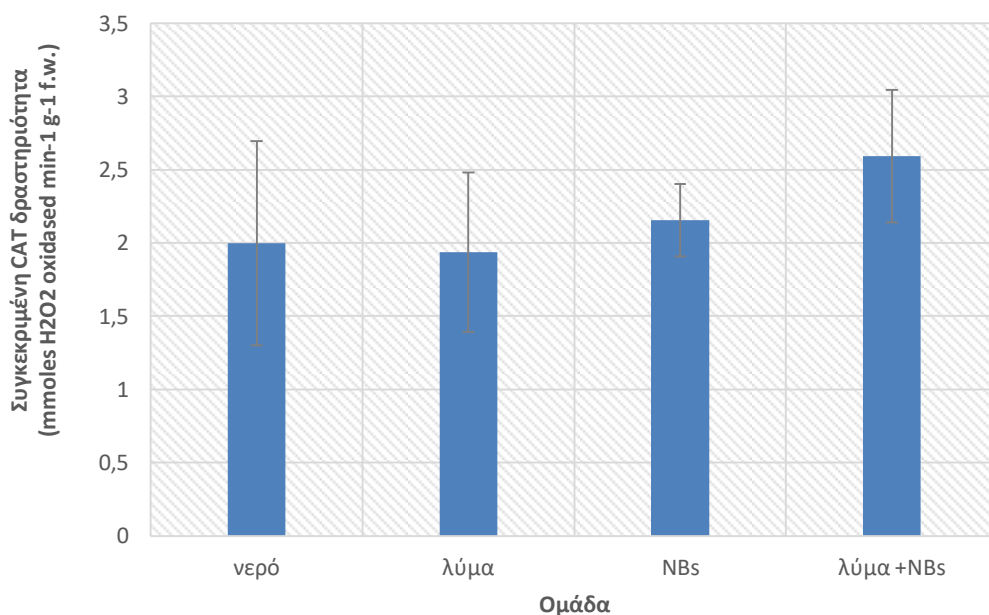


Εικόνα 22 Διάγραμμα περιεχόμενου χλωροφύλλης του φυτού *Juncus acutus* L. Οι τιμές υποδηλώνουν τις μέσες τιμές με (n=3). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα. Ο αστερίσκος υποδηλώνει στατιστική διαφορά ($p<0,05$) όταν συγκρίνεται με ομάδα σύμφωνα με τη μέθοδο 2 δειγμάτων t-test για μέσους όρους.

Όσο γνωρίζει ο συγγραφέας δεν υπάρχει βιβλιογραφία, η οποία να συγκρίνει το περιεχόμενο της χλωροφύλλης ανάμεσα σε ομάδα με νερό και ομάδα με λύμα. Για την ομάδα με το λύμα και τις νανοφουσαλίδες, όσο γνωρίζει ο συγγραφέας δεν υπάρχουν μετρήσεις.

4.3.2. Ενζυμική δραστηριότητα της καταλάσης στις ρίζες

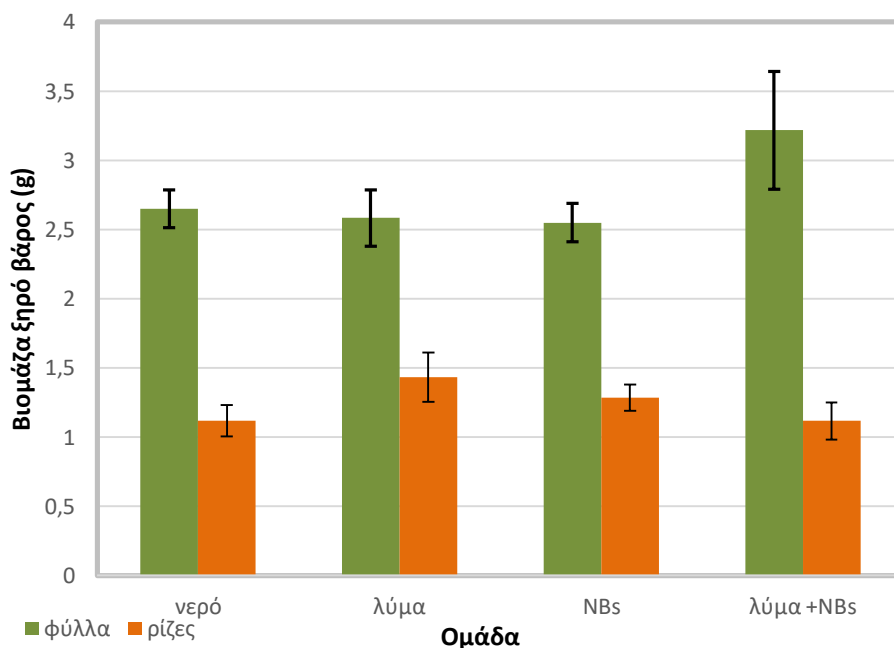
Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα (Εικόνα 24) η δραστηριότητα της καταλάσης ήταν αυξημένη στις ομάδες με τις νανοφουσαλίδες, το οποίο αποδεικνύει ότι το στρες που δέχθηκαν τα φυτά ίσως ήταν υψηλότερο και γι' αυτό το φυτό ως άμυνα αύξησε την παραγωγή του ενζύμου. Παρ' όλα αυτά, η διαφορά αυτή δεν είναι ικανή για να υπάρξει στατιστική διαφορά. Όσο γνωρίζει ο συγγραφέας, δεν υπάρχει βιβλιογραφία που να αναφέρεται σε ενζυμική δραστηριότητα της καταλάσης στις ρίζες από αστικά λύματα, καθώς επίσης δεν υπάρχει βιβλιογραφία για ενζυμική δραστηριότητα σε φυτά που ποτίστηκαν με νανοφουσαλίδες.



Εικόνα 23 Διάγραμμα ενζυμικής δραστηριότητας της καταλάσης στις ρίζες του φυτού *Juncus acutus* L. Οι τιμές υποδηλώνουν τις μέσες τιμές (n=3). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα. Ο αστερίσκος υποδηλώνει στατιστική διαφορά ($p < 0,05$) όταν συγκρίνεται με ομάδα σύμφωνα με τη μέθοδο 2 δειγμάτων t-test για μέσους όρους.

4.3.3. Βιομάζα φυτών

Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα (Εικόνα 25) η βιομάζα είναι υψηλότερη στο υπέργειο τμήμα του φυτού απ' ό,τι στο ριζικό σύστημα. Όσον αφορά το υπέργειο τμήμα την υψηλότερη τιμή έχει η ομάδα με το λύμα και τις νανοφουσαλίδες, το οποίο υποδεικνύει ότι ίσως ο συνδυασμός λύματος και νανοφουσαλίδων βοήθησαν στην περαιτέρω ανάπτυξη του φυτού, παρ' όλα αυτά η διαφορά αυτή από τις υπόλοιπες ομάδες δεν είναι επαρκής για να υπάρξει στατιστική διαφορά. Στο ριζικό σύστημα, την υψηλότερη τιμή έχει η ομάδα με το λύμα. Όπως και στο υπέργειο τμήμα, έτσι και στο ριζικό σύστημα η διαφορά αυτή δεν επαρκεί για να υπάρξει στατιστική διαφορά.



Εικόνα 24 Διάγραμμα βιομάζας ξηρού βάρους του φυτού *Juncus acutus* L. Οι τιμές υποδηλώνουν μέσες τιμές με ($n=3$). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα. Ο αστερίσκος υποδηλώνει στατιστική διαφορά ($p<0,05$) όταν συγκρίνεται με ομάδα σύμφωνα με τη μέθοδο 2 δειγμάτων t-test για μέσους όρους.

Όπως παρατηρήθηκε και από τους Carballeira, Ruiz, & Soto (2016), οι οποίοι διενέργησαν πείραμα σε τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής οριζόντιας ροής, χρησιμοποιώντας τα φυτά *Juncus effusus*, *Iris pseudacorus*, *Typha latifolia* L. και *Phragmites australis* η βιομάζα αυξήθηκε στην ομάδα με το λύμα όταν αυτή συγκρίθηκε με την ομάδα ελέγχου, το οποίο παρατηρήθηκε και στο παρόν πείραμα. Παρόμοια αύξηση παρατηρήθηκε και από τους Fountoulakis et al. (2017), οι οποίοι διενέργησαν πείραμα με τεχνητούς υγροβιότοπους κάθετης ροής, όσον αφορά τα αλόφυτα. Η αύξηση της βιομάζας στην ομάδα με τις νανοφυσολίδες παρατηρήθηκε και από τους Zimmerman, Tesař & Bandulasena (2011), οι οποίοι έκαναν αντίστοιχα πειράματα με άλγη. Τα αποτελέσματα, αυτά, συμφωνούν και με το πείραμα που διεξήγαγαν οι Wu, et al. (2019) σε ντομάτες, όπου βρήκαν ότι οι ντομάτες οι οποίες είχαν ποτιστεί με νανοφυσολίδες είχαν μια αύξηση της βιομάζας του κατά 22% σε σχέση με την ομάδα ελέγχου.

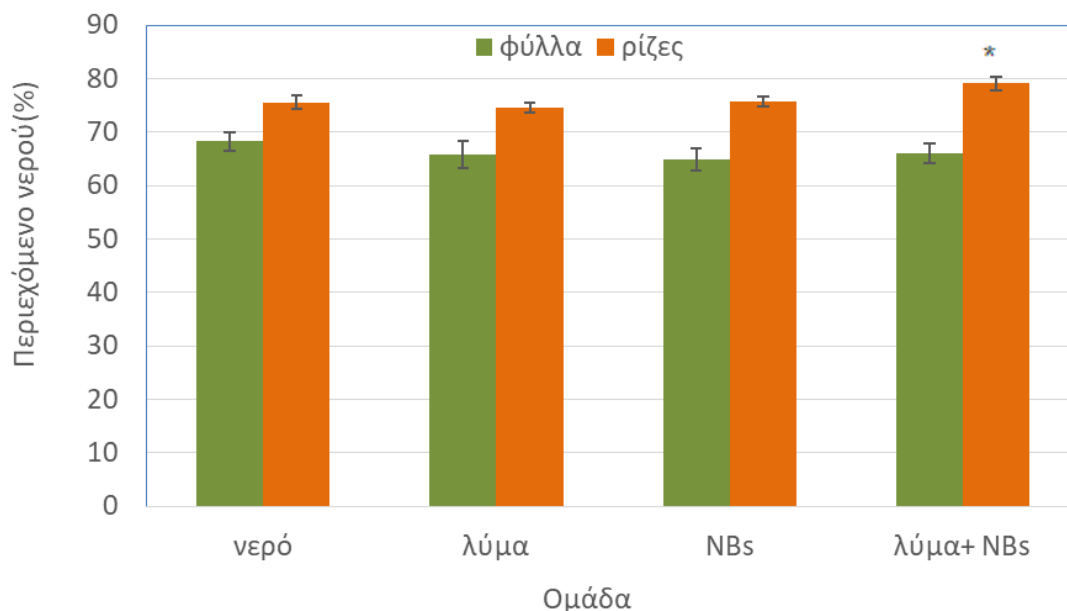
4.3.4. Αύξηση αριθμού φύλλων του φυτού

Ομάδα	Αύξηση(%) \pm Τυπική απόκλιση
Νερό	17,8 \pm 10,2
Λύμα	20,8 \pm 11,3
NBs	20,1 \pm 15,7
Λύμα+NBs	21,1 \pm 11,1

Πίνακας 9 Αύξηση αριθμού φύλλων του φυτού *Juncus acutus* L. Οι τιμές αναφέρονται σε μέσους όρους (n=6).

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα (Πίνακας 8) ο αριθμός των φύλλων είναι ελαφρώς αυξημένος στις ομάδες με το λύμα, ενώ στην ομάδα που περιέχονται και οι νανοφυσολίδες έχουμε τη μεγαλύτερη αύξηση, παρ' όλα αυτά εδώ δεν υπάρχει στατιστική διαφορά

4.3.5. Περιεχόμενο σε νερό στους φυτικούς ιστούς



Εικόνα 25 Διάγραμμα περιεχομένου νερού στους φυτικούς ιστούς του φυτού *Juncus acutus* L. Οι τιμές υποδηλώνουν μέσες τιμές με (n=6). Οι μπάρες αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα. Ο αστερίσκος υποδηλώνει στατιστική διαφορά ($p < 0,05$) όταν συγκρίνεται με την ομάδα με το λύμα σύμφωνα με τη μέθοδο 2 δειγμάτων t-test για μέσους όρους.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα όσον αφορά το περιεχόμενο νερό στα φύλλα καλύτερο ποσοστό παρατηρείται στην ομάδα με το νερό και στις υπόλοιπες το ποσοστό κυμαίνεται περίπου στις ίδιες τιμές με το ποσοστό στην ομάδα με το λύμα και τις νανοφυσολίδες να είναι ελαφρώς αυξημένο. Στις ρίζες, ενώ στις 3 πρώτες ομάδες το ποσοστό κυμαίνεται στις ίδιες τιμές, στην ομάδα με το λύμα και τις νανοφυσολίδες παρατηρείται το καλύτερο ποσοστό, καθώς επίσης υπάρχει στατιστική διαφορά ανάμεσα στην ομάδα με το λύμα και τις νανοφυσολίδες με την ομάδα με το λύμα, ενώ στις υπόλοιπες μετρήσεις δεν παρατηρήθηκε στατιστική διαφορά. Αυτή η ένδειξη υποδεικνύει ότι ο συνδυασμός λύματος και νανοφυσολιδων βοήθησε το ριζικό σύστημα των φυτών να κατακρατήσει μεγαλύτερο ποσοστό του νερού σε σχέση με τις άλλες ομάδες. Σύμφωνα με τους Fountoulakis et al. (2017), οι οποίοι διενέργησαν πείραμα σε τεχνητούς υγροβιοτόπους κάθετης ροής με αλόφυτα το ποσοστό του περιεχόμενου νερού κυμαίνεται στο 65% για το *J. acutus*, ποσοστό πολύ κοντινό με του πειράματος για τις ομάδες που δεν περιέχουν νανοφυσολίδες. Όσο γνωρίζει ο συγγραφέας δεν υπάρχουν πειράματα τα οποία να μετράνε το ποσοστό περιεχόμενου νερού σε φυτά τα οποία ποτίζονται με νερό εμπλουτισμένο με νανοφυσολίδες αέρα.

4.3.6. Φωτογραφίες ριζικών συστημάτων

Παρακάτω (Εικόνα 26) παρατίθεται ένα ενδεικτικό δείγμα ριζικού συστήματος, το οποίο πάρθηκε μετά το τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Από οπτική παρατήρηση μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι η σύζευξη των τεχνολογιών έφερε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα.



Εικόνα 26 Ενδεικτικό δείγμα ριζικού συστήματος για κάθε ομάδα μετά το πέρας του πειράματος

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά την απομάκρυνση του COD, η σύζευξη των τεχνολογιών δηλαδή για την ομάδα που περιέχει λύμα και νανοφυσαλίδες, αν εξαιρεθεί η περίοδος του ευτροφισμού, έδωσε μια απομάκρυνση της τάξης του 51%, ενώ η αντίστοιχη απομάκρυνση της ομάδας με το λύμα που αντιπροσωπεύει την τεχνολογία των τεχνητών υγροβιοτόπων είναι της τάξης του 44,8%. Επίσης, η απομάκρυνση του ολικού αζώτου είναι 49,8% και 42%, αντίστοιχα. Τέλος, η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου για την ομάδα του υγροβιοτόπου με νανοφυσαλίδες αέρα, αν εξαιρεθεί η περίοδος του ευτροφισμού είναι 56,7%, ενώ για την ομάδα με τον υγροβιοτόπο η απομάκρυνση είναι της τάξης του 52,2%.

Στη φυσιολογία και στην ανάπτυξη του φυτού, για τα φυτά ελέγχου που αναπτύχθηκαν με σκέτο νερό, σε σύγκριση με τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με νερό με νανοφυσαλίδες αέρα έδειξαν ότι οι νανοφυσαλίδες αέρα δεν ενίσχυσαν την αύξηση του φυτού. Στην περίπτωση των αποτελεσμάτων των ομάδων με το λύμα οπτικά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το περιεχόμενο της χλωροφύλλης, ολικής, α-

και β-, ο συνδυασμός των 2 τεχνολογιών έφερε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα, όμως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά. Ακριβώς ανάλογα ήταν και τα αποτελέσματα για τη δραστηριότητα του ενζύμου της καταλάσης στις ρίζες, τη βιομάζα και τον αριθμό φύλλων του φυτού. Στατιστική διαφορά βρέθηκε μόνο στο ποσοστό του περιεχόμενου νερού στις ρίζες των φυτών, έχοντας και στατιστικά αυξημένες τιμές στην ομάδα της σύζευξης των τεχνολογιών, επιβεβαιώνοντας μια πιθανώς καλύτερη ανάπτυξη του *J. acutus* στην ομάδα σύζευξης των τεχνολογιών.

Συνεπώς, τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη είναι ότι η σύζευξη των τεχνητών υγροβιοτόπων και των νανοφυσολογικών αέρα έδωσαν ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά τη μείωση του οργανικού φορτίου, του αζώτου και του φωσφόρου τουλάχιστον τις τελευταίες πειραματικές μέρες. Αυτή η τάση, ίσως, μας οδηγεί να σκεφτούμε ότι μια επέκταση της πειραματικής διαδικασίας να μας επιβεβαιώνει μια καλύτερη απόδοση του συστήματος. Το συμπέρασμα, αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων της φυσιολογίας του φυτού.

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Almeida, C. M., Mucha, A. P., & Vasconcelos, M. T. (2006). Variability of metal contents in the sea rush *Juncus maritimus*—estuarine sediment system through one year of plant's life. *Marine Environmental Research*, 424-438.
- Barbier, E. (2007). Valuing ecosystems as productive inputs. *Economic Policy*, 177-229.
- Bassi, N., Kumar, M. D., Sharma, A., & Pardha-Saradhi, P. (2014). Status of wetlands in India: A review of extent, ecosystem benefits, threats and management strategies. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 1-19.
- Breckle, S.-W. (2002). Salinity, halophytes and salt affected natural ecosystems. Στο *Salinity: EnVironment - Plants - Molecules* (σσ. 53-77). The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Brown, K., & Brooks, K. (2002). *Bushland Weeds: A Practical Guide to Their Management*. Greenwood, WA: Enviromental Weeds Action Action Network.
- Campbell, C. S., & Ogden, M. (1999). *Constructed Wetlands in the Sustainable Landscape*. Wiley.
- Carballeira, T., Ruiz, I., & Soto, M. (2016). Effect of plants and surface loading rate on the treatment efficiency of shallow subsurface constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 203-214.
- Carter, V. (1996). *Technical aspects of wetlands-Wetland Hydrology, Water Quality and Associated Functions*. United States Geological Survey: Water Supply Paper 2425.
- Christofilopoulos, S., Syranidou, E., Gkavrou, G., Manousaki, E., & Kalogerakis, N. (2016). The role of halophyte *Juncus acutus* L. in the remediation of mixed contamination in a hydroponic greenhouse experiment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 1665-1674.
- Clescerl, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (20th ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
- Cooper, P., Griffin, P., & Humphries, S. (1999). Design of a hybrid reed bed system to achieve complete nitrification and denitrification of domestic sewage. *Water Science and Technology*, 283-289.
- Couto, H. J., Nunes, D. G., Neumann, R., & França, S. C. (2009). Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique. *Minerals Engineering*, 330-335.

- D.Cunningham, S., R.Berti, W., & W.Huang, J. (1995). Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology*, 393-397.
- Duarte-Davidson, R., & Jones, K. (1996). Screening the environmental fate of organic contaminants in sewage sludge applied to agricultural soils: II. The potential for transfers to plants and grazing animals . *The Science of the Total Environment* , 59-70.
- Ebina, K., Shi, K., Hirao, M., Hashimoto, J., Kawato, Y., Kaneshiro, S., et al. (2013). Oxygen and Air Nanobubble Water Solution Promote the. *PLoS ONE*, 8(6).
- EPA. (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology*. Office of water: EPA 832-R-93-008.
- EPA. (1995). *A Handbook of Constructed Wetlands Vol. 1*.
- Fan, M., & Tao, D. (2008). A Study on Picobubble Enhanced Coarse Phosphate Froth Flotation. *Separation Science and Technology*, 1-10.
- Fan, M., Tao, D., Honaker, R., & Luo, Z. (2010). Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part III): specially designed laboratory scale column flotation of phosphate. *Mining Science and Technology (China)*, 317-338.
- Feng, D., & Aldrich, C. (1999). Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores. *Minerals Engineering*, 721-731.
- Fountoulakis, M., Sabathianakis, G., Kritsotakis, I., Kabourakis, E., & Manios, T. (2017). Halophytes as vertical-flow constructed wetland vegetation for domestic wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 432-439.
- Gerhardt, K. E., Huang, X.-D., Glick, B. R., & Greenberg, B. M. (2009). Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants:. *Plant Science*, 20-30.
- Goldman, C. R., & Horne, A. J. (1983). *Limnology*. McGraw-Hill.
- Gurunga, A., Dahla, O., & Jansson, K. (2016). The fundamental phenomena of nanobubbles and their behavior in wastewater. *Geosystem Engineering*, 133-142.
- Haberl, R., Grego, S., Langergraber, G., Kadlec, R. H., Cicalini, A.-R., Dias, S. M., et al. (2003). Constructed Wetlands for the Treatment of Organic Pollutants . *Journal of Soils and Sediments*, 109-124.
- Hashim, A., Yaakob, O., Koh, K. K., & Ismail, N. (2015). Review of Micro-bubble Ship Resistance Reduction Methods and the Mechanisms that Affect the Skin Friction on Drag Reduction from 1999 to 2015. *Jurnal Teknologi*.
- Irvine, K. (2013). Climate Change and Urban Hydrology: Research Needs in the Developed and Developing Worlds. *Journal of Water Management Modeling*, 197-201.

- Jenssen, P. D., Mrethlum, T., & Krogstad, T. (1993). Potential Use of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Northern Environments. *Water Science and Technology*, 149-157.
- Kadlec, R. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 159-174.
- Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., & Haberl, R. (2000). *Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation*.
- Kapler, A. (2019). Habitats of Halophytes. Στο *Halophytes & Climate Change: Adaptive Mechanisms and Potential Uses* (σσ. 19-37). CAB International.
- Li, P., Takahashi, M., & Chiba, K. (2009). Enhanced free-radical generation by shrinking microbubbles using a copper catalyst. *Chemosphere*, 1157-1160.
- Liu, S., Kawagoe, Y., Makino, Y., & Oshita, S. (2013). Effects of nanobubbles on the physicochemical properties of water: The basis for peculiar properties of water containing nanobubbles. *Chemical Engineering Science*, 250-256.
- Lone, M. I., He, Z.-I., Stoffella, P. J., & Yang, X.-e. (2008). Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *Journal of Zhejiang University Science B*, 210-220.
- Manousaki, E., & Kalogerakis, N. (2009). Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.): metal uptake in relation to salinity. *Environmental Science and Pollution Research*, 844-854.
- Manousaki, E., & Kalogerakis, N. (2011). Halophytes Present New Opportunities in Phytoremediation of Heavy Metals and Saline Soils. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 656-660.
- Metcalf, & Eddy. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse* (3rd εκδ.). Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- Narayan, D. (2014). Development and Applications of Nanobubbles. *Biotech Articles* .
- Popp, M., Larher, F., & Weigel, P. (1985). Osmotic adaption in Australian mangroves. *Ecology of coastal vegetation*, 247-253.
- Rahman, A., Ahmad, K. D., Mahmoud, A., & Maoming, F. (2014). Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopryrite particles. *International Journal of Mining Science and Technology*, 559-566.
- Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). PHYTOREMEDIATION. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 643-668.
- Santiago, d., Martín, A., G.Guesdon, & R.Galvez. (2016). Plants for Constructed Wetlands as an Ecological Engineering Alternative to Road Runoff Desalination. In A. A. Ansari, S.

- S. Gil, R. Gill, G. R. Lanzal, & L. Newman, *Phytoremediation* (pp. 233-266). Springer, Cham.
- Shevyakova, N. I., Netronina, I. A., Aronova, E. E., & Kuznetsov, V. (2003). Compartmentation of Cadmium and Iron in Mesembryanthemum crystallinum Plants during the Adaptation to Cadmium Stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 678-685.
- Syranidou, E., Christofilopoulos, S., Politi, M., Weyens, N., Venieri, D., Vangronsveld, J., και συν. (2017). Bisphenol-A removal by the halophyte Juncus acutus in a phytoremediation pilot: Characterization and potential role of the endophytic community . *Journal of Hazardous Materials*, 350-358.
- Syranidou, E., Manousaki, E., Christofilopoulos, S., & Kalogerakis, N. (2014). MIXED HEAVY METAL TOLERANCE AND ACCUMULATION IN THE HALOPHYTIC SPECIES JUNCUS ACUTUS L. *11th International Phytotechnologies Conference*. Heraklion, Greece: School of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece.
- Takahashi, M. (2005). Potential of Microbubbles in Aqueous Solutions: Electrical Properties of the Gas-Water. *The Journal of Physical Chemistry B*, 21858-21864.
- Takahashi, T., Miyahara, T., & Mochizuki, H. (1979). FUNDAMENTAL STUDY OF BUBBLE FORMATION. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 275-280.
- Tao, D. (2005). Role of Bubble Size in Flotation of Coarse and Fine Particles - A Review. *Separation Science and Technology*, 741-760.
- Tao, D., Yu, S., Zhou, X., Honaker, R. Q., & Parekh, B. K. (2008). Picobubble Column Flotation of Fine Coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-14.
- Tchobanoglous, G., & Burton, F. (1990). *Wastewater engineering : treatment, disposal, and reuse*. New York: Metcalf & Eddy, Inc.
- Temel, F. A., Avci, E., & Ardali, Y. (2017). Full scale horizontal subsurface flow constructed wetlands to treat domestic wastewater by Juncus acutus and Cortaderia selloana. *International Journal of Phytoremediation*, 264-273.
- Temel, F. A., Ozyazici, G., Uslu, V. R., & Ardali, Y. (2018). Full Scale Subsurface Flow Constructed Wetlands for Domestic Wastewater Treatment: 3 Years' Experience. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 1348-1360.
- Tsuge, H. (2014). *Micro- and nanobubbles - fundamentals and applications*. New York: Pan Stanford Publishing.
- Ushikubo, F. Y., Furukawa, T., Nakagawa, R., Enari, M., Makino, Y., Kawagoe, Y., et al. (2010). Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 31-37.
- Vrushali, S., & Kaustav, C. (2014). SEWAGE TREATMENT AND REUSE - A STEP TOWARDS WATER CONSERVATION. *International Science Journal*.

- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering*, 633-646.
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 530-549.
- Weber, K. P. (2016). Microbial Community Assessment in Wetlands for Water Pollution Control: Past, Present, and Future Outlook. *Water*, 503.
- Worrall, P., Peberdy, K. J., & Millett, M. C. (1997). Constructed wetlands and nature conservation. *Water Science and Technology*, 205-213.
- Wu, C. Y., Kao, C. M., Lin, C. E., Chen, C. W., & Lai, Y. C. (2010). Using a constructed wetland for non-point source pollution control and river water quality purification: a case study in Taiwan. *Water Science & Technology*, 2549-2555.
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., et al. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 594-601.
- Wu, Y., Lyu, T., Yue, B., Tonoli, E., Verderio, E. A., Ma, Y., et al. (2019). Enhancement of Tomato Plant Growth and Productivity in Organic Farming by Agri-Nanotechnology Using Nanobubble Oxygenation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 10823-10831.
- Zaimoglu, Z. (2006). Treatment of campus wastewater by a pilot-scale constructed wetland utilizing *Typha latifolia*, *Juncus acutus* and *Iris versicolor*. *Journal of Environmental Biology*, 293-298.
- Zimmerman, W. B., Tesař, V., & Bandulasena, H. H. (2011). Towards energy efficient nanobubble generation with fluidic oscillation. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 350-356.
- Zouboulis, A., & Avranas, A. (2000). Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 153-161.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγγελάκης, Α. Ν., & Tchobanoglous, G. (1995). *Υγρά απόβλητα φυσικά συστήματα επεξεργασίας και ανάκτηση, επαναχρησιμοποίηση και διάθεση εκροών*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης .
- Αγιουτάντη, Ρ. (2018). *Μελέτη αποτελεσματικότητας τεχνητού υγροβιοτόπου με αλόφυτα για την απομάκρυνση Cd, Ni και Zn από αστικά λύματα*. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Αντωνόπουλος, Β. (2003). *Ύδραυλική Περιβάλλοντος και Ποιότητα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γιαχούδη.

- Βουλγαράκης, Ι. (2017). *Φυτοαποδόμηση οργανικού φορτίου και φαινόλων στα υγρά απόβλητα ελαιοτριβείου με χρήση του φυτού *Tamarix parviflora* L.* Διπλωματική Έργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Γκέκας, Β., & Πρωιμάκη, Σ. (2002). *Φυσικοχημικές Διεργασίες Διαχωρισμού για Μηχανικούς Περιβάλλοντος*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Δανιηλίδου, Έ. (2010). *Πειραματική καλλιέργεια φυτών με στόχο εφαρμογές για την προστασία του περιβάλλοντος*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Πάτρα.
- Καλτέκης, Ά. (2019). *Επεξεργασία υγρών αστικών και γαλακτοκομικών αποβλήτων με μεμβράνες υπερδιήθησης και νανοδιήθησης, για την απομάκρυνση COD*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Λέκκα, Ά. Θ. (2013). *Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων- Περιγραφή και Λειτουργία Μονάδας Επεξεργασίας Λυμάτων Ιωαννίνων*. Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μηχανολογίας, Ηράκλειο.
- Λουπασάκη, Ε. (2014). *Επεξεργασία υγρών αποβλήτων με αναερόβιο αντιδραστήρα UASB & συστήματα προσκολλημένης ανάπτυξης*. Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Μανουσάκη, Ε. (2008). *Χαρακτηρισμός της ικανότητας μεσογειακών φυτών για απομάκρυνση Pb και Cd από ρυπασμένα εδάφη*. Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Μελίδης, Π. (2015). *Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων*. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Μπίσδα, Α. (2017). *Εκτίμηση του ρυθμού οξυγόνωσης (kLa) με σύστημα παραγωγής νανοφουσαλίδων*. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Μπλάνας, Γ. (2013). *Φυτοεξυγίανση με το αλόφυτο *Limonium cornarianum* ρυπασμένων εδαφών με κάδμιο (Cd)*. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Πανταζίδου, Μ., Ξενίδης, Α., & Παπασιώπη, Ν. (2006). *Σημειώσεις μαθήματος «Αποκατάσταση ρυπασμένων χώρων»*. Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του ΕΜΠ.
- Σοφιανός, Σ. (2016). *Επεξεργασία λυμάτων υψηλής αλατότητας με υγροβιότοπους*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Στεφανόπουλος, Κ. (2006). *Επεξεργασία πυκνών λυμάτων μέσω τεχνητού υγροβιότοπου σε ξηρά κλίματα*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.

- Σωτηροπούλου, Α. (2010). *Συστήματα τεχνητών υγροβιοτόπων*. Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Δυτ. Μακεδονίας, Τεχνολογιών Αντιρρύπανσης, Κοζάνη.
- Τσώνης, Σ. (2004). *Επεξεργασία Λυμάτων*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Χουρδάκης, Ν. (2008). *Επεξεργασία αστικών αποβλήτων με κροκίδωση*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.
- Ψυλλάκη, Ε. (2014). *Έλεγχος Ρύπανσης Νερών "Σημειώσεις Θεωρίας"*. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.