



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΙΣΧΥΡΟΥ ΛΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΤΕΧΝΗΤΟ
ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟ**

ΣΠΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δρ. ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ (επιβλέπων)

Δρ. ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Δρ. ΜΑΝΤΖΑΒΙΝΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2005

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	i
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	iv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ.....	6
2.1 Εισαγωγή.....	6
2.2 Είδη τεχνητών υγροβιοτόπων.....	8
2.3 Βλάστηση.....	10
2.4 Υπόστρωμα.....	12
2.5 Μικροοργανισμοί.....	13
2.6 Μηχανισμοί απομάκρυνσης.....	14
2.6.1 Απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα.....	15
2.6.2 Απομάκρυνση του αζώτου.....	17
2.6.3 Απομάκρυνση του φωσφόρου.....	19
2.6.4 Απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών.....	21
2.7 Σχεδιαστικές εξισώσεις.....	22
3 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΚΑΘΕΤΗΣ ΡΟΗΣ.....	28
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	28
3.2 ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΟΞΥΓΟΝΟΥ.....	29
3.4 Παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας.....	32
3.5 Φαινόμενα φραξίματος των πόρων.....	34
4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ.....	36
4.1 Εισαγωγή.....	36
4.2 Πειραματική διάταξη του τεχνητού υγροβιοτόπου.....	36
4.3 Πληρωτικά υλικά.....	40
4.4 Βλάστηση.....	41
4.5 Λειτουργία της μονάδας.....	43
4.6 Αναλυτικές μέθοδοι.....	44
4.6.1 Πειράματα προσρόφησης.....	46
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	48
5.1 Προσρόφηση φωσφορικών στο υπόστρωμα.....	48

5.2	Οργανικός άνθρακας	49
5.2.1	COD.....	50
5.2.2	BOD ₅	53
5.2.3	Μετρήσεις οργανικού άνθρακα	56
5.3	Άζωτο.....	57
5.3.1	Ολικό άζωτο.....	57
5.3.2	Αμμωνία.....	60
5.3.3	Νιτρικά – Νιτρώδη	63
5.4	Φωσφορικά	67
5.5	Αιωρούμενα στερεά	70
5.6	Θειικά	73
5.7	Ανάπτυξη της βλάστησης	74
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	80
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	82
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΟΝΑ1	84
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	89

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.3.1 – Χαρακτηριστικά υδροχαρών φυτών για τεχνητούς υγροβιοτόπους..	11
Πίνακας 5.2.1.1 – Ποσοστιαία απομάκρυνση του COD μεταξύ εισόδου – ενδιαμέσου, ενδιαμέσου – εξόδου και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.	52
Πίνακας 5.2.2.1 – Ποσοστιαία απομάκρυνση του BOD ₅ μεταξύ εισόδου – ενδιαμέσου, ενδιαμέσου – εξόδου και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.	56
Πίνακας 5.3.1.1 - Ποσοστιαίες απομακρύνσεις αμμωνίας μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας κάθε γραμμής	60
Πίνακας 5.3.2.1 – Ποσοστιαίες απομακρύνσεις αμμωνίας μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας κάθε γραμμής	63
Πίνακας 5.3.3.1 - Μέσες συγκεντρώσεις οργανικού αζώτου στα σημεία δειγματοληψίας της μονάδας	67
Πίνακας 5.4.1 Ποσοστιαίες απομακρύνσεις φωσφορικών μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας κάθε γραμμής	69
Πίνακας 5.5.1 – Ποσοστιαίες απομακρύνσεις αιωρούμενων στερεών μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας κάθε γραμμής.....	72
Πίνακας 5.7.1 – Υπολογισμός της επιφάνειας που καταλαμβάνεται από τη βλάστηση	79

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 5.1.1 – Ισόθερμη Freundlich	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Διάγραμμα 5.2.1.1 - Συγκέντρωση του COD στην είσοδο ενδιάμεσα και στην έξοδο της γραμμής με βλάστηση	50
Διάγραμμα 5.2.1.2 - Συγκέντρωση του COD στην είσοδο ενδιάμεσα και στην έξοδο της γραμμής χωρίς βλάστηση	51
Διάγραμμα 5.2.1.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του COD στα ενδιάμεσα σημεία των δύο γραμμών	51
Διάγραμμα 5.2.1.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του COD στις εξόδους των δύο γραμμών	52
Διάγραμμα 5.2.2.1 – Συγκεντρώσεις του BOD ₅ στη γραμμή με βλάστηση	54
Διάγραμμα 5.2.2.2 - Συγκεντρώσεις του BOD ₅ στη γραμμή χωρίς βλάστηση	54
Διάγραμμα 5.2.2.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του BOD ₅ στα ενδιάμεσα σημεία	55
Διάγραμμα 5.2.2.4 – Σύγκριση τιμών του BOD ₅ στην έξοδο κάθε γραμμής	55
Διάγραμμα 5.2.2.1.1 – Συγκέντρωση DOC στη γραμμή με βλάστηση και TOC στη γραμμή χωρίς βλάστηση	57
Διάγραμμα 5.3.1.1 – Συγκέντρωση ολικού αζώτου στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (SP1) στο ενδιάμεσο σημείο (SP2) και στην έξοδο (SP3)	58
Διάγραμμα 5.3.1.2 - Συγκέντρωση ολικού αζώτου στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (SP1) στο ενδιάμεσο σημείο (SP4) και στην έξοδο (SP5)	58
Διάγραμμα 5.3.1.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς (SP4)	59
Διάγραμμα 5.3.1.4 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων στις εξόδους της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς (SP5)	59
Διάγραμμα 5.3.2.0.1 – Συγκεντρώσεις αμμωνίας στη γραμμή με βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP2) και έξοδος (SP3)	61
Διάγραμμα 5.3.3.1 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων των νιτρικών στο ενδιάμεσο σημείο της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP4)	64
Διάγραμμα 5.3.3.2 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων των νιτρικών στις εξόδους, της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP5)	64
Διάγραμμα 5.3.3.3 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων των νιτρικών στο ενδιάμεσο σημείο της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP4)	

.....	65
Διάγραμμα 5.3.3.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων των νιτρωδών στις εξόδους, της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP5).....	65
Διάγραμμα 5.4.1 - Συγκεντρώσεις φωσφορικών στη γραμμή με βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP2) και έξοδος (SP3)	67
Διάγραμμα 5.4.2 - Συγκεντρώσεις φωσφορικών στη γραμμή χωρίς βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP4) και έξοδος (SP5)	68
Διάγραμμα 5.4.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς (SP4).....	68
Διάγραμμα 5.4.4 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων από την έξοδο της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς (SP5).....	69
Διάγραμμα 5.5.1 - Συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στη γραμμή με βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP2) και έξοδος (SP3)	70
Διάγραμμα 5.5.2 – Συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στη γραμμή χωρίς βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP4) και έξοδος (SP5).....	71
Διάγραμμα 5.5.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων από το ενδιάμεσο σημείο της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς (SP4)	71
Διάγραμμα 5.5.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων από την έξοδο της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς (SP5).....	72
Διάγραμμα 5.6.1 - Συγκεντρώσεις θεικών στη γραμμή με βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP2) και έξοδος (SP3)	73
Διάγραμμα 5.6.2 1 - Συγκεντρώσεις θεικών στη γραμμή χωρίς βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP4) και έξοδος (SP5)	73

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 5.7.1 - Η μονάδα αμέσως μετά την κατασκευή.....	74
Εικόνα 5.7.2 - Ο τεχνητός υγροβιότοπος στις 28/03 μετά από 20 μέρες τροφοδοσίας με νερό και λίπασμα	75
Εικόνα 5.7.3 - Ανάπτυξη νέων καλαμιών στην πρώτη δεξαμενή.....	75
Εικόνα 5.7.4 - Ανάπτυξη νέων καλαμιών στην δεύτερη δεξαμενή.....	75
Εικόνα 5.7.5 – Συνολική εικόνα του τεχνητού υγροβιοτόπου.....	76
Εικόνα 5.7.6 - Τα καλάμια στην πρώτη δεξαμενή.....	76
Εικόνα 5.7.7 - Τα καλάμια στην πρώτη δεξαμενή.....	76
Εικόνα 5.7.8 - Τα καλάμια στην δεύτερη δεξαμενή.....	77
Εικόνα 5.7.9 – Ο τεχνητός υγροβιότοπος στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας...	77
Εικόνα 5.7.10 - Τα καλάμια στην πρώτη δεξαμενή.....	78
Εικόνα 5.7.11 - Τα καλάμια στην δεύτερη δεξαμενή.....	78

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασία είναι κατασκευή και η λειτουργία ενός τεχνητού υγροβιοτόπου για την επεξεργασία αστικού λύματος. Η μονάδα κατασκευάστηκε στον χώρο του εργαστηρίου «Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος». Το είδος του τεχνητού υγροβιοτόπου που επιλέχτηκε ήταν τεχνητός υγροβιοτόπος κάθετης ροής. Το όνομά του προέρχεται από τον τρόπο που γίνεται η εφαρμογή του λύματος. Αυτό που τον κάνει να διαφέρει από άλλα είδη τεχνητών υγροβιοτόπων είναι η μεγάλη ικανότητα να επεξεργάζεται λύματα τα οποία δεν έχουν υποστεί κανενός είδους επεξεργασία.

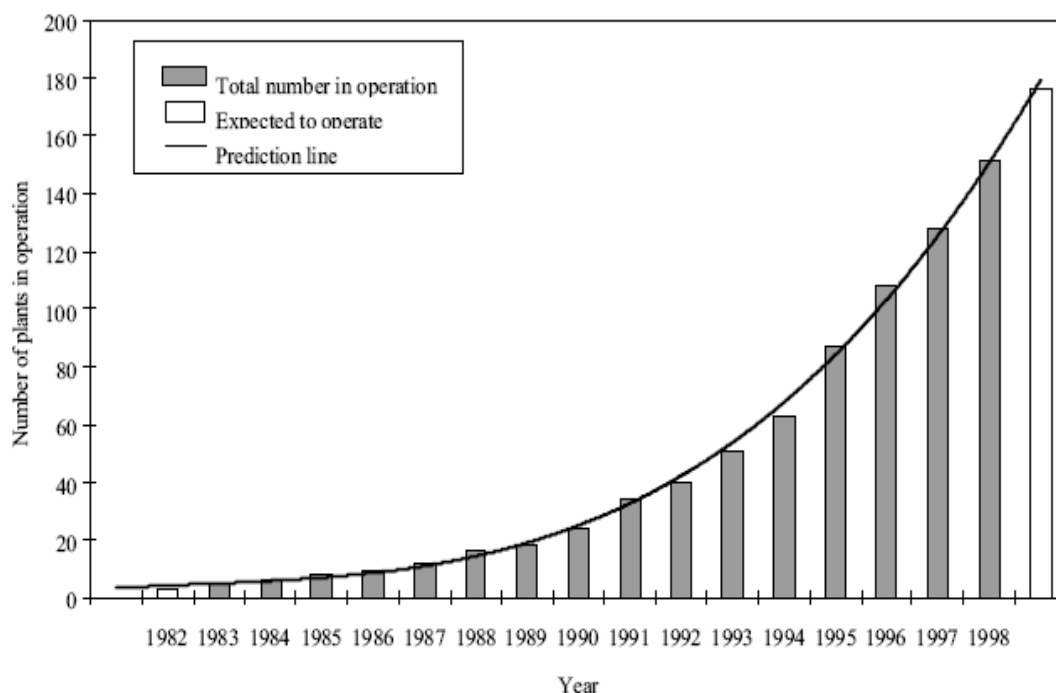
Τα λύματα για την λειτουργία της πιλοτικής μονάδας προέρχονταν από την εισροή της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων το πολυτεχνείου.

Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε στις 11 Απριλίου και τελείωσε 25 Ιουνίου και η ικανότητα καθαρισμού που επιτεύχθηκε ήταν υψηλή για COD, BOD₅ και NH₄ – N.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα λόγω της `βιομηχανικής επανάστασης` που είχε την ανάγκη από πολυάριθμα εργατικά χέρια αρχίζουν να δημιουργούνται και τα μεγάλα αστικά κέντρα. Έτσι η δημιουργία δικτύων αποχέτευσης αλλά και μονάδων επεξεργασίας των αστικών αποβλήτων ήταν επιτακτική ανάγκη κυρίως για λόγους δημόσιας υγείας αλλά και προστασίας του περιβάλλοντος. Το 1868 κατασκευάστηκε στην Αγγλία το πρώτο αμμοδιυλιστήριο ενώ ο αερισμός των λυμάτων χρησιμοποιήθηκε το 1882.

Στην Ελλάδα η ύπαρξη μονάδων επεξεργασίας σε λειτουργία ξεκίνησε αρχές της δεκαετίας του 1980 και ο αριθμός τους από τότε συνεχώς αυξάνεται, όπως φαίνεται και από το σχήμα 1.1 [13].



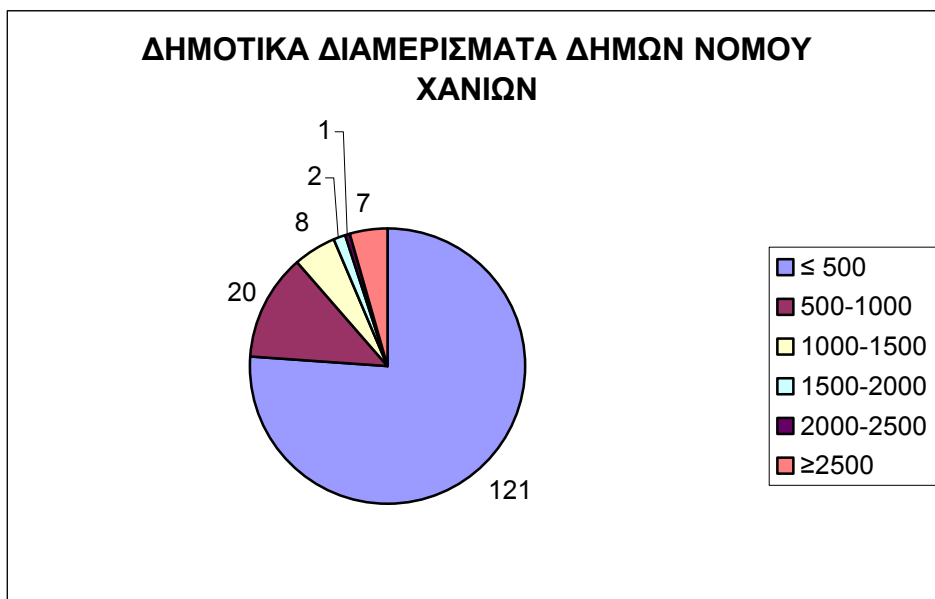
Σχήμα 1.1.1 Ανάπτυξη των μονάδων επεξεργασίας αστικών λυμάτων στην Ελλάδα

Σήμερα περισσότερες από 300 μονάδες επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων λειτουργούν και εξυπηρετούν το 60 % του πληθυσμού.

Με βάση τόσο την Ευρωπαϊκή νομοθεσία (91/271/EEC) όσο και την εθνική (5673/400/143/97 Κ.Υ.Α) καθίσταται σαφές ότι η δημιουργία μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων δεν αφορά μόνο μεγάλα αστικά κέντρα (στην Ελλάδα για παράδειγμα τις πρωτεύουσες των νομών) αλλά γενικά κάθε δήμο με πληθυσμό μεγαλύτερο 2000 κατοίκων [34]. Είναι γεγονός ότι στην Ελλάδα υπάρχουν, σε όλους τους νόμους, πολλοί δήμοι οι οποίοι αποτελούνται από δημοτικά διαμερίσματα τα οποία αφενός απέχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους αφετέρου οι πληθυσμοί τους δεν ξεπερνάει τους 2000 κάτοικους. Ενδεικτικά στο νομό Χανίων σε ότι αφορά την κατανομή του πληθυσμού σε δήμους και δημοτικά διαμερίσματα έχουμε τα σχήματα 1.2 και 1.3 (Πηγή: Εθνική Στατιστική Υπηρεσία)



Σχήμα 1.1.2 – Καταμέτρηση των Δήμων του νόμου Χανίων με βάση τον πληθυσμό



Σχήμα 1.1.3 – Καταμέτρηση των δημοτικών διαμερισμάτων των δήμων του νομού Χανίων

Από τα διαγράμματα βλέπουμε πως οι περισσότεροι δήμοι έχουν πληθυσμούς μεταξύ 2000-10000 κάτοικους και ότι υπάρχουν πολλά δημοτικά διαμερίσματα με πληθυσμό μικρότερο των 500 κατοίκων. Ανάλογη είναι η κατάσταση και σε άλλους νομούς.

Σε τέτοιες περιπτώσεις η κατασκευή μιας κεντρικής μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι ασύμφορη οικονομικά γιατί πρέπει να ενωθούν με αυτή αποχετευτικά δίκτυα από περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους που σημαίνει μεγάλο κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί και στην επιλογή της τεχνολογίας με την οποία θα γίνεται η επεξεργασία των υγρών απόβλητων σε σχέση κυρίως με τον πληθυσμό που πρόκειται να εξυπηρετήσει άμεσα αλλά και στο μέλλον.

Εξάλλου, η οδηγία 2000/60/EEC ορίζει ότι το κόστος υπηρεσιών ύδατος (εγκαταστάσεις συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων οι οποίες στη συνέχεια πραγματοποιούν απορρίψεις σε επιφανειακά ύδατα) πρέπει να καλύπτεται πλήρως από τους χρηστές επομένως ο τρόπος διαχείρισης συνολικά των υγρών απόβλητων , από την συλλογή ως την επεξεργασία και τελικά την απόρριψη, πρέπει να επιλέγεται με προσοχή έτσι ώστε και να είναι μικρό το κόστος αλλά ταυτόχρονα και να προχωρήσουμε από την απόρριψη των επεξεργασμένων

εκροών σε θάλασσες ή ποτάμια στην επαναχρησιμοποίηση είτε για άρδευση είτε ακόμη και για εμπλουτισμό του υδροφορέα [34].

Τις τελευταίες δεκαετίες τόσο σε Ευρώπη όσο και στην Αμερική η ανάγκη για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων σε αποκεντρωμένες περιοχές ή σε περιοχές με όχι υψηλό πληθυσμό, με χαμηλό κόστος αλλά και με απόδοση ανάλογη των συμβατικών μονάδων οδήγησε στην χρήση των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας.

Φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι αυτά στα οποία η επεξεργασία γίνεται με φυσικά μέσα και διεργασίες (βιολογικές, φυσικές και χημικές) όπως ακριβώς συμβαίνει και στο περιβάλλον με την αλληλεπίδραση νερού ατμόσφαιρας εδάφους και μικροοργανισμών. Συγκρίνοντας ένα συμβατικό και ένα φυσικό σύστημα επεξεργασίας θα δούμε ότι υπάρχουν διεργασίες που συμβαίνουν και στα δύο, όπως καθίζηση, φιλτράρισμα, μεταφορά αερίων, ιοντοεναλλαγή, βιολογική αποδόμηση, προσρόφηση και οξειδοαναγωγή, αλλά υπάρχουν και κάποιες που συμβαίνουν μόνο στα φυσικά συστήματα όπως η φωτοσύνθεση φωτοοξείδωση και πρόσληψη από τα φυτά. Επίσης στα συμβατικά συστήματα οι ταχύτητες με τις οποίες συμβαίνουν οι αντιδράσεις είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτές των φυσικών συστημάτων. Όμως για μικρούς οικισμούς τα φυσικά συστήματα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα που έχουν να κάνουν με το κόστος κατασκευής συντήρησης και λειτουργίας, την απλότητα στη λειτουργία και την αναβάθμιση του περιβάλλοντος.

Τα φυσικά συστήματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [5] :

1. Γήινα και/ή εδαφικά συστήματα. Βασίζονται στην εφαρμογή αποβλήτων τα οποία έχουν προεπεξεργαστεί στο έδαφος έτσι ώστε καθώς διέρχονται από αυτό να γίνεται επιπλέον επεξεργασία μέσα από τις φυσικές βιολογικές και χημικές διεργασίες που συμβαίνουν σε αυτό. Διακρίνονται σε : τοπικά, βραδείας εφαρμογής, ταχείας διήθησης, επιφανειακής ροής και σε συνδυασμό των παραπάνω.
2. Συστήματα υδροχαρών φυτών. Όπως φαίνεται και από το όνομα τους τα συστήματα αυτά βασίζονται στην ύπαρξη υδροχαρών φυτών. Τέτοια συστήματα είναι οι τεχνητοί υγροβιότοποι και τα συστήματα επιπλεόντων

υδροχαρών φυτών.

3. Διάφοροι τύποι τεχνητών λιμνών. Τα συστήματα αυτά βασίζονται στην αερόβια ή/και αναερόβια επεξεργασία αποβλήτων σε τεχνητές λίμνες.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η κατασκευή και η λειτουργία ενός τεχνητού υδροβιότοπου κάθετης ροής για την επεξεργασία αστικών λυμάτων χωρίς να έχει προηγηθεί κανενός είδους προεπεξεργασία.

Έτσι, στο χώρο του εργαστηρίου 'Τεχνολογίας και Διαχείρισης περιβάλλοντος' κατασκευάστηκε το εν λόγω σύστημα με δυο παράλληλες γραμμές· μία με βλάστηση και μία άνευ

2 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ

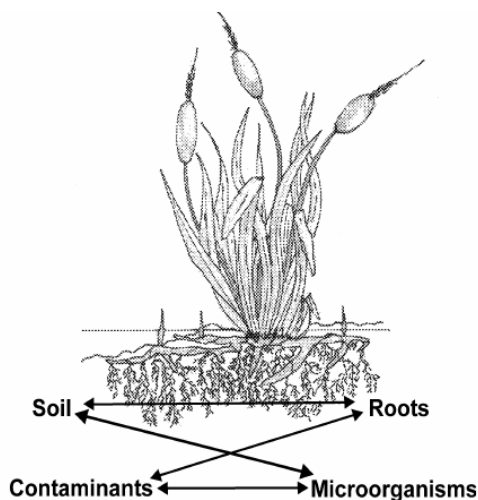
2.1 Εισαγωγή

Ως υγροβιότοπο ορίζουμε το τμήμα του εδάφους που η επιφάνεια του νερού είναι για μεγάλο χρονικό διάστημα στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους ώστε να υπάρχουν συνθήκες κορεσμού με ταυτόχρονη ύπαρξη φυτικής βλάστησης όπως είδη κύπερης, είδη καλαμιών, είδη βούρλων και είδη ψαθιού [34].

Με τον όρο 'τεχνητό υγροβιότοπο' εννοούμε το τεχνητό σύστημα που κατασκευάζεται με σκοπό την επεξεργασία υγρών αποβλήτων με διεργασίες είδες με αυτές που θα συνέβαιναν σε έναν φυσικό υγροβιότοπο [27].

Η χρήση των τεχνητών υγροβιότοπων ξεκίνησε πριν 40 περίπου χρόνια σε Βόρεια Αμερική και Ευρώπη [21]. Η ιδέα προέκυψε από την χρήση των υγροβιότοπων είτε για επεξεργασία υγρών αποβλήτων είτε ως αποδέκτες επεξεργασμένων εκροών. Αυτή η πρακτική είχε ως συνέπεια την υποβάθμιση του οικοσυστήματος των υγροβιότοπων. Έτσι ξεκίνησε πειραματικά η χρήση τεχνητών υγροβιότοπων όπου παρατήρησαν οι επιστήμονες την ικανότητα απομάκρυνσης οργανικών και ανόργανων ρύπων που βρίσκονταν στα υγρά απόβλητα και την ανάπτυξη μικροοργανισμών στο υπόστρωμα. Με την πάροδο των χρόνων η διαδικασία κατασκευής και λειτουργίας βελτιώθηκε και σήμερα οι τεχνητοί υγροβιότοποι ως τεχνολογία επεξεργασίας χρησιμοποιούνται σε παρά πολλές χώρες για επεξεργασία αστικών και οικιακών λυμάτων, απόβλητα βιομηχανίας τροφίμων, στραγγίσματα χωρών υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.

Η περιοχή που γίνεται η διαδικασία της επεξεργασίας είναι κυρίως η ριζόσφαιρα, το μέρος όπου αναπτύσσονται οι ρίζες του φυτού, γιατί εκεί λαμβάνουν χώρα οι φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες (σχήμα 2.1 [22])



Σχήμα 2.1 – Αλληλεπιδράσεις στην ριζόσφαιρα ενός τεχνητού υγροβιοτόπου

Τα πλεονεκτήματα από την χρήση των τεχνητών υγροβιοτόπων είναι :

1. Μικρό κόστος κατασκευής
2. Μικρό κόστος λειτουργίας και συντήρησης
3. Η λειτουργία και η συντήρηση δεν απαιτούν συνεχή παρουσία προσωπικού
4. Μπορούν να λειτουργούν εξίσου καλά με διακυμάνσεις είτε στην ροή είτε στις συγκεντρώσεις των ρύπων
5. Συνεισφέρουν στην αναβάθμιση του περιβάλλοντος καθώς προσφέρουν κατάλληλες συνθήκες για την παρουσία και ανάπτυξη πανίδας και χλωρίδας που συναντάμε και σε φυσικούς υγροβιότοπους

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα όπως :

1. Απαιτούν σχετικά μεγάλες εκτάσεις γης σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας
2. Είναι δυνατόν η απόδοση τους να επηρεαστεί και από εξωγενείς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες
3. Μπορεί να χρειαστούν επιπλέον συμβατικά μέσα για περαιτέρω επεξεργασία κυρίως για απομάκρυνση μικροοργανισμών ή ακόμη και για

θρεπτικά

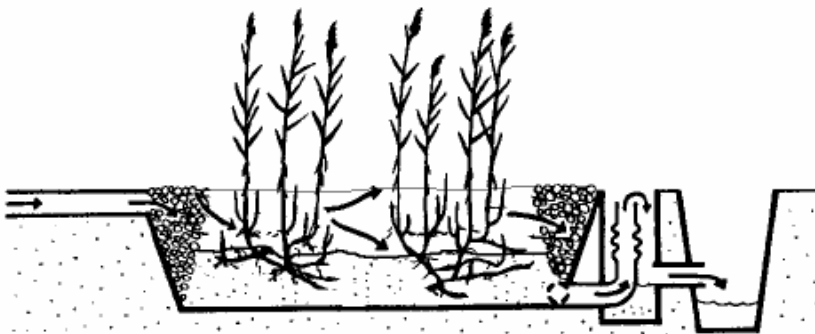
4. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι ένα σύνθετο σύστημα που συνδυάζει φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες στις οποίες δεν είναι δυνατόν να παρέμβουμε κατά τη διάρκεια λειτουργίας
5. Χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα έως ότου το σύστημα φτάσει στο μέγιστο της απόδοσής του

2.2 Είδη τεχνητών υγροβιοτόπων

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

1. Επιφανειακής ροής
2. Υποεπιφανειακής ροής

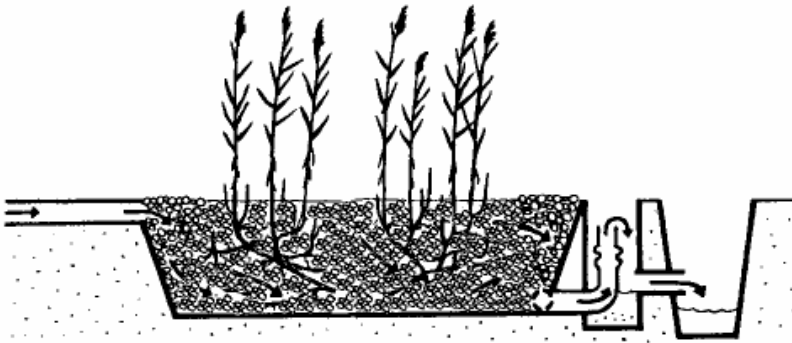
Στους τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής η ροή του νερού είναι οριζόντια και πάντα πάνω από την επιφάνεια του υποστρώματος (σχήμα 2.2 [36]). Το υπόστρωμα είναι χώμα σε μια δεξαμενή που ο πυθμένας είναι στρωμένος με ένα αδιαπέραστο υλικό (συνήθως από πλαστικό) ώστε να μην υπάρχουν διαρροές. Η επεξεργασία των αποβλήτων γίνεται καθώς αυτά διέρχονται διάμεσου της βλάστησης από βακτήρια και φυσικοχημικές διεργασίες.



Σχήμα 2.2 – Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής

Οι υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής είναι συστήματα στα οποία η ροή γίνεται είτε οριζόντια είτε κάθετα πάντα κάτω από την επιφάνεια του υποστρώματος (σχήμα 2.3 [36]) που είναι τις περισσότερες φορές συνδυασμός άμμου και

χαλικιού με τον πυθμένα να έχει κλίση από 0 – 1 %. Σημαντική παράμετρος για τον σχεδιασμό αυτών των συστημάτων αποτελεί το πορώδες του υποστρώματος.



Σχήμα 2.3 – Τεχνητός υγροβιότοπος υποεπιφανειακής ροής

Συγκρίνοντας έναν τεχνητό υγροβιότοπο επιφανειακής ροής με έναν υποεπιφανειακής ροής θα δούμε ότι :

1. Ο επιφανειακής ροής τεχνητός υγροβιότοπος έχει μικρότερο κόστος κατασκευής από έναν υποεπιφανειακής ροής
2. Ο επιφανειακής ροής τεχνητός υγροβιότοπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επεξεργασία υγρών αποβλήτων με υψηλές συγκεντρώσεις σε αιωρούμενα στερεά σε αντίθεση με έναν υποεπιφανειακής ροής όπου οι υψηλές συγκεντρώσεις αιρούμενων στερεών μπορούν να οδηγήσουν σε κλείσιμο των πόρων και γενικά σε δυσλειτουργία του συστήματος
3. Είναι πιο εύκολο να ελεγχθεί η ροή ενός τεχνητού υγροβιότοπου επιφανειακής ροής
4. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής προσφέρουν καταφύγια σε περισσότερα είδη από ότι μπορούν οι υποεπιφανειακής ροής
5. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής απαιτούν λιγότερη έκταση σε σχέση με του επιφανειακής ροής τεχνητούς υγροβιότοπους και έχουν υψηλότερους ρυθμούς απομάκρυνσης αφού το υπόστρωμα τους παρέχει μεγαλύτερη επιφάνεια για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών

6. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής δεν παρουσιάζουν προβλήματα οσμών και εντόμων, γιατί το επίπεδο του νερού βρίσκεται συνεχώς κάτω από την επιφάνεια του υποστρώματος.

2.3 Βλάστηση

Ένα κύριο χαρακτηριστικό των τεχνητών υδροβιότοπων είναι η παρουσία βλάστησης και συγκεκριμένα των υδροχαρών φυτών όπως ονομάζονται. Οι πιο σημαντικές λειτουργίες που επιτελούν σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο και οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση του είναι :

- α) σταθεροποίηση του υποστρώματος
- β) φυσική φίλτρωση των στερεών
- γ) βοηθούν στην ομαλή ροή των αποβλήτων διαμέσου του τεχνητού υδροβιότοπου αυξάνοντας τον χρόνο παραμονής και ενισχύοντας την καθίζηση των αιρούμενων στερεών
- δ) στους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής οι ρίζες βοηθούν στο να εμποδίζουν το φράξιμο των πόρων καθώς διαπερνούν το υπόστρωμα ανοίγοντας νέους “δρόμους” για τα απόβλητα
- ε) σε τεχνητούς υδροβιότοπους επιφανειακής ροής προσφέρουν σκίαση και έτσι εμποδίζεται η ανάπτυξη μικροφυκών

Η πιο σημαντική λειτουργία των υδροχαρών φυτών είναι ο ρόλος τους στην απομάκρυνση των ρύπων από το απόβλητο. Αυτό συμβαίνει και άμεσα και έμμεσα. Άμεσα συμβαίνει όταν το φυτό απορροφά βαρέα μέταλλα και θρεπτικά (άζωτο και φώσφορο) από το απόβλητο. Η λειτουργία αυτή είναι σημαντική όταν ο υδροβιότοπος χρησιμοποιείται για επεξεργασία “αδύνατου” αποβλήτου, για παράδειγμα όταν χρησιμοποιείται για τριτοβάθμια επεξεργασία.

Ο έμμεσος τρόπος με τον οποίο τα φυτά βοηθούν στην απομάκρυνση του ρυπαντικού φορτίου είναι ότι προσφέρουν κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη μικροοργανισμών τόσο στην ριζόσφαιρα όσο και στο κορμό του φυτού, αν μιλάμε για τεχνητό υδροβιότοπο επιφανειακής ροής. Αυτό συμβαίνει γιατί κυρίως από τις ρίζες αλλά και από το κορμό του φυτού απελευθερώνεται

οξυγόνο. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα του οξυγόνου που απελευθερώνεται από την ριζόσφαιρα των φυτών είναι το pH, η θερμοκρασία, το είδος του φυτού και η φάση ανάπτυξης στην οποία βρίσκεται αυτό.

Επιπλέον από τις ρίζες απελευθερώνονται οργανικές ενώσεις (ζάχαρα, βιταμίνες, οργανικά οξέα) οι οποίες βοηθούν στο εξής :

Οι οργανικές ενώσεις όπως βιταμίνες και αμινοξέα χρησιμοποιούνται από τους μικροοργανισμούς ως υπόστρωμα και γενικά βοηθούν στην ανάπτυξη τους, ιδιαίτερα στο στάδιο προσαρμογής των φυτών στο τεχνητό υδροβιότοπο, όταν ακόμα δεν έχει ξεκινήσει η επεξεργασία. Αυτή η λειτουργία είναι σημαντική όταν ο τεχνητός υδροβιότοπος τροφοδοτείται με εκροές δευτεροβάθμιας επεξεργασίας που είναι χαμηλές σε οργανικό άνθρακα και θρεπτικά.

Τα είδη των φυτών (πίνακας 2.1 [27]) που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι καλάμια (του γένους *Phragmites*) είδη βούρλων (του γένους *Scirpus*) και είδη ψαθιού (του γένους *Typha*).

Πίνακας 2.3.1 – Χαρακτηριστικά υδροχαρών φυτών για τεχνητούς υδροβιότοπους

Κοινή ονομασία	Επιστημονική ονομασία	Θερμοκρασία ανάπτυξης °C	Μέγιστη ανεκτή αλατότητα ppt	pH	Βάθος ανάπτυξης ριζών m
καλάμι	<i>Phragmites</i>	12 – 23	45	2-8	> 0.6
βούρλα	<i>Scirpus</i>	18 – 27	20	4-9	0.8
ψάθα	<i>Typha</i>	10 – 30	30	4-10	0.3

Τα κριτήρια επιλογής του είδους βλάστησης είναι :

- Ανοχή σε τοπικές κλιματικές συνθήκες , έντομα και ασθένειες
- Ανοχή σε ρύπους
- Γρήγορη προσαρμογή και ανάπτυξη
- Υψηλή ικανότητα απομάκρυνσης είτε έμμεσα είτε άμεσα
- Να είναι οικολογικά αποδεκτό

2.4 Υπόστρωμα

Το υπόστρωμα στους τεχνητούς υγροβιότοπους παίζει σημαντικό ρόλο στην καλή λειτουργία του γι' αυτό και η σωστή επιλογή του είναι πολύ σημαντική. Το υπόστρωμα συμμετέχει στις διαδικασίες απομάκρυνσης των ρύπων με πολλούς τρόπους. Στην επιφάνειά του αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στις διάφορες βιοχημικές διεργασίες και σε αυτό αναπτύσσονται οι ρίζες των φυτών. Επίσης οι φυσικοχημικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται παίζουν ρόλο όπως για παράδειγμα στην απομάκρυνση του φωσφόρου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα είναι η άμμος, το χαλίκι και απλό χώμα. Το τελευταίο χρησιμοποιείται σε τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής ενώ σε αυτούς με υποεπιφανειακή ροή χρησιμοποιούνται διάφοροι συνδυασμοί των δυο πρώτων υλικών σε διάφορα μεγέθη. Προχωρώντας από το ανώτερο στρώμα στο κατώτερο η διάμετρος των υλικών αυξάνει. Στον πίνακα 2.2 [27] παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά διαφόρων άμμων και χαλικιών που έχουν χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα σε τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής.

Πίνακας 2.4.1 – Χαρακτηριστικά ειδών μέσων τεχνητών υγροβιοτόπων

Είδος	Μέγεθος mm	Πορώδες %	Υδραυλική αγωγιμότητα $m^3 / m^2 / d$
Αδρόκοκκη άμμος	2	32	100-1,000
Χαλικώδης άμμος	8	35	500-5,000
Λεπτόκοκκο χαλίκι	16	38	1000-10,000
Ενδιάμεσο χαλίκι	32	40	10,000-50,000
Αδρόκοκκη πέτρα	128	45	50,000-250,000

Τα κριτήρια με τα οποία επιλέγεται το κατάλληλο υπόστρωμα είναι : το μέγεθος , το πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα και το κόστος. Το είδος του υποστρώματος επηρεάζει την ευκολία με την οποία τα λύματα διέρχονται μέσα από αυτό. Τα μικρότερου μεγέθους υλικά παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως

μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια για επεξεργασία των λυμάτων ή καλύτερες συνθήκες για την ανάπτυξη των ριζών. Από την άλλη λεπτόκοκκο υλικό συνεπάγεται και φράξιμο των πόρων γρηγορότερα. Αυτός είναι και ο λόγος που γίνεται συνδυασμός των διάφορων μεγεθών άμμων ή/και χαλικιών από τη μία η ύπαρξη ικανοποιητικής επιφάνειας για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών και από την άλλη ικανοποιητικό πορώδες για την διέλευση των λυμάτων. Επίσης σημαντικό ρόλο για το υπόστρωμα παίζει και η περιεκτικότητα σε οξειδία σιδήρου ασβεστίου και αργίλου, γιατί συμβάλουν σε μεγάλο ποσοστό στην απομάκρυνση του φωσφόρου από το σύστημα ενισχύοντας την προσροφητική ικανότητα ως προς αυτόν.

Με την πάροδο του χρόνου το πορώδες αλλά και η υδραυλική αγωγιμότητα αλλάζουν τόσο από την εναπόθεση των στερεών που περιέχονται στα λύματα, όσο και από το βιοφίλμ που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του υποστρώματος. Αλλά, και η προσροφητική ικανότητα του υποστρώματος μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, αφού καταλαμβάνονται συνεχώς οι θέσεις που είναι διαθέσιμες για προσρόφηση.

2.5 Μικροοργανισμοί

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους οι μικροοργανισμοί παίζουν σημαντικό ρόλο καθώς αποτελούν τον κύριο μηχανισμό απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου και του αζώτου. Σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο θα συναντήσουμε πολλά είδη μικροοργανισμών όπως βακτηρία, μύκητες, νηματοειδή και πρωτόζωα. Άλλα από αυτά είναι χημειοετερότροφα και άλλα χημειοαυτότροφα. Επίσης διαφοροποίηση στους μικροοργανισμούς υπάρχει και στο αν είναι αερόβιοι, επαμφοτερίζοντες ή αναερόβιοι. Κοντά στην επιφάνεια και σχεδόν πάνω στην επιφάνεια των ριζών ή στον κορμό (σε επιφανειακής ροής συστήματα) επικρατούν αερόβιοι μικροοργανισμοί. Όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια συναντάμε από επαμφοτερίζοντες μέχρι και αναερόβιους μικροοργανισμούς. Η αποδόμηση του οργανικού άνθρακα, για παράδειγμα, βασίζεται στα ετερότροφα βακτήρια ενώ η

απομάκρυνση του αζώτου είναι συνδυασμός της δράσης χημειοαυτότροφων αερόβιων βακτηρίων (νιτροσομονάδες και νιτροβακτήρια) και ακολούθως η απονιτροποίηση βασίζεται σε χημειοετεροτροφα επαμφοτερίζοντα βακτηρίδια (*Pseudomonas*, *Agrobacterium* [32]).

2.6 Μηχανισμοί απομάκρυνσης

Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο διακρίνονται σε 2 κατηγορίες : στους αβιοτικούς , δηλαδή το σύνολο των φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα, και στους βιοτικούς που οφείλονται στη δράση των μικροοργανισμών και των φυτών. Ανάλογα με το είδος του ρύπου και τις συνθήκες λειτουργίας οι μηχανισμοί αυτοί μπορεί να δρουν ταυτόχρονα ή διαδοχικά.

Οι αβιοτικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης είναι :

1. καθίζηση
2. ρόφηση (προσρόφηση - απορρόφηση)
3. χημική οξείδωση
4. εξάτμιση
5. φωτοαποδόμηση

Οι βιοτικοί παράγοντες είναι :

1. βιοαποδόμηση (αερόβια, αναερόβια)
2. φυτοσυσσώρευση - φυτοσταθεροποίηση
3. φυτοαποδόμηση – ριζοαποδόμηση
4. φυτοεξάτμιση – εξατμισοδιαπνοή

Στον πίνακα 2.3 [12] παρουσιάζονται ανά κατηγορία ρύπου οι φυσικοί, χημικοί και βιολογικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης

Πίνακας 2.6.1 – Μηχανισμοί απομάκρυνσης σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο

Ρύπος	Φυσικοί	Χημικοί	Βιολογικοί
Ολικά αιωρούμενα στερεά	Καθίζηση		Βιοαποδόμηση
Απαίτηση οξυγόνου	Καθίζηση	Οξειδωση	Βιοαποδόμηση
Οργανικές Ενώσεις	Διάχυση Εξαέρμιση Καθίζηση	Φωτοχημική οξειδωση	Βιοαποδόμηση Φυτοεξαέρμιση
Ενώσεις του αζώτου	Καθίζηση		Αμμωνιοποίηση Νιτροποίηση- Απονιτροποίηση Πρόσληψη από φυτά
Ενώσεις του φωσφόρου	Καθίζηση	Προσρόφηση Κατακρήμνιση	Πρόσληψη από φυτά Μικροοργανισμοί
Μέταλλα	Καθίζηση	Προσρόφηση Κατακρήμνιση Εναλλαγή ιόντων	Πρόσληψη από φυτά
Παθογόνοι μικροοργανισμοί		UV ακτινοβολία	Μικροοργανισμοί

2.6.1 Απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα

Η απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο γίνεται με διάφορες διεργασίες, φυσικές χημικές και βιολογικές ανάλογα με το είδος της ουσίας (για παράδειγμα αν είναι πτητική ή μη) και τη φυσική της κατάσταση, δηλαδή αν είναι διαλυμένη ή βρίσκεται σε σωματιδιακή μορφή.

Η καθίζηση αποτελεί έναν γρήγορο τρόπο απομάκρυνσης που λαμβάνει χώρα καθώς το απόβλητο διέρχεται από τον τεχνητό υγροβιότοπο. Λόγω της ταχύτητας της ροής ορισμένα στερεά καθιζάνουν και μαζί τους οργανικές ενώσεις που είναι προσροφημένες σε αυτά για να αποδομηθούν αργότερα από μικροοργανισμούς.

Αν στα λύματα υπάρχουν πτητικές ενώσεις αυτές θα εξατμιστούν ενώ άλλες

οργανικές ενώσεις είναι δυνατόν να διασπαστούν λόγω φωτοχημικής οξειδωσης. Η πιο σημαντική διαδικασία στην οποία οφείλεται η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και κατά συνέπεια η μείωση του BOD₅ είναι η βιοαποδόμηση.

Τόσο στο υπόστρωμα όσο και στη ριζόσφαιρα αναπτύσσονται διάφορα είδη χημειοετερότροφων μικροοργανισμών, για τα οποία το οργανικό φορτίο που εισέρχεται στο σύστημα αποτελεί την πηγή για παραγωγή ενέργειας και σύνθεση νέας βιομάζας.

Οι μικροοργανισμοί μπορεί να είναι αερόβιοι, αναερόβιοι ή επαμφοτερίζοντες ανάλογα αν στο σημείο στο οποίο αναπτύσσονται υπάρχει οξυγόνο ή όχι. Η θερμοκρασία του λύματος επηρεάζει την απόδοση των μικροοργανισμών, γιατί σχετίζεται με τον ρυθμό ανάπτυξης όπως και η ταχύτητα με την οποία το λύμα διέρχεται διάμεσου των πόρων του υποστρώματος. Όσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος επαφής, τόσο πιο πολύ ποσότητα αποδομείται από τους μικροοργανισμούς.

Οι δυο τελευταίοι παράγοντες χρησιμοποιούνται και στην παρακάτω εξίσωση που περιγράφει τη μείωση του οξυγόνου για τη βιοχημική αποδόμηση του οργανικού άνθρακα :

$$\frac{BOD_{5,effluent}}{BOD_{5,influent}} = \exp(-k \cdot t)$$

k = σταθερά βιοαποδόμησης συναρτήσει της θερμοκρασίας

t = χρόνος παραμονής

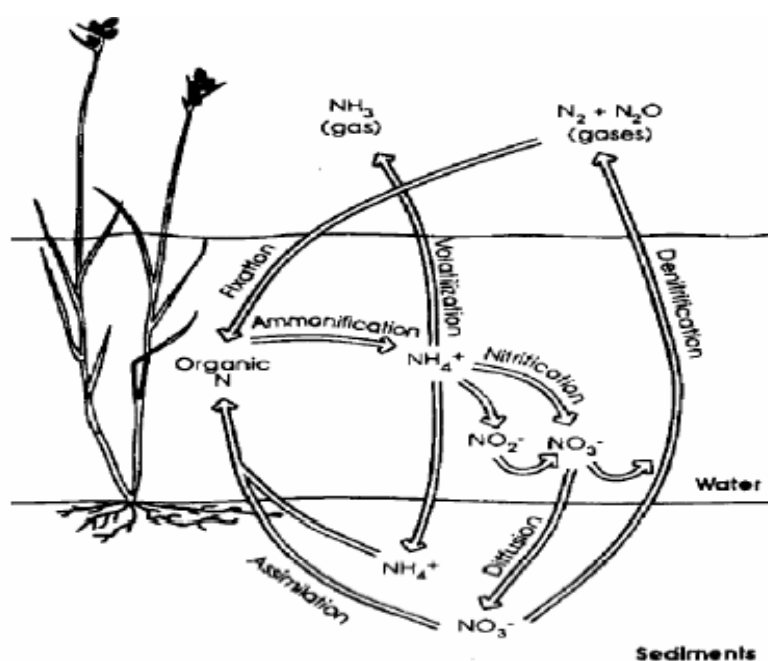
Σημαντική μείωση του οργανικού φορτίου μπορεί να επιφέρει και η επικράτηση ανοξικών συνθηκών όπου λαμβάνει χώρα η απονιτροποίηση από ετερότροφους οργανισμούς.

Ανεξάρτητα από τις συνθήκες που μπορεί να επικρατούν, οι μέχρι τώρα έρευνες έχουν δείξει ότι οι διάφοροι τύποι τεχνητών υγροβιοτόπων μπορούν να επιτύχουν υψηλές αποδόσεις στην απομάκρυνση οργανικών ρύπων.

2.6.2 Απομάκρυνση του αζώτου

Ένα από τα κύρια συστατικά των υγρών αποβλήτων είναι το άζωτο. Το άζωτο υπάρχει τόσο σε οργανική μορφή, όσο και σε ανόργανη. Σε ό,τι αφορά το οργανικό άζωτο, στα αστικά λύματα το βρίσκουμε κυρίως με την μορφή της ουρίας ενώ το ανόργανο υπάρχει είτε ως αμμωνία είτε ως νιτρώδη είτε ως νιτρικά και αυτό εξαρτάται από το στάδιο επεξεργασίας. Συνήθως το λύμα που δεν έχει υποστεί καμιάς μορφής επεξεργασία περιέχει κυρίως σε μεγάλη συγκέντρωση αμμωνία. Η αμμωνία σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι τοξική για φυτά και μικροοργανισμούς. Τόσο η αμμωνία, όσο και τα νιτρικά είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία ευτροφισμού σε υδάτινους αποδέκτες.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6.2.1 [12] καθώς το απόβλητο διέρχεται από τον τεχνητό υδροβιότοπο υφίσταται πλήθος διεργασιών που το μετατρέπουν από την μια μορφή στην άλλη



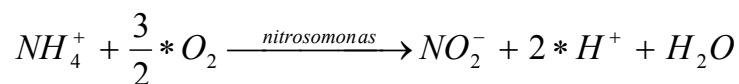
Σχήμα 2.6.2.1 – Ο κύκλος του αζώτου

Οι κυριότερες είναι η αμμωνιοποίηση, δηλαδή η μετατροπή του οργανικού αζώτου σε αμμωνία, η νιτροποίηση, δηλαδή η μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρώδη και κατόπιν σε νιτρικά, και η απονιτροποίηση η μετατροπή των νιτρικών

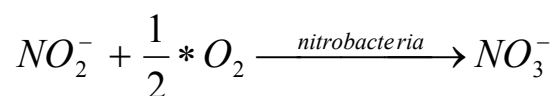
σε αέριο άζωτο ή σε πρωτοξειδίο του αζώτου. Οι παραπάνω μετατροπές γίνονται από μικροοργανισμούς και οι συνθήκες που απαιτούνται διαφέρουν.

Σε ό,τι αφορά τις οργανικές ενώσεις του αζώτου στα αστικά λύματα σημαντικό ποσοστό καταλαμβάνει η ουρία η οποία μετατρέπεται σε αμμωνία είτε σε αερόβιες είτε σε αναερόβιες συνθήκες.

Σημαντική διεργασία είναι η νιτροποίηση η οποία γίνεται σε δύο στάδια από χημειότροφους αυτότροφους αερόβιους μικροοργανισμούς. Πρέπει η συγκέντρωση του οξυγόνου να είναι τουλάχιστον 2 mg/l και το pH μεταξύ 8-9 αλλά όχι κάτω από 6. Το πρώτο βήμα είναι η μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρώδη, η οποία γίνεται από τις νιτροσομονάδες



και κατόπιν τα νιτροβακτήρια μετατρέπουν τα νιτρώδη σε νιτρικά

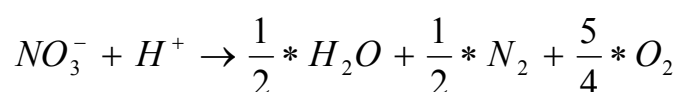


Η συνολική αντίδραση είναι :



Για κάθε mg αμμωνίας που νιτροποιείται απαιτούνται 4.57 mg οξυγόνου.

Η διαδικασία της απονιτροποίησης γίνεται από ετερότροφους μικροοργανισμούς (bacillus, micrococcus, enterobacter) σε ανοξικές συνθήκες, όπου το ιόν NO_3^- χρησιμοποιείται ως δέκτης ηλεκτρονίων



Σημαντικός παράγοντας για την πραγματοποίηση της αντίδρασης είναι η ύπαρξη ικανής ποσότητας οργανικού άνθρακα.

Η απονιτροποίηση είναι μια διεργασία η οποία απαιτεί αρκετό χρόνο για να ξεκινήσει. Εν τω μεταξύ ο οργανικός άνθρακας χρησιμοποιείται και από άλλους χημειοτερότροφους μικροοργανισμούς που συνυπάρχουν στο υπόστρωμα ενός τεχνητού υγροβιοτόπου. Αυτό θα έχει ως συνεπεία να υπάρξει έλλειψη πηγής ενέργειας για τους απονιτροποιητές, άρα ύπαρξη νιτρικών σε μεγάλη συγκέντρωση στην έξοδο. Αυτό το πρόβλημα συνήθως αντιμετωπίζεται με σύστημα ανακυκλοφορίας μεταξύ της εξόδου και του τελικού σταδίου της μονάδας. Επίσης μπορεί να λυθεί με προσθήκη ποσότητας οργανικού άνθρακα, όπως μεθανόλη.

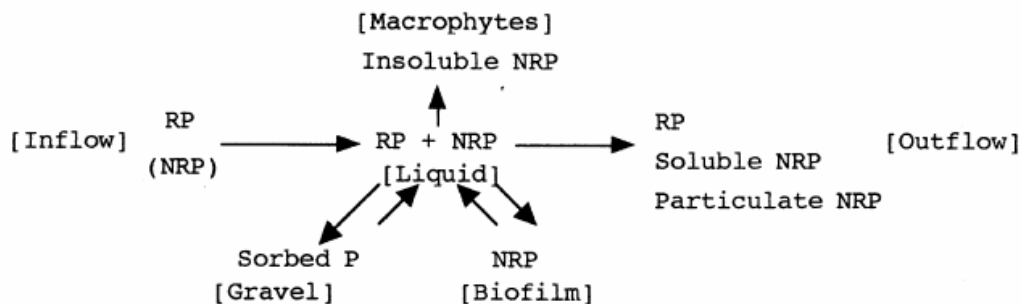
Το άζωτο αποτελεί θρεπτικό συστατικό για του φυτικούς οργανισμούς και επομένως ένα ποσοστό θα απομακρύνεται από τα φυτά. Τα φυτά προσλαμβάνουν το άζωτο με τη μορφή αμμωνίας το οποίο κατόπιν αποθηκεύεται στους ιστούς. Η ποσότητα αυτή απομακρύνεται κόβοντας τα φυτά συνήθως μια φορά το χρόνο και κατά προτίμηση το φθινόπωρο. Αν αυτό δεν γίνει οι ποσότητες αυτές θα επιστρέψουν στο σύστημα και θα έχουμε υψηλές συγκεντρώσεις υποβάθρου. Η ικανότητα πρόσληψης έχει να κάνει με την φάση ανάπτυξης του φυτού και το είδος. Έχει εκτιμηθεί να κυμαίνεται μεταξύ $0,5 - 3,3 \text{ gN} / \text{m}^2 / \text{yr}$ [25]. Τα καλάμια και τα βούρλα βρίσκονται στο κατώτερο όριο και τα ψαθιά στο ανώτερο. Το ποσοστό αυτό όταν ο τεχνητός υγροβιοτόπος χρησιμοποιείται για επεξεργασία λύματος με μεγάλη συγκέντρωση αζώτου δεν είναι και πολύ σημαντικό.

Σε πολλές περιπτώσεις τεχνητών υγροβιοτόπων για να επιτευχθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερο ποσοστό απομάκρυνσης του αζώτου συνήθως κατασκευάζονται δυο δεξαμενές· η πρώτη είναι επιφανειακής ροής για καλύτερο αερισμό και μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά και η δεύτερη είναι υποεπιφανειακής ροής για τη δημιουργία ανοξικών συνθηκών και απομάκρυνση των νιτρικών, η οποία δέχεται και ένα ποσοστό της εκροής του συστήματος. Αυτό γίνεται για να βοηθηθεί η διεργασία της απονιτροποίησης λόγω τυχόν έλλειψης οργανικού άνθρακα για τους μικροοργανισμούς.

2.6.3 Απομάκρυνση του φωσφόρου

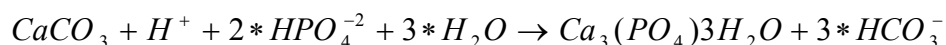
Όπως και το άζωτο έτσι και ο φώσφορος αποτελεί ένα θρεπτικό συστατικό που περιέχεται στα αστικά λύματα. Η απομάκρυνση του έχει μεγάλη σημασία γιατί αποτελεί συχνά παράγοντα που σε διάφορα υδάτινα οικοσυστήματα δημιουργεί προβλήματα ευτροφισμού. Στα υγρά απόβλητα βρίσκεται είτε σε διαλυτή είτε σε σωματιδιακή μορφή. Επίσης, βρίσκεται τόσο ως ανόργανος με προέλευση τα οικιακά καθαριστικά όσο και ως οργανικός, από υπολείμματα φαγητών και ανθρώπινα απόβλητα. Η απομάκρυνση του φωσφόρου γίνεται με φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες. Πιο συγκεκριμένα η απομάκρυνση των ενώσεων του φωσφόρου γίνεται με τρεις τρόπους (σχήμα 2.6.3.1 [19]) :

- i. Προσρόφηση στο υπόστρωμα
- ii. Πρόσληψη από τις ρίζες των φυτών
- iii. Αφομοίωση από μικροοργανισμούς



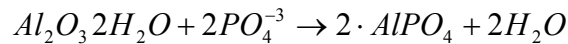
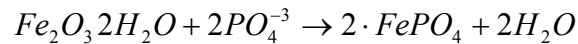
Σχήμα 2.6.3.1 – Μηχανισμοί απομάκρυνσης του φωσφόρου [20]

Η προσρόφηση των φωσφορικών λαμβάνει χώρα όταν το υπόστρωμα που χρησιμοποιείται είναι πλούσιο σε ασβέστιο σίδηρο ή αργίλιο. Σε υποστρώματα πλούσια σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) γίνεται η αντίδραση [35] :



Εκτός από τα συνηθισμένα υλικά για υπόστρωμα (χαλίκι, άμμος) έχουν χρησιμοποιηθεί και στέρα υπολείμματα χυτηρίων τα οποία είναι πλούσια σε

οξείδια σιδήρου ή αργιλίου και η προσρόφηση των φωσφορικών φαίνεται στις εξισώσεις [35]:



Η προσρόφηση του φωσφόρου στα οξείδια του σιδήρου και του αργιλίου ευνοείται σε ελαφρώς όξινο pH [35].

Ο φώσφορος αποτελεί θρεπτικό συστατικό για τα φυτά και ως εκ τούτου προσλαμβάνεται από αυτά με μεγαλύτερο ρυθμό την άνοιξη που είναι και η περίοδος ανάπτυξης για τα περισσότερα φυτά που χρησιμοποιούνται σε τεχνητούς υγροβιότοπους. Με τη συγκομιδή απομακρύνεται ο φώσφορος από αυτά. Ο ρυθμός πρόσληψης από τα φυτά κυμαίνεται από 1.8 ως 18 g-p / m² / γ [25]. Τέλος οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται στο υπόστρωμα απορροφούν κάποιες ποσότητες φωσφόρου. Μόλις ο φώσφορος προσροφηθεί στο υπόστρωμα μπορεί κάποια ποσότητα να μετατραπεί σε οργανικό λόγω βιολογικής δράσης ενισχύοντας έτσι την ακινητοποίησή του.

Από του παραπάνω μηχανισμούς αυτός που επικρατεί είναι η προσρόφηση εξαιτίας της οποίας στην αρχή λειτουργίας του τεχνητού υγροβιότοπου η συγκέντρωση του φωσφόρου στην έξοδο θα είναι ικανοποιητικά χαμηλή, αλλά με την πάροδο του χρόνου η προσροφητική ικανότητα του υποστρώματος μειώνεται.

2.6.4 Απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών

Στα αστικά λύματα εκτός των άλλων υπάρχουν και παθογόνοι μικροοργανισμοί οποίοι αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για την δημόσια υγεία και γι' αυτό είναι σημαντική η απομάκρυνση τους κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Οι μικροοργανισμοί αυτοί να είναι βακτηρία, πρωτόζωα και ιοί για παράδειγμα E-coli, Salmonella, Shigell [28] κ.α.

Η απομάκρυνση των παθογόνων στους τεχνητούς υγροβιότοπους είναι

συνδυασμός :

- Φυσικών διεργασιών
- Χημικών διεργασιών
- Βιολογικών διεργασιών

Στις φυσικές διεργασίες απομάκρυνσης συμπεριλαμβάνονται η φίλτρανση στους πόρους του υποστρώματος και στις ρίζες των φυτών όπως και η καθίζηση. Οι χημικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης είναι η οξειδωση και προσρόφηση σε οργανικά υλικά. Οι βιολογικοί τρόποι απομάκρυνσης περιλαμβάνουν ουσίες που εκκρίνονται από τις ρίζες των φυτών και δρουν ως αντιβιοτικά, Θήρευση από άλλα είδη για παράδειγμα ορισμένα πρωτόζωα που τρέφονται με βακτήρια, και φυσικός θάνατος.

2.7 Σχεδιαστικές εξισώσεις

Ο σχεδιασμός των τεχνητών υγροβιοτόπων γίνεται με βάση τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, εκφρασμένου ως BOD_5 ή την απομάκρυνση της αμμωνίας όπου αυτά τα είδη ρύπων απομακρύνονται κυρίως με βιοχημικές διεργασίες. Επίσης υπάρχουν σχεδιαστικοί τύποι που σχετίζονται με τη ροή. Σε όλες τις περιπτώσεις ο σχεδιασμός γίνεται με βάση κάποιες παραδοχές. Γενικά οι τεχνητοί υγροβιότοποι μπορούν να θεωρηθούν ως συστήματα προσκολλούμενης βιομάζας και η απόδοση τους μπορεί να υπολογιστεί από κινητική πρώτης τάξης για αντιδραστήρες εμβολικής ροής [36].

1) Υδραυλικοί τύποι σχεδιασμού

Διακρίνονται σε δυο κατηγορίες με κριτήριο το είδος της ροής.

- Τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής

Σε αυτά τα συστήματα η ροή προσομοιάζεται με ροή σε ανοικτό αγωγό και η ταχύτητα υπολογίζεται με την εξίσωση Manning

$$u = \frac{1}{n} \cdot d^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

u = ταχύτητα ροής m / sec

n = συντελεστής Manning

d = βάθος νερού λεκάνης m

S = υδραυλική κλίση ή κλίση της επιφάνειας του νερού m / m

Θεωρητικά, για να ισχύει αυτή η σχέση πρέπει να μην υπάρχουν επιδράσεις που θα μπορούσαν να αλλάξουν το βάθος ροής, δεν υπάρχει μεταβολή της επιφάνειας διατομής και δεν υπάρχει μεταβολή της τραχύτητας της επιφάνειας των στέρεων ορίων. Στους τεχνητούς υγροβιοτόπους η βλάστηση προβάλλει αντίσταση στην ροή όποτε θεωρούμε έναν συντελεστή αντίδρασης $a = n \cdot d^{-1/2}$ ανάλογα με την πυκνότητα αυτής και τυπικές τιμές από 1 έως 4 $S \cdot m^{1/6}$, όπου m η αύξηση του βάθους που εξυπηρετεί διαφορετικό φορτίο συνήθως 0,01 – 0,03 [36].

Για την διαστασιολόγηση της λεκάνης ισχύουν οι σχέσεις :

$$u = \frac{Q}{W \cdot d} \quad W = \frac{A_s}{L} \quad S = \frac{m \cdot d}{L} \quad L = \left(\frac{A_s \cdot d^{2.667} \cdot m^{0.5} \cdot 86400}{a \cdot Q} \right)^{0.6667}$$

L = μέγιστο επιτρεπτό μήκος λεκάνης m

Q = παροχή m^3/d

A_s = επιφάνεια m^2

W = πλάτος m

Συνήθως ο λόγος μήκος : πλάτος = 3:1

- Τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής

Για τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής χρησιμοποιείται ο νόμος του Darcy

ο οποίος περιγράφει την ροή του υγρού σε πορώδες μέσο με βασική προϋπόθεση την γραμμική ροή.

$$Q = K \cdot A_C \cdot S$$

Q = μέση παροχή στη λεκάνη m^3/d

S = υδραυλική κλίση (της επιφάνειας νερού) m/m

K = υδραυλική αγωγιμότητα $m^3/m^2/day$

A_C = Εμβαδόν κάθετο στη ροή m^2

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων της λεκάνης ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις :

$$S = \frac{m \cdot d}{L} \quad L = \frac{A_S}{W} \quad A_C = W \cdot d \quad W = \frac{1}{d} \cdot \left(\frac{Q \cdot A_S}{m \cdot K} \right)^{0.5}$$

m = αύξηση του βάθους που εξυπηρετεί ως διαφορικό φορτίο : 0,005 – 0,02

Q = μέση παροχή στη λεκάνη m^3/d

W = πλάτος υποστρώματος λεκάνης m

d = βάθος νερού λεκάνης m

L = μήκος λεκάνης παράλληλα στην ροή m

Για βάθος λεκάνης $\leq 0,6$ ο λόγος μήκος προς πλάτος είναι μικρότερο του 3:1 και για βάθος 0,3 μέτρα 0,75 :1 [36]

2) Σχεδιασμός με βάση την απομάκρυνση οργανικού φορτίου

Με αυτόν τον τρόπο σχεδιασμού η επιφάνεια υπολογίζεται σε σχέση με το οργανικό φορτίο στην είσοδο και την επιθυμητή τιμή του στην έξοδο [36].

$$A_S = \frac{Q \cdot (\ln C_O - \ln C_E)}{K_T \cdot d \cdot n}$$

A_s = η συνολική επιφάνεια του υδροβιότοπου m^2

C_o = BOD εισόδου mg/l

C_E = BOD εξόδου mg/l

d = βάθος υγρού λεκάνης m

n = πορώδες 0.65 – 0.75 για επιφανειακή ροή, 0.35 – 0.45 για υποεπιφανειακή ροή

K_T = σταθερά κινητικής πρώτης τάξης συναρτήσει της θερμοκρασίας d^{-1}

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

K_{20} = σταθερά, $0.678 d^{-1}$ για επιφανειακή ροή, $1.104 d^{-1}$ για υποεπιφανειακή ροή

$\theta = 1.06$

T = θερμοκρασία σχεδιασμού $^{\circ}C$

3) Σχεδιασμός με βάση την απομάκρυνση του αζώτου

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας γίνονται 2 υπολογισμοί, ένας για τη νιτροποίηση και ένας για την απονιτροποίηση [36].

- Νιτροποίηση

$$\frac{C_E}{C_o} = \exp(-K_T \cdot t) \quad A_s = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{C_o}{C_E}\right)}{K_T \cdot d \cdot n}$$

C_E = συγκέντρωση TKN στην εισροή mg/l

C_o = συγκέντρωση αμμωνίας στην εκροή mg/l

Q = παροχή m^3 / day

d = βάθος νερού m

n = πορώδες

A_S = επιφάνεια δεξαμενής m^2

t = χρόνος παραμονής days

K_T = κινητική σταθερά d^{-1}

Στους τεχνητούς υγροβιοτοπούς επιφανειακής ροής για θερμοκρασίες $1 - 10\ ^\circ C$ υπολογίζεται από την σχέση :

$$K_T = 0.1367 \cdot 1.15^{(T-10)}$$

ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των $10\ ^\circ C$ η σταθερά υπολογίζεται ως εξής :

$$K_T = 0.2187 \cdot 1.048^{(T-20)}$$

Στους τεχνητούς υγροβιοτόπους υποεπιφανειακής ροής εκτός από τη θερμοκρασία η σταθερά επηρεάζεται και από το ποσοστό ανάπτυξης του ριζικού συστήματος.

Για θερμοκρασίες από 10 ως $20\ ^\circ C$

$$K_T = K_{NH} \cdot 1.048^{(T-20)} \quad K_{NH} = 0.0184 + 0.3922 \cdot (rz)^{2.6077}$$

T = θερμοκρασία $^\circ C$

K_{NH} = σταθερά ρυθμού νιτροποίησης d^{-1}

rz = ποσοστό ανάπτυξης ριζικού συστήματος $0 - 1$

Για θερμοκρασίες από 1 ως $10\ ^\circ C$

$$K_T = K_{10} \cdot 1.15^{(T-10)}$$

T = θερμοκρασία $^\circ C$

K_{10} = σταθερά η οποία προκύπτει από την εξίσωση για θερμοκρασίες μεταξύ 10 ως $20\ ^\circ C$, d^{-1}

- Απονιτροποίηση

Ο υπολογισμός γίνεται με τις ίδιες σχέσεις και για τα δύο είδη υγροβιοτόπων

$$\frac{C_E}{C_O} = e^{-(K_T \cdot t)} \quad A_S = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{C_O}{C_E}\right)}{K_T \cdot d \cdot n} \quad K_T = 1.15^{T-20}$$

C_E = συγκέντρωση νιτρικών στην εισροή mg/l

C_O = συγκέντρωση νιτρικών στην εκροή mg/l

Q = παροχή m^3 / day

d = βάθος νερού m

n = πορώδες

A_S = επιφάνεια δεξαμενής m^2

t = χρόνος παραμονής days

K_T = κινητική σταθερά d^{-1}

T = θερμοκρασία $^{\circ}C$

Ο σχεδιασμός για την απομάκρυνση του αζώτου γίνεται με τρία διαδοχικά βήματα. Πρώτα υποθέτουμε μια τιμή για τη συγκέντρωση της αμμωνίας C_O λίγο μικρότερη από την επιθυμητή συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην εκροή. Από την εξίσωση για τη διαδικασία της νιτροποίησης υπολογίζουμε την αιτούμενη έκταση, με την προϋπόθεση ότι γνωρίζουμε τι εισροή C_E έχουμε στο σύστημα. Η διαφορά $C_O - C_e$ είναι η εισροή των νιτρικών στην εξίσωση για την απονιτροποίηση από την οποία υπολογίζεται η συγκέντρωση των νιτρικών στην εκροή. Το άθροισμα της συγκέντρωσης των νιτρικών στην εκροή συν τη συγκέντρωση της αμμωνίας που υποθέσαμε στην αρχή πρέπει να είναι μικρότερο από την επιθυμητή συγκέντρωση ολικού αζώτου στην εκροή ώστε η επιφάνεια που υπολογίσαμε να είναι αποδεκτό αποτέλεσμα. Η διαδικασία γίνεται και για χειμώνα και για το καλοκαίρι έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία που είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τη μικροβιακή δραστηριότητα στο σύστημα [36].

3 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΚΑΘΕΤΗΣ ΡΟΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι κάθετης ροής όπως δηλώνει και το όνομα τους η ροή του απόβλητου γίνεται κάθετα κατά μήκος όλης της επιφάνειας σε αντίθεση με τους τεχνητούς υγροβιοτοπούς οριζόντιας ροής όπου η εισαγωγή γίνεται από τη μια άκρη και βγαίνει από την άλλη.

Ο λόγος που τα συστήματα αυτά είναι ελκυστικά σε σχέση με τα άλλα είδη τεχνητών υγροβιοτόπων είναι η μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου. Αυτό έχει να κάνει με τον τρόπο εφαρμογής του αποβλήτου.

Η πρακτική που ακολουθείται είναι ότι όσες μέρες διαρκεί η τροφοδοσία το ίδιο ή το διπλάσιο διάστημα αφήνουμε το σύστημα να ξεκουραστεί. Επίσης την ημέρα της τροφοδοσίας αυτή γίνεται με τρόπο ασυνεχή. Έτσι, καθώς γίνεται αποστράγγιση του απόβλητου από το σύστημα οι κενοί πόροι του γεμίζουν με αέρα [16].

Το γεγονός ότι με αυτού του είδους υγροβιοτόπων μπορούμε να πετύχουμε υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης COD, TSS, NH_4 και ανάλογα με το υλικό του υποστρώματος και P οδήγησε στο να χρησιμοποιούνται για επεξεργασία αστικών λυμάτων χωρίς πρωτοβάθμια επεξεργασία. Συνήθως πριν την είσοδο στις κλίνες το λύμα περνάει από εσχάρες για να απομακρυνθούν τα μεγάλα σε μέγεθος αντικείμενα.

Σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να επιτευχθούν με τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων είναι :

- Η επιφάνεια να είναι ικανή στο να κατεισδύσει το απόβλητο στο χρονικό διάστημα που χωρίζει 2 δόσεις στο σύστημα και ταυτόχρονα ο χρόνος επαφής του λύματος με το υπόστρωμα να είναι ικανός ώστε να έρθει σε επαφή με τη μικροβιακή μάζα που αναπτύσσεται σε αυτό.

- να παρέχει ικανοποιητική επιφάνεια για την ανάπτυξη της βιομάζας και να επιτρέπει ικανοποιητική μεταφορά οξυγόνου

Ένα μειονέκτημα που έχουν αυτού του είδους τα συστήματα είναι το φράξιμο των πόρων τα οποία μπορεί να συμβεί αν δεν γίνει σωστός σχεδιασμός. Μετά από αρκετό χρονικό διάστημα μειώνεται η προσροφητική ικανότητα του υποστρώματος και έτσι μειώνεται η απόδοση απομάκρυνσης του φωσφόρου. Επίσης απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά τη τροφοδοσία να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή του λύματος στην επιφάνεια ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο να έχουμε έξοδο σε λιγότερο χρόνο με αποτέλεσμα κακή επεξεργασία.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν παρατηρηθεί καλά αποτελέσματα από τη συνδυαστική χρήση επιφανειακής ροής συστημάτων και κάθετης ροής. Αυτός ο συνδυασμός φαίνεται να είναι ιδανικός κυρίως σε ότι αφορά την απομάκρυνση του ολικού αζώτου (άλλο ένα σημείο που υστερούν κάπως οι υγροβιότοποι κάθετης ροής).

3.2 Ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου

Το οξυγόνο σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο μπορεί να εισέλθει με τρεις τρόπους [18]:

- Με συμμεταφορά
- Από τις ρίζες
- Με διάχυση

Η συμμεταφορά είναι ο μηχανισμός με τον οποίο το οξυγόνο εισέρχεται στο σύστημα και έχει να κάνει με την κλίση της ατμοσφαιρικής πίεσης στο σύστημα. Καθώς το απόβλητο εξέρχεται από το σύστημα δημιουργεί κενό το οποίο καταλαμβάνεται από αέρα ή απόβλητο. Αν το χρονικό διάστημα από την εφαρμογή της τροφοδοσίας μέχρι την πλήρη έξοδο από το σύστημα είναι μικρό, τότε όλος ο κενός χώρος θα καλυφθεί από αέρα [18].

Η διάχυση είναι ο μηχανισμός με τον οποίο το οξυγόνο κατανέμεται στο σύστημα,

αφού ο αέρας ο οποίος εισέρχεται στο σύστημα δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε αυτόν και επίσης υπάρχει κατανάλωση από οξυγόνου από τους μικροοργανισμούς και αυτή η διάφορα στη συγκέντρωση του οξυγόνου στα διάφορα σημεία είναι η δρώσα δύναμη για τη διάχυση [18].

Σε ότι αφορά τις ρίζες η συνεισφορά τους είναι μικρή καθώς δημιουργούν μια πολύ μικρή ζώνη πάχους κάποιων μm γύρω τους.

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα υπολογισμού της ποσότητας οξυγόνου που εισέρχεται στο σύστημα. Μερικά από αυτά είναι :

$$1. \quad \frac{[(BOD_{IN} - BOD_{OUT}) + ((NH_4 - N)_{IN} - (NH_4 - N)_{OUT}) \times 4.3]}{\text{επιφάνεια κλίνης}} \times \text{παροχή}$$

Οι συγκεντρώσεις είναι σε ppm, η επιφάνεια σε m² και η παροχή σε L/d

Ο τύπος αυτό προτάθηκε από τον Cooper [4] . Δεν υπολογίζει την απομάκρυνση του BOD λόγω καθίζησης, την απώλεια της αμμωνίας λόγω της βλάστησης και την απομάκρυνση του BOD λόγω της απονιτροποίησης [4].

2. Μια άλλη μέθοδος υπολογισμού βασίζεται σε χαρακτηριστικά στοιχεία της τροφοδοσίας όπως ο όγκος του λύματος σε κάθε τροφοδοσία, ο αριθμός των τροφοδοσιών και το διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών τροφοδοσιών. Το μοντέλο περιλαμβάνει δύο αριθμητικές σχέσεις. Μία για τη μεταφορά οξυγόνου λόγω συμμεταφοράς και μία λόγω διάχυσης[18].

- Λόγω διάχυσης

$$OI_D = J \times A \times (24 - t \times n)$$

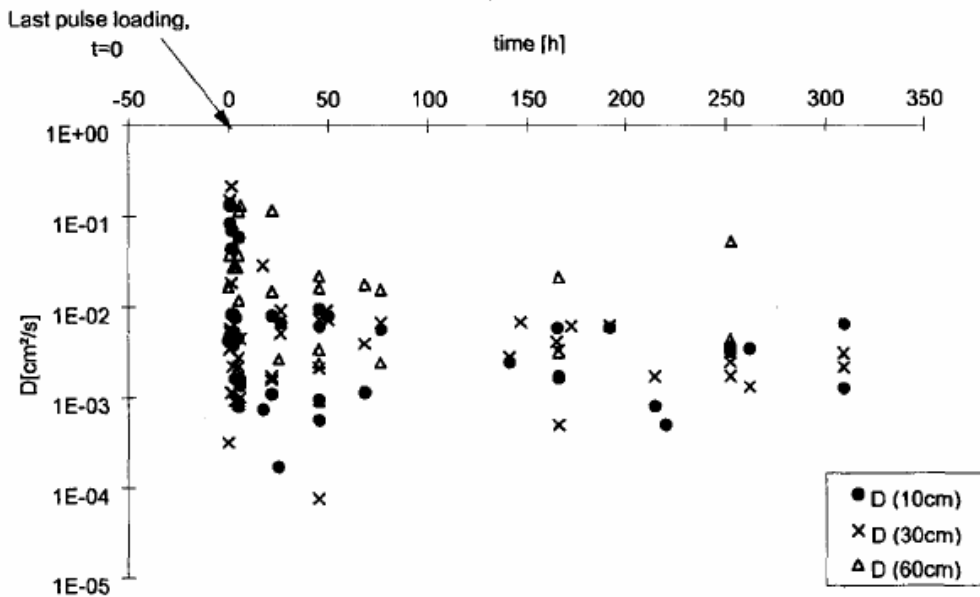
OI_D = συγκέντρωση οξυγόνου g / d

J = flux οξυγόνου με βάση τον πρώτο νόμο του Fick

A = η επιφάνεια του υγροβιότοπου m²

t = χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών τροφοδοσιών h

n = ο αριθμός των τροφοδοσιών



Σχήμα 3.2.1 – Συντελεστής διάχυσης συναρτήσει του χρόνου μετά την τελευταία φόρτιση σε διάφορα βάθη

Για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης χρησιμοποιείται το διάγραμμα 3.2.1 (Liessen [18]) όπου στον άξονα x είναι ο χρόνος σε ώρες μεταξύ δύο διαδοχικών τροφοδοτήσεων του συστήματος και στον άξονα y ο συντελεστή διάχυσης σε cm^2 / sec για διάφορα βάθη

- Λόγω συμμεταφοράς

Η μεταφορά οξυγόνου λόγω συμμεταφοράς οφείλεται στο υδραυλικό φορτίο εφαρμογής. Για μικρούς χρόνους εφαρμογής ο αέρας που εισέρχεται στο σύστημα είναι ίσος με τον όγκο του αποβλήτου που βγαίνει από αυτό. Ο αέρας περιέχει $300 \text{ mg O}_2 / \text{l}$ οπότε

$$OI_C = 0.3 \times V \times 1000$$

OI_C = συγκέντρωση οξυγόνου λόγω συμμεταφοράς g / d

V = όγκος λύματος ανά τροφοδοσία m^3 / d

Άρα η συνολική συγκέντρωση του οξυγόνου που εισέρχεται στο σύστημα είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους.

Η μέχρι τώρα εμπειρία από τα συστήματα αυτά έχει δείξει ότι ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου είναι τουλάχιστον $28 \text{ g O}_2 / m^2 \cdot d$ [4]

3.4 Παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας

Ο σχεδιασμός των τεχνητών υγροβιοτόπων κάθετης ροής περιλαμβάνει την επιλογή προεπεξεργασίας, τη διαστρωμάτωση τους, τον τρόπο τροφοδοσίας και τους ρυθμούς φόρτισης και την έκταση της επιφάνειας. Οι παράμετροι αυτοί βασίζονται κυρίως στην εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τη λειτουργία τέτοιων συστημάτων καθώς το 80 % των τεχνητών υγροβιοτόπων στη Γαλλία περιλαμβάνουν ένα στάδιο κάθετης ροής [17].

Το είδος προεπεξεργασίας που απαιτείται είναι η χρήση εσχάρων συνήθως με 2 cm διάκενο των ράβδων ή αν η τροφοδοσία γίνεται από δίκτυο ομβρίων και ακαθάρτων τότε χρησιμοποιούνται διπλές εσχάρες με διάκενο ράβδων 4 και κατόπιν 2 cm [17].

Οι τεχνητοί υγροβιοτόποι κάθετης ροής αποτελούνται από δύο στάδια. Και τα δύο αποτελούνται από τρία στρώματα με διαφορετικό υλικό ως προς το μέγεθος [16].

Έτσι, στο πρώτο στάδιο, από την κορυφή προς το πυθμένα :

- > 30 cm πάχος με λεπτόκοκκο χαλίκι (2 – 8 mm)
- Μεταβατικό στρώμα πάχους 10 – 20 cm με χαλίκι 5 – 20 mm
- Στρώμα αποστράγγισης πάχους 10 – 20 cm με χαλίκι 20 – 40 mm

Η διαστρωμάτωση για το δεύτερο στάδιο είναι :

- > 30 cm πάχος με άμμο ($0.25 \text{ mm} < d_{10} < 0.40 \text{ mm}$)
- Μεταβατικό στρώμα πάχους 10 – 20 cm με χαλίκι 3 – 10 mm

- Στρώμα αποστράγγισης πάχους 10 – 20 cm με χαλίκι 20 – 40 mm

Παρατηρούμε ότι τα δύο στάδια διαφέρουν μεταξύ τους και κυρίως διαφέρουν ως προς το υλικό του επιφανειακού τους στρώματος. Αυτό πρέπει να συμβαίνει γιατί στο πρώτο στάδιο εισέρχεται ακατέργαστο λύμα και πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος να φράξουν οι πόροι.

Για τον ίδιο λόγο και για να υπάρχει έλεγχος της βιομάζας που αναπτύσσεται πρέπει στο πρώτο στάδιο να διασφαλιστεί η ύπαρξη αερόβιων συνθηκών.

Το κλειδί για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η τροφοδοσία. Αυτή διαρκεί συνήθως 3 με 4 ημέρες [17] και ακολουθεί μια περίοδος διπλάσια σε χρονική διάρκεια που δεν γίνεται τροφοδοσία. Με αυτό τον τρόπο ελέγχεται η ανάπτυξη της βιομάζας στο υπόστρωμα, ενισχύεται ο αερισμός και ενισχύεται η βιοδιάσπαση των οργανικών στερεών που παραμένουν στην επιφάνεια του πρώτου σταδίου.

Επίσης κατά την περίοδο που γίνεται η τροφοδοσία αυτή γίνεται ασυνεχώς έτσι ώστε εκτός από την ενίσχυση των αερόβιων συνθηκών να διασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή του λύματος και των στερεών που αυτό περιέχει σε ολόκληρη την επιφάνεια. Γενικά τα συστήματα κάθετης φόρτισης είναι επιθυμητό να έχουν υδραυλικό ρυθμό φόρτισης $0.5 - 0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ [17].

Για την έκταση την οποία θα καταλαμβάνουν τα δυο στάδια έχουν επίσης αναπτυχθεί κάποια εμπειρικά μοντέλα υπολογισμού [4] :

- Οι Grant και Griggs για ισοδύναμο πληθυσμό σχεδιασμού μέχρι 100 p.e προτείνουν ότι η επιφάνεια για το πρώτο στάδιο δίνεται από τον τύπο :

$$A_1 = 5.25 \cdot P^{0.35} + 0.9 \cdot P$$

και η επιφάνεια του δεύτερου :

$A_2 = 0.50 \cdot A_1$ αν χρησιμοποιείται και σηπτική δεξαμενή ως πορεπεξεργασία

$A_2 = 0.6 \cdot A_1$ αν δεν υπάρχει σηπτική δεξαμενή.

- Οι Boutin και Lienard προτείνουν το εξής :

Για τροφοδοσία του συστήματος από δίκτυο ακαθάρτων τότε το πρώτο στάδιο

έχει επιφάνεια $1.2 \text{ m}^2/\text{p.e}$ και το δεύτερο $0.8 \text{ m}^2/\text{p.e}$.

Για μεικτά δίκτυα ακαθάρτων και ομβρίων το πρώτο στάδιο έχει επιφάνεια $1.5 \text{ m}^2/\text{p.e}$ και το δεύτερο $1.0 \text{ m}^2/\text{p.e}$.

- Επίσης ο υπολογισμός της συνολικά απαιτούμενης επιφάνειας μπορεί να γίνει από τον υπολογισμό της ανάγκης για οξυγόνο [18]. Αν OD είναι η ανάγκη για οξυγόνο, TON (Total oxidized nitrogen) και η απομάκρυνση του COD τότε :

$$OD = n \times 0.7 \times COD + 4.3 \times TKN - 2.9 \times TON_{denitrified} \quad g/d$$

πρέπει να ισχύει ότι το οξυγόνο λόγω διάχυσης και λόγω συμμεταφοράς είναι μεγαλύτερο από την ανάγκη για οξυγόνο. Από τις σχέσεις με τις οποίες υπολογίζονται η εισροή του οξυγόνου

$$OI_D = J \times A \times (24 - t \times n) \quad \text{λόγω διάχυσης}$$

$$OI_C = 0.3 \text{ g } O_2 / l \times V \times 1000 \quad \text{λόγω συμμεταφοράς}$$

μπορούμε να υπολογίζουμε την συνολική επιφάνεια χωρίς όμως να λαμβάνουμε υπόψη ότι το οργανικό φορτίο μπορεί να βιοαποδομηθεί και με ανοξικές ή αναερόβιες συνθήκες.

- Επίσης υπολογισμός των παραμέτρων μπορεί να γίνει και με τα εξής κριτήρια : $COD < 120 \text{ gr/P.E}$, $SS < 60 \text{ gr/P.E}$, $TKN < 10 - 12 \text{ gr/P.E}$ για όγκο λυμάτων 150 L/P.E [17].

3.5 Φαινόμενα φραξίματος των πόρων

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά φαινόμενα που συναντάμε στους τεχνητούς υδροβιοτόπους κάθετης ροής είναι το φράξιμο των πόρων του υποστρώματος. Το φαινόμενο αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δεν εμφανίζεται σε όλα τα συστήματα στο ίδιο χρονικό διάστημα. Αυτοί είναι ο ρυθμός φόρτισης του αποβλήτου, η συγκέντρωση σε στερεά, το είδος του υποστρώματος, η πυκνότητα της βλάστησης και η θερμοκρασία [2]. Αν το φαινόμενο συμβαίνει στην επιφάνεια και σε μικρό βαθμό, για παράδειγμα δημιουργείται λιμνάζων λύμα λίγων

χιλιοστών, τότε δεν υπάρχει πρόβλημα καθώς έτσι το λύμα κατανέμεται σε όλη την επιφάνεια. Τα σοβαρά προβλήματα δημιουργούνται όταν το φαινόμενο πάρει μεγάλη έκταση κυρίως στα κατώτερα στρώματα του υποστρώματος καθώς τότε υπάρχει περίπτωση να βραχυκυκλώνει η ροή του αποβλήτου στην κλίνη και να εξέρχεται πιο γρήγορα. Είναι επίσης δυνατόν να ευνοείται η επικράτηση ανοξικών ή αναερόβιων συνθηκών στο σύστημα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην έχει μεγάλη απόδοση τόσο η αμμωνιοποίηση όσο και η νιτροποίηση που είναι αυστηρά αερόβιες διεργασίες.

Συγκεκριμένα το φράξιμο κατηγοριοποιείται στις εξής τρεις καταστάσεις [29]:

- Καθόλου φράξιμο : ≤ 30 % του λύματος παραμένει στην επιφάνεια μεταξύ του χρονικού διαστήματος δυο δόσεων
- Μερικό φράξιμο : $30 - 80$ % του λύματος παραμένει στην επιφάνεια μεταξύ του χρονικού διαστήματος δυο δόσεων
- Πλήρες φράξιμο : ≥ 80 % του λύματος παραμένει στην επιφάνεια μεταξύ του χρονικού διαστήματος δυο δόσεων

Το φράξιμο των πόρων στην επιφάνεια κυρίως τον προκαλούν τα ανόργανα σωματίδια ανάλογα με το υδραυλικό φορτίο φόρτισης του συστήματος και τη συγκέντρωσή τους σε αυτό. Αντίθετα το φράξιμο των πόρων προκαλείται από την ανάπτυξη της βιομάζας που εξαρτάται με τη σειρά της από την περιεκτικότητα του λύματος σε οργανικά στερεά το χρόνο επαφής και τη θερμοκρασία αλλά και με τον χρόνο για τον οποίο το σύστημα αφήνεται χωρίς τροφοδοσία. Ένας δεύτερος παράγοντας είναι οι ρίζες που αναπτύσσονται σε βάθος αλλά αυτό είναι ένα φαινόμενο εποχικό και ουσιαστικά είναι ένας κύκλος ζωής και θανάτου των ριζών. Τέλος η χημική κατακρήμνιση ανθρακικών είναι παράγοντας που συνεισφέρει στο φαινόμενο.

4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η κατασκευή και η λειτουργία ενός τεχνητού υγροβιοτόπου για την επεξεργασία ισχυρού αστικού λύματος χωρίς να έχει υποστεί οποιοδήποτε είδος προεπεξεργασίας.

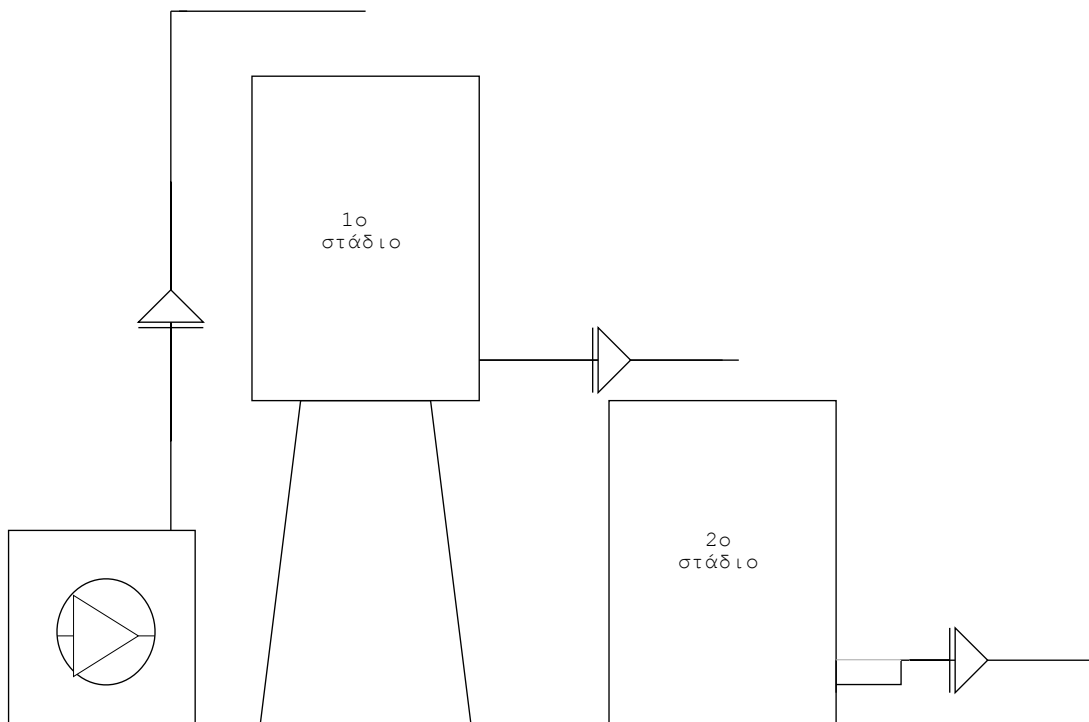
Στόχος της εργασίας είναι ανάδειξη των τεχνητών υγροβιοτόπων ως ένα αποτελεσματικό και ταυτόχρονα χαμηλού κόστους, σύστημα για την επεξεργασία λυμάτων σε μη αστικές περιοχές.

Η πιλοτική μονάδα στήθηκε στο χώρο του εργαστηρίου `Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος`. Για την κατασκευή της μονάδας χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά : 4 πλαστικά βαρέλια, χαλίκι και άμμος, φυτά του γένους *Phragmites*, μια πλαστική δεξαμενή , μια υποβρύχια αντλία λυμάτων και υδραυλικός εξοπλισμός όπως βάνες, σύνδεσμοι σχήματος T και Γ και σωληνώσεις διάφορων διαμέτρων.

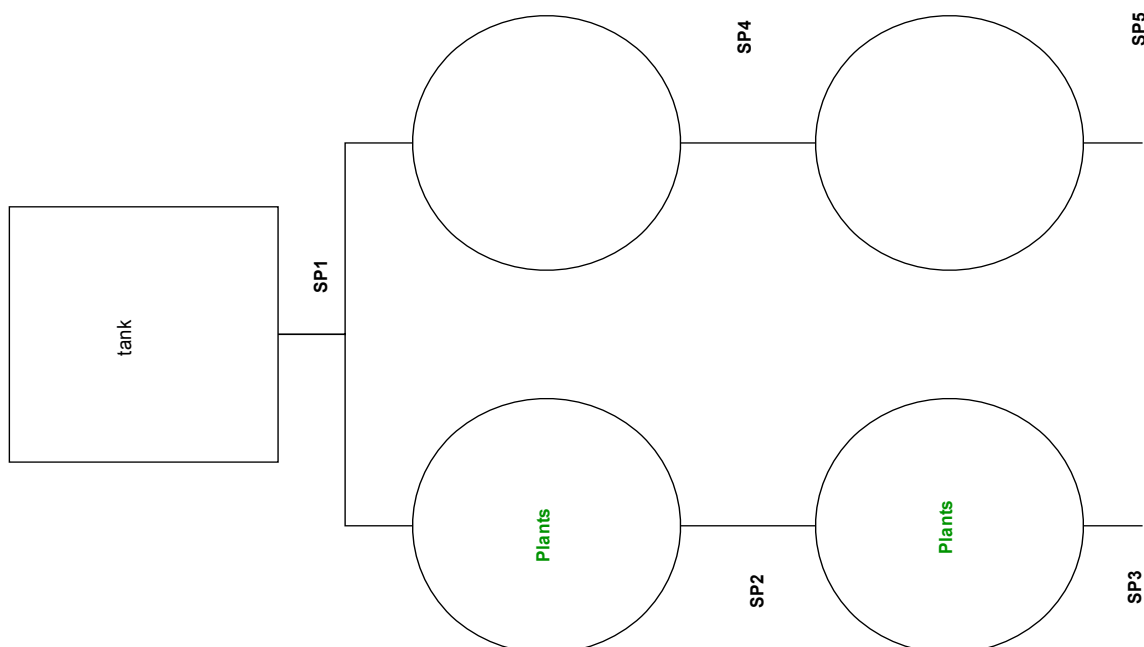
4.2 Πειραματική διάταξη του τεχνητού υγροβιοτόπου

Ο τεχνητός υγροβιότοπος αποτελείται από δυο παράλληλες γραμμές. Η μια έχει φυτευτεί ενώ η άλλη όχι. Κάθε γραμμή αποτελείται από δύο στάδια. Το λύμα είναι σε μία δεξαμενή και με χρήση υποβρύχιας αντλίας λυμάτων γινόταν η τροφοδοσία της μονάδας και στις δύο γραμμές ταυτόχρονα.

Στα σχήματα 4.1.1 και 4.1.2 απεικονίζεται ο τεχνητός υγροβιότοπος σε πλάγια τομή και κάτοψη.



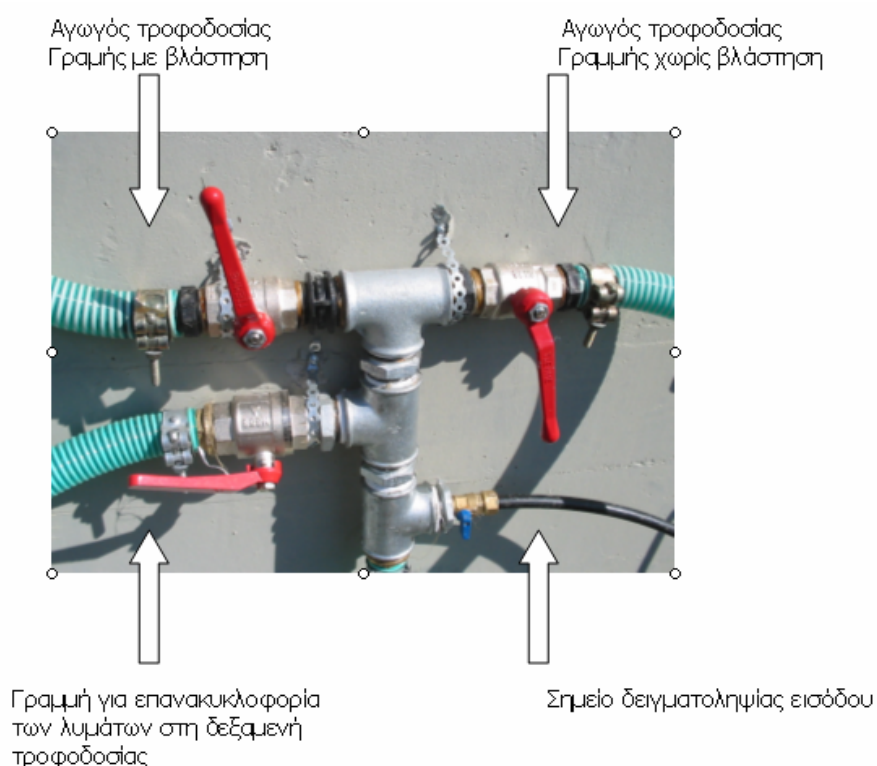
Σχήμα 4.2.1 – Διάγραμμα ροής της πιλοτικής μονάδας. Πλάγια τομή



Σχήμα 4.2.2 – Διάγραμμα ροής της πιλοτικής μονάδας. Κάτοψη

Τα δύο στάδια μεταξύ τους έχουν υψομετρική διαφορά 80 εκατοστών. Τα τέσσερα πλαστικά βαρέλια επιλέχθηκαν με κριτήριο το ύψος που αρχικά ήταν 1 μέτρο καθώς από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι τα καλάμια του είδους *Phragmites* μπορούν να αναπτύξουν τις ρίζες τους σε βάθος μεγαλύτερο των 60 εκατοστών [24]. Τα βαρέλια κόπηκαν από το άνω μέρος ώστε το ύψος τους να είναι 80 εκατοστά και να είναι ανοιχτό· η διάμετρος τους είναι 55 εκατοστά. Επειδή η αρχική χρήση των βαρελιών ήταν για μεταφορά οργανικού διαλύτη και περιείχαν υπολείμματα από αυτή την ουσία πριν γίνει οτιδήποτε πλύθηκαν με απορρυπαντικό.

Οι αγωγοί για την τροφοδοσία στο πρώτο στάδιο είναι διαφανείς σπιράλ διαμέτρου 1 $\frac{3}{4}$ in. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το σύστημα κατανομής του λύματος στις δύο γραμμές.



Σχήμα 4.2.3 – Σύστημα κατανομής της ροής

Τα αποστραγγιστικά σύστημα είναι το ίδιο για όλα τα στάδια. Αποτελείται από τέσσερις παράλληλους σωλήνες από πλαστικό HDPE \varnothing 32 mm. Στο άνω ημικύκλιο

ανοίχτηκαν τρύπες διαμέτρου 5 mm σε τρεις σειρές, στον κάθε ένα (Εικόνα 4.1.4).



Εικόνα 4.2.1 – Σύστημα αποστράγγισης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.4 το σύστημα αποστράγγισης δεν εφάπτεται με τον πυθμένα και επίσης δεν καλύπτει όλη την επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό στον πυθμένα κάτω από το αποστραγγιστικό σύστημα τοποθετήθηκε ένα στρώμα χαλαζιακής άμμου. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της μονάδας είναι η υπερυψωμένη έξοδος και στις δυο γραμμές σε σχέση με το επίπεδο που βρίσκεται το σύστημα αποστράγγισης. Αυτό έγινε ώστε να γίνει επεξεργασία του λύματος και κάτω από ανοξικές συνθήκες που ευνοούν την απονιτροποίηση. Το ανώτερο σημείο απέχει από τον πυθμένα του βαρελιού 15 εκατοστά αλλά αν συνυπολογίσουμε ότι η αποστράγγιση γίνεται από απόσταση 5 εκατοστών από τον πυθμένα τότε πρακτικά το ύψος λύματος που παραμένει στο τελευταίο στάδιο είναι 10 εκατοστά (Εικόνα 4.1.2)



Εικόνα 4.2.2 – Διάταξη εξόδου του επεξεργασμένου λύματος από την πιλοτική μονάδα

4.3 Πληρωτικά υλικά

Ως πληρωτικό υλικό επιλέχτηκαν δύο διαφορετικά υλικά. Χαλίκι και χαλαζιακή άμμος. Η διαστρωμάτωση του πληρωτικού υλικού στις δεξαμενές είναι ίδια για τις δύο γραμμές. Η διαστρωμάτωση μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου σταδίου κάθε γραμμής διαφέρει.

Το χαλίκι που χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα αγοράστηκε από μάντρα υλικών για οικοδομές. Ήταν σε δύο διαφορετικά μεγέθη : $< 1 \text{ cm}$ και $> 1 \text{ cm}$. Με συρμάτινο πλέγμα για περίφραξη το οποίο είχε τρύπες μεγέθους 1.5 cm το χαλίκι με μέγεθος $> 1 \text{ cm}$ χωρίστηκε σε δύο μεγέθη : $1 - 1.5 \text{ cm}$ και $> 1.5 \text{ cm}$. Ο λόγος για την επιλογή του συγκεκριμένου υλικού ήταν η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο προσδίδει μεγάλη προσροφητική ικανότητα σε φωσφορικά. Αφού έγινε ο διαχωρισμός του χαλικιού πλύθηκε έτσι ώστε η σκόνη που είχε να μην δημιουργούσε ένα μεγάλο σε πάχος στρώμα λάσπης στον πυθμένα των βαρελιών το οποίο θα μπορούσε να εμποδίσει την έξοδο του λύματος όταν θα ξεκινούσε το πείραμα.

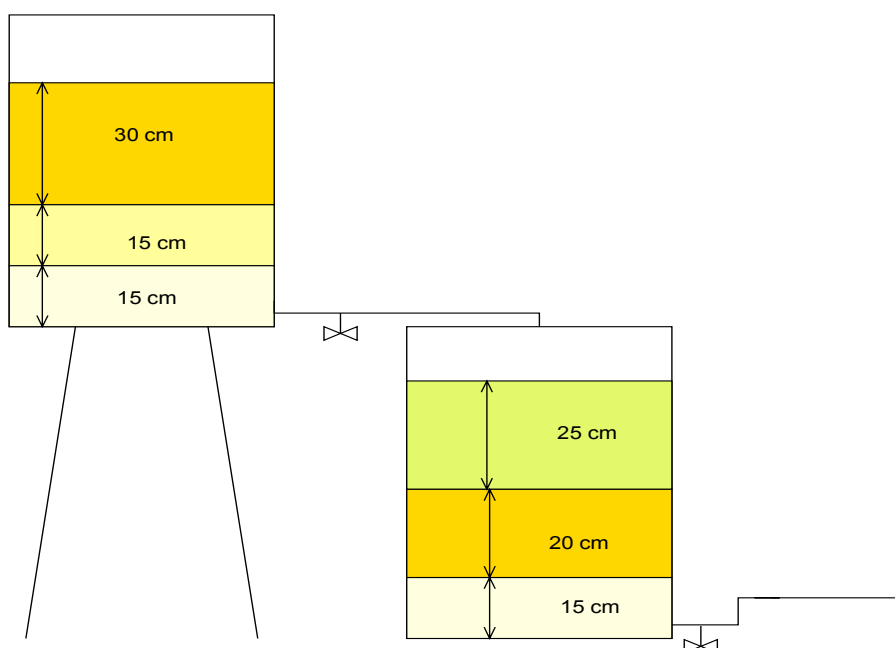
Στο πρώτο στάδιο τα βαρέλια έχουν μόνο χαλίκι, σε αντίθεση με το δεύτερο στάδιο όπου το πρώτο στρώμα αποτελείται από χαλαζιακή άμμο. Αυτό συμβαίνει γιατί τα πρώτα στάδια και των δύο γραμμών δέχονται ακατέργαστο λύμα. Το πάχος κάθε στρώματος και το υλικό είναι το ίδιο για το αντίστοιχο στάδιο κάθε γραμμής. Από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, και στα δύο στάδια, μεγαλώνει η διάμετρος των υλικών, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλή φίλτραση από τα στερεά και να διευκολύνεται η διέλευσή του προς το αποστραγγιστικό σύστημα. Για το πρώτο στάδιο κάθε γραμμής, από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, η διάταξη του υποστρώματος είναι :

- 30 cm χαλίκι διάμετρος $< 1 \text{ cm}$
- 15 cm χαλίκι διάμετρος $1 - 1.5 \text{ cm}$
- 15 cm χαλίκι διάμετρος $1.5 - 3 \text{ cm}$

Στο δεύτερο στάδιο η διάταξη του υποστρώματος έχει διαμορφωθεί ως εξής :

- 25 cm χαλαζιακή άμμος 3 – 5 mm
- 20 cm χαλίκι διάμετρος < 1 cm
- 15 cm χαλίκι διάμετρος 1.5 – 3 cm

Στο σχήμα 4.3.1 παρουσιάζεται η διαστρωμάτωση σε πλάγια τομή



Σχήμα 4.3.1 – Διαστρωμάτωση του πληρωτικού υλικού στις δεξαμενές

4.4 Βλάστηση

Το είδος της βλάστησης που επιλέχθηκε ήταν το καλάμι (*Phragmites Australis*). Τα χαρακτηριστικά αυτού του είδους είναι η ανάπτυξη των ριζών σε μεγάλο βάθος > 60 cm [27], η μεγάλη αντοχή σε αναερόβιες συνθήκες και η μέτρια αντοχή στο ανθρακικό ασβέστιο [24]. Τα καλάμια αφού κόπηκαν ώστε να έχουν ύψος 15 εκατοστά περίπου και από το κοκκινόχωμα που βρίσκονταν μεταφυτεύτηκαν σε κοινό χώμα εμπορίου για φυτά τοποθετημένα το καθένα σε

δική του πλαστική σακούλα και παρέμειναν εντός του εργαστηρίου έως ότου να μεταφερθούν στον τεχνητό υδροβιότοπο. Τα καλάμια παρέμειναν στο εργαστήριο για 3 εβδομάδες περίπου χωρίς σε αυτό το διάστημα να τους δοθεί νερό, όμως 8 από αυτά ανέπτυξαν νέα καλάμια και νέες ρίζες (Εικόνα 4.4.1 και 4.4.2).



Εικόνα 4.4.2 – Ανάπτυξη νέων ριζών

Εικόνα 4.4.1 – Ανάπτυξη νέων καλάμιών

Αφού φυτεύτηκαν στον τεχνητό υδροβιότοπο μεσολάβησε μια περίοδος 25 ημερών όπου γινόταν τροφοδοσία του συστήματος με νερό στο οποίο είχε προστεθεί λίπασμα. Αυτό γινόταν γιατί έπρεπε να αναπτυχθούν οι ρίζες όσο το δυνατό περισσότερο πριν την κανονική λειτουργία του συστήματος. στην εικόνα 4.4.3 φαίνεται ο υδροβιότοπος μετά την φύτευση.

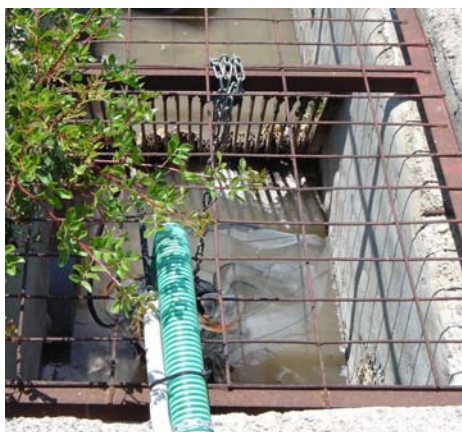


Εικόνα 4.4.3 – Η μονάδα μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής

4.5 Λειτουργία της μονάδας

Η τροφοδοσία της μονάδας γινόταν με λύμα από την είσοδο της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων του πολυτεχνείου στις 07:30 και στις 08:00 (εικόνα 4.5.1)

.



Εικόνα 4.5.1 – Φρεάτιο δειγματοληψίας

Ο όγκος του λύματος κάθε φορά ήταν 70 λίτρα. Η περίοδος τροφοδοσία ήταν μια μέρα κι η περίοδος ξεκούρασης του συστήματος ήταν δύο μέρες. Την ημέρα τροφοδοσίας αυτή γινόταν ασυνεχώς, σε 5 δόσεις. Η παροχή σε κάθε δόση ήταν 0.7 L/min για 10 λεπτά για κάθε γραμμή. Το διάστημα μεταξύ κάθε δόσης ήταν 140 λεπτά. Η έναρξη γινόταν στις 09:30. Η ημερήσια παροχή σε κάθε γραμμή ήταν 35 L/d και αντιστοιχεί σε HLR 146 mm/d.

Δειγματοληψία γινόταν σε 5 σημεία :

- 1 στην είσοδο SP1
- 2 ενδιάμεσα, ένα σε κάθε γραμμή: SP2 (βλάστηση), SP4 (χωρίς βλάστηση)
- 2 στην έξοδο, ένα σε κάθε γραμμή: SP3 (βλάστηση), SP5 (χωρίς βλάστηση)

Η έναρξη της λειτουργίας της μονάδας ήταν στις 11 Απριλίου 2005 και η τελευταία τροφοδοσία έγινε στις 23 Ιουνίου 2005.

4.6 Αναλυτικές μέθοδοι

Οι παράμετροι που προσδιορίζονταν σε κάθε δείγμα ήταν :

- COD
- BOD₅
- NH₄ – N
- TN
- TOC
- SS
- Ανιόντα (PO₄³⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻)

- **COD**

Χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρίας Merck

1. 1.14540.0001 για COD 10 – 150 ppm
2. 1.14541.0001 για COD 25 – 1500 ppm

Χώνευση του αντιδραστηρίου με 3 ml αδιήθητου δείγματος για 2 ώρες στους 148 °C και μέτρηση στο φασφατοφωτόμετρο στα 593 nm για τα αντιδραστήρια με εύρος 25 – 1500 ppm και 445 nm για τα αντιδραστήρια με εύρος 10 – 150 ppm.

- **BOD₅**

Ο προσδιορισμός έγινε μανομετρικά με μετρητές πτώσεις πιέσεις των εταιριών OXITOP και AQUALYTIC. Σε μπουκάλια σκούρου καφέ χρώματος τοποθετείται η κατάλληλη ποσότητα δείγματος, ένα μαγνήτης ανάδευσης, αναστολέας νιτροποίησης και NaOH . Τα μπουκάλια τοποθετούνται σε ειδικό χώρο με σταθερή θερμοκρασία στους 20 °C όπου γίνεται ανάδευση για 5 μέρες. Τα πώματα των μπουκαλιών είναι και οι μετρητές της πτώσης πίεσης. Το αριθμητικό αποτέλεσμα που δίνουν πολλαπλασιάζεται με ένα ειδικό συντελεστή. Ο συντελεστής δίνεται από την εταιρία ανάλογα με τον όγκο δείγματος. Το γινόμενο αυτό δίνει την

συγκέντρωση του BOD₅.

OXITOP			AQUALYTIC		
Εύρος ppm	Όγκος ml	Συντελεστής	Εύρος ppm	Όγκος ml	Συντελεστής
0 – 200	250	5	0 – 200	244	5
0 – 400	164	10	0 – 400	157	10
0 – 800	97	20	0 – 800	94	20
0 - 2000	43.5	50	0 - 2000	56	40

Πίνακας 4.5.1 – Αντιστοίχιση εύρους BOD₅, όγκου δείγματος και συντελεστή για κάθε εταιρία

- **NH₄ – N**

Χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρίας Merck

1. 1.00683.0001 για εύρος τιμών 2 – 75 ppm
2. 1.14752.0001 για εύρος τιμών 0.05 – 3 ppm

Για δείγματα με εύρος από 2 – 75 ppm απαιτούνται 0.2 ml δείγματος και για εύρος από 0.05 – 3 ppm 5 ml δείγματος. Επίσης ετοιμάζονται και τα αντίστοιχα τυφλά δείγματα. Η μέτρηση γίνεται στο φασφατοφωτόμετρο στα 712 nm και στα 692 nm αντίστοιχα.

- **TN**

Χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρίας Merck

1. 1.14763.0001 για εύρος τιμών από 10 – 150 ppm

για κάθε μέτρηση απαιτούνται 1 ml δείγματος και 9 ml απιονισμένου νερού.

Μετά ακολουθεί χώνευση για 1 ώρα στους 120 °C. Ο προσδιορισμός γίνεται με φασφατοφωτόμετρο στα 338 nm.

- **TOC**

Προσθήκη 1% κ.ο HCl 2N σε κάθε δείγμα και μέτρηση με στο όργανο προσδιορισμού TOC (SHIMADZU TOC ANALYZER)

- **Ανιόντα**

Ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων των ιόντων έγινε με χρήση ιοντικής χρωματογραφίας (DIONEX CHROMATOGRAPHY). Η μέθοδος ανήκει στην υγρή χρωματογραφία. Το φέρον μέσο είναι διάλυμα ανθρακικού νατρίου 0.5 M. ο προσδιορισμός βασίζεται στην μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μετατροπής της σε συγκέντρωση από το λογισμικό που συνοδεύει το όργανο.

Το όργανο στην οθόνη εμφανίζει κορυφές, οι οποίες εμφανίζονται σε διαφορετικό χρόνο ανάλογα με το ανιόν.

Ο όγκος δείγματος είναι 25μl και το δείγμα πρώτα έχει διηθηθεί από φίλτρα με πόρους 0.45 και 0.2 μm.

- **Αιωρούμενα στερεά**

Ο προσδιορισμός γίνεται με διήθηση υπό κενό συγκεκριμένου όγκου σε φίλτρα που έχουν ζυγιστεί πριν την διαδικασία. Μετά τα φίλτρα τοποθετούνται στο φούρνο για ξήρανση στους 105 °C. Ακολουθεί νέα ζύγιση του φίλτρου και από τη διάφορα του βάρους και με την διαίρεσή της με τον όγκο του δείγματος υπολογίζεται η συγκέντρωση. Στο δείγμα της εισόδου ο όγκος δείγματος ήταν 25 ml στα δείγματα από ενδιάμεσα σημεία 100 ml και στα δείγματα από τις εξόδους 200 ml.

4.6.1 Πειράματα προσρόφησης

Σε αυτό το διάστημα έγινε πείραμα προσρόφησης του υποστρώματος για να

προσδιορισθεί η ικανότητα του στην προσρόφηση των φωσφορικών αφού είναι και ο κυριότερος μηχανισμός απομάκρυνσής τους. Συγκεκριμένα το πείραμα αφορούσε τα εξής υλικά : τη χαλαζιακή άμμο και το χαλίκι με μέγεθος < 1 cm. Η διαδικασία ήταν : Παρασκευή διαλύματος φωσφορικών συγκέντρωσης 30 ppm χρησιμοποιώντας στερεό K_2HPO_4 σε 1 λίτρο απιονισμένου νερού. Σε κωνικές φιάλες οποίες περιείχαν 200 ml από το παραπάνω διάλυμα βάλαμε διάφορες ποσότητες από το κάθε υλικό και στη συνέχεια αφέθηκαν στον αναδευτήρα για δυο μέρες στις 200 rpm. Μετά το διάστημα των δύο ημερών το περιεχόμενο κάθε φιάλης διηθήθηκε και έγινε προσδιορισμός της συγκέντρωσης των φωσφορικών στο κάθε διήθημα. Ο προσδιορισμός έγινε με χρήση ιοντικής χρωματογραφίας.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Προσρόφιση φωσφορικών στο υπόστρωμα

- Χαλαζιακή άμμος

Παρατηρώντας τον πίνακα 5.1.1 γίνεται κατανοητό ότι η χαλαζιακή άμμος δεν παρουσιάζει προσροφητική ικανότητα. Η πρώτη στήλη δείχνει την αρχική συγκέντρωση, η δεύτερη τη μάζα του προσροφητή και η τρίτη στήλη την τελική συγκέντρωση

Co (ppm)	m (gr/L)	Ce (ppm)
30	2	30.13
30	6	29.91
30	10	28.35
30	14	28.43
30	18	27.30
30	22	30.04

Πίνακας 5.1.1 – Αποτελέσματα προσρόφισης για την χαλαζιακή άμμο

- Χαλίκι

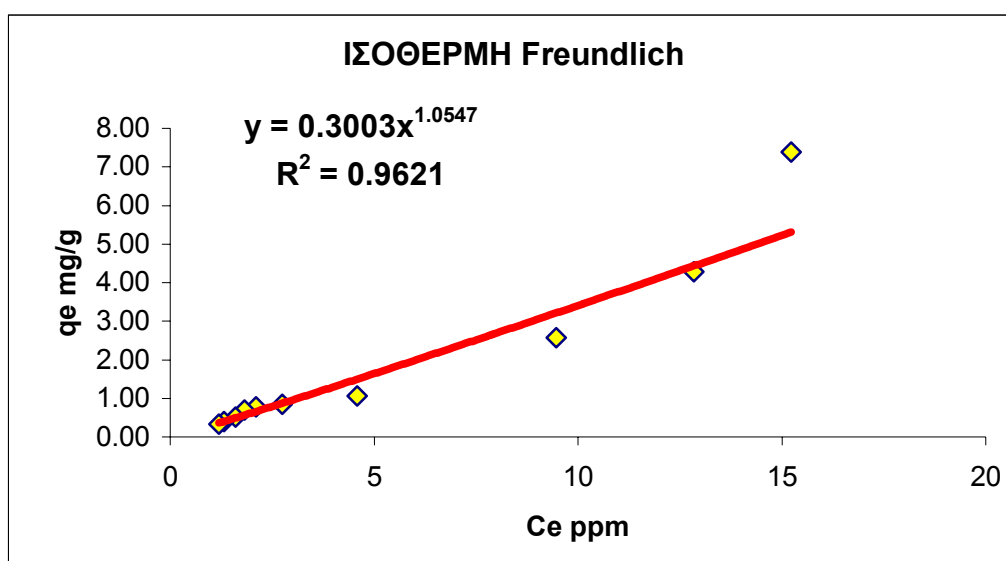
Co (ppm)	m (gr/L)	Ce (ppm)	$q=(Co-Ce)/m$ (mg/g)
30	2	15.23	29.54
30	4	12.84	17.16
30	8	9.47	10.26
30	24	4.59	4.24
30	32	2.75	3.41
30	36	2.1	3.10
30	40	1.83	2.82
30	56	1.61	2.03
30	72	1.32	1.59
30	88	1.19	1.31

Πίνακας 5.1.2 – Αποτελέσματα προσρόφισης φωσφορικών στο χαλίκι

Σε αντίθεση με την χαλαζιακή άμμο το χαλίκι παρουσιάζει προσροφητική ικανότητα. Στο διάγραμμα 5.1.1 παρουσιάζεται η ισόθερμη Freundlich, η οποία περιγράφεται από την σχέση :

$$qe = 0.3 \times Ce^{1.05}$$

Η ισόθερμη είναι οριακά ευνοϊκή καθώς ο εκθέτης της ισόθερμης είναι ελάχιστα μεγαλύτερος από τη μονάδα 1.05. Η τιμή 0.3 είναι παράμετρος που σχετίζεται με την μέγιστη προσροφητική ικανότητα.



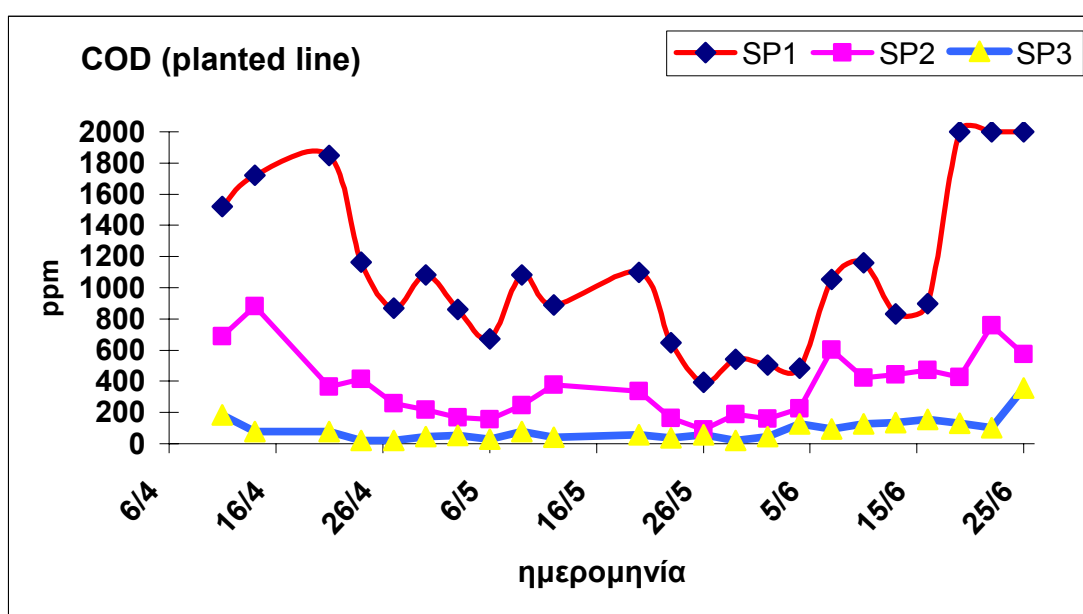
Διάγραμμα 5.1.1 – Ισόθερμη Freundlich για τα φωσφορικά

5.2 Οργανικός άνθρακας

Οι μετρήσεις που αφορούν τον οργανικό άνθρακα είναι : COD, BOD₅, και TOC.

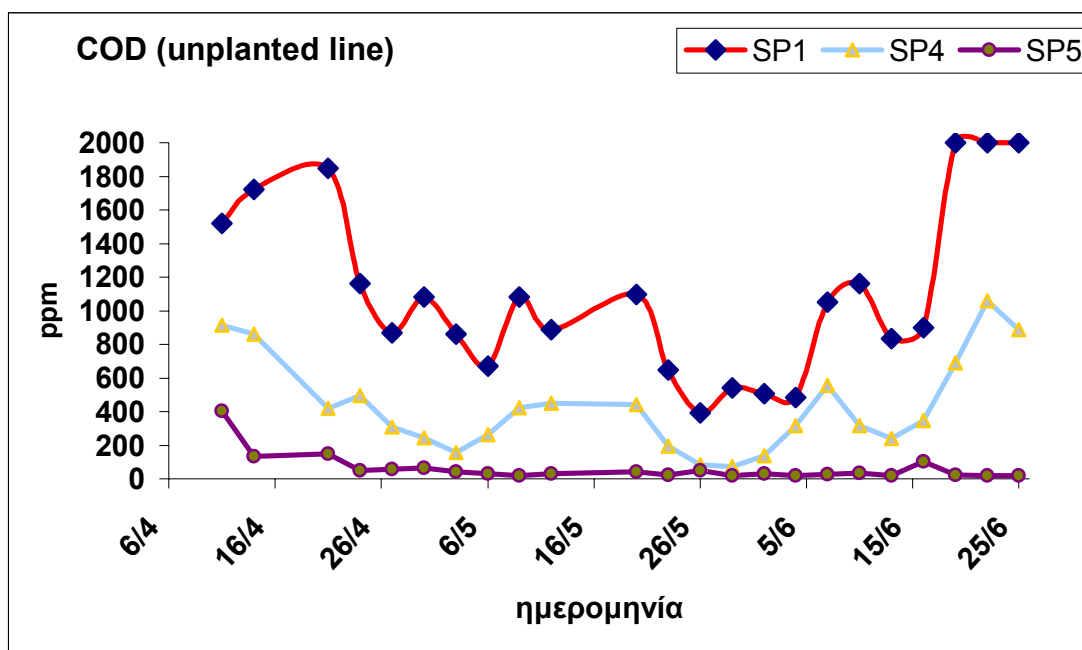
5.2.1 COD

Στο διάγραμμα 5.2.1 παρουσιάζεται η διακύμανση της συγκέντρωσης του COD στη γραμμή με την βλάστηση, στην είσοδο, ενδιάμεσα και στην έξοδο. Η συγκέντρωση στην είσοδο δεν είναι σταθερή αλλά παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Η καμπύλη της συγκέντρωσης στο ενδιάμεσο σημείο έχει τη τάση να ακολουθήσει τη διακύμανση της καμπύλης εισόδου. Αντίθετα, η καμπύλη της συγκέντρωσης στην έξοδο παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση.



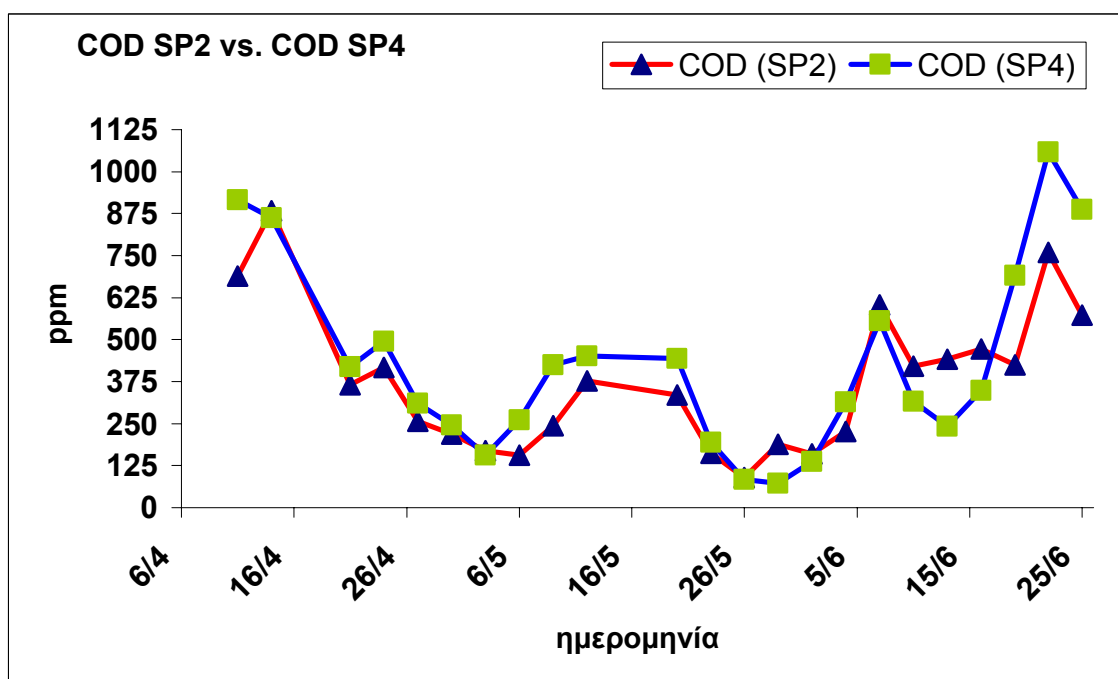
Διάγραμμα 5.2.1.1 - Συγκέντρωση του COD στην είσοδο (SP1) ενδιάμεσα(SP2) και στην έξοδο της γραμμής με βλάστηση (SP3)

Στο διάγραμμα 5.2.1.1 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι συγκεντρώσεις στη γραμμή χωρίς βλάστηση. Στην γραμμή χωρίς βλάστηση η καμπύλη της συγκέντρωσης στο ενδιάμεσο σημείο δεν είναι σταθερή αλλά ακολουθεί σχεδόν τη διακύμανση της καμπύλης για τη συγκέντρωση στην είσοδο. Η καμπύλη για τη συγκέντρωση στην έξοδο είναι σταθερή.

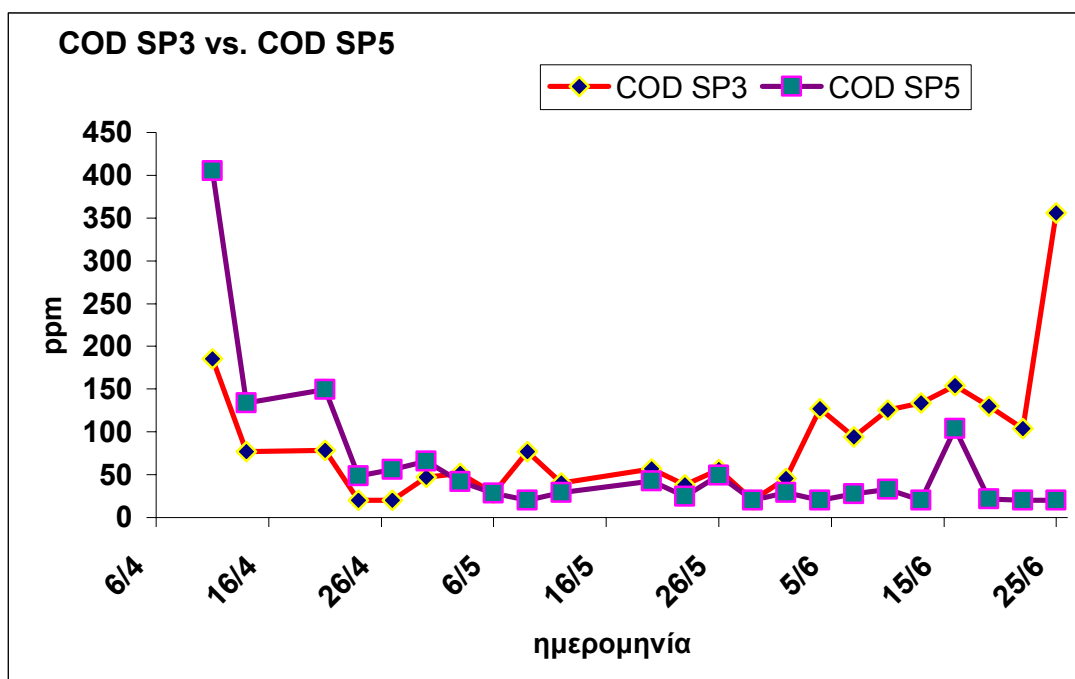


Διάγραμμα 5.2.1.2 - Συγκέντρωση του COD στην είσοδο (SP1) ενδιάμεσα (SP4) και στην έξοδο της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP5)

Στα διαγράμματα 5.2.1.3 και 5.2.1.4 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία των δυο γραμμών και στις εξόδους τους.



Διάγραμμα 5.2.1.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του COD στα ενδιάμεσα σημεία SP2 και SP4 των δύο γραμμών με βλάστηση και χωρίς αντίστοιχα



Διάγραμμα 5.2.1.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του COD στις εξόδους των δύο γραμμών SP3 και SP5 στη γραμμή με βλάστηση και σε αυτή χωρίς αντίστοιχα

Στον πίνακα 5.2.1.1 δίνονται οι % απομακρύνσεις του COD μεταξύ εισόδου – ενδιαμέσου, ενδιαμέσου – εξόδου και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

	SP1 vs. SP2	SP2 vs. SP3	SP1 vs. SP3	SP1 vs. SP4	SP4 vs. SP5	SP1 vs. SP5
Mean	65 %	74 %	91 %	62 %	82 %	94 %
SD	12 %	16 %	6.1%	13 %	14 %	5.4 %
MIN	42 %	37 %	73 %	34 %	41%	73 %
MAX	80 %	95 %	98 %	86 %	98 %	99 %

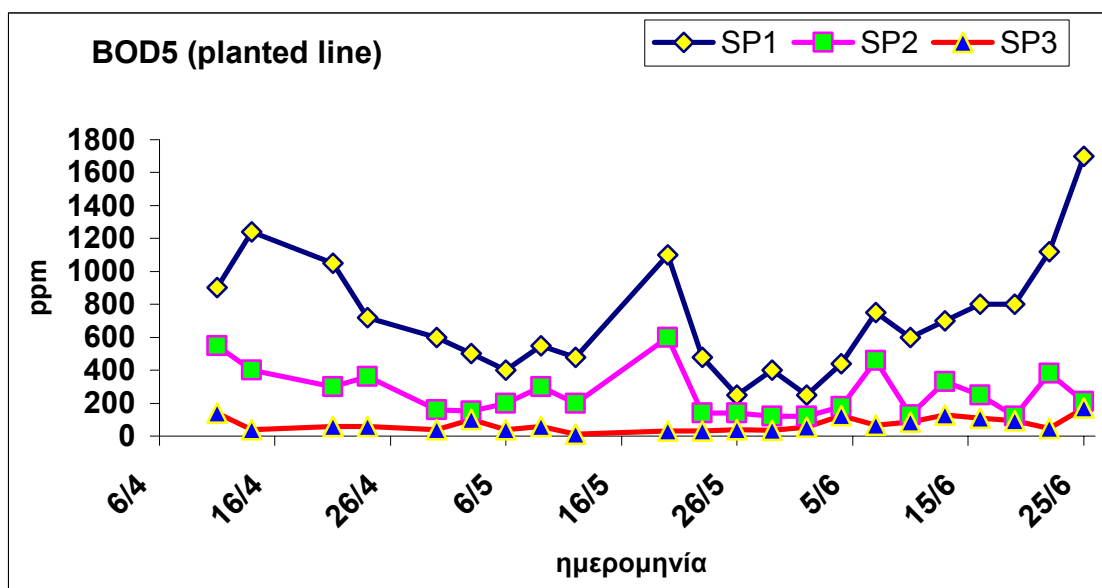
Πίνακας 5.2.1.1 – Ποσοστιαία απομάκρυνση του COD μεταξύ εισόδου – ενδιαμέσου, ενδιαμέσου – εξόδου και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

Το ποσοστό απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου είναι υψηλό και στις δύο Γραμμές. Μετά το δεύτερο στάδιο κάθε γραμμής (έξοδος) είχαμε μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης σε σύγκριση με τη μείωση που γινόταν στο πρώτο στάδιο κάθε γραμμής. Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι στη δεύτερη δεξαμενή ο αγωγός εξόδου ανάγκαζε το λύμα να παραμένει στο σύστημα. Έτσι αυξανόταν ο

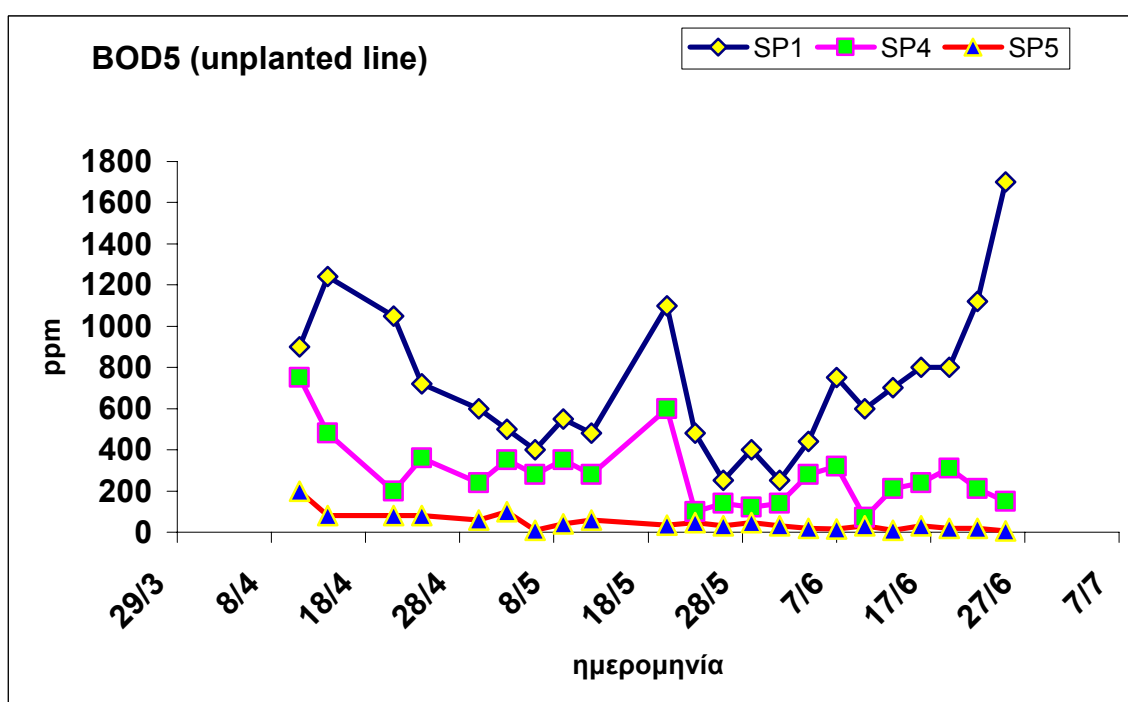
χρόνος παραμονής και δινόταν η ευκαιρία στους χημειοετερότροφους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται σε ανοξικές συνθήκες (απονιτροποιητές) να καταναλώσουν όσον το δυνατό περισσότερο οργανικό φορτίο. Συγκρίνοντας τις δύο γραμμές παρατηρούμε ότι στη γραμμή με βλάστηση έχουμε καλύτερη μείωση στο πρώτο στάδιο, στη γραμμή χωρίς βλάστηση έχουμε μεγαλύτερη απόδοση στο δεύτερο και η μεγαλύτερη συνολική μείωση επιτυγχάνεται στη γραμμή χωρίς βλάστηση. Εντούτοις, η ανάλυση με ANOVA1 έδειξε ότι οι μέσοι όροι των συγκεντρώσεων των δύο γραμμών δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ούτε μετά το πρώτο στάδιο ούτε στην έξοδο. Στην αρχή η γραμμή με τη βλάστηση έχει καλύτερη ή ίδια απόδοση σε σύγκριση με την άλλη γραμμή. Από κάποιο χρονικό σημείο (αρχές Μαΐου) και έπειτα η γραμμή χωρίς βλάστηση είναι αυτή που έχει καλύτερη απόδοση. Η διαφορά αυτή είναι πιθανόν να οφείλεται στη βλάστηση είτε λόγω έκκρισης ουσιών από τις ρίζες που δρουν ανασταλτικά για τους μικροοργανισμούς είτε λόγω θανάτου ριζών και βιοαποδόμησης τους. Μία άλλη πιο πιθανή εξήγηση είναι ότι από τα τέλη Μαΐου στη γραμμή με βλάστηση είχαμε αυξημένη συγκέντρωση στέρεων σε σχέση με την άλλη γραμμή στην έξοδο.

5.2.2 BOD₅

Τα διαγράμματα 5.2.2.1 και 5.2.2.2 δείχνουν τις συγκεντρώσεις του BOD₅ στη γραμμή με βλάστηση και σε αυτή χωρίς, στην είσοδο, ενδιάμεσα και στην έξοδο, αντίστοιχα.

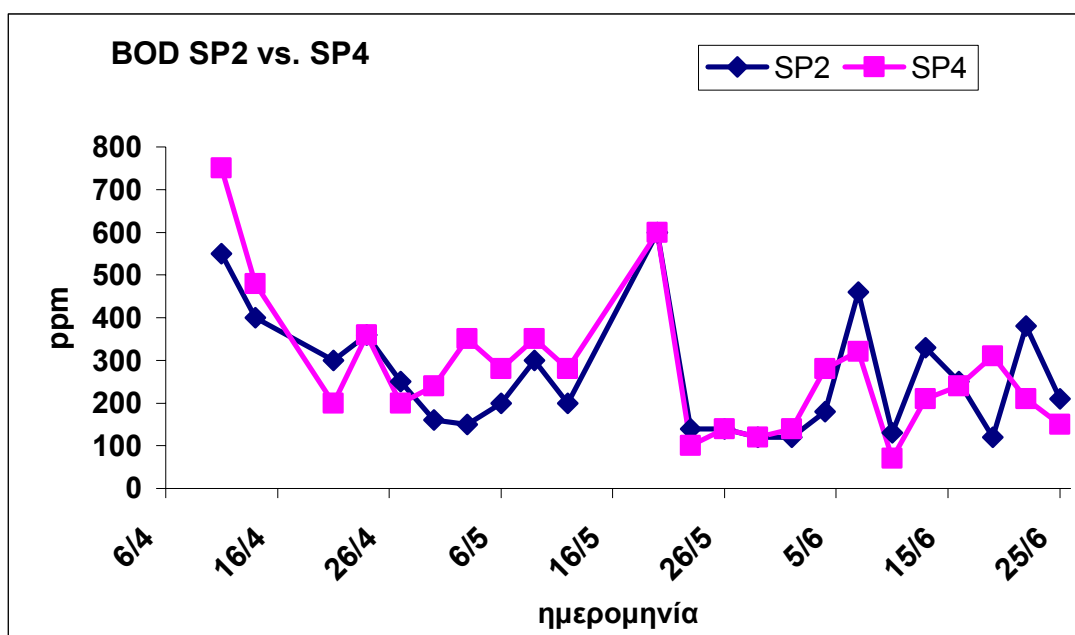


Διάγραμμα 5.2.2.1 – Συγκεντρώσεις του BOD₅ στην είσοδο (SP1) ενδιάμεσα(SP2) και στην έξοδο της γραμμής με βλάστηση (SP3)

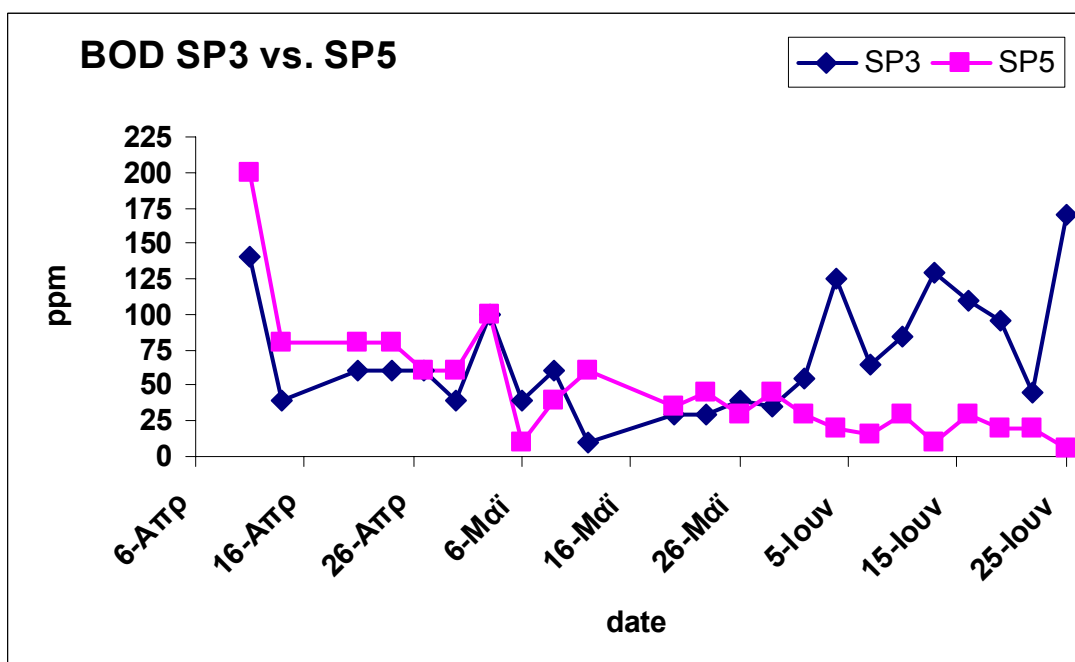


Διάγραμμα 5.2.2.2 - Συγκεντρώσεις του BOD₅ στην είσοδο (SP1) ενδιάμεσα(SP4) και στην έξοδο της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP5)

Στα διαγράμματα 5.2.2.3 και 5.2.2.4 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία των δυο γραμμών και στις εξόδους τους.



Διάγραμμα 5.2.2.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων του BOD₅ στα ενδιαμέσως σημεία, της γραμμής με βλάστηση SP2 και αυτής χωρίς SP4



Διάγραμμα 5.2.2.4 – Σύγκριση τιμών του BOD₅ στην έξοδο, SP3 της γραμμής με βλάστηση και SP5 της γραμμής χωρίς

Στον πίνακα 5.2.1.1 δίνονται οι % απομακρύνσεις του BOD₅ μεταξύ εισόδου – ενδιάμεσου, ενδιάμεσου – εξόδου και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

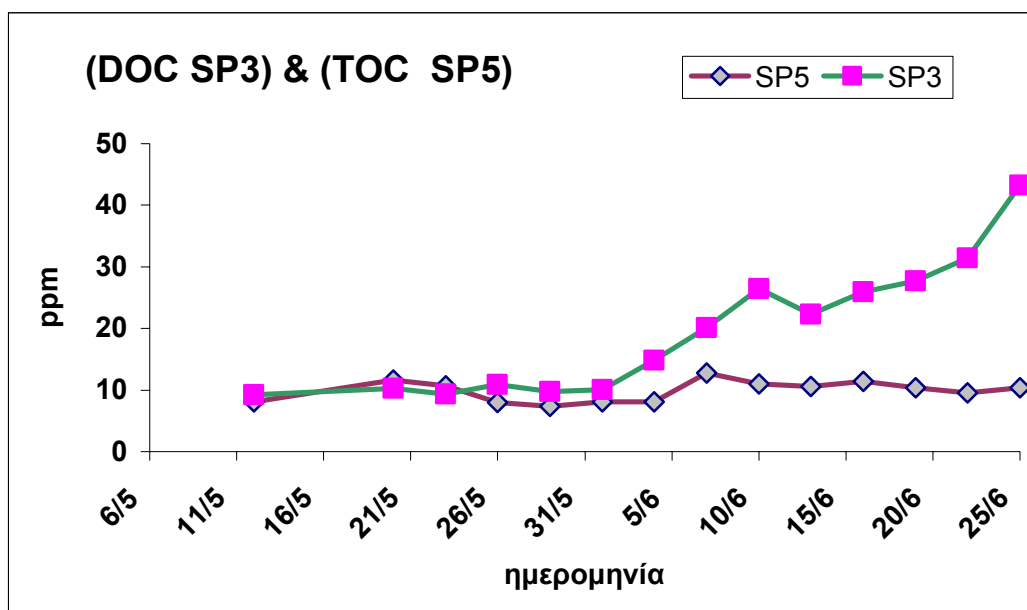
	SP1 vs. SP2	SP2 vs. SP3	SP1 vs. SP3	SP1 vs. SP4	SP4 vs. SP5	SP1 vs. SP5
Mean	61 %	66 %	88 %	55 %	80 %	91 %
SD	14 %	23 %	7.2 %	22 %	13 %	6.7 %
MIN	38 %	19 %	71 %	16%	55 %	76 %
MAX	87 %	95 %	98%	91%	97 %	99 %

Πίνακας 5.2.2.1 – Ποσοστιαία απομάκρυνση του BOD₅ μεταξύ εισόδου – ενδιαμέσου, ενδιαμέσου – εξόδου και εισόδου – εξόδου για κάθε γραμμή.

Η συγκέντρωση του BOD₅ παρουσιάζει διακυμάνσεις στην είσοδο και στα ενδιάμεσα σημεία και τείνει να σταθεροποιηθεί στην έξοδο. Η μεγαλύτερη απομάκρυνση επιτυγχάνεται μεταξύ του ενδιαμέσου σημείου και της εξόδου και στις δύο γραμμές. Η γραμμή με βλάστηση έχει επιφέρει μεγαλύτερη μείωση στο πρώτο στάδιο και η γραμμή χωρίς βλάστηση στο δεύτερο. Η γραμμή χωρίς βλάστηση έχει μεγαλύτερη απόδοση στη μείωση του BOD₅. Αρχικά, η γραμμή με βλάστηση μειώνει περισσότερο το BOD₅ αλλά από τον μήνα Ιούνιο συμβαίνει το ανάποδο. Η στατιστική ανάλυση δεν έδειξε διαφορά στους μέσους όρους των συγκεντρώσεων τόσο στα ενδιάμεσα σημεία όσο και στις εξόδους

5.2.3 Μετρήσεις οργανικού άνθρακα

Στο διάγραμμα 5.2.3.1 παρουσιάζουν τη συγκέντρωση του διαλυμένου οργανικού άνθρακα στην έξοδο της γραμμής με βλάστηση και τη συγκέντρωση του ολικού οργανικού άνθρακα στη γραμμή χωρίς βλάστηση.



Διάγραμμα 5.2.3.1 – Συγκέντρωση DOC στη γραμμή με βλάστηση και TOC στη γραμμή χωρίς βλάστηση

Για λόγους καλής λειτουργίας του αναλυτή TOC τα δείγματα από τη γραμμή με βλάστηση έπρεπε να διηθηθούν λόγω των στερεών. Έτσι οι δυο καμπύλες δεν είναι αριθμητικά συγκρίσιμες. Αυτό που δείχνει το διάγραμμα είναι μία ακόμα ένδειξη ότι η γραμμή χωρίς βλάστηση από το Μάιο και μετά απομακρύνει περισσότερο οργανικό φορτίο.

5.3 Άζωτο

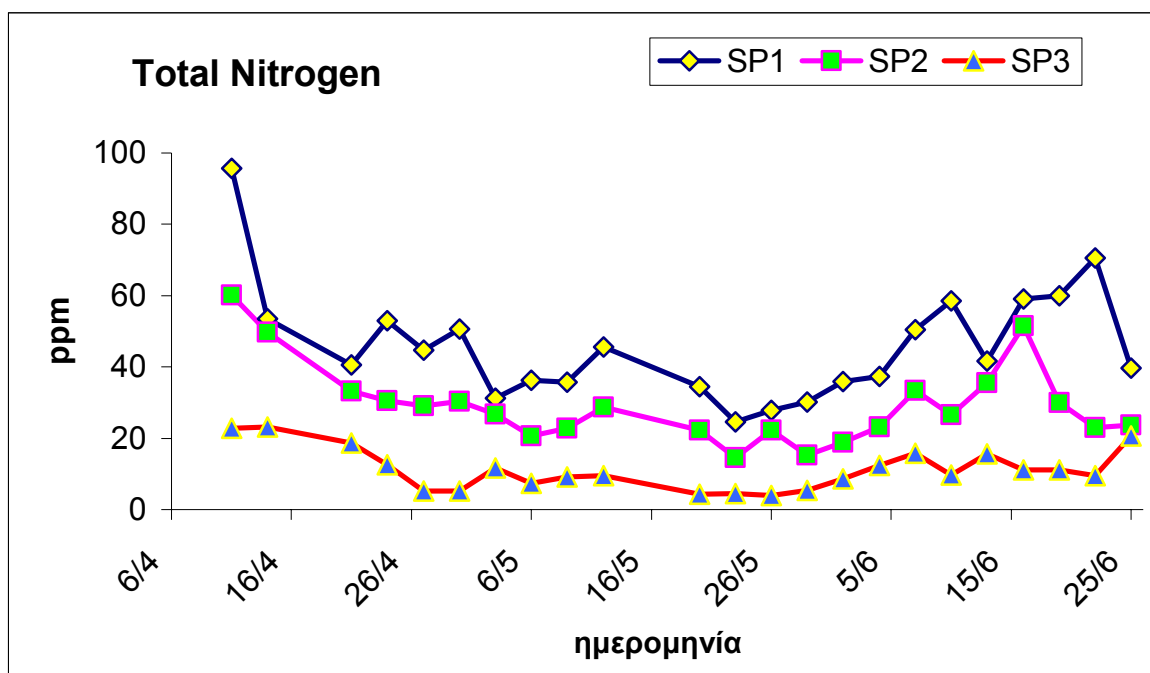
Οι μετρήσεις που έγιναν και σχετίζονται με το άζωτο είναι :

- Ολικό άζωτο
- Αμμωνία εκφρασμένη ως άζωτο
- Νιτρικά
- Νιτρώδη

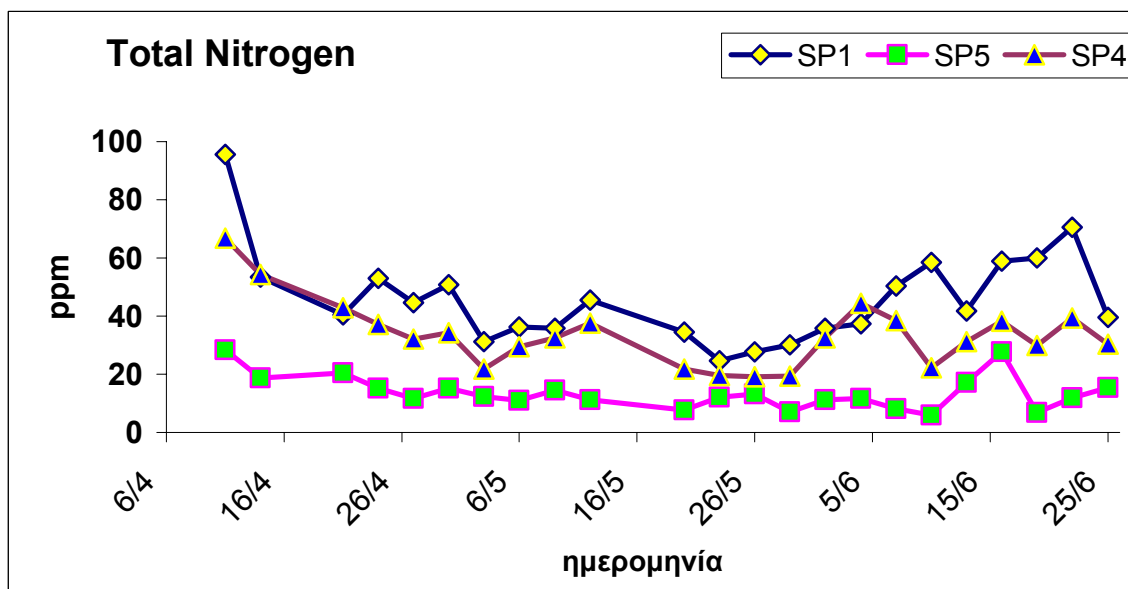
5.3.1 Ολικό άζωτο

Τα διαγράμματα 5.3.1.1 και 5.3.1.2 δείχνουν τις συγκεντρώσεις της αμμωνίας σε είσοδο, ενδιάμεσο σημείο και έξοδο, για τη γραμμή με βλάστηση και για τη χωρίς

γραμμή αντίστοιχα.

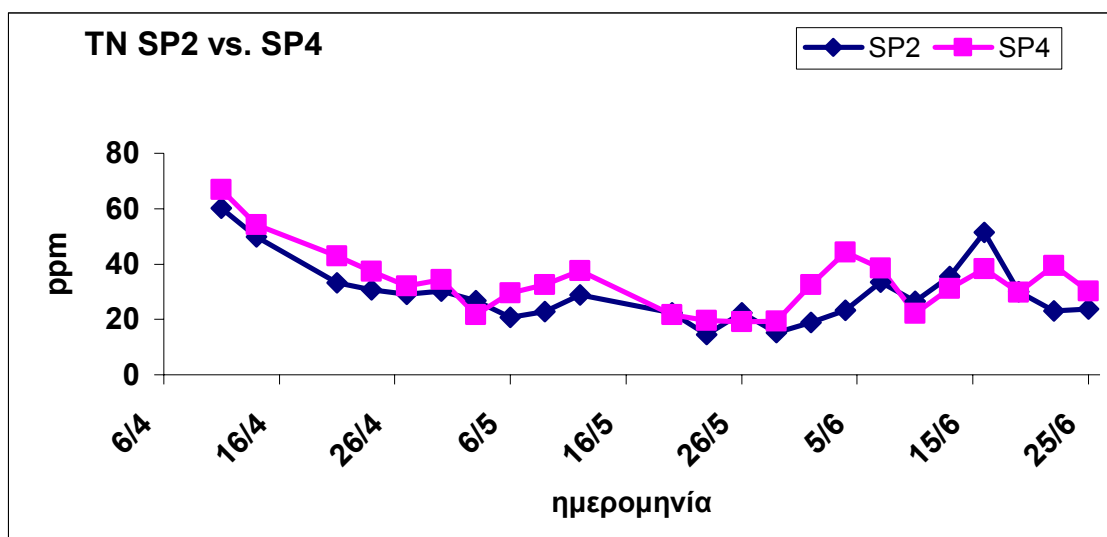


Διάγραμμα 5.3.1.1 – Συγκέντρωση ολικού αζώτου στη γραμμή με βλάστηση σε είσοδο (SP1) στο ενδιάμεσο σημείο (SP2) και στην έξοδο (SP3)

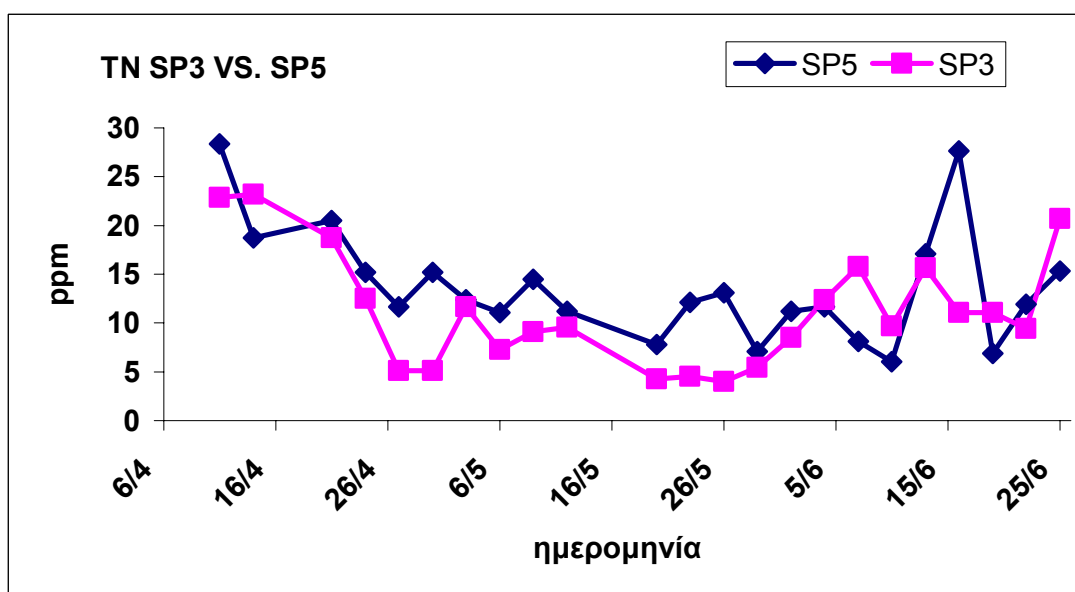


Διάγραμμα 5.3.1.2 - Συγκέντρωση ολικού αζώτου στη γραμμή χωρίς βλάστηση σε είσοδο (SP1) στο ενδιάμεσο σημείο (SP4) και στην έξοδο (SP5)

Στα διαγράμματα 5.3.1.3 και 5.3.1.4 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.3.1.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς (SP4)



Διάγραμμα 5.3.1.4 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων στις εξόδους της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς (SP5)

Στον πίνακα 5.3.1.1 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις του ολικού αζώτου .

	SP1 vs. SP2	SP2 vs. SP3	SP1 vs. SP3	SP1 vs. SP4	SP4 vs. SP5	SP1 vs. SP5
Mean	35 %	62 %	75 %	30 %	58 %	69 %
SD	15 %	15 %	12 %	13%	14 %	12 %
MIN	6.9 %	13 %	48 %	9.1 %	28 %	49 %
MAX	67 %	83 %	90 %	62 %	79 %	90%

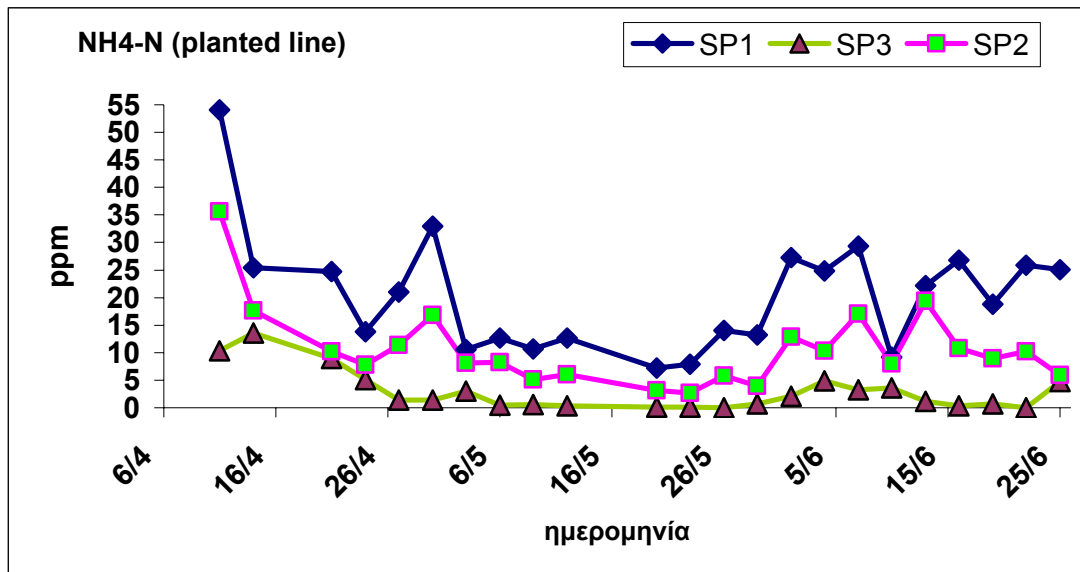
Πίνακας 5.3.1.1 - Ποσοστιαίες απομακρύνσεις αμμωνίας μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας κάθε γραμμής

Ποσοστιαία φαίνεται ότι η γραμμή με τη βλάστηση απομακρύνει περισσότερο ολικό άζωτο από τη γραμμή χωρίς. Πρακτικά, η διαφορά στη μέση τιμή τους είναι μόνο 2.4 ppm και η ανάλυση ANOVA1 έδειξε ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά. Ούτε μετά την πρώτη δεξαμενή αλλά ούτε και στην έξοδο υπάρχει σημαντική διάφορα στις συγκεντρώσεις ολικού αζώτου. Η απομάκρυνση είναι μεγαλύτερη μετά τη δεύτερη δεξαμενή από ότι στην πρώτη και στις δύο γραμμές. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το λύμα παραμένει στη δεύτερη δεξαμενή περισσότερο και λόγω της διάταξης της εξόδου ευνοείται τόσο η απονιτροποίηση όσο και η ανοξική οξείδωση της αμμωνίας. Δεν πρέπει να παραβλέψουμε τη συνεισφορά της βλάστησης στη συγκέντρωση του αζώτου η οποία προέρχεται είτε από έκκριση ουσιών από τις ρίζες είτε από την αποδόμηση τους είτε από την αποδόμηση του φυλλώματος όταν αυτό πέφτει στις δεξαμενές. Από την είσοδο ως το ενδιάμεσο σημείο στη γραμμή με βλάστηση η μέση τιμή του ολικού αζώτου μειώνεται κατά 15.8 ppm. Η συγκέντρωση αυτή είναι αρκετά υψηλή για να έχει προσληφθεί από τα φυτά. Άρα είναι πιθανό να μην εισέρχεται αρκετό οξυγόνο σε όλο το βάθος του υποστρώματος με αποτέλεσμα προς βάθος να επικρατούν ανοξικές συνθήκες και να γίνεται απονιτροποίηση.

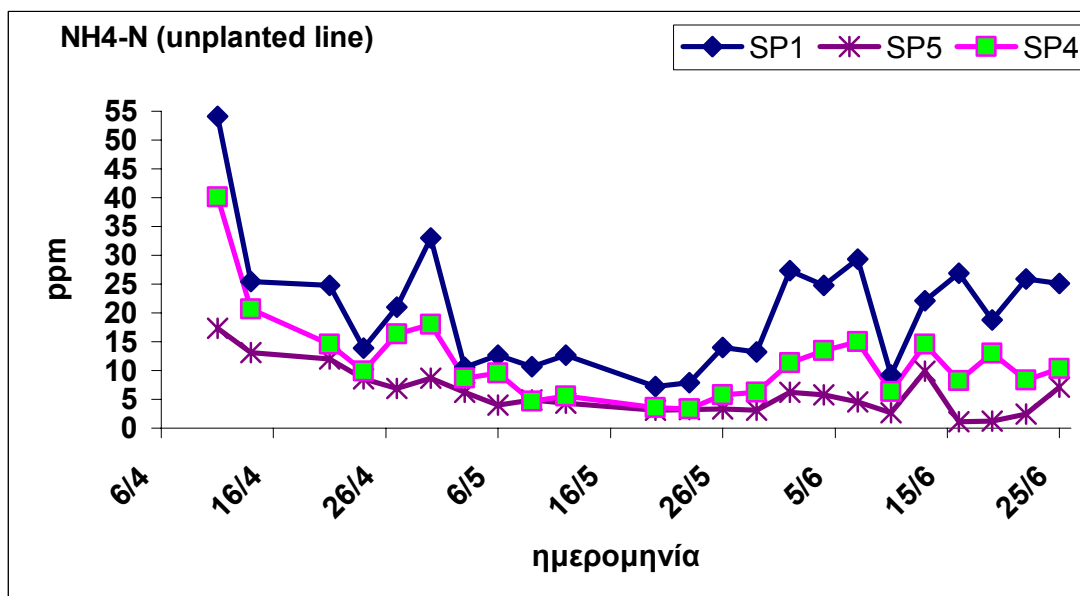
5.3.2 Αμμωνία

Τα διαγράμματα 5.3.2.1 και 5.3.2.2 δείχνουν τις συγκεντρώσεις της αμμωνίας σε είσοδο, ενδιάμεσο σημείο και έξοδο, για τη γραμμή με βλάστηση και για τη χωρίς

γραμμή αντίστοιχα. Στις συγκεντρώσεις υπάρχει διακύμανση στη είσοδο και στα ενδιάμεσα σημεία η οποία μειώνεται στην καμπύλη που αντιστοιχεί στην έξοδο

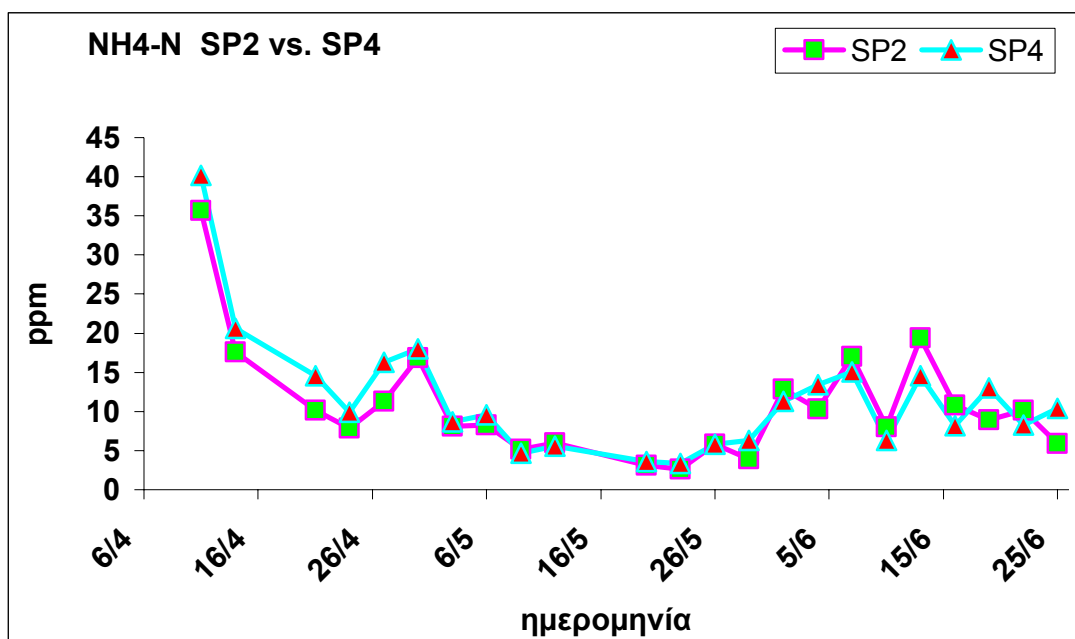


Διάγραμμα 5.3.2.0.1 – Συγκεντρώσεις αμμωνίας στη γραμμή με βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP2) και έξοδος (SP3)

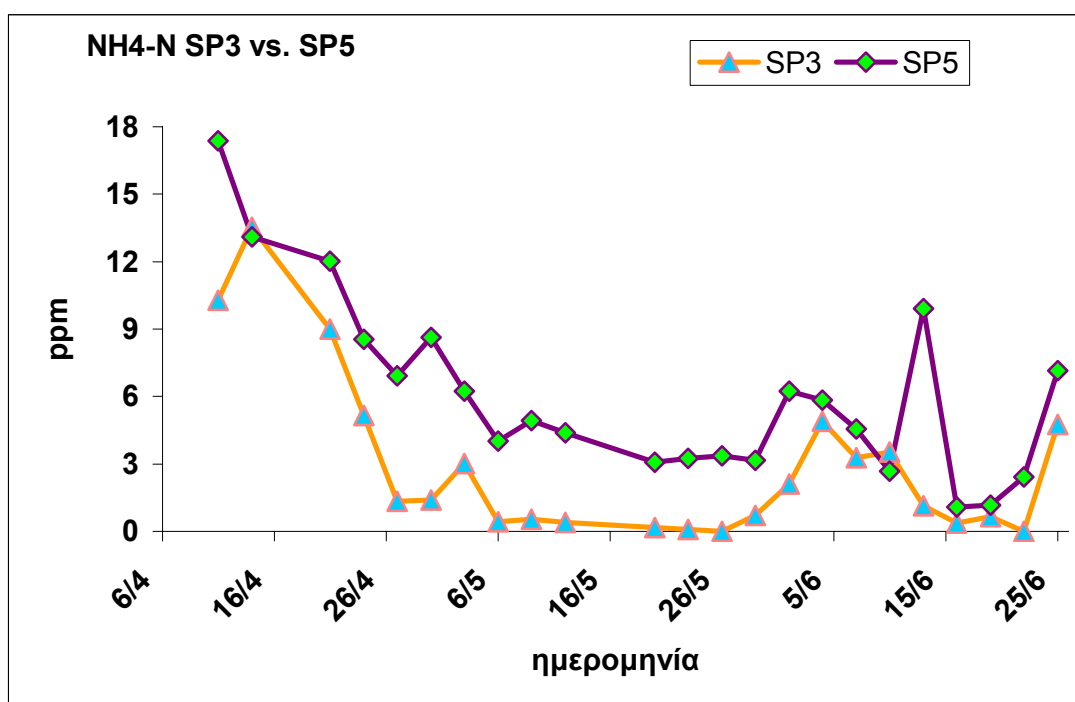


Διάγραμμα 5.3.2.2 – Σ Συγκεντρώσεις αμμωνίας στη γραμμή χωρίς βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP2) και έξοδος (SP3)

Στα διαγράμματα 5.3.2.3 και 5.3.2.4 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.3.2.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή με βλάστηση (SP2) και στη γραμμή χωρίς (SP4)



Διάγραμμα 5.3.2.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία στη γραμμή χωρίς βλάστηση (SP3) και στη γραμμή χωρίς (SP5)

Στον πίνακα 5.3.2.1 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες απομακρύνσεις μεταξύ των

σημείων δειγματοληψίας κάθε γραμμής.

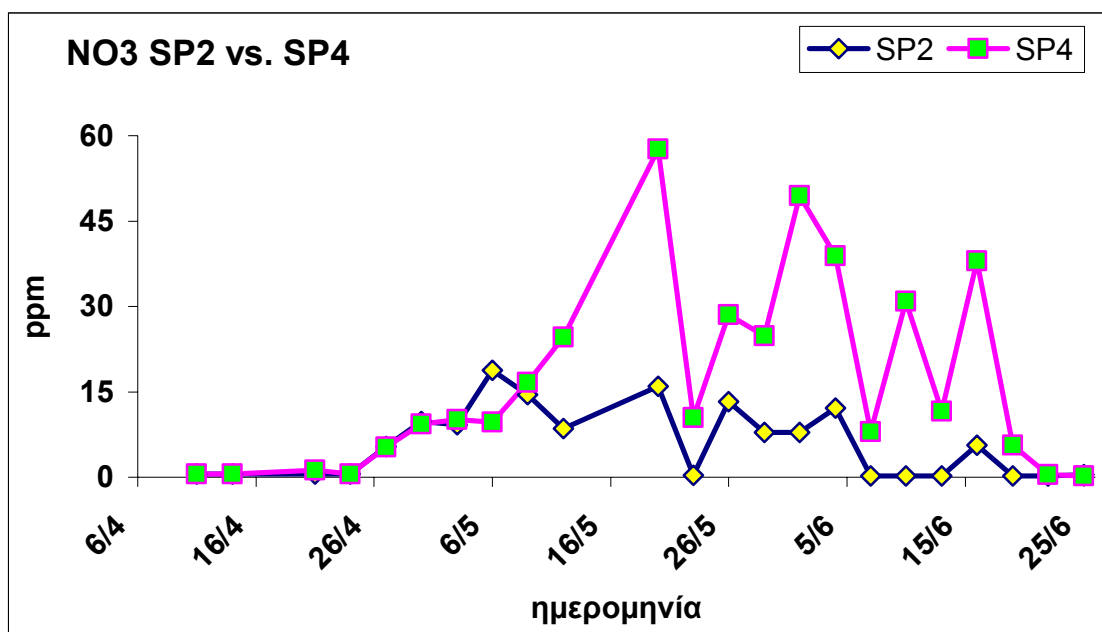
	SP1 vs. SP2	SP2 vs. SP3	SP1 vs. SP3	SP1 vs. SP4	SP4 vs. SP5	SP1 vs. SP5
Mean	48 %	74 %	86 %	43 %	45 %	68 %
SD	17 %	28 %	15 %	16 %	24 %	16 %
MIN	12 %	11 %	47 %	17 %	3.3 %	38 %
MAX	77 %	99 %	99 %	69 %	90 %	96 %

Πίνακας 5.3.2.1 – Ποσοστιαίες απομακρύνσεις αμμωνίας μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας κάθε γραμμής

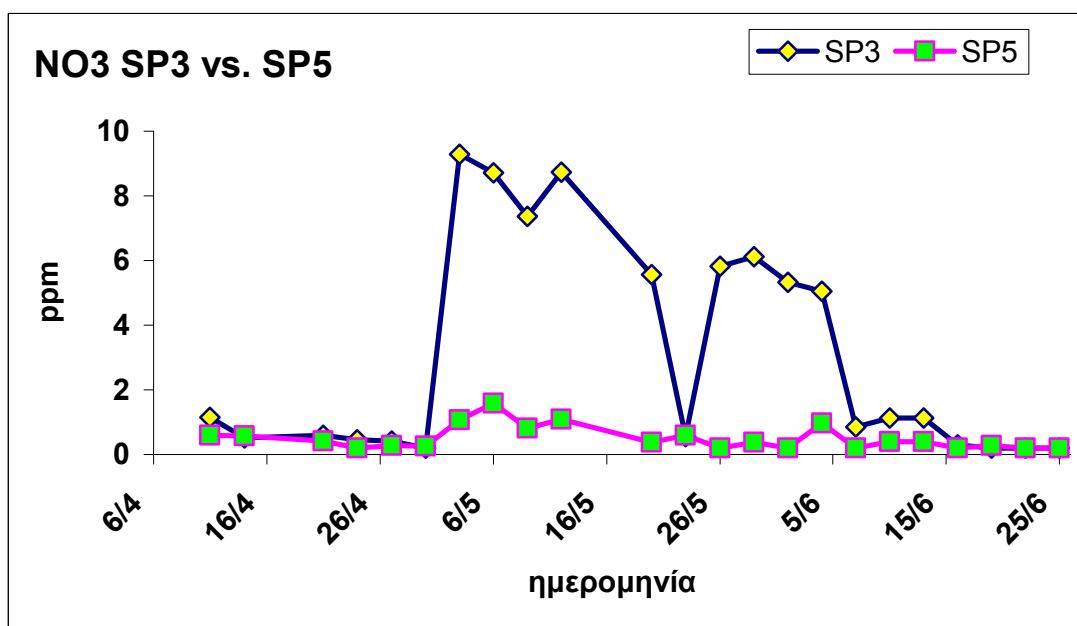
Η συμπεριφορά των δυο γραμμών στην απομάκρυνση της αμμωνίας είναι διαφορετική σε ότι αφορά την απόδοσή τους στο δεύτερο στάδιο. Η γραμμή με την βλάστηση απομακρύνει σε μεγαλύτερο ποσοστό την αμμωνία στα επιμέρους στάδια και συνολικά αλλά, στο πρώτο στάδιο η αμμωνία είναι 10.7 ppm στη γραμμή με βλάστηση και 11.6 ppm. Η διαφορά αυτή μπορεί να είναι η ποσότητα που προσροφούν τα καλάμια. Υπάρχει μεγάλη διαφορά στην απομάκρυνση μεταξύ ενδιαμέσου σημείου - εξόδου και εισόδου – ενδιαμέσου σημείου, στη γραμμή με βλάστηση. Αντίθετα στη γραμμή χωρίς βλάστηση δεν υπάρχει διαφορά στην απομάκρυνση αμμωνίας. Η ανάλυση με ANOVA1 έδειξε ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στους μέσους όρους των εκροών των δύο γραμμών.

5.3.3 Νιτρικά – Νιτρώδη

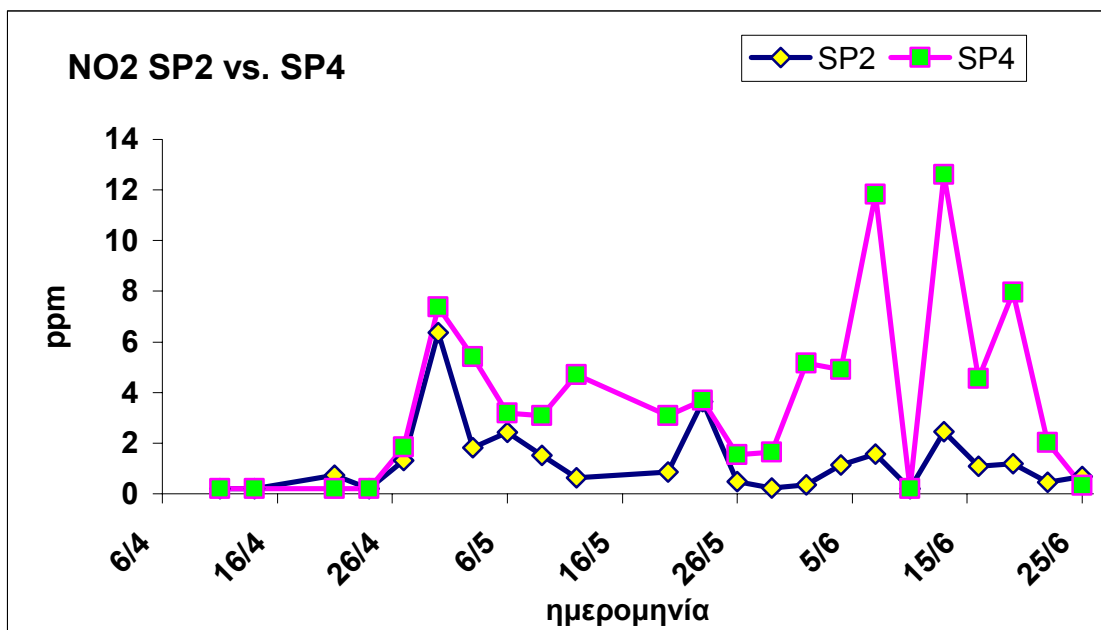
Στα διαγράμματα 5.3.3.1 και 5.3.3.2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις νιτρικών στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δυο γραμμών αντίστοιχα. Στα διαγράμματα 5.3.3.3 και 5.3.3.4 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των νιτρωδών στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δυο γραμμών αντίστοιχα.



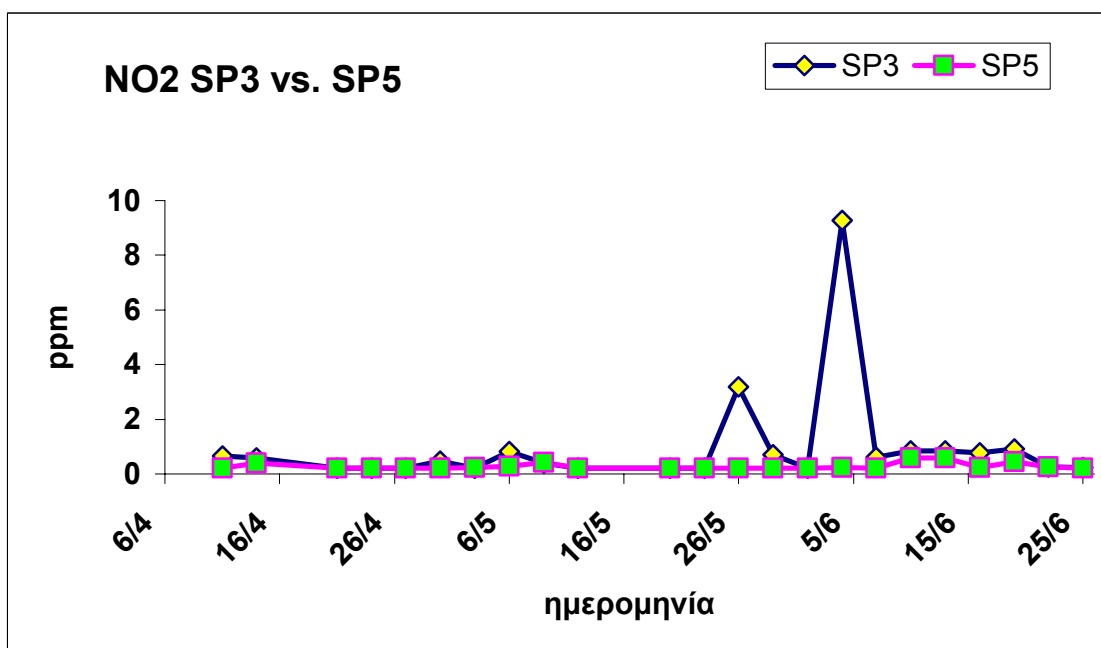
Διάγραμμα 5.3.3.1 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων των νιτρικών στο ενδιαμέσο σημείο της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP4)



Διάγραμμα 5.3.3.2 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων των νιτρικών στις εξόδους, της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP5)



Διάγραμμα 5.3.3.3 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων των νιτρωδών στο ενδιάμεσο σημείο της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP4)



Διάγραμμα 5.3.3.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων των νιτρωδών στις εξόδους, της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς βλάστηση (SP5)

Στα διαγράμματα των νιτρικών φαίνεται ότι στα ενδιάμεσα σημεία η γραμμή χωρίς βλάστηση έχει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις και στην έξοδο η γραμμή με

βλάστηση. Η μέση τιμή των νιτρικών στο ενδιάμεσο σημείο της γραμμής χωρίς βλάστηση είναι 3 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση στην άλλη γραμμή. Η διαφορά αυτή παρατηρείται μετά την πρώτη εβδομάδα του Μαΐου. Η διαφορά αυτή στις συγκεντρώσεις ίσως σημαίνει ότι στο πρώτο στάδιο της γραμμής χωρίς βλάστηση γινόταν σε μεγαλύτερο βαθμό μεταφορά οξυγόνου στο υπόστρωμα. Επίσης ενισχύει την άποψη για την ύπαρξη περιοχής που επικρατούν ανοξικές συνθήκες. Η γραμμή με βλάστηση έχει συγκεντρώσεις αμμωνίας, εκείνο το χρονικό διάστημα, λίγο μεγαλύτερες ή ίσες με τη γραμμή χωρίς βλάστηση. Το γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις των νιτρικών είναι στην πλειοψηφία τους κοντά στο 0 δείχνει ότι η απονιτροποίηση γίνεται σε ικανοποιητικό βαθμό.

Για τα νιτρώδη δεν ισχύει κάτι το διαφορετικό σε σχέση με την διακύμανση των συγκεντρώσεών τους στα ενδιάμεσα σημεία και στην έξοδο. Αξιοσημείωτο είναι ότι στη γραμμή χωρίς βλάστηση, στην έξοδο η συγκέντρωση τους ήταν πάντα κοντά στο όριο ανίχνευσης 0.2 ppm.

5.3.4 Οργανικό άζωτο

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του οργανικού αζώτου δεν έγινε με βάση κάποια αναλυτική μέθοδο αλλά αριθμητικά με βάση τις παρακάτω εξισώσεις :

$$(Org - N) + TIN = TN$$

$$TIN = (NH_4 - N) + (NO_3^- - N) + (NO_2^- - N)$$

Όπου TN : ολικό άζωτο, TIN : ολικό ανόργανο άζωτο

Org – N : οργανικό άζωτο

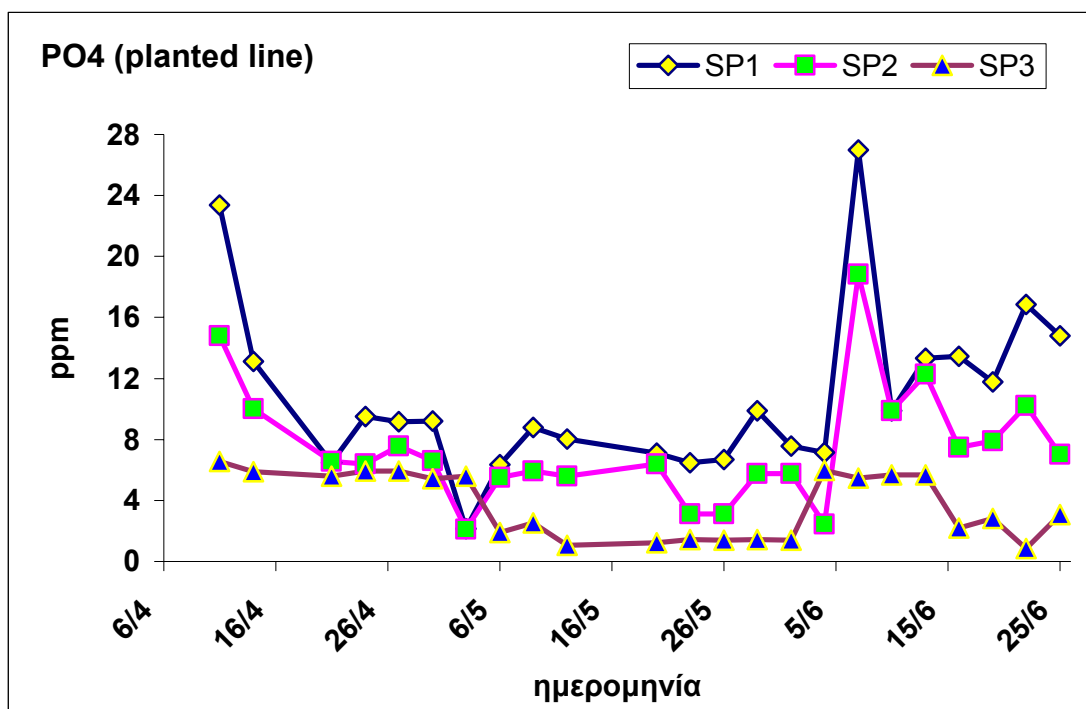
Στον πίνακα 5.3.4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις των άλλων ενώσεων του αζώτου. Οι τιμές είναι σε ppm

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
Mean	25	16.7	7.3	16	7.4
SD	11	7.8	3.9	8.2	4.6
MIN	8.1	4.1	1.7	4.2	3.
MAX	49	39	16	33	26

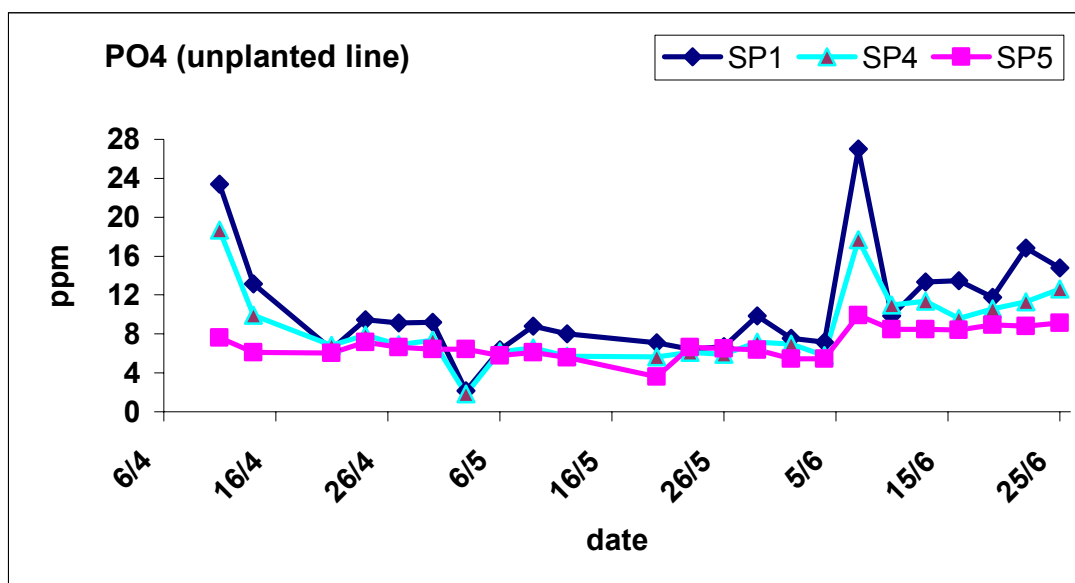
Πίνακας 5.3.3.1 - Μέσες συγκεντρώσεις οργανικού αζώτου στα σημεία δειγματοληψίας της μονάδας

5.4 Φωσφορικά

Τα διαγράμματα 5.4.1 και 5.4.2 δείχνουν τις συγκεντρώσεις των φωσφορικών σε είσοδο, ενδιάμεσο σημείο και έξοδο, για τη γραμμή με βλάστηση και για τη χωρίς γραμμή αντίστοιχα.

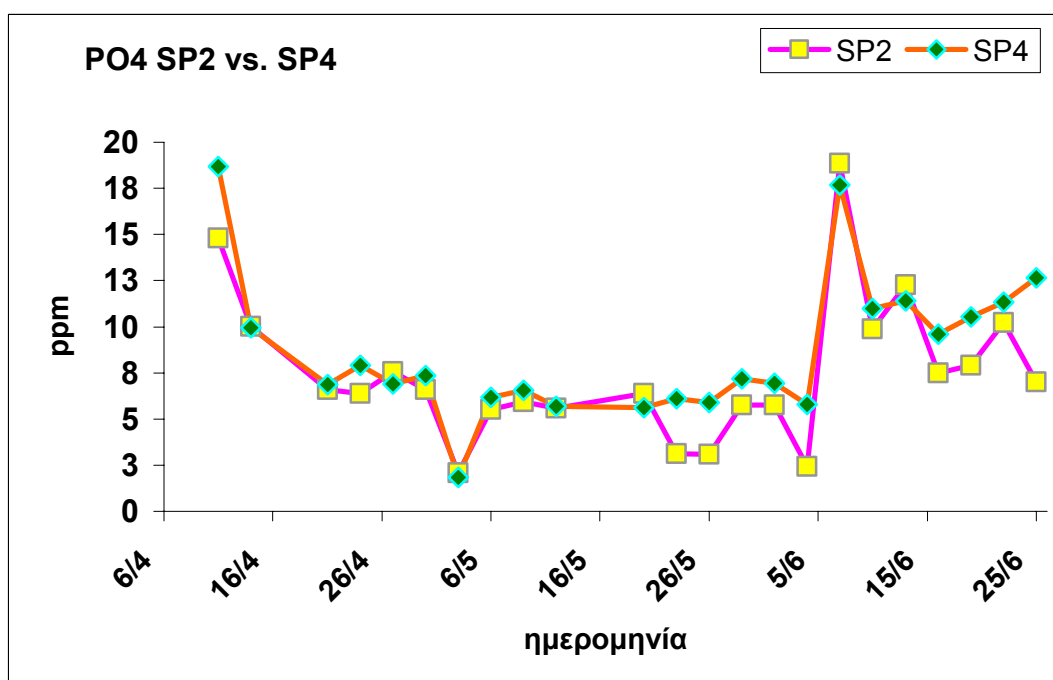


Διάγραμμα 5.4.1 - Συγκεντρώσεις φωσφορικών στη γραμμή με βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP2) και έξοδος (SP3)

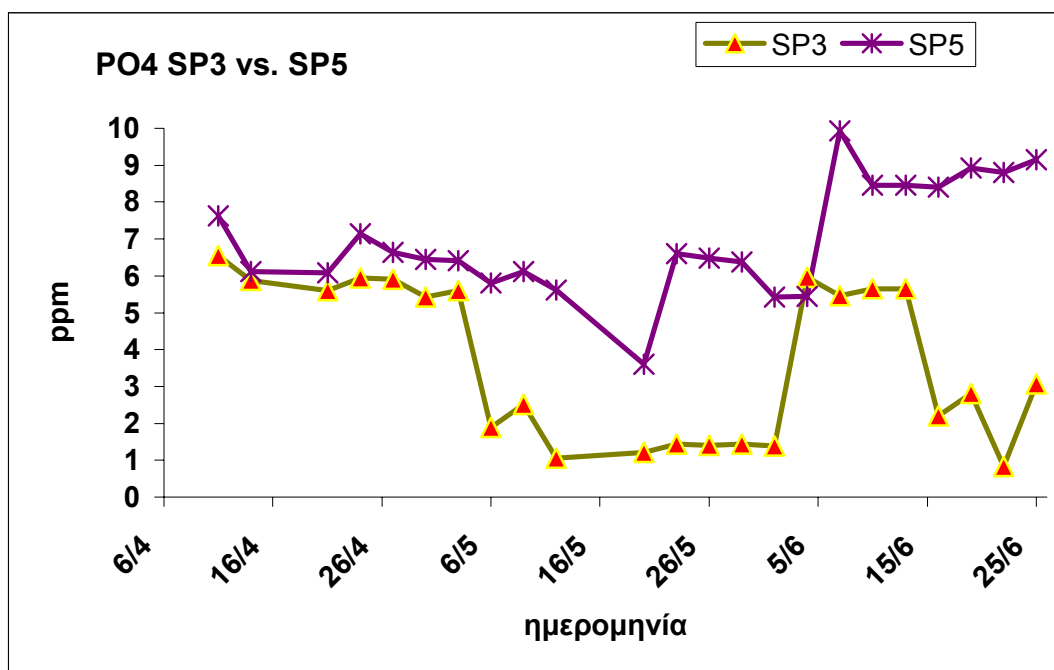


Διάγραμμα 5.4.2 - Συγκεντρώσεις φωσφορικών στη γραμμή χωρίς βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP4) και έξοδος (SP5)

Στα διαγράμματα 5.4.3 και 5.4.4 γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δύο γραμμών, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.4.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων στα ενδιάμεσα σημεία της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς (SP4)



Διάγραμμα 5.4.4 - Σύγκριση των συγκεντρώσεων από την έξοδο της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς (SP5)

Στον πίνακα 5.4.1 παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης των φωσφορικών σε κάθε στάδιο της κάθε γραμμής.

	SP1 vs. SP2	SP2 vs. SP3	SP1 vs. SP3	SP1 vs. SP4	SP4 vs. SP5	SP1 vs. SP5
Mean	31 %	19 %	64 %	32 %	55 %	20 %
SD	18 %	8.8 %	23 %	17 %	23 %	15 %
MIN	0.06 %	3. 2%	13 %	3 %	6.7 %	1.4 %
MAX	66 %	34 %	95 %	67 %	92 %	59 %

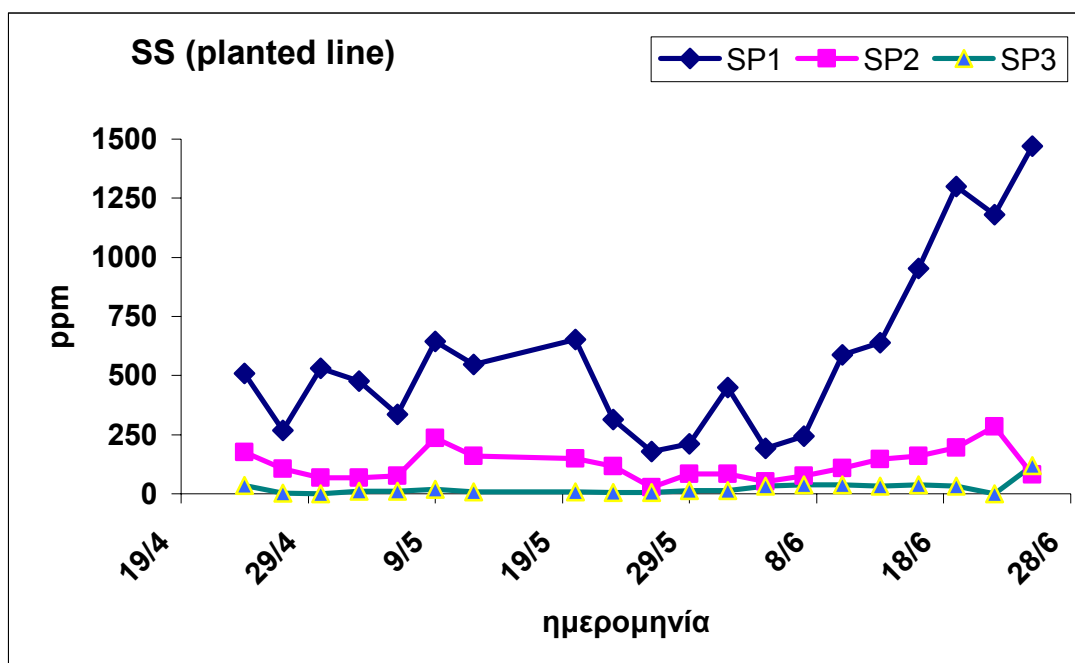
Πίνακας 5.4.1 Ποσοστιαίες απομακρύνσεις φωσφορικών μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας κάθε γραμμής

Τα ποσοστά απομάκρυνσης των φωσφορικών από το σύστημα είναι τα χαμηλότερα που παρατηρούνται ` 64.54 % για τη γραμμή με βλάστηση και μόλις 32.35 για τη γραμμή χωρίς βλάστηση. Επίσης αξίζει να σημειωθεί το γεγονός πως στη γραμμή με βλάστηση η απομάκρυνση των φωσφορικών είναι μεγαλύτερη στην δεύτερη δεξαμενή και όχι στην πρώτη, αν και η πρώτη δεξαμενή έχει

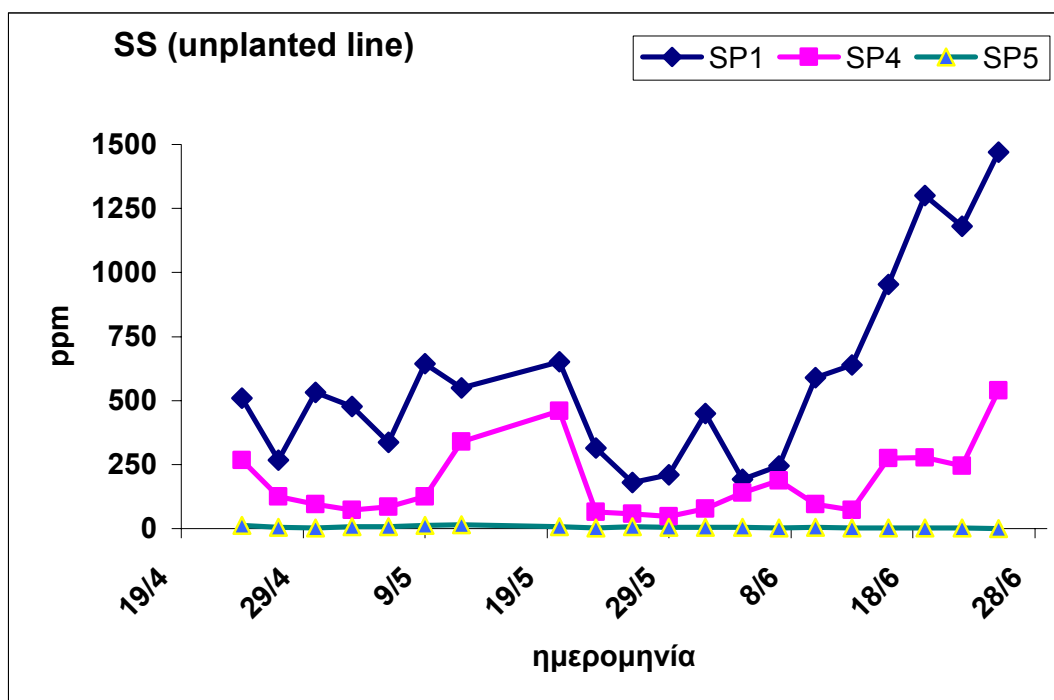
υπόστρωμα μόνο από χαλίκι. Στη γραμμή χωρίς βλάστηση το ποσοστό απομάκρυνσης είναι το ίδιο και στις δύο δεξαμενές. Ίσως να οφείλεται στο μικρό χρόνο παραμονής του λύματος στην πρώτη δεξαμενή ή ίσως στο ότι στη δεύτερη δεξαμενή με την χαλαζακή άμμο δινόταν η ευκαιρία στα καλάμια να προσλαμβάνουν περισσότερα φωσφορικά και έτσι να εξηγείται η μεγαλύτερη ανάπτυξή τους. Επίσης δεν αποκλείεται τα θειικά να ανταγωνίζονται τα φωσφορικά ιόντα στην διεργασία της προσρόφησης. Η ανάλυση ANOVA1 έδειξε ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στα αποτελέσματα των εκροών των δύο γραμμών.

5.5 Αιωρούμενα στερεά

Τα διαγράμματα 5.5.1 και 5.5.2 δείχνουν τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών σε είσοδο, ενδιάμεσο σημείο και έξοδο, για τη γραμμή με βλάστηση και για τη χωρίς γραμμή αντίστοιχα.

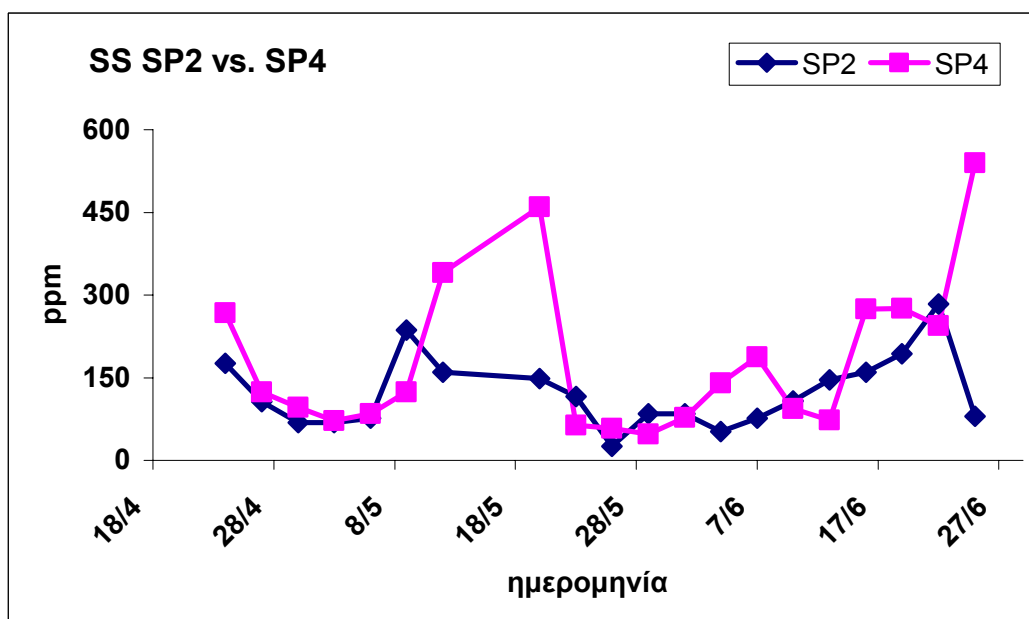


Διάγραμμα 5.5.1 - Συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στη γραμμή με βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP2) και έξοδος (SP3)

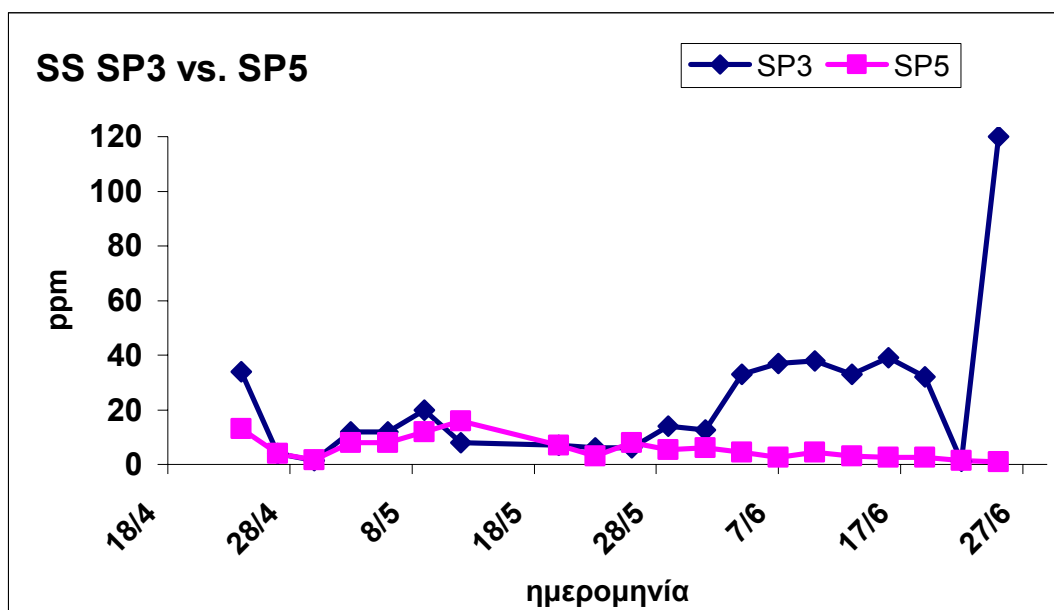


Διάγραμμα 5.5.2 – Συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στη γραμμή χωρίς βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP4) και έξοδος (SP5)

Στα διαγράμματα 5.5.3 και 5.5.2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις νιτρικών στα ενδιάμεσα σημεία και στις εξόδους των δυο γραμμών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.5.3 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων από το ενδιάμεσο σημείο της γραμμής με βλάστηση (SP2) και της γραμμής χωρίς (SP4)



Διάγραμμα 5.5.4 – Σύγκριση των συγκεντρώσεων από την έξοδο της γραμμής με βλάστηση (SP3) και της γραμμής χωρίς (SP5)

Στον πίνακα 5.5.1 παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών σε κάθε στάδιο της κάθε γραμμής.

	SP1 vs. SP2	SP2 vs. SP3	SP1 vs. SP3	SP1 vs. SP4	SP4 vs. SP5	SP1 vs. SP5
Mean	76 %	82 %	95 %	66%	95 %	98.56%
SD	10 %	16 %	4.5 %	21%	4.1 %	1.16%
MIN	60 %	37 %	83 %	23%	86 %	95.56%
MAX	95 %	99 %	99 %	89%	99 %	99 %

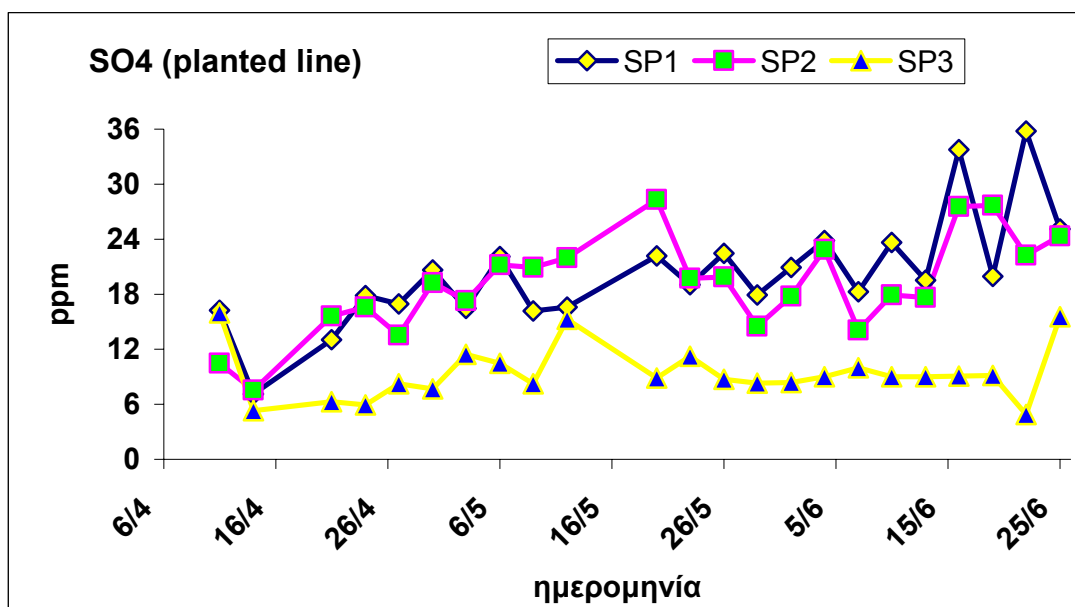
Πίνακας 5.5.1 – Ποσοστιαίες απομακρύνσεις αιωρούμενων στερεών μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας κάθε γραμμής

Τα διαγράμματα δείχνουν ότι ανεξάρτητα από την διακύμανση της συγκέντρωσης των στερεών στην είσοδο η τελική εκροή είναι πάντα σταθερή και στις δύο γραμμές. Το σύστημα παρουσιάζει εξαιρετική απόδοση σε ότι αφορά την απομάκρυνση τους και από τις δύο γραμμές, με την γραμμή χωρίς βλάστηση να έχει μικρότερη μέση συγκέντρωση. Η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι υπάρχει διάφορα στους μέσους όρους των δύο γραμμών. Αυτή τη φορά και στις δύο γραμμές είχαμε μεγαλύτερη απομάκρυνση στο πρώτο στάδιο. Από τα τέλη Μαΐου

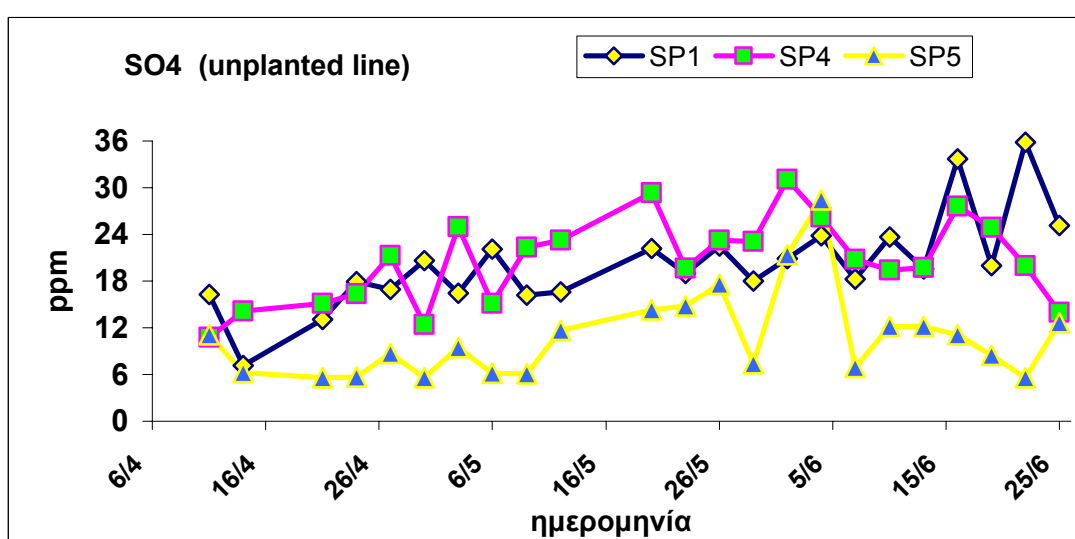
η γραμμή χωρίς βλάστηση παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση.

5.6 Θειικά

Τα διαγράμματα 5.6.1 και 5.6.2 δείχνουν τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών σε είσοδο, ενδιάμεσο σημείο και έξοδο, για τη γραμμή με βλάστηση και για τη χωρίς γραμμή αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.6.1 - Συγκεντρώσεις θεικών στη γραμμή με βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP2) και έξοδος (SP3)



Διάγραμμα 5.6.2 5.6.3 - Συγκεντρώσεις θεικών στη γραμμή χωρίς βλάστηση : είσοδος (SP1), ενδιάμεσο σημείο (SP4) και έξοδος (SP5)

Η συγκεντρώσεις των θειικών μειωνόταν μόνο στο δεύτερο στάδιο και στις δύο γραμμές οι οποίες είχαν και παρόμοιες μέσες τιμές. Ο πιο πιθανός μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η χρήση τους ως δέκτες ηλεκτρονίων από τους αναερόβιους μικροοργανισμούς. Δεν αποκλείεται να προσροφόνται από το υπόστρωμα όπως τα φωσφορικά.

5.7 Ανάπτυξη της βλάστησης

Εξαιτίας των υψηλών συγκεντρώσεων θρεπτικών στην είσοδο και της εποχής που έγινε το πείραμα ήταν λογικό να υπάρχει μια συνεχής ανάπτυξη της βλάστησης όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες.

- Στις 15 Μαρτίου όταν ολοκληρώθηκε η κατασκευή



Εικόνα 5.7.1 - Η μονάδα αμέσως μετά την κατασκευή

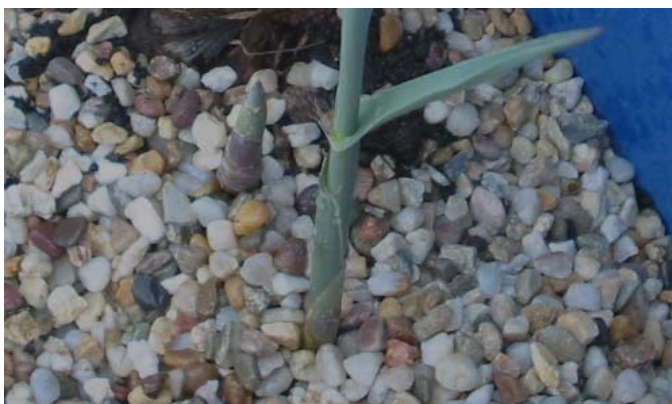
- Στις 28 Μαρτίου λίγο πριν αρχίσει το πείραμα όπου στο σύστημα γινόταν τροφοδοσία νερού βρύσης με λίπασμα



Εικόνα 5.7.2 - Ο τεχνητός υδροβιότοπος στις 28/03 μετά από 20 μέρες τροφοδοσίας με νερό και λίπασμα



Εικόνα 5.7.3 - Ανάπτυξη νέων καλαμιών στην πρώτη δεξαμενή



Εικόνα 5.7.4 - Ανάπτυξη νέων καλαμιών στην δεύτερη δεξαμενή

- Στις 21 Απριλίου 10 μέρες μετά την έναρξη



Εικόνα 5.7.5 – Συνολική εικόνα του τεχνητού υδροβιοτόπου



Εικόνα 5.7.6 - Τα καλάμια στην πρώτη δεξαμενή



Εικόνα 5.7.7 - Τα καλάμια στην πρώτη δεξαμενή



Εικόνα 5.7.8 - Τα καλάμια στην δεύτερη δεξαμενή

- Στις 28 Ιουνίου στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας



Εικόνα 5.7.9 – Ο τεχνητός υγροβιότοπος στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας



Εικόνα 5.7.10 - Τα καλάμια στην πρώτη δεξαμενή



Εικόνα 5.7.11 - Τα καλάμια στην δεύτερη δεξαμενή

Η μεγάλη ανάπτυξη των φυτών οφείλεται στη μεγάλη συγκέντρωση των θρεπτικών στο λύμα σε συνδυασμό με την εποχή που έγινε η πειραματική διαδικασία καθώς η άνοιξη είναι η εποχή όπου αρχίζουν να αναπτύσσονται.

Στο πίνακα 5.7.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για την διάμετρο των καλάμιών :

	1 ^ο στάδιο		2 ^ο στάδιο	
Ημερομηνία	Εμβαδόν m ² της βλάστησης	Ποσοστό επί της συνολικής επιφάνειας	Εμβαδόν m ² της βλάστησης	Ποσοστό επί της συνολικής επιφάνειας
28/04	0.0001	0.05 %	0.0003	0.11 %
24/05	0.0004	0.17 %	0.0009	0.36 %
18/06	0.0012	0.50 %	0.002	0.83 %

Πίνακας 5.7.1 – Υπολογισμός της επιφάνειας που καταλαμβάνεται από τη βλάστηση

Τα καλάμια στην δεύτερη δεξαμενή παρουσίασαν καλύτερη ανάπτυξη σε σχέση με τα αντίστοιχα της πρώτης. Αυτό ίσως να οφείλεται στο υπόστρωμα στο οποίο τοποθετήθηκαν. Στην πρώτη δεξαμενή τα καλάμια τοποθετήθηκαν σε χαλίκι με συγκεντρώσεις ανθρακικού ασβεστίου. Στη δεύτερη, σε χαλαζιακή άμμο. Η ανοχή των καλάμιων στο ανθρακικό ασβέστιο είναι μέτρια [24]. Αντίθετα έχουν μεγάλη ανοχή σε αναερόβιες συνθήκες [24] και έτσι δεν επηρεάστηκαν από τις υψηλές συγκεντρώσεις του COD στην είσοδο.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής :

- 1 Με βάση τις μέσες συγκεντρώσεις COD BOD₅ και TSS στην είσοδο το λύμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ισχυρό.
- 2 Οι μεγαλύτερες αποδόσεις παρατηρούνται στην απομάκρυνση του COD BOD και TSS και στις δύο γραμμές και της NH₄ στη γραμμή με βλάστηση.
- 3 Λιγότερο ικανοποιητικά είναι τα ποσοστά απομάκρυνσης για TN, PO₄³⁻ και NH₄ στη γραμμή χωρίς βλάστηση. Η πιο χαμηλή ποσοστιαία απομάκρυνση είναι αυτή των φωσφορικών η οποία φτάνει μόνο το 32.35 %.
- 4 Στο δεύτερο στάδιο κάθε γραμμής επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απομάκρυνση σε σχέση με το πρώτο ή τουλάχιστον ίση με εξαίρεση τα στερεά όπου απομακρύνονται περισσότερο στην πρώτη δεξαμενή.
- 5 Η διάταξη των αγωγών στις εξόδους κάθε γραμμής ενίσχυσε την απονιτροποίηση.
- 6 Η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι οι δύο γραμμές έχουν σημαντικές διαφορές στην απομάκρυνση των στερεών, της αμμωνίας και των φωσφορικών.

- Προτάσεις

Με σκοπό πάντα την καλύτερη απόδοση του συστήματος υπάρχουν κάποια πράγματα, σε ότι αφορά τη λειτουργία του, που θα μπορούσαν να αλλάξουν ή να γίνουν διαφορετικά εξ αρχής όπως για παράδειγμα :

1. Περαιτέρω ανύψωση του αγωγού στην έξοδο, ιδιαίτερα στη γραμμή με βλάστηση, ώστε να αυξηθεί το πάχος της ζώνης υπό συνθήκες κορεσμού ώστε να αυξηθεί η κατανάλωση οργανικού φορτίου από

χημειοτερότροφους μικροοργανισμούς και η ανοξική οξείδωση της αμμωνίας.

2. Ανακυκλοφορία της εξόδου στο δεύτερο στάδιο για επιπλέον απομάκρυνση ολικού αζώτου και φωσφορικών.
3. Αύξηση του αριθμού των δόσεων που εφαρμόζονται στο σύστημα την ημέρα τροφοδοσίας με αντίστοιχη μείωση του όγκου που εφαρμόζεται σε κάθε δόση.
4. Το φθινόπωρο πρέπει οπωσδήποτε να γίνει συγκομιδή της βλάστησης για να αποφευχθεί το φαινόμενο της επαναισροής θρεπτικών στο σύστημα.
5. Ίσως θα έπρεπε να γίνουν πειράματα προσρόφησης θειικών αντίστοιχα με αυτά που έγιναν αρχικά για τα φωσφορικά.
6. Μάλλον θα έπρεπε το υπόστρωμα να έχει μεγαλύτερο ύψος που να έφτανε τουλάχιστον τα 80 εκατοστά για μεγαλύτερο χρόνο παραμονής του λύματος στο πρώτο στάδιο κάθε γραμμής.

Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά και είναι όπως τα περιμέναμε με βάση τη βιβλιογραφία: μεγάλη απόδοση στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου αμμωνίας και στερεών και μικρότερη η απομάκρυνση ολικού αζώτου και φωσφορικών. Βέβαια αν δεν περάσει ένας ολόκληρος χρόνος ώστε το σύστημα να λειτουργήσει και κάτω από τελείως διαφορετικές συνθήκες, για παράδειγμα καιρικές ή διαφορετικό στάδιο στον κύκλο ζωής της βλάστησης, δεν μπορούμε να βγάλουμε συμπέρασμα με ασφάλεια. Πρέπει να αναφερθεί ότι το πείραμα έγινε με πολύ ισχυρό λύμα. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι είναι ένα σύστημα που στην πλειοψηφία των περιπτώσεων έχει εφαρμογή σε αγροτικές περιοχές με λύμα πιο 'αδύναμο' σε σύγκριση με αυτό που γινόταν η τροφοδοσία οπότε να το σύστημα είχε, αν όχι την ίδια, αλλά παραπλήσια απόδοση τότε τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων στην έξοδο πιθανόν θα ήταν διαφορετικά. Άλλωστε η ικανότητα των τεχνητών υδροβιοτόπων να επεξεργάζονται τα αστικά λύματα είναι αδιαμφισβήτητη. Μέσα σε όλα αυτά θα πρέπει να συμπεριληφθεί και το φτηνό κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Αυτός είναι και ο λόγος που οι τεχνητοί υδροβιότοποι αποτελούν ικανή λύση για σωστή διαχείριση υγρών αποβλήτων σε αποκεντρωμένες περιοχές.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- COD (ppm)

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
MEAN	1101	375	430	90	61
SD	512	212	280	74	83
MIN	393	89	72	< 20	< 20
MAX	> 2000	883	1058	356	405

- BOD₅ (ppm)

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
MEAN	699	263	277	71	48
SD	360	141	160	41	42
MIN	250	120	70	10	5
MAX	1700	600	750	170	200

- TN (ppm)

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
MEAN	45.9	29.2	33.7	11.2	13.7
SD	15.9	11.3	11.5	5.9	5.8
MIN	24.5	14.6	19.0	4.0	6.0
MAX	95.7	60.2	66.8	23.2	28.4

- NH₄ – N (ppm)

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
MEAN	20.5	10.7	11.6	2.9	6.1
SD	10.6	7.2	7.8	3.6	4.0
MIN	7.2	2.7	3.4	0.01	1.1
MAX	54.1	35.6	40.2	13.5	17.4

- SO_4^{2-} (ppm)

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
MEAN	20.3	19.1	20.6	9.4	10.8
SD	6.0	5.3	5.5	3.0	5.7
MIN	7.1	7.6	10.7	4.9	5.6
MAX	35.8	28.3	31.1	16.0	28.4

- PO_4^{3-} (ppm)

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
MEAN	10.8	7.4	8.7	3.7	7.0
SD	5.6	3.9	3.9	2.1	1.5
MIN	2.2	2.1	1.8	0.8	3.6
MAX	27.0	18.9	18.7	6.6	9.9

- NO_3^- (ppm)

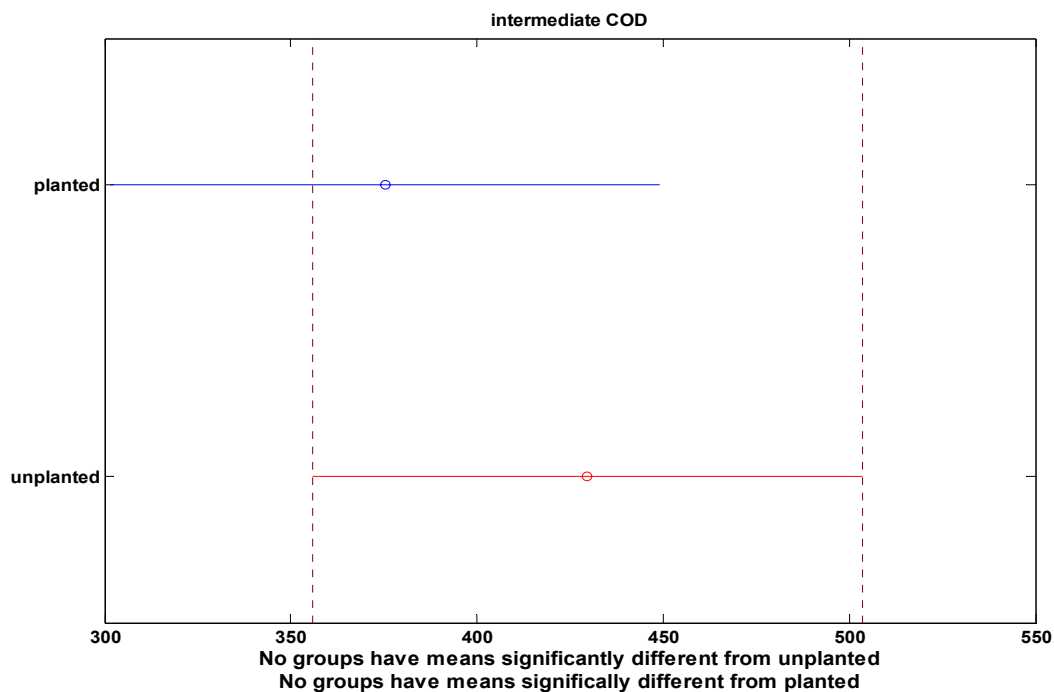
	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
MEAN	0.61	5.78	16.65	3.04	0.50
SD	1.20	6.07	16.87	3.32	0.37
MIN	0.20	0.20	0.27	0.20	0.20
MAX	6.04	18.80	57.68	9.28	1.59

- NO_2^- (ppm)

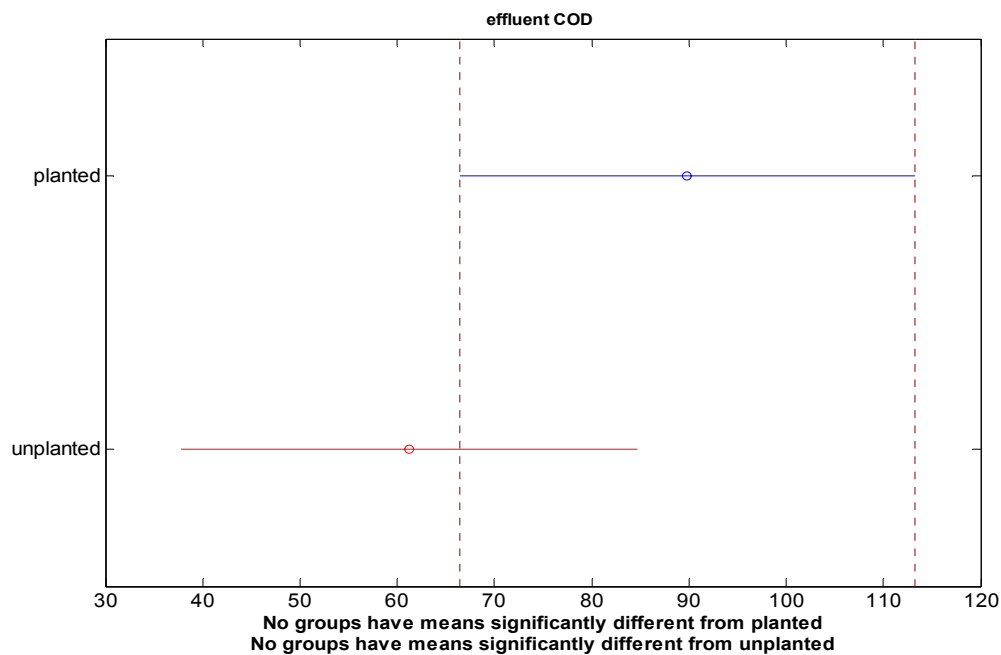
	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
MEAN	0.26	1.29	3.73	0.97	0.27
SD	0.12	1.41	3.53	1.92	0.12
MIN	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
MAX	0.72	6.38	12.62	9.28	0.58

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΟΒΑ1

- COD

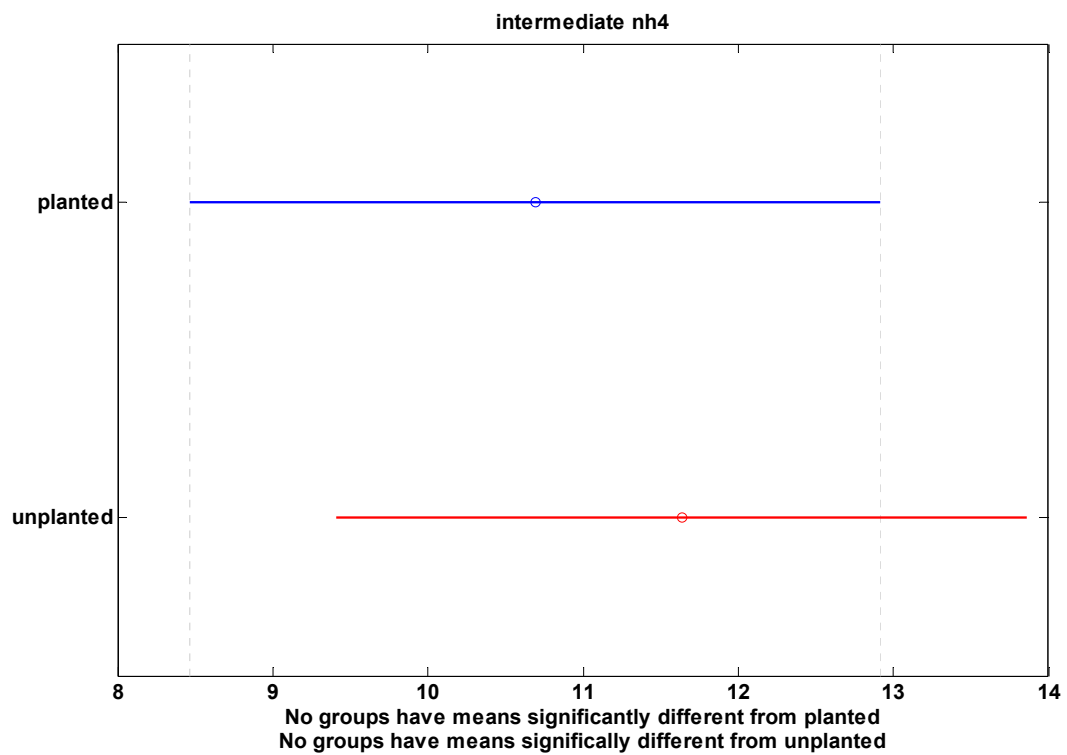


ANOVA1 για τις συγκεντρώσεις του COD στα ενδιάμεσα σημεία δειγματοληψίας της μονάδας

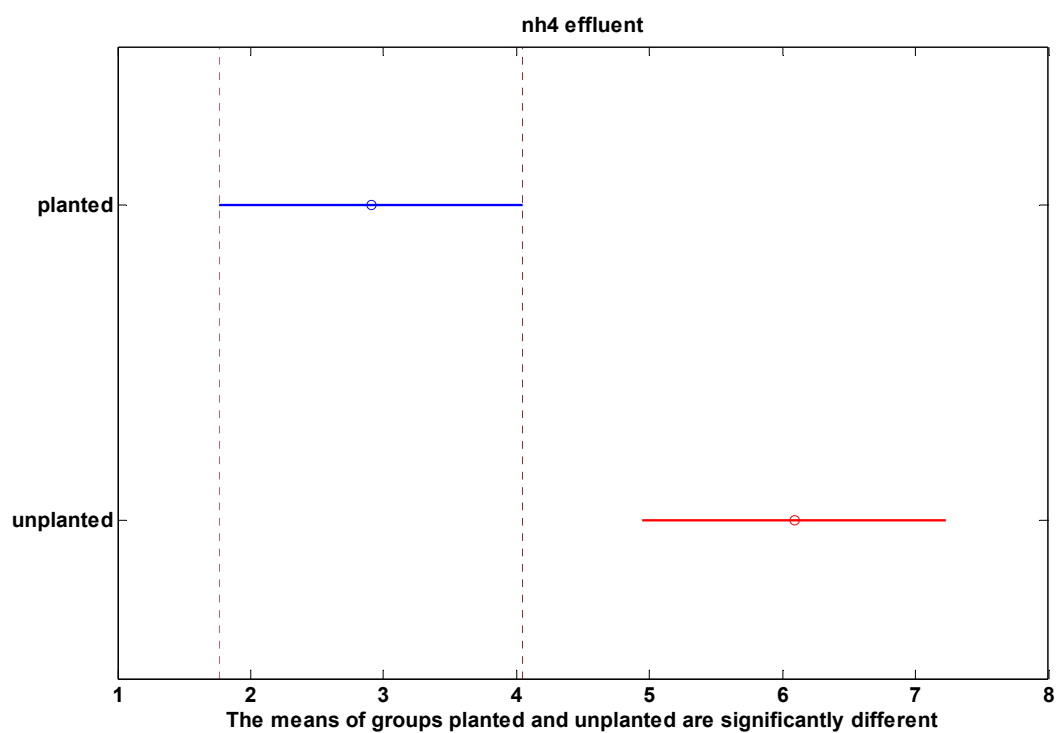


ANOVA1 για τη συγκέντρωση του COD στην έξοδο της μονάδας

- $\text{NH}_4 - \text{N}$

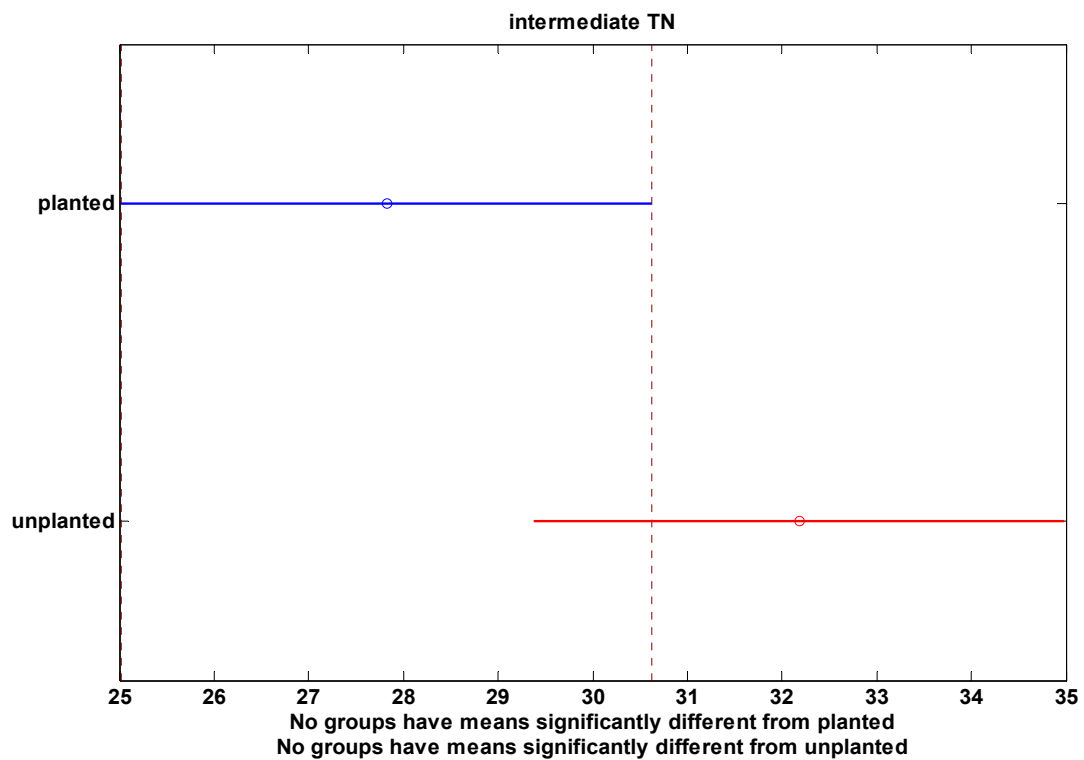


ANOVA1 ανάλυση για τις ενδιάμεσες συγκεντρώσεις αμμωνίας

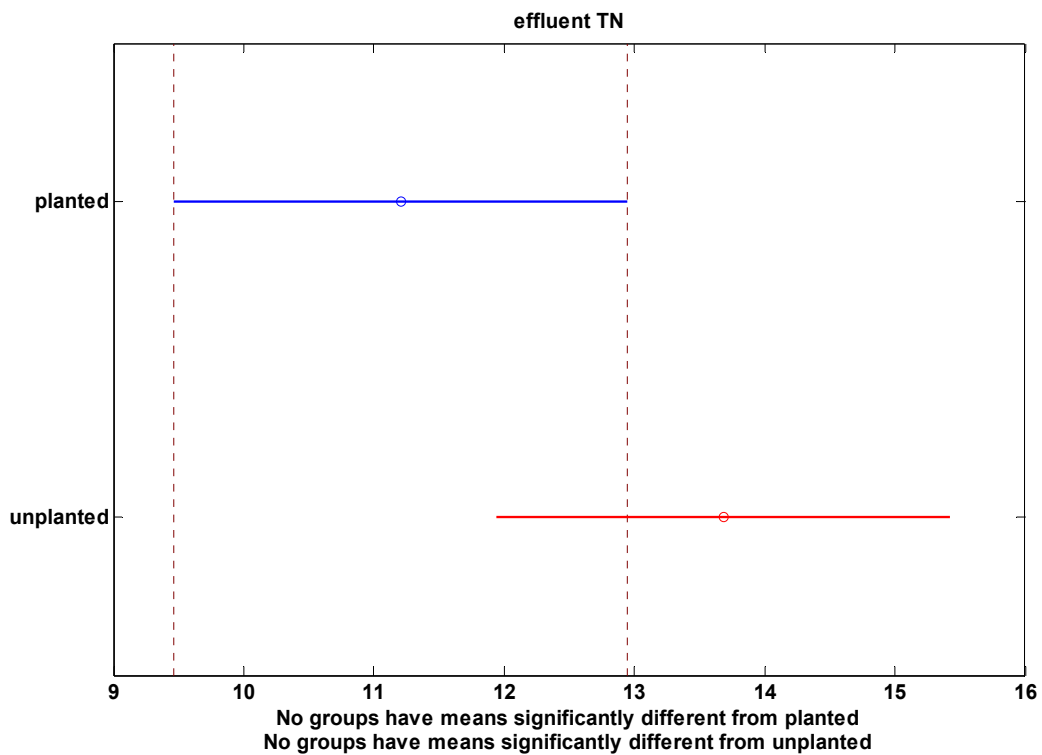


ANOVA1 ανάλυση για την αμμωνία στην έξοδο

- TN

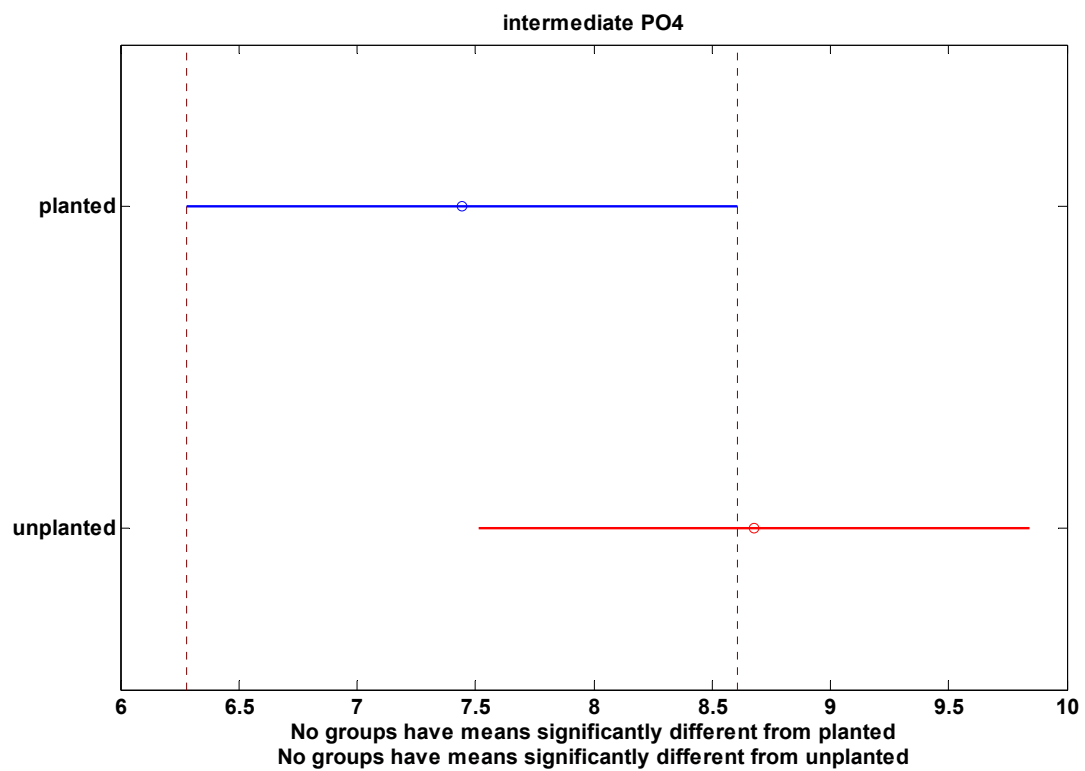


ANOVA1 ανάλυση για ολικό άζωτο στα ενδιάμεσα σημεία

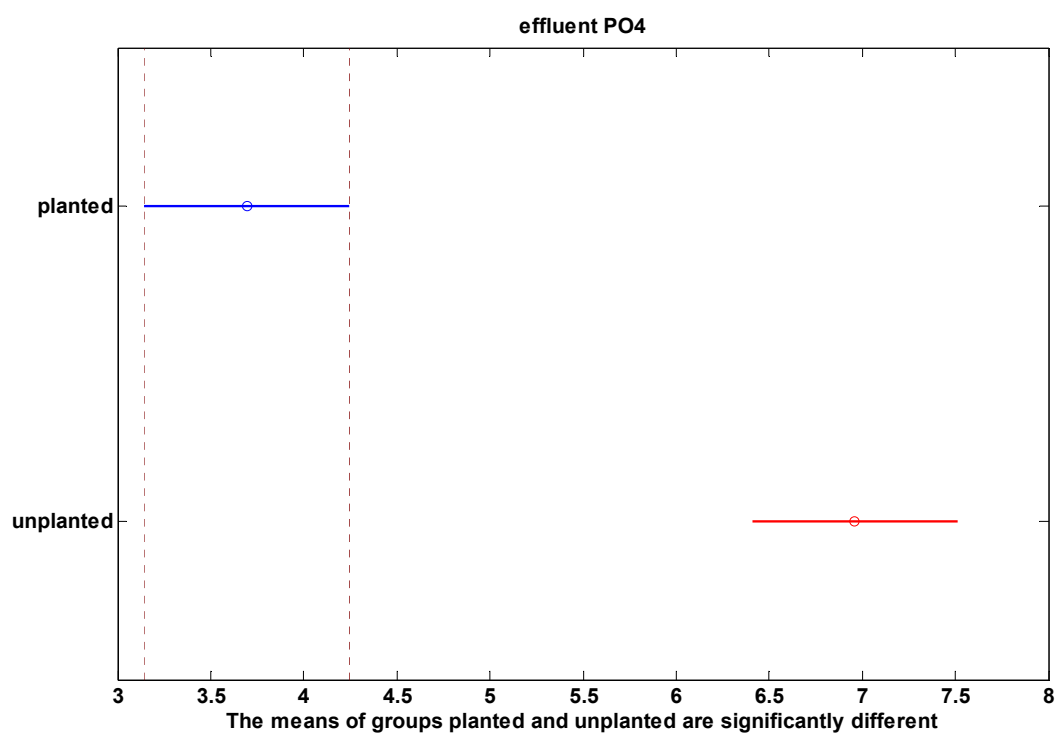


ANOVA1 ανάλυση για ολικό άζωτο στην έξοδο

- PO_4^{3-}

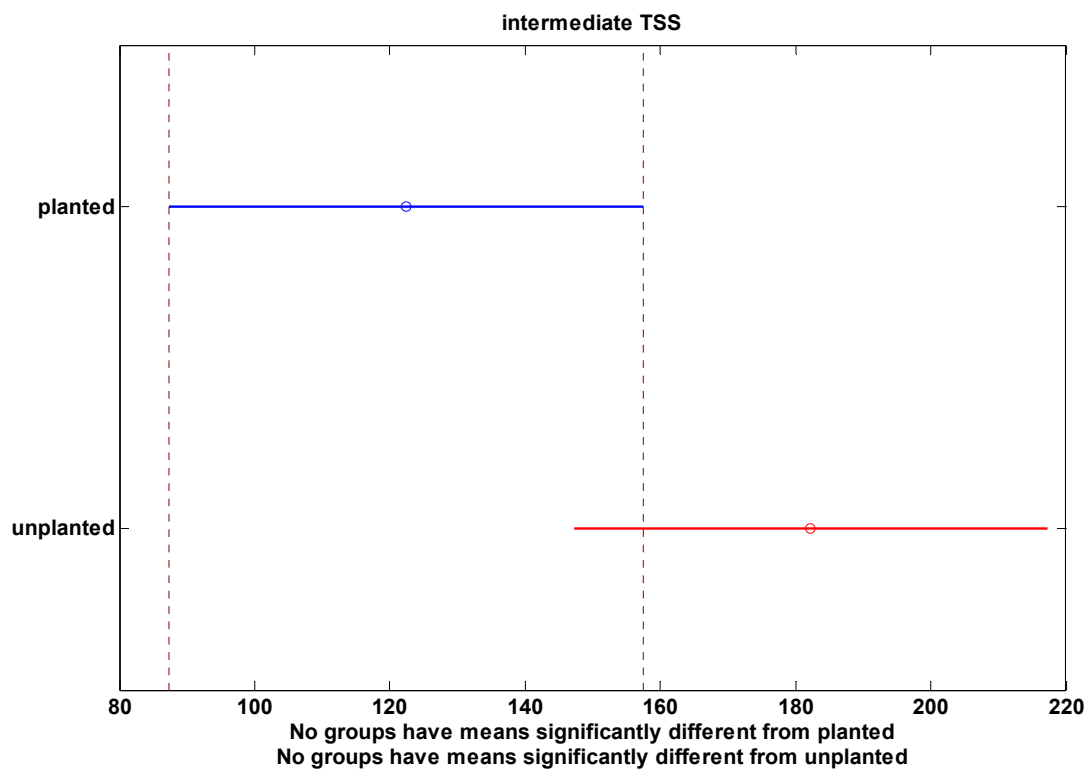


ANOVA1 ανάλυση για τη συγκέντρωση των φωσφορικών στα ενδιάμεσα σημεία

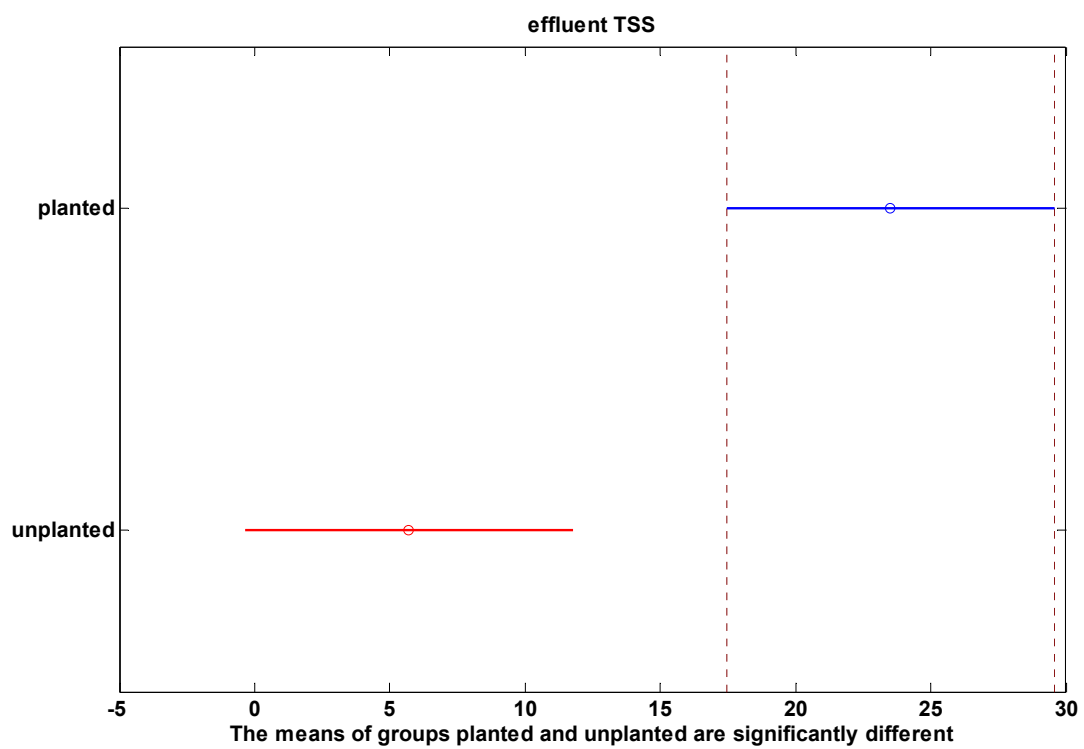


ANOVA1 ανάλυση για τη συγκέντρωση των φωσφορικών στην έξοδο

- SS



ANOVA1 ανάλυση για τις ενδιάμεσες συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών



ANOVA1 ανάλυση για τις συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στην έξοδο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Brix, Hans. Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development present status and future perspectives. Water Science and Technology. Volume 30, issue 30, pp209-223
2. Blazejewski Ryszard and Blazejewska Sadsiz Murat. Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow. Water Science and Technology, volume 35, issue 5, pp183-188, 1997
3. Cooper P. A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment systems. Water Science and Technology, volume 40, issue 3, pp 1 – 9.
4. Cooper Paul. The performance Of Vertical Flow Constructed Wetland systems with special reference to the significance of oxygen Transfer and Hydraulic Loading Rates
5. Crites and Tchobanoglous. Small and Decentralized Wastewater Management Systems. McGraw Hill. 1998
6. G.Langergraber. The role of plant uptake on the removal of organic matter and nutrients in subsurface flow constructed wetlands – A simulation study
7. Gopal, Brij. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems. Water Science and Technology. Volume 40, issue 3, pp 27-35
8. Green M. Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetland utilizing a passive air pump. Water Research volume 32, issue 12, pp 3513 – 3520.
9. Halverson Nancy. Review of constructed wetlands subsurface flow vs. surface flow wetlands. Westinghouse Savannah River Company, September 2004
10. Hammer D. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment Municipal, Industrial and Agricultural. Lewis Publishers

11. Ingersoll L. Todd. Nitrate removal in wetland microcosms. *Water Research*, volume 32, issue 3, pp 677 – 684
12. Interstate Technology & Regulatory Council. Technical and Regulatory Guidance Document for Constructed Treatment Wetland. December 2003
13. K.P Tsagarakis, D.D Mara, A.N Angelakis. Wastewater management in Greece: experience and lessons for developing countries. *Water Science and Technology* Vol 44(6) 163-172 2001
14. Karahtanasis A.D. Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological Engineering*, volume 20, pp 157 - 169
15. Lantze I.R. A model of factors controlling orthophosphate removal in planted vertical flow. *Ecological Engineering* volume 12, 1999, pp 93 – 105
16. Lienard A et.al. How to treat sewage with constructed wetlands : An overview of the French systems
17. Lienard Alain, Molle Pascal. Constructed wetlands for Wastewater Treatment in France: from experience to design and operation recommendations. Cemagref, Water Quality and Pollution control Research Unit.
18. Plantzer C. Design Recommendations for a subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. *Water Science and Technology* volume 40, issue 3, pp 257 – 263.
19. Rivera F. Removal of pathogens from wastewaters by the root zone method (rzm). *Water Science and Technology*, volume 32, issue 3, pp 211 – 218
20. Sakadevan K., Bavor H.J. Phosphate adsorption characteristics of soils slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetlands. *Water Research*, volume 32, issue 2, pp 393 – 399
21. Shutes R.B.E. Artificial wetlands and water quality improvement. *Environment International*, v26, pp 441-447, 2001.

22. Stottmeister, U. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, volume 22, 2003, pp 93 – 117
23. Tanner C. Chris. Plants for constructed wetland treatment systems – A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological Engineering*, volume 7, 1996, pp 59 – 83
24. U.S Department of Agriculture
25. U.S E.P.A National Risk management Research Laboratory Office of Research and Development. Manual – Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters.. EPA/625/R-99/010 September 1999
26. U.S E.P.A Office of Research and Development Design Manual Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. EPA/625/1-88/022 September 1988
27. U.S E.P.A Office Of Water. Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment, A Technology Assessment. EPA 832-R-93-008 July 1993
28. Vladimir Novotny and Harvey Olem. Water quality : prevention, identification, and management of diffuse pollution. New York :Van Nostrand Reinhold, 1994.
29. Voisin Jean, Paing Joelle. Vertical flow constructed wetlands for municipal wastewater and septage treatment in French rural area.
30. Weedon C.M. Compact vertical flow constructed wetland systems – first two years' performance. *Water Science Technology*, volume 48, issue 5, pp 15 – 23.
31. Winter K.J ,Goetz D. the impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetland. *Water Science and Technology*, volume 48, issue 5, pp 9 - 14
32. Wood M. Environmental Soil Biology. Tertiary Level Biology. BLACKIE ACADEMIC & PROFESSIONAL
33. Yang Lei, Chang Hui – Ting, Huang Mong – Na lo. Nutrient removal in gravel and soil - based wetlands microcosms with and without vegetation. *Ecological Engineering* volume 18, 2001, pp 91 – 105

34. Αγγελάκης Α.Ν. Διαχείριση Αστικών Υγρών Αποβλήτων. Ένωση Δημοτικών Επιχειρήσεων Ύδρευσης και Αποχέτευσης Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης , 2004
35. Προχάσκα Χαρίκλεια. Μελέτη της επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων με χρήση φυσικών συστημάτων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2005
36. Τσαγκάρης Κ. Πανεπιστημιακές σημειώσεις για το μάθημα : «Διαχείριση υγρών αποβλήτων», 2004 Πολυτεχνείο Κρήτης