ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επεξεργασία υγρών απόβλητων κτηνοτροφικής μονάδας σε σύστημα τεχνητού υγροβιότοπου»

Βοροστσούκ Ιρίνα

Εξεταστική επιτροπή:

Δρ. Διαμαντόπουλος Ευάγγελος (επιβλέπων)

Δρ. Μανζαβίνος Διονύσιος

Δρ. Βενιέρη Δανάη

ΧΑΝΙΑ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στην παρακάτω πτυχιακή εργασία με την πολύτιμη στήριξη τους. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Διαμαντόπουλο Ευάγγελο που μου εμπιστεύτηκε το συγκεκριμένο θέμα. Επίσης ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην Λουπασάκη Ελευθερία που με βοήθησε ουσιαστικά και πραγματικά να τα βγάλω εις πέρας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθ. Κελεσίδη Βασίλειο, επιστημονικό υπεύθυνο του προγράμματος «Επιλύων» στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη σε θεωρητικό, σχεδιαστικό και πιλοτικό επίπεδο, μιας μονάδας τεχνητού υγροβιότοπου για την επεξεργασία κτηνοτροφικών απόβλητων στις αγροτικές φύλακες της Αγιάς. Ο σχεδιασμός στηρίχτηκε στη λειτουργία μιας πιλοτικής μονάδας που είχε κατασκευαστεί ήδη στο χώρο του εργαστηρίου Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος. Το είδος του τεχνητού υγροβιότοπου που κατασκευάστηκε ήταν κάθετης ροής. Τα υγρά κτηνοτροφικά απόβλητα που επεξεργαστήκαν ήταν του βουστασίου των φυλακών Αγιάς. Πριν ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία στην πιλοτική μονάδα έγιναν μετρήσεις πεδίου για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των υγρών απόβλητων. Επίσης κατασκευάστηκε μια πιλοτική μονάδα δεξαμενής καθίζησης, ώστε να σχεδιαστεί μια πρωτοβάθμια δεξαμενή καθίζησης πριν τον τεχνητό υγροβιότοπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ανεξέλεγκτη απόρριψη κτηνοτροφικών απόβλητων δημιουργεί σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Έχει πολλές φόρες καταγγελθεί ότι ποσότητες κτηνοτροφικών απόβλητων καταλήγουν σε μη εγκεκριμένους χώρους απόθεσης. Οι συνέπειες αυτής της περιβαλλοντικής μη αποδεκτής διαχείρισης των απόβλητων δημιουργούν κινδύνους αυξημένης πιθανότητας ρύπανσης των επιφανειακών νερών. Στην προσπάθεια επεξεργασίας των κτηνοτροφικών μονάδων έχουν γίνει διάφορες μελέτες για τη δημιουργία εγκαταστάσεων επεξεργασίας κτηνοτροφικών απόβλητων.
Στην παρούσα εργασία θα εξεταστεί η επεξεργασία κτηνοτροφικών απόβλητων στις αγροτικές φύλακες της Αγιάς. Ο τρόπος επεξεργασίας θα γίνει με τη χρήση τεχνητού υγροβιότοπου.

Η χρήση του τεχνητού υγροβιότοπου ξεκίνησε πριν από 40 χρόνια σε Βόρεια Αμερική και Ευρώπη (Shutes, 2001). 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 οι επιστήμονες παρατήρησαν 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 κλπ.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι κατασκευή και η λειτουργία μιας πιλοτικής μονάδας τεχνητού υγροβιότοπου, η οποία θα επεξεργάζεται τα υγρά απόβλητα από τους στάβλους των αγροτικών φυλακών της Αγιάς.

Η διπλωματική εργασία συνολικά περιλαμβάνει :

- Ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των παραγομένων κτηνοτροφικών απόβλητων.
- Δειγματοληψία στα αποστραγγιστικά κανάλια οπού φτάνει η εκροή των κτηνοτροφικών απόβλητων.
- Επεξεργασία κτηνοτροφικών απόβλητων με πιλοτική μονάδα τεχνητού υγροβιότοπου.
- Κατασκευή πιλοτικής μονάδος δεξαμενής καθίζησης.
- Διαστασιολόγηση μονάδων (δεξαμενής καθίζησης, τεχνητού υγροβιότοπου) πλήρους κλίμακας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Κτηνοτροφικά απόβλητα

2.1.1 Όγκος

Ο παραγόμενος μέσος ημερήσιος όγκος μικτών υγρών αποβλήτων (ούρα, κοπριά και νερά πλύσεως) μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά για ελληνικές συνθήκες:

1. Για χοίρους με μέσο βάρος 70kg, σε 7-10 λίτρα / ημέρα δηλαδή περίπου 120 λίτρα / ημέρα * 1000kg ζωντανού βάρους (ΖΒ)

2. Για μοσχάρια με μέσο βάρος 400kg, σε 35 - 50 λίτρα ανά ημέρα δηλαδή περίπου 100 λίτρα / ημέρα * 1000kg ζωντανού βάρους

3. Η κοπριά, που λαμβάνεται με μηχανικό διαχωρισμό από τα πιο πάνω μικτά απόβλητα, αντιπροσωπεύει σε όγκο περίπου 45%

Γενικότερα για τη μελέτη και σχεδίαση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας και διαθέσεως των αποβλήτων των κτηνοτροφικών μονάδων αν δεν υπάρχουν ακριβέστερα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία του Πίνακα 1 για τα πιο συνηθισμένα είδη ζώων (Φραγκάκη, 2008).

Πίνακας 1: Ενδεικτικά στοιχεία κατανάλωσης νερού και παραγωγής κοπριάς από σύγχρονες κτηνοτροφικές μονάδες.

Είδος ζώων	Είδος σταβλισμού	Μέγεθος ζώων Kg/κεφ.	Χρόνος εκτροφής/ημέρες	Κατανάλωση νερού 1/κεφ.ημ.	Κοπριά	
					Kg/κεφ.ημ.	Kg T Z.B.ημ.
1	2	3	4	5	6	7
1.ΠΟΥΛΕΡΙΚΑ						
▪ Κρεατοπαραγωγή	Στεγασμένος (στρωμνή)	0-2	40-60	0,1-0,2	0,05-0,06	
▪ Αυγοπαραγωγή	Στεγασμένος (κλουβιά ή στρωμνή)	1,5-2	400	0,15-0,2	0,1-0,2	66
▪ Γαλοπούλες	Ανοιχτός	2-4	120-170	0,3-0,5	0,3-0,6	
▪ Πάπιες	Ανοιχτός - υγρός	0,5-4	40-60	40-130	-	
2. ΒΟΟΕΙΔΗ						
▪ Γαλακτοφόρες αγελάδες	Βουστάσιο Ελεύθερο βουστάσιο	500-650 500-650	- -	60-320 100-130	40-60 40-60	94
▪ Μοσχάρια	Με προαύλιο Ανοικτός Στεγασμένος	500-650 250-500 250-500	- 100-180 100-180	120-320 40-120 40-120	40-60 2-20 10-30	46

	(σχαρωτό ή συμπαγές δάπεδο)					
3.ΧΟΙΡΙΝΑ	Άνοιχτός ή στεγασμένος (χωμάτινο, σχαρωτό ή συμπαγες δάπεδο	20-100	150-180	4-20	1-5	51
4.ΠΡΟΒΑΤΑ						
▪ Αρνιά	Στεγασμένος	30-60	40-150	4-7	1,5-3	
▪ Πρόβατα	Ανοιχτός ή στεγασμένος	50-100	40-150	7-13	2-4	36
5.Άλογα	Στάβλος	300-600	-	30-40	20-60	
Πηγή: στοιχεία από "animal waste" E.Taiganides, WHO, Kopenhagen,1978						

2.1.2 Ρυπαντικά φορτία

Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση του φορτίου ρύπανσης των αποβλήτων, περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, εκτός από τον όγκο, το βιοχημικά και χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5, COD), τα ολικά και πτητικά στερεά, το ολικό άζωτο (N), το φώσφορο (P_2O_5) και το κάλιο (K_2O) . (Φραγκάκη, 2008)

Ο υπολογισμός των παραμέτρων αυτών γίνεται με αναφορά στο ζωντανό βάρος. Για τη σχεδίαση των εγκαταστάσεων θεωρείται ότι τα απόβλητα είναι ανάλογα με το ολικό ζωντανό βάρος των ζώων. Στον Πίνακα 2 δίνονται ενδεικτικά στοιχεία για τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων ορισμένων ειδών εκτρεφόμενων ζώων. Η πυκνότητα των υγρών αποβλήτων των κτηνοτροφικών μονάδων από πλευρά ρυπαντικού φορτίου (π.χ. BOD_5) εξαρτάται τελικά από τον ημερήσιο όγκο των αποβλήτων (αποχωρήματα, ούρα, νερά καθαρισμού δαπέδων) ανά μονάδα ζωικού πληθυσμού (π.χ. 1000kg ΖΒ) και είναι συνάρτηση του είδους των εκτρεφόμενων ζώων, των συνθηκών σταβλισμού και των τοπικών συνηθειών των κτηνοτρόφων.

Πίνακας 2: Ενδεικτικά στοιχεία για τα χαρακτηριστικά των απόβλητων ορισμένων ειδών εκτρεφόμενων ζωών.

Παράμετρος	Ποσότητα, kg/ημ. × 1000 kg. Ζ.Β.*					
	Συμβολισμός	Κόττες αυγοπαραγωγής	Γαλακτοφόρες αγελάδες	Μοσχάρια	Χοιρινά	Πρόβατα
1	2	3	4	5	6	7
1. Υγρά απόβλητα (αποχωρήματα και ούρα: ουροκόπρος)	TWW	66	94	46	51	36
2. Βιοχ. απαιτ. οξυγόνο	BOD_5	3,6	1,8	1,3	2,2	0,9
Ισοδύναμο πληθυσμού (άτ./1000 kg. Ζ.Β.)	PE**	67	33,5	24	41	16,7
3. Σχέση COD/BOD_5	Λόγος	4,3	7,2	5,7	3,3	12,8
4. Ολικά στερεά	TTS	16,8	8,8	7,9	6,9	10,7
5. Πτητικά στερεά	TVS	12,2	7,2	6,5	5,7	9,1
6. Ολικό άζωτο	N	0,99	0,36	0,55	0,39	0,43
7. Φωσφόρος (1)	P_2O_5	0,77	0,10	0,08	0,17	0,15
8. Κάλιο	K_2O	0,35	0,15	0,13	0,10	0,31

(1) Για τον υπολογισμό του στοιχειακού P: (πολλαπλ.) × 0.44.
Για τον υπολογισμό του στοιχειακού K: (πολλαπλ.) × 0.83
* Ζ.Β. = ζωντανό βάρος ζώων (TLW = Total live weight)
** P.E. = Population equivalent (ισοδύναμο πληθυσμού, βλ. παρ. 2.3, β. 1) (υπολογίστηκε με βάση: BOD_5 = 54 g/ατ. ημ.).

ΠΗΓΗ: Animal waste, E. Taïganides, WHO, Kopenhagen, 1978

2.1.3 Ισοδύναμος πληθυσμός

Το πληθυσμιακό ισοδύναμο (P.E. Population equivalent) μιας πηγής ρύπανσης προσδιορίζεται με διαίρεση του ημερήσιου οργανικού φορτίου (kg BOD_5/ανά ημέρα) με την τιμή 54g/άτομο ανά ημέρα που αντιστοιχεί συμβατικά (ευρωπαϊκές συνθήκες) σε κάθε άτομο.

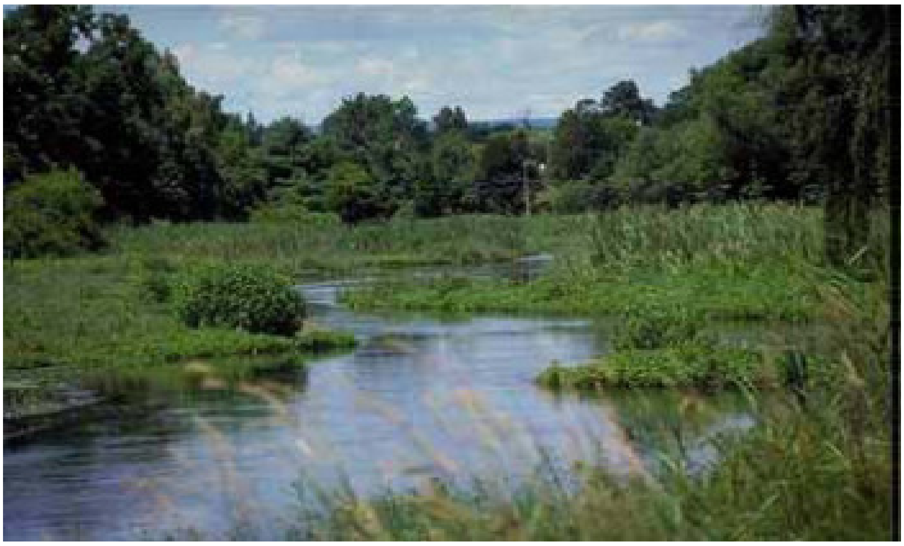
Στην περίπτωση πάντως των ζωικών αποβλήτων, η ισοδυναμία αυτή είναι χονδρικά μόνο αντιπροσωπευτική, γιατί το BOD_5 αυτών των αποβλήτων αποτελεί λιγότερο από 60% (κυμαίνεται από 16-60%) του ολικού BOD, ενώ για τα αστικά λύματα είναι 80% περίπου (68-94% για τις ανθρακούχες ενώσεις). Επομένως η τελική, δηλαδή η συνολική οργανική φόρτιση του αποδέκτη, θα είναι μεγαλύτερη (περίπου διπλάσια) στην περίπτωση των ζωικών αποβλήτων από την αντίστοιχη του πληθυσμιακού ισοδύναμου των αστικών λυμάτων. (Φραγκάκη, 2008)

2.2 Υγροβιότοποι – ορισμός

Ως υγροβιότοποι ορίζονται περιοχές οι οποίες είτε πλημμυρίζουν από επιφανειακό νερό, είτε τα εδάφη τους βρίσκονται σε κατάσταση κορεσμού λόγω της υψηλής στάθμης του υπόγειου νερού, τόσο συχνά και με τέτοια διάρκεια, ώστε να έχουν χαρακτηριστικά εδάφη, να υποστηρίζουν βλάστηση που έχει προσαρμοσθεί σε υγρές συνθήκες και να λαμβάνουν χώρα σε αυτές τις περιοχές βιολογικές λειτουργίες και δραστηριότητες προσαρμοσμένες στο υγρό περιβάλλον (Τσιχριντζής, 2000).

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

Οι υγροβιότοποι αποτελούν τμήματα του εδάφους κατακλυζόμενα με νερό, συνήθως μικρού βάθους (μικρότερο των 0,6 m), στα οποία αναπτύσσονται φυτά όπως είναι: διάφορα είδη κύπερης, καλάμια, είδη βούρλων και άλλα είδη ψαθιού και αφράτου. Η φυτική βλάστηση προσφέρει το βασικό υπόστρωμα ανάπτυξης των βακτηριακών μεμβρανών, βοηθά στη διήθηση και την προσρόφηση συστατικών των αποβλήτων, μεταφέρει οξυγόνο στη μάζα του νερού και περιορίζει την ανάπτυξη αλγών με τον έλεγχο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Στην επεξεργασία των ρυπασμένων υδάτων έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο τεχνητοί, όσο και φυσικοί υγροβιότοποι. Οι φυσικοί όμως υγροβιότοποι έχουν περιορισμένη χρήση που συνίσταται στην αποδοχή και/ή περαιτέρω επεξεργασία εκροών δευτεροβάθμιας ή ακόμη προωθημένης επεξεργασίας (Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995).



Εικόνα 1: Υγροβιότοπος(Πηγή:www.umt.edu/chemistry/wetlands/data.htm)

2.2.1 Φυσικοί υγροβιότοποι (Natural wetlands)

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

Στις ΗΠΑ υπολογίζεται ότι έχει καταστραφεί το 35 έως 50% των φυσικών υγροβιοτόπων λόγω αποστράγγισης ή επιχωμάτωσης της επιφάνειας έκτασης που καταλάμβαναν (Tsihrintzis, 1999). Τα τελευταία έτη, οι φυσικοί υγροβιότοποι προστατεύονται μέσω διεθνών συμβάσεων, όπως είναι η συνθήκη Ramsar (www.ramsar.org) και η Διάσκεψη του Ρίο για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (Agenda 21) (www.un.org), οι οποίες έχουν προσυπογραφεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα. Έτσι, η οποιαδήποτε μετατροπή της υδρολογικής κατάστασης κάποιου φυσικού υγροβιοτόπου είναι εξαιρετικά δύσκολο να λάβει χώρα (Τσιχριντζής, 2000).

Οι περισσότεροι φυσικοί υγροβιότοποι είναι συστήματα επιφανειακής ροής που περιλαμβάνουν βαλτώδη βλάστηση (βασική βλάστηση βρυών, βλάστηση γρασιδιού και αναδυόμενα μακρόφυτα) (US.EPA, 2000).

Οι φυσικοί υγροβιότοποι μπορούν να θεωρηθούν ως υδατικοί αποδέκτες. Υπάρχουν σχετικά λίγα παραδείγματα φυσικών υγροβιοτόπων για επεξεργασία ρυπασμένου ύδατος στις ΗΠΑ. Επειδή κάθε εκροή σε ένα φυσικό υγροβιότοπο πρέπει να ικανοποιεί τα όρια του Εθνικού Μολυσματικού Συστήματος Απαλλαγής Αποβολών (NPDES), αυτοί οι υγροβιότοποι χρησιμοποιούνται τυπικά για προχωρημένη επεξεργασία (US.EPA, 2000). Τροποποιήσεις σε υπάρχοντες υγροβιοτόπους με σκοπό τη βελτίωση των συνθηκών επεξεργασίας πρέπει γενικά να αποφεύγονται, γιατί είναι πιθανόν να προξενήσουν προβλήματα στο οικοσύστημα (Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995).

Στην πλειονότητα των Πολιτειών των ΗΠΑ δεν γίνεται διάκριση μεταξύ ενός υγροβιοτόπου και των γειτονικών επιφανειακών νερών και παρουσιάζονται οι ίδιες απαιτήσεις και στα δύο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, από οικονομικής απόψεως δεν ευνοείται η χρησιμοποίηση φυσικών υγροβιοτόπων στη διαδικασία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, αφού η βασική επεξεργασία πρέπει να παρασχεθεί πριν την απόρριψη στον υγροβιότοπο (Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995). Η χρήση φυσικών υγροβιοτόπων για άμεση επεξεργασία λυμάτων επιπλέον δημιουργεί προβλήματα μηχανικής απόψεως, έχοντας επιπτώσεις στην απόδοση του συστήματος.

Το υδραυλικό καθεστώς στους περισσότερους φυσικούς υγροβιοτόπους έχει αναπτυχθεί για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μπορεί να είναι «υγρό», όμως λόγω της δημιουργίας καναλιών στη ροή το μεγαλύτερο κομμάτι της ροής διαμέσου του υγροβιοτόπου εμφανίζεται διαμέσου ενός σχετικά μικρού μέρους της συνολικής περιοχής. Στην ακραία περίπτωση, μόνο 10% της επιφάνειας του υγροβιοτόπου ίσως έλθει σε επαφή με τα λύματα που εισάγονται στον υγροβιότοπο, οπότε μόνο το 10% της συνολικής περιοχής μπορεί να θεωρηθεί ως αποτελεσματικό στην επεξεργασία. Θεωρείται απίθανο να διορθωθεί το πρόβλημα αυτό με ισοπέδωση του εδάφους ή κάποια άλλη δραστηριότητα του μηχανικού και να συνεχίζεται να συντηρείται η αξία που είχε αρχικά ο φυσικός υγροβιότοπος (Reed et al., 1995).

2.2.2 Τεχνητοί υγροβιότοποι οριζόντιας και υπόγειας ροής (Free water surface and subsurface flow constructed wetlands)

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, που βασίζεται στη χρησιμοποίηση υδροχαρών φυτών, όπως νεροκάλαμα, βούρλα και ψαθί. Σε τέτοια συστήματα η εφαρμογή αποβλήτου λαμβάνει χώρα πάνω ή κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Reed et al., 1984). Η δημιουργία και η απόδοση των υγροβιοτόπων πρέπει να πραγματοποιείται μέσω οικολογικά υγιών τρόπων. Η δημιουργία τεχνητού υγροβιοτόπου αναφέρεται στην κατασκευή του σε μια περιοχή όπου δεν υπήρχε υγροβιότοπος προηγουμένως. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι δεν έχουν υπολογισθεί με ακρίβεια στις ΗΠΑ, αλλά πιθανότατα είναι χιλιάδες (Mitsch, 1992).

Οι υγροβιότοποι θεωρούνται χαμηλού κόστους εναλλακτικές λύσεις για την επεξεργασία αστικών, βιομηχανικών και αγροτικών υγρών αποβλήτων. Από τεχνολογικής πλευράς οι τεχνητοί υγροβιότοποι προτιμώνται των φυσικών, επειδή έχουν περισσότερα μηχανικά συστήματα και είναι ευκολότερο να ελεγχθούν (Kadlec, 1995; Ayaz and Akca, 2001). Αυτή η νέα αναπτυσσόμενη τεχνολογία μπορεί να παρέχει χαμηλό κόστος και μικρές απαιτήσεις συντήρησης στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων, χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα χρήσιμα ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες (Haberl et al., 1995; Hammer,1989; Ayaz and Akca, 2001).

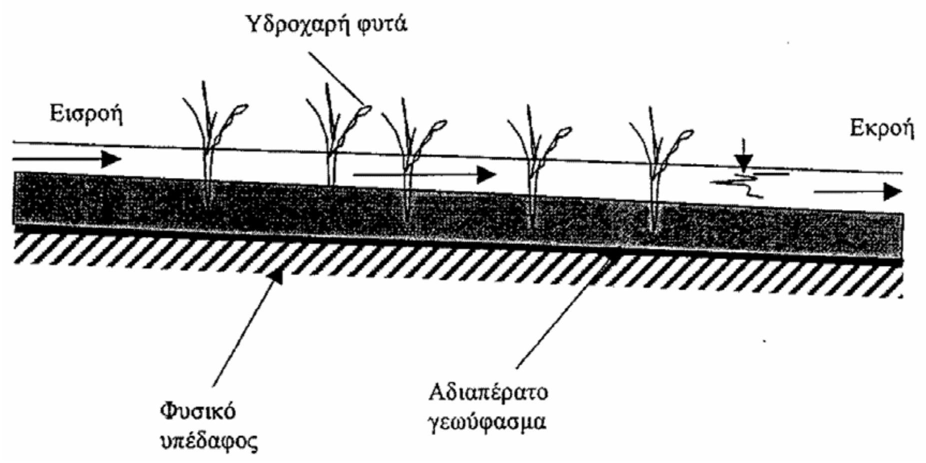
Η κατασκευή ενός υγροβιοτόπου σε μια περιοχή επιτρέπει την αποφυγή ρυθμίσεων και περιβαλλοντικών εμπλοκών που συνδέονται με τη διάθεση εκροών σε φυσικά οικοσυστήματα (όπως θεωρούνται οι φυσικοί υγροβιότοποι) και επιτρέπουν το σχεδιασμό του υγροβιοτόπου με σκοπό αποκλειστικά τη βέλτιστη επεξεργασία των ρυπασμένων υδάτων. Τυπικά, ένας τεχνητός υγροβιότοπος αποδίδει περισσότερο σε σχέση με ένα φυσικό ίσης έκτασης, εφόσον το έδαφος έχει προσεκτικά ισοπεδωθεί και στο υδραυλικό καθεστώς του συστήματος πραγματοποιείται σωστός έλεγχος.

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

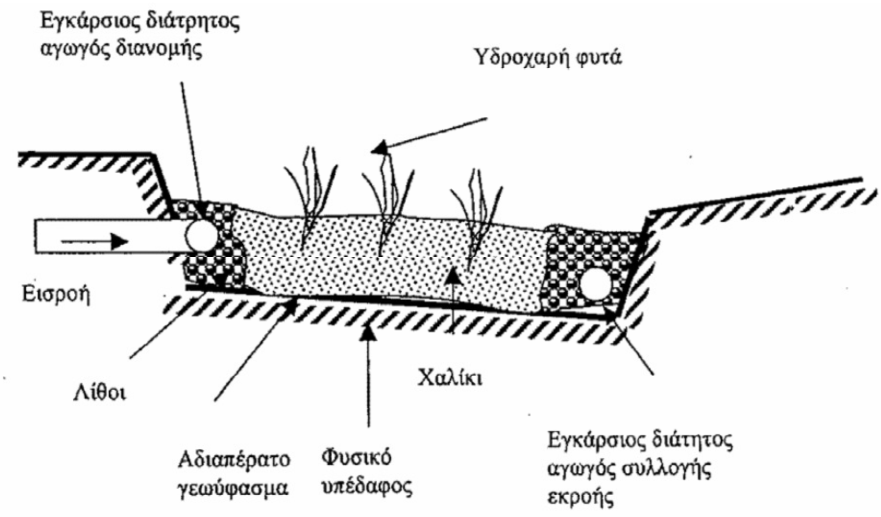
Οι τεχνητοί υγροβιότοποι όπως όλα τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας βασίζονται (σε μικρό ή μεγάλο βαθμό) στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, περιλαμβάνοντας την ηλιακή ακτινοβολία, την κινητική ενέργεια του ανέμου, την ενέργεια του νερού της βροχής, το επιφανειακό νερό, το έδαφος και την αποθήκευση ενδεχόμενης ενέργειας σε βιομάζα και στα εδάφη (Ζουραράκη, 2002). Οι τεχνητοί υγροβιότοποι σήμερα χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων, αποστραγγίσεων ορυχείων, αστικών απορροών, κτηνοτροφικών αποβλήτων, σηπτικών δεξαμενών που έχουν αστοχήσει, αγροτικών απορροών και διαφόρων βιομηχανικών αποβλήτων.

Τέτοια συστήματα επεξεργασίας εντοπίζονται σε περιοχές που βρίσκονται στο επίπεδο της θάλασσας έως περιοχές υψομέτρου 1500 μέτρων και από τροπικές έως ημιαρκτικές περιοχές, όπως στο Οντάριο του Καναδά και σε σκανδιναβικές χώρες. Αφού η λειτουργία τους βασίζεται σε χημικές και βιολογικές διαδικασίες, η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων μειώνεται σε κάποιο βαθμό κατά τη διάρκεια χαμηλών θερμοκρασιών, αλλά τα επίπεδα εκροής παραμένουν ικανοποιητικά και συνήθως κάτω από επιτρεπτά όρια (Hammer, 1992).

Για την επεξεργασία ρυπασμένων υδάτων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί δύο τύποι τεχνητών υγροβιοτόπων: α) Τεχνητοί υγροβιότοποι ελεύθερης επιφάνειας ή επιφανειακής ροής (free water surface wetland- FWS) (Εικόνα 2) και β) Τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής (ή υπόγειας) ροής (subsurface flow wetland- SFS) (Εικόνα 3).



Εικόνα 2: Τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής (Πηγή: Μάρκου, 2000).



Εικόνα 3: Τεχνητός υγροβιότοπος οριζόντιας υπόγειας ροής (Πηγή: Μάρκου, 2000).

Τα συστήματα επιφανειακής ροής αποτελούνται, συνήθως, από παράλληλες λεκάνες, κανάλια ή τάφρους με αδιαπέρατους πυθμένες, με αναφυόμενη φυτική βλάστηση και μικρό βάθος νερού (0,1 ως 0,6 m). Σε τέτοια συστήματα εφαρμόζονται συνεχώς προεπεξεργασμένα υγρά απόβλητα και η περαιτέρω επεξεργασία τους διενεργείται, καθώς η εφαρμοζόμενη παροχή ρέει με μικρή ταχύτητα δια μέσου των στελεχών των ριζωμάτων της υφιστάμενης φυτικής βλάστησης και του υφιστάμενου υποστρώματος. Επίσης, τα συστήματα αυτά είναι δυνατόν να σχεδιάζονται με σκοπό την ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για την αποδοχή υγροβιοτόπων ή ενίσχυση υπαρχόντων φυσικών υγροβιοτόπων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, αναπτύσσεται ένας συνδυασμός υδατικών επιφανειών, με βλάστηση και ανοικτών μικρών νησίδων με την κατάλληλη βλάστηση και ενίσχυση της ροής του νερού (Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995).

Με ανάλογο τρόπο, τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής σχεδιάζονται με σκοπό την επίτευξη δευτεροβάθμιας ή προωθημένης επεξεργασίας. Αυτά τα συστήματα καλούνται επίσης συστήματα «ριζόσφαιρας» ή «φίλτρων εδάφους-καλαμιών» και αναπτύσσονται μέσα σε κανάλια ή τάφρους με σχετικά στεγανούς πυθμένες που περιέχουν άμμο ή άλλα γήινα μέσα υποστήριξης της αναπτυσσόμενης (επιφανειακά) φυτικής βλάστησης (Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995).

2.2.3 Τεχνητοί υγροβιότοποι κατακόρυφης υπόγειας ροής (Vertical flowsubsurface constructed wetlands)

Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από την κατακόρυφη ροή των προς επεξεργασία λυμάτων μέσα από τις εδαφικές στρώσεις των λεκανών τους. Η λειτουργία τους προσομοιάζει αρκετά με το περιοδικό πότισμα μιας γλάστρας στην οποία το νερό αρχικά πλημμυρίζει τη λεκάνη και εν συνεχεία αφήνεται να στραγγίσει (Καραμούζης, 2003). Οι λεκάνες στα συστήματα αυτά κατασκευάζονται με ένα βάθος περίπου 0,90 έως 1,20 m, με μια μέση κλίση πυθμένα περίπου 1%. Ο πυθμένας και τα πρανή τους καλύπτονται από γεωμεμβράνη ή κατασκευάζονται από σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, γίνεται πλήρωση των λεκανών με αδρανή υλικά συνολικού βάθους μέχρι ενός μέτρου, μειούμενης κοκκομετρίας από τον πυθμένα προς την επιφάνεια. Το επιφανειακό στρώμα της λεκάνης, βάθους 10 έως 30 cm, καλύπτεται με άμμο, μέσα στην οποία φυτεύονται και αναπτύσσονται είδη καλαμιών.

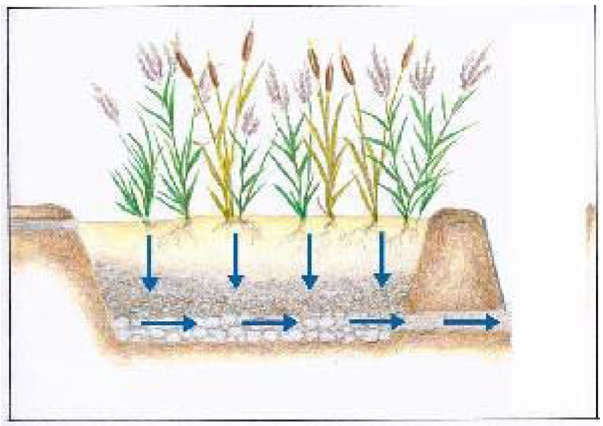
Για τη λειτουργία αυτού του συστήματος οι λεκάνες κατακλύζονται περιοδικά με μεγάλες παροχές λυμάτων και η ροή γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους τεχνητού υγροβιοτόπου έναντι των υπολοίπων είναι η απαίτηση μικρότερης έκτασης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και η διατήρηση αερόβιων συνθηκών επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, εξ αιτίας της περιοδικής ανάπαυσης και ως εκ τούτου της περιοδικής ξήρανσης κάθε λεκάνης.

Αυτό το πλεονέκτημα των υγροβιοτόπων με περιοδική κατάκλυση αποδίδεται, κυρίως, στις συνθήκες ακόρεστης ροής και επιπρόσθετα στο μεγαλύτερο πάχος της εδαφικής στρώσης των λεκανών, με το οποίο επιτυγχάνεται ένα επιπρόσθετο φιλτράρισμα των υγρών αποβλήτων (Καραμούζης, 2003).

Στις μέρες μας, οι κατακόρυφης ροής τεχνητοί υγροβιότοποι με διακοπτόμενη τροφοδοσία χρησιμοποιούνται συχνά στην Ευρώπη λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν σε σχέση με τους άλλους σχεδιασμούς.

Οι κατακόρυφης ροής τεχνητοί υγροβιότοποι παρουσιάζουν περισσότερο ισοδύναμη κατανομή ριζών και επαφή ριζών-νερού και λιγότερα προβλήματα κακοσμίας και πολλαπλασιασμού εντόμων, αφού δεν έχουν ελεύθερη επιφάνεια νερού. Ακόμη κι αν οι κατακόρυφης ροής τεχνητοί υγροβιότοποι χρησιμοποιούνται κυρίως για απομάκρυνση COD, TSS και κολοβακτηριδίων, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον στη χρήση τους για απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου. Στους τεχνητούς υγροβιοτόπους, όπου δημιουργούνται αερόβια και αναερόβια περιβάλλοντα, ο μικροβιακός υποβιβασμός αποτελεί τον πιο σημαντικό μηχανισμό για νιτροποίηση και απονιτροποίηση, ενώ η προσρόφηση φωσφόρου στο υπόστρωμα είναι ένας σημαντικός μηχανισμός για την απομάκρυνσή του (IWA, 2000).

Για τέτοιες διαδικασίες, τα υποστρώματα (κορεσμένα μέσα των τεχνητών υγροβιοτόπων) θεωρούνται επίσης πολύ σημαντικά. Με σκοπό τη βελτίωση κατακράτησης φωσφόρου, υποστρώματα με μεγαλύτερη ικανότητα προσρόφησης φωσφόρου, μεγαλύτερο περιεχόμενο σε ασβέστιο, σίδηρο και αργίλιο, μεγαλύτερη επιφάνεια σωματιδίων και κατάλληλη υδραυλική αγωγιμότητα χρησιμοποιούνται ευρέως. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές υγροβιοτόπων έχουν ξεκινήσει να χρησιμοποιούν βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως μικρού βάρους τσιμεντολάσπη (LWA, LECA κτλ.) και απορρίμματα από βιομηχανίες, όπως και φυσικά υλικά με υψηλή ικανότητα προσρόφησης (Korkusuz et al., 2004).



Εικόνα 4: Τεχνητός υγροβιότοπος κατακόρυφης υπόγειας ροής (Πηγή:www.uvm.edu).

2.3 Χρησιμοποιούμενα είδη βλάστησης

Στους τεχνητούς υγροβιοτόπους επεξεργασίας ρυπασμένων υδάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια αρκετά μεγάλη ποικιλία φυτών. Η επιλογή τους εξαρτάται από μια σειρά χαρακτηριστικών των φυτών καθώς επίσης κι από τα χαρακτηριστικά του υγροβιοτόπου. Σύνηθες είναι τα φυτά που επιλέγονται να αποτελούν χαρακτηριστικά δείγματα της τοπικής χλωρίδας. Αυτό συμβαίνει τόσο για οικονομικό όφελος, όσο και λόγω της ασφάλειας που προσδίδει αυτή η επιλογή. Η ασφάλεια αυτή οφείλεται στο ότι ένα ιθαγενές είδος μπορεί να εγκαθιδρυθεί ευκολότερα και με μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας σε σχέση με κάποιο που μεταφέρεται από μια άλλη περιοχή. Επίσης, η εισαγωγή νέου φυτικού είδους στην περιοχή ενέχει και άλλους κινδύνους με σημαντικότερο την πιθανή παρασιτική επέκταση του είδους αυτού και την αλλοίωση του περιβάλλοντος βιότοπου (Ντεντιδάκης, 2000).

Έχει καταστεί εμφανές ότι οι περιοχές με πυκνή βλάστηση απομακρύνουν περισσότερο τους ρυπαντές από ό,τι περιοχές με αραιή βλάστηση. Το πόρισμα αυτής της παρατήρησης είναι ότι τα φυτικά είδη που επιβιώνουν καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους έχουν καλύτερες αποδόσεις από αυτά που πεθαίνουν κάτω από το νερό με την έναρξη των χαμηλών θερμοκρασιών. Για αυτούς τους λόγους, τα γρήγορα ανεπτυγμένα ανερχόμενα είδη, που έχουν υψηλή ποσότητα λιγνίνης και προσαρμόζονται στα μεταβαλλόμενα βάθη νερού είναι πιο κατάλληλα για τα συστήματα επεξεργασίας των τεχνητών υγροβιοτόπων. Τα γένη των φυτών που ικανοποιούν τα κριτήρια αυτά είναι τα Typha, Scirpus, Phragmites (Ντεντιδάκης, 2000; Ζουραράκη, 2002).

Μόνο μια μικρή ποσότητα της βασικής φυτικής πυκνότητας φυτεύεται στον υγροβιότοπο. Οι ποσότητες των φυτών αυτών κυμαίνονται από 1000 έως 25000 φυτά ανά εκτάριο (ha). Μέσω της φυτικής αναπαραγωγής τα φυτά επεκτείνονται ώστε να αποκτήσουν πυκνότητα πάνω από 10^6 φυτών ανά ha. Όταν ο πρώτος γύρος των φυτών ωριμάζει και πεθαίνει, τα ριζώματα βγάζουν καινούριους βλαστούς διατηρώντας με αυτόν τον τρόπο τη βλάστηση του υγροβιοτόπου. Οι περισσότεροι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν επίσης αποικιακά είδη φυτών γύρω από τις ρηχές άκρες και σε περιοχές που δεν υπάρχει βλάστηση. Μολονότι αυτά τα είδη φυτών δεν καλύπτουν μεγάλο μέρος του υγροβιοτόπου, προβάλλουν κάποια αντίσταση ενάντια στα παθογόνα φυτά, παρέχουν σημαντική κατοικία για την άγρια ζωή και καταλαμβάνουν το μέρος των περιοχών που τα κυρίαρχα φυτά ίσως να μην το καταλάμβαναν κάτω από διαφορετικές συνθήκες (Ντεντιδάκης, 2000).

Αν ο υγροβιότοπος είναι στη διαδικασία φύτευσης, το κόστος και η διαθεσιμότητα φυτικών ειδών θα πρέπει να ληφθούν υπόψη νωρίς στη διαδικασία σχεδιασμού. Η επιλογή δημιουργίας ενός φυτωρίου θα πρέπει να γίνει νωρίς επειδή προτιμούνται τα ώριμα φυτά 1 έως 2 χρονών. Αυτά έχουν αποθέματα ενέργειας για να επιβιώσουν στη διαδικασία μεταφύτευσης.

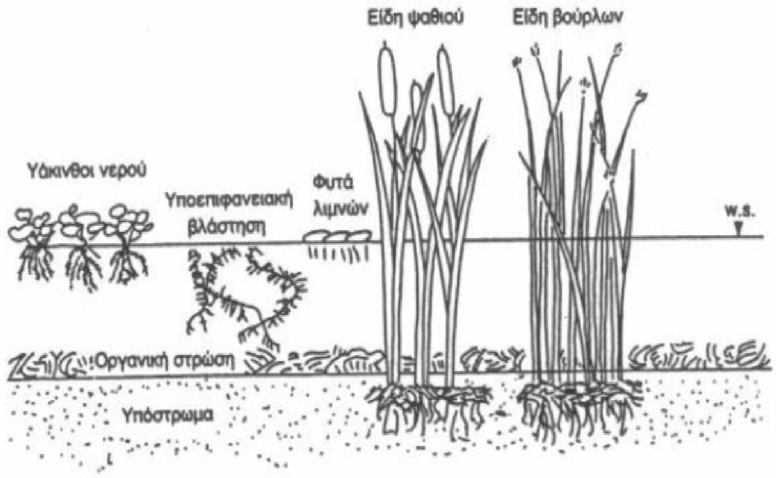
Συνεπώς, η εγκατάσταση του φυτωρίου μπορεί να ολοκληρωθεί πριν από κάποια άλλη κατασκευή (Ζουραράκη, 2002).

Τα φυτά που χρησιμοποιούνται σε υγροβιοτόπους επεξεργασίας μπορεί να είναι δενδρώδη, θαμνώδη ή ποώδη. Τα συνηθέστερα που συναντούμε είναι αυτά της οικογένειας Typha (ψαθί), όπως τα Typha angustifolia και Typha Latifolia, τα φυτά της οικογένειας Scirpus (σήφη), με κυριότερα τα Scirpus lacustris και Scirpus validus, και αυτά της οικογένειας Phragmites (καλάμι) με κυριότερους εκπροσώπους τα Phragmites australis και Phragmites communis. Το ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε δέντρο ή φυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο τα συγκεκριμένα φυτά αντέχουν στη συνεχή κατάκλιση με νερό και γι' αυτό και βρίσκονται και στους φυσικούς υγροβιοτόπους.

Πιο αναλυτικά τα φυτά που χρησιμοποιούνται σε τεχνητούς υγροβιότοπους είναι (Τσιχριντζής 2000):

Ψαθί (*Typha spp.*): Είναι φυτά με επιμήκη φύλλα και κυλινδρικά καφέ άνθη. Βρίσκονται παντού, είναι πολύ ανθεκτικά, αναπτύσσονται καλά κάτω από πολλές περιβαλλοντικές συνθήκες και απλώνονται πολύ εύκολα. Είναι ιδεώδη για τεχνητούς υγροβιοτόπους.
Σήφη (*Scirpus spp.)*: Πολυετή φυτά, αναπτύσσονται σε συστάδες. Βρίσκονται παντού και αναπτύσσονται σε ποικίλες συνθήκες, σε γλυκό, υφάλμυρο και αλμυρό περιβάλλον.
Καλάμι (*Phragmites spp.*): Είναι το είδος που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στην Ευρώπη. Είναι ψηλά φυτά τύπου χόρτου που αναπτύσσονται ετήσια αλλά έχουν πολυετές ρίζωμα. Είναι το περισσότερο διαδεδομένο αναδυόμενο φυτό. Οι ακόλουθες ποικιλίες χρησιμοποιούνται στους υγροβιοτόπους: *Phragmites australis και Phragmites communis.*
Βούρλο (*Juncus spp.*): Συνήθως χρησιμοποιούνται περιφερειακά στους υγροβιοτόπους.
Σπαθόχορτο (*Carex spp.*): Συνήθως χρησιμοποιούνται περιφερειακά σε υγροβιοτόπους.
Τα πιο συνηθισμένα φυτά που χρησιμοποιούνται για επεξεργασία νερού είναι τα καλάμια (Phragmites spp.), τα ψαθιά (Typha spp.) και τα βούρλα (Scirpus spp.).

Τυπικά φυτά που χρησιμοποιούνται σε τεχνητούς υγροβιοτόπους φαίνονται επίσης στο Εικόνα 5. Αυτά τα φυτά μεταβάλλουν τις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου (DO) και τη θερμοκρασία του νερού και σκιάζουν τα άλγη. Η βλάστηση ως επί το πλείστον δημιουργεί πρόσθετα οξικά περιβάλλοντα για μικροβιακούς πληθυσμούς μέσω αύξησης της επιφάνειας του υποστρώματος στη στήλη νερού και οξυγονώνοντας τα στερεά σωματίδια γύρω από τις ίνες των ριζών (Bachand and Horne, 2000).



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση συστήματος υδροχαρών φυτών (Πηγή: Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995).

Συνοπτικά, τα κριτήρια καταλληλότητας των φυτών ώστε να χρησιμοποιηθούν σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο είναι (Ντεντιδάκης, 2000):

- Οικολογική αποδεκτότητα, για παράδειγμα μη σημαντικοί κίνδυνοι εμφάνισης ασθενειών από την παρουσία φυτών ή παρασιτικής διασποράς και λειτουργίας τους και γενικά αποφυγή κινδύνου οικολογικής ή γενετικής αλλοίωσης των περιβαλλόντων φυσικών συστημάτων.
- Αντοχή στις τοπικές κλιματικές συνθήκες, στα ζιζάνια και στις ασθένειες
- που θα αντιμετωπίσει.
- Αντοχή στους μολυσματικούς παράγοντες και στις υπερτροφικές πλημμυρικές συνθήκες.
- Δυνατότητα απομάκρυνσης υψηλού ποσοστού ρύπων, είτε μέσω άμεσης αφομοιώσεως και αποθήκευσής τους είτε έμμεσα, μέσω εμπλουτισμού των μικροβιακών μετασχηματισμών και διαδικασιών όπως η νιτροποίηση (μέσω του εμπλουτισμού του ανοξικού περιβάλλοντος με

οξυγόνο προερχόμενο από τις ρίζες των φυτών) και η απονιτροποίηση (μέσω της παραγωγής υποκατάστατων του άνθρακα).

2.4 Απομάκρυνση ρύπων σε συστήματα τεχνητών υγροβιότοπω

2.4.1 Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD)

Υγροβιότοποι που ελάμβαναν απόβλητα επεξεργασμένα από πρωτοβάθμιο έως τριτοβάθμιο επίπεδο, έδειξαν συνέπεια στην αφαίρεση BOD. Η συγκέντρωση BOD στην εκροή ήταν πάντοτε μικρότερη των 20 mg/l για συγκεντρώσεις εισροής μέχρι περίπου 80 mg/l (Reed et al., 1995). Ουσιαστικά όμως η συγκέντρωση που αναφέρθηκε παραπάνω είναι δυνατόν να επιτευχθεί ανεξάρτητα από τη συγκέντρωση εισροής μέχρι 150 mg/l (Brix, 1992). Παρατηρήθηκε εντούτοις ότι δεν είναι δυνατόν να σχεδιασθεί ένα σύστημα υγροβιοτόπων έτσι ώστε η εκροή να έχει μηδενική συγκέντρωση BOD, όσο μεγάλος κι αν είναι ο χρόνος παραμονής και τούτο διότι παράγεται BOD από την αποσύνθεση της φυτικής ύλης μέσα στον υγροβιότοπο, με αποτέλεσμα το BOD να κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 2 και 7 mg/l (Reed et al., 1995).

2.4.2 Αιωρούμενα στερεά

Η αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών είναι πολύ αποτελεσματική και στους δύο τύπους υγροβιοτόπων. Μετρήσεις σε διάφορους υγροβιοτόπους έδειξαν συνέπεια σε συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών στην εκροή μικρότερες των 20 mg/L για συγκεντρώσεις στην εισροή μέχρι 160 mg/L. Το μεγαλύτερο πρόβλημα με την αφαίρεση ΑΣ, το οποίο παρατηρήθηκε σε πολλές μελέτες, είναι η απόφραξη του πορώδους μέσου σε υγροβιοτόπους υπόγειας ροής. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται υπερχείλιση του φίλτρου, επιφανειακή ροή και χαμηλότερη απόδοση. Κατάλληλα σχεδιαστικά και κατασκευαστικά μέτρα πρέπει να λαμβάνονται για την αποφυγή αυτού του προβλήματος. Άλλο πρόβλημα χαμηλής απόδοσης μπορεί να προκύψει επίσης από το φαινόμενο του υδραυλικού βραχυκυκλώματος (Reed et al., 1995).

2.4.3 Άζωτο

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

2.4.4 Οργανικό άζωτο

Το οργανικό άζωτο βρίσκεται κυρίως στα στερεά που περιέχονται στα υγρά απόβλητα και αφαιρείται αμέσως με την καθίζηση των στερεών, αποσυντίθεται ή δημιουργούνται άλατα και τελικά παράγεται αμμωνία. Οργανικό άζωτο επίσης εισέρχεται στο σύστημα με φυσικό τρόπο από τα υπολείμματα βλάστησης και πάλι παράγεται μετά την αποσύνθεσή του αμμωνία. Επομένως, η συνήθης συντηρητική υπόθεση στο σχεδιασμό είναι ότι το περισσότερο από το οργανικό άζωτο καταλήγει σε αμμωνία στο σύστημα και πρέπει να αφαιρεθεί (Reed et al., 1995).

2.4.5 Αμμωνία

Η αφαίρεση της αμμωνίας γίνεται με βιολογική νιτροποίηση ακολουθούμενη από απονιτροποίηση και η διεργασία είναι η ίδια και για τους δύο τύπους υγροβιοτόπων. Οι απαιτούμενες συνθήκες για νιτροποίηση είναι οι ακόλουθες: (1) οξυγόνο (απαιτούνται 4,6 g για την οξείδωση 1 g NH_4^+-N), δηλαδή αερόβιες συνθήκες, και να έχει αφαιρεθεί ήδη το BOD, (2) ικανοποιητική αλκαλικότητα και (3) κατάλληλη θερμοκρασία. Επίσης, οι μικροοργανισμοί νιτροποίησης προτιμούν προσκόλληση σε επιφάνειες (Reed et al., 1995). Μετρήσεις σε λειτουργούντες τεχνητούς υγροβιοτόπους έδειξαν ότι σε πολλές περιπτώσεις η συγκέντρωση αμμωνίας στην εκροή ήταν μεγαλύτερη αυτής της εισροής. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αποσύνθεση του οργανικού αζώτου της εισροής ή/και του φυσικά παραγόμενου στον υγροβιότοπο, σε συνδυασμό με χαμηλό επίπεδο οξυγόνου για την αντίδραση της νιτροποίησης. Στους υγροβιοτόπους επιφανειακής ροής η μεταφορά οξυγόνου γίνεται με αερισμό από την ατμόσφαιρα, ενώ στα συστήματα υποεπιφανειακής ροής η μεταφορά οξυγόνου γίνεται μέσω των υδροχαρών φυτών. Έτσι, στη δεύτερη περίπτωση παρατηρήθηκε ότι, όταν οι ρίζες των φυτών διεισδύουν σε όλο το βάθος του πορώδους μέσου, η απόδοση σε αφαίρεση αμμωνίας είναι μεγαλύτερη. Σε πειράματα που δεν περιελάμβαναν φυτά αλλά μόνο το πορώδες μέσο, η αφαίρεση αμμωνίας ήταν ελάχιστη αυτό οφείλετε κυρίως στο γεγονός ότι τα φυτά παίρνουν άζωτο από το νερό για παράγωγη βιομάζας. Επομένως, ένα σχεδιαστικό κριτήριο είναι ότι όταν απαιτείται αφαίρεση αμμωνίας, τότε πρέπει οι ρίζες των φυτών να διεισδύουν σε όλο το πάχος του πορώδους μέσου. Επειδή η μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα στις ρίζες είναι μια σχετικά αργή διαδικασία (ακόμη και για υψηλές θερμοκρασίες) απαιτείται για την αφαίρεση της αμμωνίας ένας ελάχιστος υδραυλικός χρόνος παραμονής τουλάχιστον 6-8 ημερών (όταν η διείσδυση των ριζών είναι πλήρης). Όταν η διείσδυση των ριζών είναι μερική ή/και οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, ο χρόνος παραμονής πρέπει να αυξάνεται. Τέλος, η παρουσία φυκών επηρεάζει αρνητικά την αφαίρεση αμμωνίας και για το λόγο αυτό δεν συνιστάται ο συνδυασμός σε σειρά δεξαμενών σταθεροποίησης με υγροβιοτόπους.

2.4.6 Νιτρικό άζωτο

Η αφαίρεση του νιτρικού αζώτου γίνεται με βιολογική απονιτροποίηση, διεργασία που απαιτεί: (1) αναερόβιες συνθήκες, (2) κατάλληλη θερμοκρασία και (3) αρκετή περιεκτικότητα άνθρακα. Η κύρια παράμετρος που επηρεάζει τη διεργασία σε υγροβιοτόπους είναι ο άνθρακας, αφού αναερόβιες συνθήκες επικρατούν συνήθως (εκτός γύρω από τις ρίζες) και η θερμοκρασία είναι απρόβλεπτη παράμετρος που εξαρτάται από το κλίμα της περιοχής του υγροβιοτόπου (Reed et al., 1995). Ο άνθρακας εξαρτάται από τις οργανικές ενώσεις που βρίσκονται είτε στα υγρά απόβλητα, είτε με φυσικό τρόπο στον υγροβιότοπο. Λόγω όμως του ότι η αφαίρεση BOD προηγείται της νιτροποίησης, η μόνη πηγή άνθρακα είναι οι φυσικές οργανικές ενώσεις από τα υπολείμματα φυτικής ύλης. Οι υγροβιότοποι επιφανειακής ροής είναι πιο αποτελεσματικοί στην απονιτροποίηση, λόγω ακριβώς της επαφής του αποβλήτου με τα υπολείμματα φυτικής ύλης. Μετρήσεις έδειξαν ότι αυτό είναι ιδίως αισθητό για συγκεντρώσεις NO_3-N μεγαλύτερες από 6 mg/l. Σε γενικές γραμμές, έχει παρατηρηθεί σημαντική απόδοση σε αφαίρεση νιτρικού αζώτου σε τεχνητούς υγροβιοτόπους.

2.4.7 Φώσφορος

Η απομάκρυνση φωσφόρου γίνεται συνήθως με απορρόφηση από τα φυτά, προσρόφηση στο έδαφος και κατακρήμνιση. Οι διεργασίες αυτές είναι περιορισμένες σε τεχνητούς υγροβιοτόπους, εκτός από τα 1-2 πρώτα χρόνια λειτουργίας τους, όταν μεγαλύτερη ποσότητα μπορεί να προσροφηθεί στο έδαφος του πυθμένα πριν αυτό φθάσει σε κορεσμό. Επιπλέον, τα φυτά απορροφούν, ενώ αναπτύσσονται πριν φθάσουν σε ωριμότητα. Η δυνατότητα προσρόφησης στο έδαφος μειώνεται με το χρόνο. Τα φυτά συνεχίζουν να απορροφούν, αλλά μέρος του φωσφόρου που απορροφούν επανέρχεται πίσω στο σύστημα ως νεκρή φυτική ύλη. Μετρήσεις έδειξαν ότι μακροπρόθεσμα η αφαίρεση κυμαίνεται μεταξύ 30 και 50% (Reed et al.,1995).

2.4.8 Μέταλλα

Οι μηχανισμοί αφαίρεσης των μετάλλων σε υγροβιοτόπους είναι παρόμοιοι αυτών της αφαίρεσης φωσφόρου με κύρια την προσρόφηση στα ιζήματα του πυθμένα. Σε αντίθεση με το φωσφόρο, τα ποσοστά αφαίρεσης μετάλλων από τεχνητούς υγροβιοτόπους όλων των τύπων είναι πολύ υψηλά και πλησιάζουν το

100%. Επίσης, το ποσοστό αυτό παρατηρείται και μακροπρόθεσμα κατά τη διάρκεια ζωής του υγροβιοτόπου. Ένα πρόβλημα με τα μέταλλα είναι η συνεχής συσσώρευση μέσα στον υγροβιότοπο. Όταν πρόκειται για οικιακά λύματα, οι ποσότητες είναι μικρές και δεν προκαλείται πρόβλημα. Για βιομηχανικά λύματα όμως, με υψηλές περιεκτικότητες μετάλλων, αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό. Πρόβλημα πιθανόν να υπάρχει και με υγροβιοτόπους που γίνονται αποδέκτες αστικής επιφανειακής απορροής (Reed et al., 1995).

2.4.9 Οργανικοί ρύποι

Οι διεργασίες αφαίρεσης αυτών των ρύπων είναι η εξαέρωση, η προσρόφηση σε οργανική ύλη στο σύστημα και η βιολογική αποσύνθεση. Το ποσοστό αφαίρεσης υπερβαίνει το 90-95% και βελτιώνεται με την αύξηση του χρόνου παραμονής.

2.4.10 Παθογόνοι μικροοργανισμοί

Οι διεργασίες απομάκρυνσης παθογόνων μικροοργανισμών σε τεχνητούς υγροβιοτόπους είναι παρόμοιες με αυτές σε λίμνες σταθεροποίησης με επιπλέον αφαίρεση λόγω διήθησης μέσω των φυτών και της φυτικής ύλης σε υγροβιοτόπους επιφανειακής ροής και συγκράτηση στο πορώδες μέσο στους υγροβιοτόπους υπόγειας και κατακόρυφης ροής. Βρέθηκε ότι το λεπτόκοκκο πορώδες μέσο είναι ανώτερο σε αφαίρεση μικροοργανισμών σε σύγκριση με πιο χονδρόκοκκο. Τα ποσοστά αφαίρεσης υπερβαίνουν το 90% και για περιττωματικά κολοβακτηρίδια και ιούς για χρόνους παραμονής από 3 έως 6 ημέρες. Γενικά, η αφαίρεση είναι 1-2 τάξεις μεγέθους για χρόνο παραμονής 3-7 ημέρες και 3-4 τάξεις μεγέθους για χρόνο παραμονής μεγαλύτερο των 14 ημερών (Reed et al., 1995).

2.5 Διεργασίες αφαίρεσης ρύπων σε τεχνητούς υγροβιοτόπους

2.5.1 Αφαίρεση οργανικής ύλης

Η αφαίρεση των οργανικών ουσιών διενεργείται με μεγάλη ταχύτητα σε όλα τα συστήματα υγροβιοτόπων και οφείλεται στις αδιατάρακτες συνθήκες στα συστήματα επιφανειακής ροής και στη διήθηση και την απόθεση στα συστήματα υπόγειας ροής. Το BOD_5, το οποίο έχει καθιζάνει, υπόκειται σε αερόβια ή ανοξική αποσύνθεση ανάλογα με την ποσότητα οξυγόνου στο σημείο απόθεσης. Το υπολειπόμενο BOD_5, το οποίο είναι κολλοειδούς και διαλυμένης μορφής, συνεχίζει να αφαιρείται, καθώς το λύμα έρχεται σε επαφή με τα μικρόβια, τα οποία είναι προσκολλημένα στο πληρωτικό υλικό και στις ρίζες των φυτών (Reed et al., 1995, Vymazal, 2002). Η βιολογική αυτή διεργασία μπορεί να είναι αερόβια κοντά στην επιφάνεια των συστημάτων επιφανειακής ροής και σε αερόβιες μικροπεριοχές στα συστήματα υπόγειας ροής, αλλά η ανοξική αποσύνθεση επικρατεί σε όλο το σύστημα.

Η αφαίρεση μπορεί να περιοριστεί από την αποσύνθεση φυτικής μάζας και άλλων φυσικών οργανικών που περιέχονται στο σύστημα. Συνεπώς, ο σχεδιασμός συστήματος υγροβιοτόπου για την επίτευξη μηδενικής συγκέντρωσης εκροής BOD_5 είναι αδύνατος. Επίσης, η θερμοκρασία δείχνει να επηρεάζει τις συγκεντρώσεις BOD_5, όπως και η εποχιακή εναλλαγή, λόγω μεταβολών στην ανάπτυξη των φυτών, στο σχηματισμό νεκρής οργανικής ύλης άνωθεν των φίλτρων και στον κύκλο του άνθρακα. Τέλος, αναφέρεται ότι η αφαίρεση BOD_5 είναι ταχύτερη στους τεχνητούς υγροβιοτόπους υπόγειας ροής σε σχέση με τους επιφανειακής ροής (Kadlec and Knight, 1996).

2.5.2 Αφαίρεση αζώτου

Η αφαίρεση αζώτου μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική σε όλους τους τύπους υγροβιοτόπων, με παρόμοιους μηχανισμούς αφαίρεσης. Αν και λαμβάνει χώρα λήψη αζώτου από τα φυτά, μόνο ένα μικρό κλάσμα του ολικού αζώτου αφαιρείται με το μηχανισμό αυτό. Το άζωτο εισέρχεται στα συστήματα υγροβιοτόπων σε διάφορες μορφές, όπως οργανικό άζωτο, αμμωνία, νιτρώδη και νιτρικά.

Το οργανικό άζωτο που εισέρχεται σε έναν υγροβιότοπο σχετίζεται με τη σωματιδιακή μάζα, όπως οργανικά στερεά του λύματος και άλγη. Η αρχική αφαίρεση της μάζας αυτής, ως TSS, είναι αρκετά γρήγορη. Το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού αζώτου τότε, υπόκειται σε αποσύνθεση είτε σε αμμωνιτοποίηση απελευθερώνοντας αμμωνία στο νερό. Τα κατάλοιπα των φυτών και άλλων οργανικών υλικών μπορούν επίσης να αποτελούν πηγές οργανικού αζώτου, με αποτέλεσμα μια εποχιακή απελευθέρωση αμμωνίας, καθώς αυτά αποσυντίθενται. Οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης του αζώτου είναι η βιολογική νιτροποίηση και απονιτροποίηση, η δέσμευση από τα φυτά, η προσρόφηση, όπου ιονισμένη αμμωνία αντιδρά με το πληρωτικό υλικό, καθώς και η εξάτμιση της αμμωνίας, αφού μετατραπεί σε ελεύθερη αμμωνία (Kadlec and Knight, 1996, Vymazal, 2002).

Ο κύριος μηχανισμός αφαίρεσης της αμμωνίας ως μορφή αζώτου, τόσο στα συστήματα επιφανειακής όσο και στα υπόγειας ροής, είναι η βιολογική νιτροποίηση ακολουθούμενη από απονιτροποίηση. Η νιτροποίηση συνήθως συμβαίνει σε αερόβιες συνθήκες, μπορεί όμως να επιτευχθεί και σε συνθήκες με σχετικά χαμηλό οξυγόνο. Επίσης, εξαρτάται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, τα μικρόβια που είναι υπεύθυνα για τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση λειτουργούν καλύτερα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 15°C. Επίσης, πάνω από τη θερμοκρασία αυτή λαμβάνει χώρα ανάπτυξη των φυτών που παρέχουν το απαραίτητο διαλυμένο οξυγόνο για τη νιτροποίηση.

Τα νιτρικά (NO_3^-) ως μορφή αζώτου αφαιρούνται μέσω της βιολογικής απονιτροποίησης. Η επίτευξη της απονιτροποίησης απαιτεί ανοξικές και αποδεκτές θερμοκρασιακές συνθήκες, καθώς και επαρκή πηγή άνθρακα. Η ύπαρξη ανοξικών συνθηκών είναι εγγυημένη στα περισσότερα συστήματα τεχνητών υγροβιοτόπων και η θερμοκρασία εξαρτάται από το εκάστοτε κλίμα. Κύρια πηγή άνθρακα αποτελούν τα φυτικά κατάλοιπα, καθώς και άλλα φυσικά οργανικά στοιχεία που υπάρχουν στο σύστημα. Η απονιτροποίηση ενδέχεται να περιοριστεί απουσία πηγής άνθρακα (Reed et al., 1995).

2.5.3 Αφαίρεση φωσφόρου

Η αφαίρεση του φωσφόρου στα φυσικά συστήματα είναι αποτέλεσμα της προσρόφησης, της καθίζησης και της δέσμευσης από τα μικρόβια και τα φυτά. Η δέσμευση από τα μικρόβια και τα φυτά είναι υπεύθυνα μόνο για την αφαίρεση ορθοφωσφορικών ιόντων. Ενώ, οι υπόλοιποι μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την αφαίρεση όλων των μορφών φωσφόρου (Kadlec and Knight, 1996). Η αφαίρεση φωσφόρου μέσω της προσρόφησης και της καθίζησης εξαρτάται από το είδος του πληρωτικού υλικού. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικοί στην αφαίρεση φωσφόρου εξαιτίας των περιορισμένων δυνατοτήτων επαφής του λύματος και του εδάφους. Ένα σύστημα υγροβιοτόπου μπορεί να επιτύχει αποτελεσματική απομάκρυνση φωσφόρου κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του λόγω της προσροφητικής ικανότητας του εδάφους. Όταν όμως το σύστημα αυτό φθάσει σε ισορροπία, η αφαίρεση φωσφόρου είναι δυνατόν να μειωθεί. Η λήψη από τα φυτά συνεχίζει να συμβαίνει, όμως η αποσύνθεσή τους απελευθερώνει μέρος του φωσφόρου (Vymazal, 2002).

2.6 Πανίδα στους τεχνητούς υγροβιοτόπους

Η πανίδα έχει συνήθως μικρούς αλλά σημαντικούς ρόλους στη λειτουργία των υγροβιοτόπων, ευνοώντας τη βελτίωση της ποιότητας του νερού. Από τα μικροσκοπικά πρωτόζωα έως τα μεγαλύτερα θηλαστικά, τα ζώα καταναλώνουν παραγωγική ενέργεια βιομάζας, μετατρέπουν μέρος της ενέργειας αυτής σε νέα βιομάζα και ανακυκλώνουν το μη χρησιμοποιούμενο οργανικό υλικό και την τροφή.

Οι ελικοειδείς τροφές χρησιμοποιούνται συνέχεια και μεταλλάσσονται μέχρι να ξαναχρησιμοποιηθούν. Οι καταναλωτές κρατούν τις τροφές σε συνεχή κυκλοφορία και ρυθμίζουν τους πληθυσμούς των χαμηλότερων τροφικών επιπέδων με τρόπο που βελτιώνει το σύστημα λειτουργίας.

Τα συστήματα τεχνητών υγροβιοτόπων που είναι εκτεθειμένα σε τοξίνες ή σε άλλους παράγοντες που εξολοθρεύουν τους καταναλωτικούς πληθυσμούς, έχουν μικρότερες κυκλικές τροφικές λειτουργίες, που με τη σειρά τους είναι δυνατόν να επηρεάσουν την παραγωγικότητα της ποιότητας του νερού (Ζουραράκη, 2002).

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο σχεδιαστής του υγροβιοτόπου δεν χρειάζεται να ανησυχεί για τις τροφικές και αποικιακές ανάγκες των παρόντων ζώων. Όταν αυτοί οι φυσικοί κάτοικοι είναι παρόντες, θα δημιουργηθεί μια ποικιλία οργανισμών και σε μερικά χρόνια ή λιγότερο θα δημιουργηθεί ένα ισορροπημένο οικοσύστημα υγροβιοτόπου που θα έχει λειτουργίες που θα τις ορίζει μόνος του.

Εντούτοις, αν το σύστημα χρήσης του υγροβιοτόπου κατασκευασθεί σε μέρος όπου δεν υπάρχουν πηγές ή τα προσαρμοσμένα είδη, ο σχεδιαστής θα πρέπει να προάγει τεχνητή αποίκιση μέσω της εισαγωγής νερού, ιζημάτων και φυτών που να περιέχουν μικροσκοπικά ζώα και μικρόβια από μακρύτερες πηγές (Ζουραράκη, 2002).

Ασπόνδυλα και σπονδυλωτά ζώα μαζεύουν τα θρεπτικά και την ενέργεια παρέχοντας τροφή στα μικρόβια και στη μακροφυτική βλάστηση, με ανακύκλωση και σε ορισμένες περιπτώσεις μεταφέροντας ουσίες εκτός του συστήματος υγροβιοτόπου. Λειτουργικά, αυτά τα συστατικά έχουν περιορισμένους ρόλους σε μετατροπές ρύπων, αλλά συχνά εξασφαλίζουν ουσιώδη βοηθητικά πλεονεκτήματα (επαναδημιουργία /μόρφωση) σε επιτυχημένα συστήματα (Hammer, 1992).

2.7 Μικροβιακοί οργανισμοί

Μικρόβια - βακτήρια, μύκητες, άλγη και πρωτόζωα - μεταβάλλουν τους ρύπους, ώστε να λαμβάνουν θρεπτικά ή ενέργεια και να εκτελούν τον κύκλο ζωής τους. Επιπλέον, πολλές φυσικά δημιουργούμενες ομάδες μικροβίων λειτουργούν ως θηρευτές, καταναλώνοντας παθογόνους οργανισμούς. Η αποτελεσματικότητα των υγροβιοτόπων στον καθαρισμό του νερού εξαρτάται από την ανάπτυξη και διατήρηση βέλτιστου περιβάλλοντος για τους επιθυμητούς μικροβιακούς πληθυσμούς.

Οι συγκεκριμένοι μικροοργανισμοί απαντώνται στα περισσότερα ύδατα και συνήθως έχουν μεγάλους πληθυσμούς στους υγροβιοτόπους και στα ρυπασμένα με θρεπτικά ύδατα. Μόνο σπάνια, με πολύ ασυνήθεις ρύπους, θα χρειασθεί εμβολιασμός με ένα ειδικό τύπο ή είδος μικροβίων (Hammer, 1992).

Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των βακτηρίων και παρασίτων, όπως πρωτόζωα και έλμιθοι, που είναι συνήθη στα περισσότερα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, περιλαμβάνουν καθίζηση, προσρόφηση, ακτινοβολία, ξήρανση, εμπλοκή, ανταγωνιστικές επιδράσεις, φυσική φθορά και γενικά έκθεσή τους σε διάφορες αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι ιοί απομακρύνονται μόνο με φυσική φθορά και καταστροφή τους (US.EPA, 1981). Στα συστήματα τεχνητών υγροβιοτόπων παρατηρούνται διαφοροποιημένα ποσοστά απομάκρυνσης μικροοργανισμών, αλλά γενικά όχι σε τέτοιο βαθμό που να μην απαιτείται συμπληρωματική απολύμανση των λαμβανομένων από αυτά τελικών εκροών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που επιδιώκεται επαναχρησιμοποίησή τους (Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995).

Πέντε τεχνητοί υγροβιότοποι στη Δημοκρατία της Τσεχίας μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια των ετών 1994 και 1995 με σκοπό να προσδιορισθεί η απομάκρυνση ολικών, περιττωματικών κολοβακτηριδίων και εντεροβακτηριδίων (Ottovà et al.,1997). Επιπροσθέτως, ο συνολικός αριθμός αερόβιων και αναερόβιων βακτηρίων προσδιορίσθηκαν στο νερό. Οι πληθυσμοί βακτηρίων του κύκλου αζώτου παρακολουθήθηκε στις ρίζες και ριζώματα του *Glyceria maxima* στο σύστημα αυτό.

Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι η κατακράτηση κολοβακτηριδίων είναι πολύ υψηλή και ξεπερνάει τα συνήθη επίπεδα κράτησης των συμβατικών συστημάτων. Οι μετρήσεις επίσης υπέδειξαν ότι τα νιτροποιημένα βακτήρια δεν ήταν παρόντα στο υγρό απόβλητο, ενώ σχετικά μεγάλος αριθμός βρέθηκε στην επιφάνεια ριζών και ριζωμάτων της *Glyceria* (Ottovà et al., 1997).

2.8 Βασικά βήματα σχεδιασμού τεχνητών υγροβιοτόπων

Τα πρωταρχικής σημασίας βήματα για τον επιτυχημένο σχεδιασμό ενός τεχνητού υγροβιοτόπου περιλαμβάνουν τα ακόλουθα (Metcalf and Eddy, 1991):

- Την ακριβή εκτίμηση των παροχών εισροής και των φορτίων ρύπων που εισέρχονται στον υγροβιότοπο.
- Την εκτίμηση απόδοσης του υγροβιοτόπου καθώς και της έκτασης και του όγκου που είναι απαραίτητα για την επίτευξη των ελάχιστων ορίων ποιότητας της εκροής.
- Το σχεδιασμό ελέγχων των υδρολογικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών του υγροβιοτόπου με σκοπό να επιτευχθεί επίπεδο απόδοσης συγκρίσιμο με την απόδοση των λειτουργούντων συστημάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή εμπειρικών τοπικών σταθερών.
- Τη δημιουργία και διατήρηση των χημικών, φυσικών και βιολογικών στοιχείων του συστήματος του υγροβιοτόπου που είναι αναγκαία για την επίτευξη των αναμενόμενων ρυθμών επεξεργασίας των ρύπων.

Αρκετά συμπληρωματικά ζητήματα είναι σημαντικά στο σχεδιασμό και στη λειτουργία τεχνητών υγροβιοτόπων επεξεργασίας. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν τάφρους και αναχώματα, διατάξεις ελέγχου της εισόδου και εξόδου του νερού, συμπίεση και διαβάθμιση του εδάφους, στεγανοποίηση και άλλα Επίσης, μηχανολογικά ζητήματα σχετικά με διατάξεις ελέγχου της ροής, θέματα κατασκευής και λειτουργίας είναι επίσης σημαντικά και περιλαμβάνουν απαιτήσεις σχετικές με την αποψίλωση των φυτών και τον καθαρισμό τους, τεχνικές επιλογής των φυτών, έλεγχο του επιπέδου της επιφάνειας του νερού, αποφυγή ενοχλητικών συνθηκών λόγω κουνουπιών ή οσμών, ασφάλεια τόσο του κοινού όσο και του προσωπικού και διαχείριση της άγρια ζωής (Prescott and Tsanis, 1997).

2.9 Περιγραφή τεχνολογίας

Ένας υγροβιότοπος αποτελεί ένα πολύπλοκο σύνολο νερού, φυτών (αγγειακών και φυκιών), φυτικών ουσιών, ασπόνδυλων (κυρίως έντομα και σκουλήκια) και μικροοργανισμών (κυρίως βακτήρια). Οι μηχανισμοί που βελτιώνουν την ποιότητα του νερού είναι πολυάριθμοι και συχνά σχετίζονται μεταξύ τους. Οι μηχανισμοί αυτοί περιέχουν (Metcalf and Eddy, 1991)

- «Τακτοποιημένο» υλικό με ξεχωριστά σωματίδια
- Διύλιση και χημική καθίζηση μέσω της επαφής του νερού με τα υπόστρωμα και τις ουσίες του.
- Χημική μετατροπή
- Προσρόφηση και ανταλλαγή ιόντων στις επιφάνειες των φυτών, των υποκλινών, των ιζημάτων και των ουσιών που βρίσκονται στο έδαφος.
- Αποσύνθεση, μετασχηματισμό και λήψη των ρυπαντών από μικροοργανισμούς και φυτά.
- Θήρευση και φυσικός θάνατος των παθογόνων μικροοργανισμών.

Η πιο αποτελεσματική χρήση των υγροβιοτόπων είναι αυτή που υιοθετεί τους παραπάνω μηχανισμούς. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι οικονομικά εφικτοί για πολλούς λόγους:

- Οι υγροβιότοποι μπορεί να είναι λιγότερο ακριβοί για να κατασκευασθούν σε σχέση με άλλες επιλογές που αφορούν την επεξεργασία υγρών αποβλήτων.
- Τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας (ενέργεια και εφόδια) είναι χαμηλά.
- Η λειτουργία και η συντήρηση που απαιτούν είναι περιοδική και όχι συνεχής εργασία.
- Οι υγροβιότοποι είναι δυνατόν να αντιμετωπίσουν διακυμάνσεις στην παροχή

- Οι υγροβιότοποι είναι ικανοί να χρησιμοποιούν τα νερά με χαμηλή οργανική φόρτιση (πολύ χαμηλή για ενεργό ιλύ).
- Διευκολύνουν την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του νερού.
- Παρέχουν κατοικία σε πολλούς οργανισμούς.
- Μπορούν να κατασκευασθούν ώστε να δένουν αρμονικά στον περιβάλλοντα χώρο της περιοχής.
- Παρέχουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα μαζί με τη βελτίωση της ποιότητας του νερού, όπως η αποίκηση άγριας ζωής και η αισθητική αύξηση των ανοικτών χώρων.
- Είναι μια περιβαλλοντικά ευαίσθητη προσέγγιση που γίνεται δεκτή με ικανοποίηση από το κοινό όταν πληροφορηθούν τα θετικά της στοιχεία.

Η αποτελεσματική χρήση των υγροβιοτόπων εξαρτάται από την κατάλληλη προεπεξεργασία των αποβλήτων, τις συντηρητικές συνιστώσες και τα υδραυλικά ποσοστά φόρτισης, τη συλλογή πληροφοριών για την αποτίμηση του συστήματος παραγωγής και τη γνώση επιτυχημένων στρατηγικών λειτουργιών. Μια κοινή δυσκολία που χαρακτηρίζει τους τεχνητούς υγροβιοτόπους είναι η δυσκολία παροχής οξυγόνου μέσα στο νερό. Όταν οι υγροβιότοποι είναι υπερφορτισμένοι από τα λύματα τα οποία απαιτούν οξυγόνο ή λειτουργούν σε μεγάλο βάθος, δημιουργούνται μειωμένες συνθήκες οξυγόνωσης στα ιζήματα έχοντας ως αποτέλεσμα το φυτικό στρες και τη μειωμένη μετακίνηση για τη ζήτηση του βιοχημικού οξυγόνου και δέσμευση αζώτου αμμωνίας.

2.10 Μοντέλα σχεδιασμού τεχνητών υγροβιοτόπων

Η μοντελοποίηση συστημάτων τεχνητών υγροβιοτόπων γίνεται κυρίως με στατιστική ανάλυση δεδομένων εισροής και εκροής από λειτουργούσες εγκαταστάσεις. Ένας τρόπος αξιοποίησης των δεδομένων εισόδου και εξόδου είναι οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης (Kadlec and Knight, 1996; Rousseau et al., 2004a). Το μειονέκτημα των γραμμικών αυτών εξισώσεων είναι ότι αντιμετωπίζουν το σύστημα των τεχνητών υγροβιοτόπων σαν ένα μαύρο κουτί, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις εσωτερικές διεργασίες. Οι εξισώσεις αυτές καταλήγουν να περιγράφουν ένα περίπλοκο σύστημα με τη χρήση μόνο δύο ή τριών παραμέτρων (Rousseau et al., 2004a).

Ένας άλλος τρόπος για τη μοντελοποίηση συστημάτων τεχνητών υγροβιοτόπων είναι τα μοντέλα πρώτης τάξης, τα οποία είναι ευρέως διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται ευρέως στο σχεδιασμό τους (Rousseau et al., 2004b). Τα μοντέλα πρώτης τάξης ενσωματώνουν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων, όπως είναι η συγκέντρωση εισροής, η παροχή και η θερμοκρασία, ενώ υποθέτουν ότι η συμπεριφορά των συστημάτων προσομοιώνεται από έναν αντιδραστήρα εμβολοειδούς ροής.

2.10.1 Γενικές διαδικασίες σχεδιασμού

Όλα τα συστήματα τεχνητών υγροβιοτόπων μπορούν να θεωρηθούν ως συσχετιζόμενοι με την ανάπτυξη βιολογικοί αντιδραστήρες και η απόδοσή τους μπορεί να υπολογισθεί με εφαρμογή κινητικής πρώτου βαθμού κινητική για την απομάκρυνση BOD και αζώτου. Η βασική σχέση για αντιδραστήρες εμβολοειδούς (PFR) ροής δίνεται από τη σχέση (Reed et al., 1995):

$$\frac{C_e}{C_0}=e^{-K_T t}$$

όπου

C_e = η συγκέντρωση εκροής του ρύπου, mg/l

C_0 = συγκέντρωση εισροής του ρύπου, mg/l

K_T= η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία πρώτου βαθμού σταθερά ρυθμού αντίδρασης, d^{-1}

t = ο υδραυλικός χρόνος παραμονής,

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής στον υγροβιότοπο μπορεί να υπολογισθεί με τη σχέση:

$$t = \frac{LWyn}{Q}$$

όπου

L = το μήκος του κελιού του υγροβιοτόπου, m

W = το πλάτος του κελιού του υγροβιοτόπου, m

y = το βάθος του νερού στο κελί του υγροβιοτόπου, m

n = το πορώδες, ή το διάστημα που είναι διαθέσιμο για το νερό να ρέει διαμέσου του υγροβιοτόπου.

Η βλάστηση καταλαμβάνει κάποιο διάστημα στους υγροβιοτόπους επιφανειακής ροής και το ίδιο συμβαίνει στους υπόγειας και κατακόρυφης ροής με το πληρωτικό μέσο, τις ρίζες και άλλα στερεά. Το πορώδες είναι ποσοστό επί τοις εκατό και εκφράζεται ως δεκαδικός αριθμός.

Η μέση ροή Q (m^3/d) διαμέσου του υγροβιότοπου υπολογίζεται με χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$Q = \frac{Q_{in}+Q_{out}}{2}$$

Είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τη μέση ροή με την παραπάνω εξίσωση ώστε να αντισταθμιστούν οι απώλειες νερού ή προσθήκες λόγω υγρασίας ή η καθίζηση όσο το νερό ρέει στον υγροβιότοπο. Ο συντηρητικός σχεδιασμός δεν υπολογίζει την υγρασία και υιοθετεί ήδη μετρημένα στοιχεία για τις απώλειες εξατμισοδιαπνοής και προσθήκες βροχοπτώσεων από αρχεία για την περιοχή κάθε μήνα μελέτης. Αυτό απαιτεί μια προκαταρκτική υπόθεση στην εκτίμηση της έκτασης επιφάνειας του υγροβιοτόπου, οπότε ο όγκος του νερού που χάνεται ή προστίθεται μπορεί να υπολογισθεί. Είναι λογικό πολλές φορές για προκαταρκτικό υπολογισμό σχεδιασμού να θεωρούμε ότι Q_{in} είναι ίσο με Q_{out}.

2.10.2 Μοντέλο σχεδιασμού υγροβιοτόπου κατακόρυφης ροής

Σε έναν υγροβιοτόπο κατακόρυφης ροής, τα υγρά απόβλητα εφαρμόζονται ομοιόμορφα στην κορυφή της κλίνης και η εκροή ρέει μέσω διάτρητων σωλήνων στον πυθμένα, παράλληλα στον μακρύ άξονα της κλίνης. Η ιδέα βασίζεται σε εργασία της Seidel (1966) και είναι σε χρήση σε πολλές τοποθεσίες στην Ευρώπη. Το σύστημα τυπικά αποτελείται από δύο γκρουπ, ή στάδια, κελιών κατακόρυφης ροής σε σειρά ακολουθούμενα από ένα ή περισσότερα οριζόντιας ροής κελιά τελικού καθαρισμού. Κάθε στάδιο μονάδας κατακόρυφης ροής αποτελείται από πολλά κελιά εν παραλλήλω και το υγρά απόβλητα εφαρμόζονται περιοδικά με τη σειρά. Στα συγκεκριμένα συστήματα υγροβιοτόπων κατακόρυφης ροής στην Ευρώπη, εφαρμόζονται είτε πρωτοβάθμιες εκροές (τυπικά από σηπτική δεξαμενή), είτε σε ορισμένες περιπτώσεις ακατέργαστα λύματα. Υπάρχουν ανεπαρκή δεδομένα λειτουργίας διαθέσιμα για τεχνητούς υγροβιοτόπους κατακόρυφης ροής, ώστε να επιτρέψουν την ανάπτυξη ενός ορθολογιστικού μοντέλου σχεδιασμού (Reed et al., 1995). Οι ακόλουθες εξισώσεις βασίζονται στη λειτουργία ενός συστήματος στο Ηνωμένο Βασίλειο με 2-ήμερο υγρό κύκλο και 4-ήμερο ξηρό κύκλο (Burka and Lawrence, 1990; Reed et al., 1995).

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν με υπερβολική προσοχή (λόγω περιορισμένης βάσης δεδομένων) στον υπολογισμό της απόδοσης παρόμοιων συστημάτων.

Η απομάκρυνση BOD, ανά στάδιο, είναι

$$\frac{\mathrm{C_e}}{C_0}=e^{\frac{K_T}{HLR}}$$

όπου

C_e = η εκροή BOD, mg/l

C_0 = η εισροή BOD, mg/l

K_T = η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία σταθερά ρυθμού, d^{-1}

= $0{,}3171(1{,}06)^{(T-20)}$,d^{-1}

HLR = μέσος ημερήσιος ρυθμός υδραυλικής φόρτισης κατά τη διάρκεια του κύκλου

χορήγησης της δόσης, m/d

Η απομάκρυνση αμμωνίας, ανά στάδιο, είναι

$$\frac{\mathrm{C_e}}{C_0}=e^{-\frac{K_T}{HLR}}$$

όπου

Ce = η εκροή αμμωνίας, mg/L

C_0 = η εισροή αμμωνίας, mg/L

K_T = η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία σταθερά ρυθμού, d^{-1}

= $0{,}1425(1{,}06)^{(T-20)}$, d^{-1}

HLR = μέσος ημερήσιος ρυθμός υδραυλικής φόρτισης κατά τη διάρκεια του κύκλου χορήγησης της δόσης, m/d

Ως επί το πλείστον, υψηλότερος ρυθμός απομάκρυνσης αμμωνίας αναμένεται στο δεύτερο στάδιο ενός συστήματος δύο σταδίων. Ωστόσο, σε αυτό το δύο σταδίων σύστημα ο ρυθμός απομάκρυνσης αμμωνίας ανά στάδιο είναι περίπου ίσος, αφού το φορτίο BOD στο δεύτερο στάδιο είναι ακόμη υψηλότερο σε σχέση με το επιθυμητό για βέλτιστη νιτροποίηση. Αυτή η απάντηση καταδεικνύει ότι επιπρόσθετες βελτιώσεις και βελτιστοποίηση των υγροβιοτόπων κατακόρυφης ροής είναι επιθυμητές. Το πρώτο στάδιο πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να παράγεται εκροή BOD από 10 έως 15 mg/l. Το δεύτερο στάδιο μπορεί τότε να βελτιστοποιηθεί για απομάκρυνση αμμωνίας και ο κύριος ρόλος του SF υγροβιοτόπου που χρησιμοποιείται ως τρίτο στοιχείο θα είναι η απονιτροποίηση και ο τελικός καθαρισμός.

2.10.3 Κριτήρια σχεδιασμού υγροβιοτόπων κατακόρυφης ροής

Έρευνα εντός των υπηρεσιών της Υγιεινής Μηχανικής και της εμπειρίας σχετικά με τεχνητούς υγροβιοτόπους τελικά οδήγησε στην Γερμανική Οργάνωση για το Νερό, τα Λύματα και τα Απόβλητα (German Association for Water, Wastewater and Waste - ATV) να συντάξει την οδηγία 262, η οποία δίνει ένα σκελετό σχετικά με τη διαστασιολόγηση, την κατασκευή και λειτουργία των υγροβιοτόπων για τέσσερις έως χίλιους κατοίκους (www.tu-berlin.de). Ο σχεδιασμός για τεχνητούς υγροβιοτόπους συνεπώς βασίζεται σε τοπικές πληθυσμιακές πυκνότητες, αλλά θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά προσέγγιση και σε άλλες περιπτώσεις.
Σύμφωνα με την οδηγία 262 της ATV προτείνονται οι παρακάτω παράμετροι σχεδιασμού για τους κατακόρυφης ροής τεχνητούς υγροβιοτόπους:

- Επιφάνεια ≥ 2,5 m^2/κάτοικο
- Βάθος ≥ 0,8 m
- Μέγιστη υδραυλική φόρτιση ≥ 60 mm/d (=l/(m^2*d)

2.11 Γενικά κατασκευαστικά στοιχεία

2.11.1 Έλεγχος φορέων εντόμων

Τα συστήματα τεχνητών υγροβιοτόπων επιφανειακής ροής αποτελούν ιδεώδεις κατοικίες αναπαραγωγής κουνουπιών. Κατά το σχεδιασμό τους, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, αφού τα κουνούπια μπορούν να γίνουν φορείς μεταδόσεως νόσων στις γύρω κοινότητες. Η φύση του υγροβιοτόπου επηρεάζει τα είδη των κουνουπιών που αναπτύσσονται και το ρυθμό αναπαραγωγής τους. Καινούριοι υγροβιότοποι στους οποίους αναπτύσσεται βλάστηση μπορεί να παρέχουν κατάλληλες συνθήκες για κάποια παθογενή είδη και να παράγεται μεγάλος αριθμός κουνουπιών μέσα σε λίγες εβδομάδες. Υγροβιότοποι με πιο σταθερές συνθήκες ροής στους οποίους έχει αναπτυχθεί ένα σύνθετο οικοσύστημα με διάφορα είδη ζώων και φυτών, γενικά φιλοξενούν μικρότερο αριθμό κουνουπιών αν και σε αυτούς μπορεί να εμφανισθεί μεγαλύτερη ποικιλία ειδών. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να καταστούν φορείς διαφόρων ειδών παθογενών οργανισμών όπως ορισμένων πρωτοζώων (Μαλάρια), νηματοειδών (Φιλάρια) και κάποιων ιών (κυρίως ιών εγκεφαλίτιδας) (Walton, 2003).

Είναι χαρακτηριστικό ότι στους τεχνητούς υγροβιοτόπους η πυκνότητα κουνουπιών μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή που αναπτύσσεται σε φυσικούς υγροβιοτόπους. Τα κυριότερα είδη που αφορούν τη δημόσια υγεία είναι τα Anofeles spp., Culex spp., Coquillettidia και Mansonia. Μολονότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που σχετίζονται με ασθένειες που οφείλονται στα κουνούπια, ο κυριότερος που λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση επικινδυνότητας είναι η πυκνότητα του πληθυσμού τους. Είναι πολύ δύσκολο να καθορισθεί ένα ανώτατο όριο πέρα από το οποίο ο πληθυσμός των κουνουπιών αποτελεί κίνδυνο για τη δημόσια υγεία, γιατί η επικινδυνότητα σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό και με την υπό μελέτη περιοχή. Η ανάλυση επικινδυνότητας απαιτεί ολοκληρωμένη παρακολούθηση, αναγνώριση των ειδών που εμφανίζονται, αξιολόγηση τόσο του ρυθμού με τον οποίο αυτά αναπτύσσονται, όσο και της πιθανότητας να έρθουν σε επαφή με ανθρώπους και ζώα

(Ντεντιδάκης, 2000). Έτσι, ο σχεδιασμός των συστημάτων αυτών πρέπει να περιλαμβάνει βιολογικό έλεγχο κουνουπιών, όπως η δημιουργία συνθηκών ανάπτυξης του είδους ψαριού *Gambusia afinis*, σε συνδυασμό βέβαια με χημικό έλεγχό τους. Σημειώνεται ότι είναι απαραίτητα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου άνω του 1 mg/L για τη διατήρηση πληθυσμού ψαριών αυτού του είδους. Επίσης, αραίωση της φυτικής βλάστησης ίσως θεωρείται απαραίτητη για τον περιορισμό τμημάτων, που δεν είναι προσιτά στην ανάπτυξη ιχθυο-πληθυσμού (Αγγελάκης και Tchobanoglous, 1995).

Στον υγροβιότοπο επιφανειακής ροής στην Arcata της Καλιφόρνιας χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία το ψάρι Gambusia και μια χρυσαλίδα (Altosid) για τον έλεγχο των κουνουπιών. Βακτηριακά εντομοκτόνα (Bacillus thuringiensis israeliensis και B. Sphaericus) έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε αρκετά συστήματα υγροβιοτόπων. Η χρήση του B. thuringiensis συστήθηκε προς χρήση μετά από δοκιμές με αρκετά εντομοκτόνα σε συστήματα υγροβιοτόπων στο Kentucky.

Οι κλίσεις των επιφανειών των περιεχόμενων αναχωμάτων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο απότομες και οποιαδήποτε βλάστηση στις επιφάνειες αυτές πρέπει να ελέγχεται. Η παρουσία φυτικών ειδών όπως η λέμνα (duckweed) είναι δυνατόν να συμβάλλει επίσης στον έλεγχο των εντόμων καλύπτοντας την επιφάνεια του νερού, όμως αυτό θα παρέμβει και στη μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα (Ντεντιδάκης, 2000).

Ο έλεγχος των κουνουπιών με χρήση ψαριών είναι σχετικά εύκολος σε τεχνητούς υγροβιοτόπους υπό τον όρο ότι τα μόνιμα ύδατα εκρέουν και αποφεύγονται ιδιαίτερα ανοξικές συνθήκες. Πολλοί υγροβιότοποι που λαμβάνουν μόνο εισροές μη σημειακής ρύπανσης ίσως περιοδικά καταστούν ξηροί, με αποτέλεσμα την ολική απώλεια των πληθυσμών ψαριών που τρέφονται με κουνούπια. Χωρίς φυσικό ή τεχνητό εφοδιασμό με τα ψάρια αυτά, οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι πιθανόν να καταλήξουν σε ιδιαίτερα αρνητικές συνθήκες, όταν είναι τοποθετημένοι κοντά σε κατοικημένες περιοχές (Knight, 1992).

2.11.2 Εξατμισοδιαπνοή

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των υγροβιοτόπων στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι οι απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής. Ως εξατμισοδιαπνοή ορίζεται το μέρος εκείνο των κατακρημνισμάτων που επανέρχεται στην ατμόσφαιρα εξατμιζόμενο είτε από την ελεύθερη επιφάνεια του υγροβιοτόπου είτε από τη διαπνοή των φυτών (Διαμαντής, 1999). Οι απώλειες αυτές δύναται να είναι αρκετά σημαντικές, επομένως είναι αναγκαίο να τις λαμβάνουμε σοβαρά υπ' όψιν για το σωστό σχεδιασμό του συστήματος. Η εξατμισοδιαπνοή αυξάνει το χρόνο παραμονής και τη συγκέντρωση των διαλυμένων συστατικών των αποβλήτων, ενώ σημαντικό πρόβλημα μπορεί να προκληθεί όταν η εισερχόμενη παροχή των αποβλήτων είναι μικρότερη της εξατμισοδιαπνοής και δεν έχουμε βροχοπτώσεις (Ντεντιδάκης, 2000).

2.11.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι κι ιδιαίτερα οι επιφανειακής ροής, λειτουργούν ως χαμηλής απόδοσης «εξαεριστές» (air strippers). Πτητικά συστατικά εγκαταλείπουν τα υγρά απόβλητα και εισέρχονται στην ατμόσφαιρα μετατρέποντας με αυτόν τον τρόπο ένα ρύπο του νερού σε ατμοσφαιρικό ρύπο. Οπότε, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπ' όψιν η πιθανότητα υποβάθμισης του αέρα μέσω αυτής της διεργασίας. Για οργανικούς ρύπους χαμηλών συγκεντρώσεων, η αέρια ρύπανση που προξενείται με αυτόν τον τρόπο είναι αμελητέα. Όμως, στην περίπτωση εξαέρωσης της αμμωνίας είναι δυνατόν να προκληθεί τοπική ανησυχία. Μάλιστα, υπάρχει πιθανότητα, στο μέλλον, οι νόμοι που θα αφορούν την ποιότητα του αέρα να απαιτούν σχεδιαστικούς περιορισμούς που θα βασίζονται στις εκπομπές πτητικών ουσιών (Kadlec, 1999).

2.11.4 Περιορισμοί ψυχρού κλίματος

Μολονότι πολλοί τεχνητοί υγροβιότοποι στον πλανήτη βρίσκονται σε εύκρατες και ψυχρές-εύκρατες ζώνες, αυτές οι κλιματικές συνθήκες δεν είναι ιδανικές για επεξεργασία αποβλήτων. Όλες οι χημικές αντιδράσεις επιβραδύνονται όσο η θερμοκρασία ελαττώνεται κι αυτό συμβαίνει για τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στους τεχνητούς υγροβιότοπους (www.fujitaresearch.com, Mæhlum et al., 1995).

2.11.5 Σχηματισμός πάγου

Ο πάγος έχει απρόβλεπτες επιδράσεις στους τεχνητούς υγροβιοτόπους, ιδιαίτερα στους επιφανειακής ροής. Σε χιονώδη κλίματα, αν αρκετό χιόνι συσσωρεύεται γύρω από τα φυτά κτλ., τότε η πήξη του νερού που βρίσκεται από κάτω εμποδίζεται σημαντικά. Εντούτοις, αν ο πάγος σχηματίζεται γύρω από τους μίσχους φυτών (και συγκρατείται από αυτούς) τότε ο πάγος αυξάνεται προς τα κάτω εντός του νερού, προκαλώντας τα όρια του νερού να χαμηλώσουν ταχύτατα. Η στένωση της ροής μπορεί να οδηγήσει σε πλημμύρα, περαιτέρω πήξη και υδραυλική αποτυχία. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με εφαρμογή οριζόντιας ροής τύπου υγροβιοτόπων με μεγαλύτερο βάθος νερού το χειμώνα. Πρωταρχικά αποτελέσματα από αριθμητικά μοντέλα επίσης προτείνουν ότι η κάλυψη επιφανειακής ροής υγροβιοτόπων με πολυστυρένιο (XPS, 10 cm) είναι επαρκής να αποτρέψει το σχηματισμό πάγου, ακόμη κι αν οι θερμοκρασίες πέφτουν στους -10°C για περιόδους διάρκειας εβδομάδων.

Η ευαισθησία των υγροβιοτόπων υπόγειας ροής στα προβλήματα πάγου είναι μικρότερη σε σχέση με τα προβλήματα των επιφανειακής ροής. Η ακόρεστη επιφάνεια στρώματος λειτουργεί ως μονωτής. Πιστεύεται ότι τα συστήματα κατακόρυφης ροής μπορούν να αντισταθούν περισσότερο στα προβλήματα που δημιουργεί ο πάγος σε σχέση με τα οριζόντιας ροής (www.fujitaresearch.com).

2.11.6 Συνέπειες τήξης

Ένα δεύτερο πρόβλημα με τους υγροβιοτόπους ψυχρών κλιμάτων είναι η τήξη που παρατηρείται την άνοιξη. Η σοβαρότητα του προβλήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της περιοχής συλλογής αποβλήτων για τον υγροβιότοπο. Αν η περιοχή συλλογής είναι μεγάλη, η τήξη θα μειώσει σε έντονο βαθμό το χρόνο παραμονής των αποβλήτων εντός του συστήματος. Αυτό με τη σειρά του επηρεάζει το επίπεδο μείωσης BOD_5 και απομάκρυνσης θρεπτικών (www.fujitaresearch.com).

2.11.7 Βιοχημικές αντιδράσεις και πρόσληψη θρεπτικών

Η θερμοκρασία επηρεάζει το ρυθμό με τον οποίο λαμβάνουν χώρα οι βιογεωχημικές διεργασίες. Σε ψυχρά κλίματα, ο ρυθμός με τον οποίο η βιομάζα απορροφά θρεπτικά θα είναι σημαντικά χαμηλότερος σε σχέση με τα θερμά, υποτροπικά ή τροπικά κλίματα. Στην πραγματικότητα, η επιφάνεια επεξεργασίας που απαιτείται ώστε να μεταφέρει το 90% των θρεπτικών στη βιομάζα αυξάνεται από περίπου 7 ha στους 20°C στα 35 ha στους 0°C. Εντούτοις, αυτό δεν είναι πρακτικά σημαντικό αν δεν απαιτείται ανακύκλωση θρεπτικών (www.fujitaresearch.com).

2.11.8 Αξιολόγηση των διαδικασιών έμφραξης υποστρώματος

Πέραν πάσης αμφιβολίας, το μεγαλύτερο λειτουργικό πρόβλημα των τεχνητών υγροβιοτόπων στις ημέρες μας είναι οι εμφράξεις (clogging) της επιφάνειας του φίλτρου κλινών κατακόρυφης ροής. Ο όρος «έμφραξη υποστρώματος» περιλαμβάνει πολλές διεργασίες που οδηγούν σε μείωση της ικανότητας διήθησης της επιφάνειας του υποστρώματος. Η έμφραξη υποστρώματος οδηγεί σε εξαιρετικά γρήγορη αποτυχία της απόδοσης επεξεργασίας του συστήματος. Η αιτία της αποτυχίας είναι το περιορισμένο απόθεμα οξυγόνου σε έναν εμφραγμένο τεχνητό υγροβιότοπο. Η λειτουργία των τεχνητών υγροβιοτόπων σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων έμφραξης για μεγάλη περίοδο μπορεί συνεπώς να θεωρηθεί ως μια από τις σημαντικότερες μελλοντικές έρευνες στην τεχνολογία τεχνητών υγροβιοτόπων (Langergraber et al., 2003).

Οι κύριοι λόγοι που οδηγούν σε έμφραξη είναι η συσσώρευση αιωρούμενων στερεών και η περίσσεια παραγωγή ιλύος των περιεχόμενων μικροοργανισμών. Επίσης, η χημική κατακρήμνιση και εναπόθεση στους πόρους, η ανάπτυξη ριζωμάτων και ριζών μπορούν να φράξουν ένα μέρος του υδραυλικά ενεργού όγκου πόρων. Ο σχηματισμός και η συσσώρευση χουμικών ουσιών επίσης θεωρείται ότι παίζει ρόλο έως ένα ορισμένο σημείο. Όλοι οι μηχανισμοί οδηγούν σε εσωτερικό και εξωτερικό μπλοκάρισμα του υποστρώματος του φίλτρου με τη μείωση του ενεργού όγκου πόρων και επομένως μειώνοντας την υδραυλική αγωγιμότητα του υποστρώματος. Έτσι, οι πόροι δεν μπορούν να αεριστούν όπως θα ήταν απαραίτητο για την επεξεργασία του υγρού αποβλήτου με νιτροποίηση.

Οι ακόλουθες παράμετροι επηρεάζουν την έμφραξη υποστρώματος (Langergraber et al., 2003):

- Υπόστρωμα: Είναι φανερό ότι η κατανομή του μεγέθους των κόκκων έχει καθοριστική επίδραση στην κατανομή μεγέθους των πόρων, στον υδραυλικά ενεργό όγκο πόρων και συνεπώς στη διεργασία έμφραξης.
- Φορτίο αιωρούμενων στερεών. Η φόρτιση αιωρούμενων στερών έχει αναφερθεί ως ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν.
- Οργανικό φορτίο: Το οργανικό υλικό οδηγεί σε παραγωγή ιλύος (περίσσεια ιλύος μικροοργανισμών) που θα συσσωρεύονται εντός του άνω στρώματος
 του τεχνητού υγροβιοτόπου.
- Στρατηγικές τροφοδοσίας: Φαίνεται να υπάρχει σημαντική επίδραση του αριθμού τροφοδοσιών ανά ημέρα και της ποσότητας μιας απλής τροφοδοσίας στην ικανότητα φίλτρανσης του υποστρώματος.

2.12 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνητών υγροβιοτόπων σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας

2.12.1 Πλεονεκτήματα

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

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

2.12.2 Μειονεκτήματα

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

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός συστήματος για την επεξεργασία κτηνοτροφικών υγρών απόβλητων στις αγροτικές φυλακές της Αγιάς Χανιών.

3.1 Περιγραφή του προβλήματος

Οι αγροτικές φύλακες της Αγιάς Χανιών έχουν έκταση περίπου 332 στρεμμάτων. Στο χώρο των φυλακών στεγάζοναι διάφορες κτηνοτροφικές μονάδες. Στις μονάδες εκτρέφονται χοίροι, βοοειδή (αγελάδες) και πτηνά. Η εκροή των υγρών κτηνοτροφικών απόβλητων της κάθε μονάδας βρίσκεται σε διαφορετικό σημείο. Η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί με τα υγρά απόβλητα του βουστάσιου. Τα βοοειδή στεγάζονται στο χώρο του στάβλου, με το σύστημα του περιορισμένου σταβλισμού αρμεγόμενων αγελάδων.

Κατά τον περιορισμένο σταβλισμό, το βοοειδές είναι δεμένο σε συγκεκριμένη θέση και η δυνατότητα κίνησής του περιορίζεται στο ελάχιστο. Το σύστημα αυτό ενδείκνυται κυρίως για μικρού μεγέθους γαλακτοπαραγωγικές βοοτροφικές επιχειρήσεις. (Αποσέρκογλου, 2009)

Το άρμεγμα των βοοειδών γίνεται 3 φορές την ημέρα, μια τα ξημερώματα, μια το μεσημέρι και μια το απόγευμα. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία τα στερεά απόβλητα απομακρύνονται χειρονακτικά και αφού χωνευτούν, χρησιμοποιούνται για λίπασμα. Έπειτα ο στάβλος και τα βοοειδή καθαρίζονται με νερό. Συνολικά εκτρέφονται 13 αγελάδες, ενώ οι θέσεις ανάπαυσης φτάνουν τις 20.

Εικόνα 6: Θέσεις ανάπαυσης στο βουστάσιο των αγροτικών φυλάκων της Αγιάς.

Επισκεφτήκαμε το βουστάσιο στις αγροτικές φύλακες για να γίνει άμεση δειγματοληψία κατά τον καθαρισμό του στάβλου. Η δειγματοληψία έγινε από το φρεάτιο–σωλήνα στην έξοδο του δικτύου συλλογής των υγρών αποβλήτων σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μέχρι το τέλος της διαδικασίας.

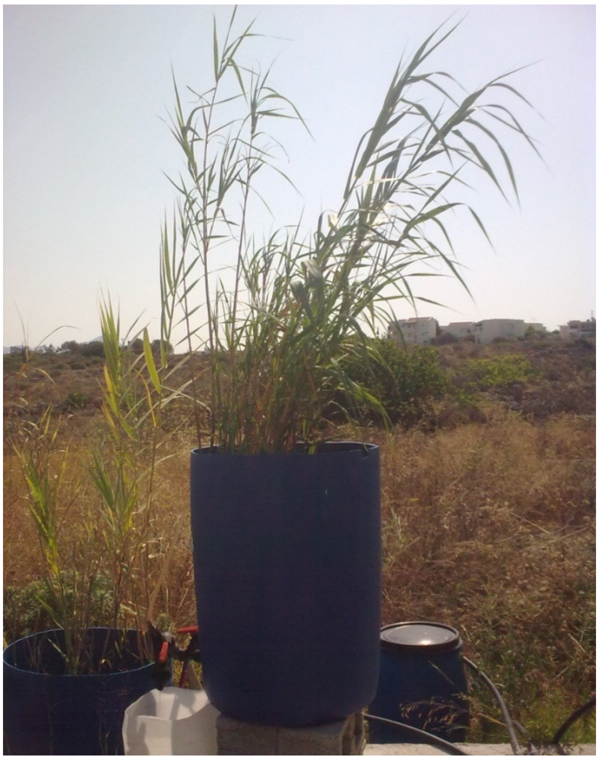
Για να είναι πιο ακριβή - αντιπροσωπευτικά τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας, επισκεφτήκαμε δυο φόρες το βουστάσιο. Η πρώτη δειγματοληψία έγινε το απόγευμα στις 1/6/2011, και η δεύτερη τα ξημερώματα στις 22/6/2011. Το πρωί οι συγκεντρώσεις των παραμέτρων έχουν υψηλές τιμές, διότι μεσολαβεί μεγάλο χρονικό διάστημα από τον προηγούμενο καθαρισμό του βουστασίου. Το απόγευμα οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι πιο χαμηλές και κοντά με αυτές του μεσημεριού γιατί μεσολαβεί πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα.

Τα υγρά απόβλητα που παράγονται κατά τον καθαρισμό της μονάδας διατίθενται στο περιβάλλον χωρίς κάποια ιδιαίτερη επεξεργασία. Στην ευρύτερη περιοχή υπάρχει δίκτυο αποστραγγιστικών καναλιών που καταλήγουν στη λίμνη της Αγιάς. Για το λόγο αυτό έγινε δειγματοληψία σε επιλεγμένα σημεία του αποστραγγιστικού δικτυού και μετρήθηκαν οι παράμετροι COD, TOC, pH, P, TN.

3.2 Περιγραφή πιλοτικής μονάδας

3.2.1 Κατασκευή

Ο τεχνητός υγροβιότοπος κάθετης ροής είχε δημιουργηθεί ήδη στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος για την διεκπεραίωση άλλων πειραματικών διαδικασιών. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η πιλοτική μονάδα, λίγο καιρό αφού έχει αρχίσει η επεξεργασία κτηνοτροφικών απόβλητων.



Εικόνα 7: Πιλοτική μονάδα στις αρχές των πειραμάτων.

Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι τα καλάμια Phragmites australis μπορούν αν αναπτύξουν τις ρίζες τους σε βάθος μεγαλύτερο των 60 εκατοστών (U.S E.P.A Office of Water 1993). Το ύψος του βαρελιού είναι 80 εκατοστά και η διάμετρος 55 εκατοστά. Στον πυθμένα έχει τοποθετηθεί ένα στρώμα χαλαζιακής άμμου πάχους 5cm, πάνω από το στρώμα αυτό υπάρχει το σύστημα αποστράγγισης, το όποιο δεν καλύπτει όλη την επιφάνεια, αποτελείται από τέσσερις παράλληλους σωλήνες από πλαστικό Ǿ 32 mm και στο άνω ημικύκλιο ανοίχτηκαν τρύπες σε τρεις σειρές στο κάθε ένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8. (Γραφιάς, 2008)

Εικόνα 8: Σύστημα αποστράγγισης

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της μονάδας είναι η υπερυψωμένη έξοδος 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 15cm, αλλά αν συνυπολογίσουμε ότι η αποστράγγιση γίνεται από απόσταση 5cm από τον πυθμένα, τότε πρακτικά το ύψος λύματος που μπορεί να παραμένει στον τεχνητό υγροβιότοπο είναι 10cm.

3.2.2 Πληρωτικά υλικά

Ως πληρωτικά υλικά επιλέχτηκαν δύο διαφορετικά, χαλίκι και χαλαζιακή άμμος. Αφού έγινε ο διαχωρισμός του χαλικιού σε δύο μεγέθη, πλύθηκε έτσι ώστε η σκόνη που είχε να μην φράξει το σύστημα αποστράγγισης. Ακολούθως το υπόστρωμα τοποθετήθηκε στις δεξαμενή του τεχνητού υγροβιότοπου από την επιφάνεια προς τον πυθμένα με την εξής διάταξη:

- 30cm χαλίκι διάμετρος < 1cm
- 15cm χαλίκι διάμετρος 1-1,5 cm
- 15cm χαλίκι διάμετρος 1,5-3 cm

Από την επιφάνεια προς τον πυθμένα μεγαλώνει η διάμετρος των υλικών, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλή φίλτρανση από τα στερεά και να διευκολύνεται η διέλευση του αποβλήτου προς το αποστραγγιστικό σύστημα. (Γραφιας, 2008)

3.2.3 Βλάστηση

Το είδος της βλάστησης που επιλέχθηκε στον τεχνητό υγροβιότοπο για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών πειραμάτων, ήταν τα καλάμια *Phragmites australis.* Το χαρακτηριστικό αυτού του είδους, είναι η ανάπτυξη των ριζών σε μεγάλο βάθος > 60 cm, η μεγάλη αντοχή σε αναερόβιες συνθήκες και η μέτρια αντοχή σε ανθρακικό ασβέστιο. (Γραφιας, 2008)

3.3 Λειτουργία της μονάδας

Η πιλοτική μονάδα του τεχνητού υγροβιότοπου υποεπιφανειακής κάθετης ροής τροφοδοτούνταν με ανεπεξέργαστα κτηνοτροφικά λύματα. Η τροφοδοσία γινόταν κάθε δυο μέρες για να υπάρχει περίοδος ξεκούρασης του υγροβιότοπου. Η οργανική φόρτιση εκφράζεται σε ($\frac{g*COD}{d*m^2}$). Η επιθυμητή οργανική φόρτιση επιτυγχάνεται με την κατάλληλη ανάμιξη λύματος και νερού (αραίωση). Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα κριτήρια επιλογής της οργανικής φόρτισης και του αντίστοιχου χρησιμοποιούμενου όγκου υγρού αποβλήτου εξαρτώνται από τους εξής περιοριστικούς παράγοντες:

- Επιλογή κατάλληλης οργανικής φόρτισης, έτσι ώστε να γίνει χρήση όσο το δυνατόν μικρότερης επιφάνειας με μέγιστη απόδοση.

- Η διοχετευόμενη ποσότητα υγρού λύματος να είναι αρκετή, έτσι ώστε να υπάρχει ικανοποιητική έξοδος. Αυτός ο περιοριστικός παράγοντας επηρεάζεται άμεσα από την εξατμισοδιαπνοή που λαμβάνει χώρα στον υγροβιότοπο, αλλά και από την ποσότητα που συσσωρεύεται στον πυθμένα λόγω υπερυψωμένης εξόδου.

Το διάστημα λειτουργίας του τεχνητού υγροβιότοπου χωρίζεται σε δυο περιόδους:
Στην Α περίοδο από 18/7/2011 έως 27/8/2011, και
Στην Β περίοδο από 30/8/2011 έως 1/10/2011,
ενώ προηγήθηκε και ένα διάστημα προσαρμογής.

Στην Α περίοδο λειτουργίας η οργανική φόρτιση ήταν $30(\frac{g*COD}{d*m^2})$. Ο όγκος των λυμάτων ήταν 1,5 λίτρα αραιωμένα με 8 λίτρα νερό, έτσι συνολικά η πιλοτική μονάδα δεχόταν 9,5 λίτρα αραιωμένου λύματος. Αρχικά η οργανική φόρτιση ήταν μικρότερη για την αποφυγή καταστροφής της βλάστησης και παράλληλα δημιουργίας του κατάλληλου ''βιοφίλμ'' από μικροοργανισμούς στο υπόστρωμα. Επίσης σε αυτό το χρονικό διάστημα προσαρμογής ο τεχνητός υγροβιότοπος είχε τη δυνατότητα να έρθει σε ισορροπία και να είναι έτοιμος πλέον για την επεξεργασία των υγρών κτηνοτροφικών λυμάτων. (Γραφιας, 2008)
Στην Β περίοδο η οργανική φόρτιση ήταν $60\left(\frac{g*COD}{d*m^2}\right)$. Ο όγκος των λυμάτων αυξήθηκε στα 3 λίτρα, ενώ ο όγκος του νερού παρέμεινε ο ίδιος.
Η δειγματοληψία γινόταν στην είσοδο και την έξοδο κάθε 4 μέρες. Την πρώτη εβδομάδα της Α αλλά και της Β περιόδου δεν έγινε δειγματοληψία για να υπάρξει χρονικό διάστημα προσαρμογής για τις συγκεκριμένες φορτίσεις. Από την είσοδο αφαιρούνταν 0,5 λίτρα για να γίνουν οι αναλύσεις. Ο όγκος της εξόδου δεν ήταν σταθερός και μετριόταν κάθε φορά για την αναγωγή των συγκεντρώσεων σε μάζα .

3.4 Αναλυτικές μέθοδοι

Σε κάθε δείγμα οι παράμετροι που προσδιοριστήκαν ήταν οι εξής:

- Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)
- Ολικό Άζωτο (TN)
- Βιοχημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5)
- Ολικά Αιωρούμενα στερεά(TSS)
- Διαλυτός οργανικός άνθρακας (DOC)
- Ενεργός οξύτητα (PH)
- Ολικός Φώσφορος (TP)

3.4.1 Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand-COD) είναι η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη οξείδωση, σε έντονα οξειδωτικό περιβάλλον, της οργανικής ύλης στο δείγμα (Οικονομόπουλους και Οικονομοπούλου, 2005) .

Για τον προσδιορισμό του COD χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρίας Merck με μία μέθοδο η οποία βασίζεται στην μέθοδο 5220 D (Closed Reflux, Colorimetric Method) από το Standard Methods (APHA, AWWA, WEF, 1992). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην χημική οξείδωση του υδατικού διαλύματος σε ειδικά φιαλίδια που περιέχουν τα απαραίτητα αντιδραστήρια, μεταξύ αυτών και διχρωμικό κάλιο ($K_2Cr_2O_7$). Γίνεται χώνευση του αντιδραστηρίου με 3 ml για την πρώτη περίπτωση ή με 1ml για την δεύτερη, αδιήθητου δείγματος για δυο ώρες στους 148°C και έπειτα μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο ορατού-υπεριώδους στα 593 nm. Ο τελικός υπολογισμός του COD γίνεται μέσω των ευθειών βαθμονόμησης που προκύπτουν μετρώντας πρότυπα διαλύματα (Γραφιας, 2008).

Ανάλογα με τις αναμενόμενες συγκεντρώσεις υπάρχουν τα αντίστοιχα kit, στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω

1. 14541.0001 για εύρος τιμών COD 25-1500 ppm

2. 14555.0001 για εύρος τιμών COD 500-10 000 ppm

3.4.2 Ολικό Άζωτο (TN)

Όπως και για τον προσδιορισμό του COD έτσι και για το άζωτο χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρίας Merck με μια μέθοδο η οποία είναι βασισμένη στην μέθοδο 4500- Norg από το Standard Methods (APHA, AWWA, WEF, 1992).

Τα kit που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

1.1.14763.0001 για εύρος τιμών από 10-150 ppm

Για κάθε μέτρηση απαιτούνται 1ml δείγματος,9 ml απιονισμένου νερού, μια κουταλιά έτοιμου διαλύματος N-2K και έξι σταγόνες N-1K.Έπειτα ακολουθεί χώνευση για 1 ώρα στους 120˚C. Μετά την μια ώρα 1ml από το χωνευμένο δείγμα και ένα ml από το έτοιμο διάλυμα N-3K προστίθενται στο έτοιμο αντιδραστήριο. Τέλος ο προσδιορισμός γίνεται με φασματοφωτόμετρο στα 338nm. Ο τελικός υπολογισμός του Ολικό Αζώτου γίνεται μέσω των ευθειών βαθμονόμησης που προκύπτουν μετρώντας πρότυπα διαλύματα.

3.4.3 Βιοχημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5)

Το BOD μετρά το οξυγόνο που καταναλώνει για την βιοχημική οξείδωση του μείγματος των οργανικών ενώσεων. Το BOD_5 σε mg/l αντιστοιχεί στα mg O_2 που καταναλώνονται από τους μικροοργανισμούς σε διάστημα 5 ημερών υπό θερμοκρασία 20 C (Οικονομόπουλους και Οικονομοπούλου 2005) .

Ο προσδιορισμός έγινε μανομετρικά με μετρητές πτώσεις πιέσεις των εταιριών OXITOP και AQUALYTIC. Σε μπουκάλια σκούρου καφέ χρώματος τοποθετείται η κατάλληλη ποσότητα δείγματος, ένας μαγνήτης ανάδευσης και υδροξύλιο του καλίου (KOH). Τα μπουκάλια τοποθετούνται σε επωαστικό θάλαμο με σταθερή θερμοκρασία 20 C όπου γίνεται η ανάδευση για πέντε ημέρες. Στα πώματα των μπουκαλιών βρίσκονται τα μανόμετρα. 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 BOD_5.

3.4.4 Ολικά Αιωρούμενα στερεά (TSS)

Ο προσδιορισμός γίνεται με διήθηση υπό κενό, όγκου μεγαλύτερου των 10 ml σε υαλόφιλτρα GF/C 47mm. Τα φίλτρα ζυγίζονται πριν την διαδικασία και διηθείται συγκεκριμένος όγκος δείγματος. Έπειτα τα φίλτρα τοποθετούνται για 20 λεπτά στο φούρνο στους 105 C για ξήρανση. Ακολουθεί νέα ζύγιση του υαλόφιλτου. Η συγκέντρωση προκύπτει από την διαφορά του βάρους και την αναγωγή στο λίτρο.

3.4.5 Διαλυτός οργανικός άνθρακας (DOC)

Ο διαλυτός οργανικός άνθρακας εκφράζει την ολική συγκέντρωση των διαλυτών οργανικών ενώσεων σε mg C ανά λίτρο δείγματος. Η μέτρηση του διαλυτού οργανικού άνθρακα γίνεται με το όργανο προσδιορισμού TOC (SHIMADZU ANALYZER). Η προετοιμασία για την μέτρηση στο όργανο είναι η εξής:

Διηθούμε 10ml δείγματος με μεμβράνες 0,45 mm.Τα δείγματα αυτά τα τοποθετούμε σε μικρά σκουρόχρωμα μπουκάλια και προσθέτουμε 1% HCI 2N.

3.4.6 Ενεργός οξύτητα (pH)

Η ενεργός οξύτητα μετρήθηκε χρησιμοποιώντας πεχάμετρο της εταιρείας Crison, μοντέλο 2002, με ηλεκτρόδια υάλου. Πριν από κάθε μέτρηση γινόταν βαθμονόμηση που πεχάμετρου σε δυο τιμές για pH 4 και pH 7. Έπειτα βυθίζαμε το ηλεκτρόδιο στο δείγμα μέχρι να εμφανιστεί η ένδειξη της τιμής του pH. Επίσης το ηλεκτρόδιο ξεπλενόταν με απιονισμένο νερό και σκουπιζόταν με απορροφητικό χαρτί πριν την μέτρηση κάθε δείγματος.

3.4.7 Φώσφορος (P)

Για την μέτρηση του ολικού φωσφόρου η οποία , είναι βασισμένη στην μέθοδο 4500-P E (Ascorbic Acid Method) από το Standard Methods (APHA, AWWA, WEF,1992) ακολουθούνται δύο στάδια:

1) Διαδικασία Χώνευσης

Σε ποτήρι ζέσεως τοποθετούνται 50ml δείγματος, 1ml H_2SO_4, 5ml HNO_3 και αφήνεται σε χαμηλή θερμοκρασία έτσι ώστε να έχουμε ήπιο βρασμό. Το δείγμα εξατμίζεται σιγά-σιγά μέχρι να μείνει στο ποτήρι ζέσεως περίπου 1ml. Όταν κρυώσει προσθέτονται σε αυτό 20ml νερό και 1 σταγόνα δείκτη φαινολοφθαλείνης (Φ.Φ). Στη συνέχεια προστίθεται μια-μια σταγόνα NaOH για να εξουδετερωθεί και να πάρει το διάλυμα ελαφρώς ροζ χρώμα. Όταν φτάσει στο σημείο αυτό διηθούμε το διάλυμα με φίλτρο μεμβράνης 0,45μm. Το διήθημα τοποθετείται σε ογκομετρική φιάλη των 100ml και συμπληρώνεται με απιονισμένο νερό μέχρι την χαραγή των 100ml.

2) Μέτρηση ολικού φωσφόρου

Για τη μέτρηση του φωσφόρου είναι αναγκαία η παρασκευή ενός σύνθετου διαλύματος το οποίο φτιάχνεται με αναλογία:

- 50 ml 5N H_2SO_4
- 5 ml potassium antimonyl tartrate.
- 15 ml από το διάλυμα ammonium molybdate (40g $(NH_4)6Mo_7O_{24}\cdot 4H_2O$ σε 1L νερού).
- 30ml από το διάλυμα ascorbic acid (φτιάχνεται κάθε φορά που χρησιμοποιειται) (1,76gr ascorbic σε 100ml νερό).

Από το διάλυμα της ογκομετρικής φιάλης των 100ml, τα 50ml τοποθετούνται σε ποτήρι ζέσεως και προστίθενται σε αυτό μία σταγόνα Φ.Φ. Αν το διάλυμα πάρει κόκκινο-ροζ χρώμα, προστίθεται H_2SO_4 μέχρι αποχρωματισμού του. Όταν έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα, τότε γίνεται προσθήκη 8ml σύνθετου διαλύματος φωσφόρου. Παρατηρείται μετά από 10- 30min maximum ένα μπλε χρώμα, το οποίο δημιουργείται λόγω του μολυβδαινίου που περιέχεται στο σύνθετο διάλυμα και δημιουργεί σύμπλοκα με τα φωσφορικά ιόντα. Η μέτρηση της απορρόφησης γίνεται με μικρές κυψελίδες σε φασφατοφωτόμετρο ορατού-υπεριώδους στα 880nm. Ο τελικός υπολογισμός του ολικού φωσφόρου γίνεται μέσω των ευθειών βαθμονόμησης που προκύπτουν μετρώντας πρότυπα διαλύματα.(Γραφιας ,2008)

Το φασματοφωτόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της απορρόφησης ήταν το UV – 1202 Spectrophotometer της εταιρείας SHIMADZU.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων όλων των πειραματικών διαδικασιών που έγιναν:

- Μετρήσεις πεδίου
- Μετρήσεις παροχής και ποιότητας κτηνοτροφικών απόβλητων
- Πιλοτική μονάδα καθίζησης
- Πιλοτική μονάδα τεχνητού υγροβιότοπου

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

4.1.1 Ανάλυση των δειγμάτων από τις μετρήσεις πεδίου.

Τα υγρά απόβλητα που παράγονται από το βουστάσιο καταλήγουν σε ένα δίκτυο αποστραγγιστικών καναλιών. Από τις δειγματοληψίες που έγιναν στα αποστραγγιστικά κανάλια διαπιστώθηκε πως οι τιμές τους δεν ξεπερνούσαν τα όρια ποιότητας νερών για υδάτινους αποδέκτες. Τα όρια παρουσιάζονται στον Πινάκα 3 και τα αποτελέσματα των αναλύσεων στον Πίνακα 4.

Πίνακας 3: Όρια ποιότητας νερών για υδάτινους αποδεκτές.(Πηγή: ΦΕΚ 1811/1999 τεύχος 2 άρθρο 2)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΟΡΙΑ
COD	125mg/l
TP	2 mg/l
TN	15mg/l

Πίνακας 4: Τιμές των παραμέτρων σε επιλεγμένα σημεία.

Σημεία	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	P (mg/L)	TN (mg/L)	pH
Σημείο 1	<25	<0,5	<0,1	10	6,88
Σημείο 2	<25	<0,5	<0,1	<10	7,13
Σημείο 3	<25	<0,5	<0,1	13,7	7,07
Σημείο 4	<25	0,84	<0,1	<10	7,34
Σημείο 5	<25	0,54	<0,1	<10	7,32

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα ακριβή σημεία έγινε η δειγματοληψία.

Εικόνα 9: Σημεία δειγματοληψίας του αποστραγγιστικού συστήματος.

Παρατηρώντας τα αποστραγγιστικά κανάλια στα ανάντη των σημείων δειγματοληψίας διαπιστώθηκε ότι στη συγκεκριμένη περίοδο δεν ήταν καθαρά, άλλα ήταν καλυμμένα με φερτά υλικά (λάσπη) και καλάμια (Phragmites australis) σχηματίζοντας έναν φυσικό υγροβιότοπο. Παρατήρηση που έδωσε την ιδέα για την επιλογή, ως τρόπου επεξεργασίας των κτηνοτροφικών υγρών απόβλητων, του συστήματος τεχνητού υγροβιότοπου.

Εικόνα 10: Αποστραγγιστικά κανάλια

4.1.2 Ανάλυση των κτηνοτροφικών απόβλητων πριν ξεκινήσει η επεξεργασία στη πιλοτική μονάδα.

Στις 1/6/2011 και στις 22/6/2011 έγιναν δυο δειγματοληψίες στο βουστάσιο των αγροτικών φυλακών της Αγιάς για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των παραγομένων κτηνοτροφικών απόβλητων .

Την πρώτη φορά, το απόγευμα στις 1/6/2011 η παροχή του νερού ήταν Q=1,25 l/sec. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των παραμέτρων COD, TSS, TOC, BOD, P, N σε μονάδες (mg/l) και το pH σε διάφορες χρονικές στιγμές. Με τη βοήθεια της παροχής και των χρόνων βρίσκουμε τον συνολικό όγκο των λυμάτων σε κάθε χρονική στιγμή.
Στο Πινάκα 6 παρουσιάζεται η συνολική συγκέντρωση των παραμέτρων με τη βοήθεια του νόμου τη αραίωσης.

Την δεύτερη φορά, το πρωί στις 22/6/2011 η παροχή του νερού ήταν Q=0,82 l/sec. Στον Πινάκα 7 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των παραμέτρων COD, TSS, TOC, BOD, P, N σε μονάδες (mg/l) και το pH σε κάθε χρονική στιγμή. Με τη βοήθεια της παροχής και των χρόνων βρίσκουμε τον συνολικό όγκο των λυμάτων σε κάθε χρονική στιγμή.
Στον Πινάκα 8 παρουσιάζεται η συνολική συγκέντρωση των παραμέτρων με τη βοήθεια του νόμου τη αραίωσης.

1/6/2011 Q=1,25 l/sec

Πίνακας 5: Τιμές παραμέτρων πρώτης δειγματοληψίας το απόγευμα.

t (min)	t (sec)	Vt (L)	V=Vt(ii)-Vt(i)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	TOC (mg/L)	BOD (mg/L)	P (mg/L)	N (mg/L)	pH
0	0	0								
1 32	92	115	115	824	464	142	322	1	>100	8,32
2 20	140	175	60	1500	753	376	506	1	>100	8,57
3 21	201	251	76	875	807	156	230	1	>100	8,42
5 25	325	406	155	8034	4530	375	1955	15	<10	7,31
10 40	640	800	394	790	573	23	115	4	32,7	7,62
17 8	1028	1285	485	500	300	50	100	2		

Πίνακας 6: Συνολική συγκέντρωση παραμέτρων πρώτης δειγματοληψίας το απόγευμα.

	COD	TSS	TOC	BOD	P
C1*V1=	94722	53360	16319	37030	159
C2*V2=	90000	45200	22572	30360	68
C3*V3=	66744	61509	11918	17538	99
C4*V4=	1245237	702150	58203	303025	2325
C5*V5=	311192	225749	9230	45281	1488
C6*V6=	242500	145500	24250	48500	970
ΑΘΡΟΙΣΜΑ :	2050395	1233467	142490	481734	5109
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ(mg/l):	**1596**	**960**	**111**	**375**	**4**

22/6/2011 Q=0,82 l/sec

Πίνακας 7: Τιμές παραμέτρων δεύτερης δειγματοληψίας το πρωί.

t (min)	t (sec)	Vt (L)	V=Vt(ii)-Vt(i)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	TOC (mg/L)	BOD (mg/L)	P (mg/L)	N (mg/L)	pH
0	0	0,00								
1 32	92	76	76	3656	1420	624	1500	1	300	8,12
3 30	210	173	97	8651	4190	746	2800	8	10	8,31
5 8	308	254	81	7773	3330	851	2300	0,56	36	8,42
17 44	1064	876	622	4379	1850	144	800	0,40	200	8,02
18 55	1135	934	58	2918	1230	81	500	0,02	80	7,72
20 0	1200	988	53	2500	1000	50	400	0,00	70	7,5

Πίνακας 8: Συνολική συγκέντρωση παραμέτρων δεύτερης δειγματοληψίας το πρωί .

	COD	TSS	TOC	BOD	P	N
C1*V1=	276971	107567	47276	113627	95	22725
C2*V2=	840521	407098	72442	272046	788	972
C3*V3=	627218	268703	68677	185591	45	2940
C4*V4=	2725845	1151585	89699	497983	249	124496
C5*V5=	170561	71906	4710	29230	1	4680
C6*V6=	133800	53520	2676	21408	0	3746
ΑΘΡΟΙΣΜΑ :	4774917	2060379	285480	1119885	1178	159560
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ(mg/l):	**4833**	**2085**	**289**	**1133**	**1**	**161**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

4.1.3 Αποτελέσματα για την δεξαμενή καθίζησης

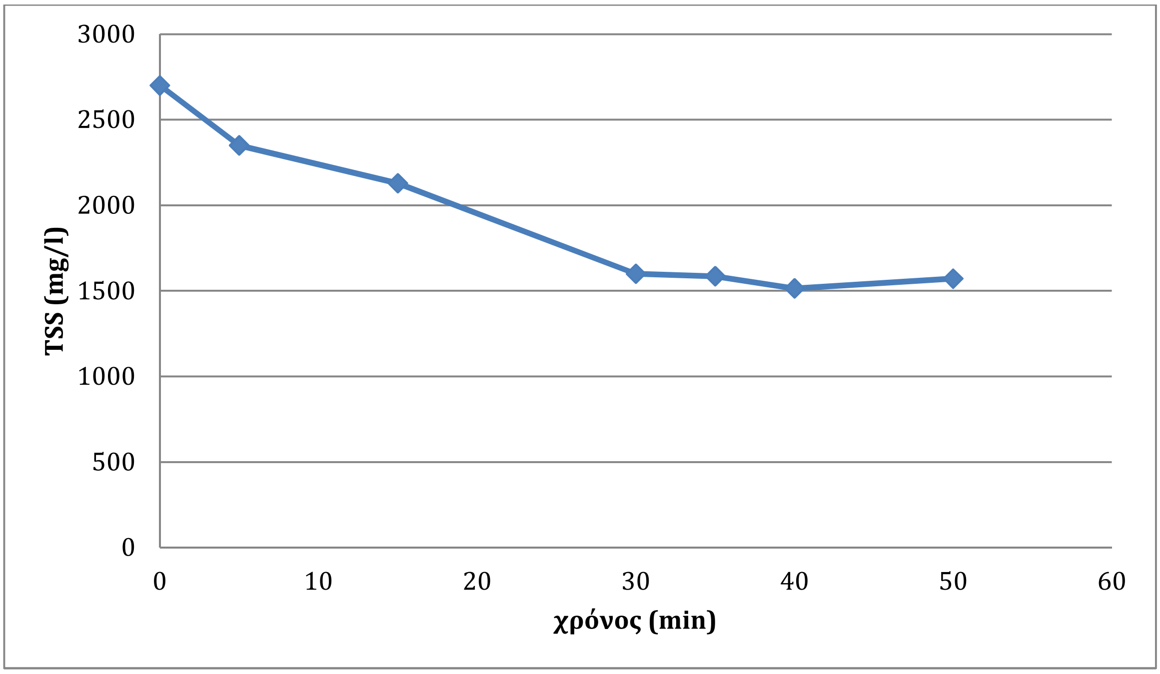
Πριν την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων στον τεχνητό υγροβιότοπο, θα σχεδιαστεί μια δεξαμενή καθίζησης για την απομάκρυνση των ολικών αιωρούμενων στερεών.

Για τη διαστασιολόγηση της δεξαμενής καθίζησης κατασκευάστηκε στο εργαστήριο μια πιλοτική μονάδα. Το ύψος της δεξαμενής ήταν 0,5 m, η διάμετρος 0,83 m και το σημείο δειγματοληψίας βρισκόταν σε βάθος 0,27 m.

Η πειραματική διαδικασία ήταν εξής:

Στην δεξαμενή καθίζησης (βαρέλι) προστέθηκαν κτηνοτροφικά λύματα και ξεκίνησε η καθίζηση των ολικών αιωρούμενων στερεών, την όποια παρακολουθήσαμε με δειγματοληψία. Η δειγματοληψία γινόταν κάθε 5 λεπτά. Η διάρκεια του πειράματος ήταν 50 λεπτά.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα ολικά αιωρούμενα στερεά σε συνάρτηση με τον χρόνο της δειγματοληψίας.



Σχήμα 1: Πείραμα καθίζησης, TSS σε συνάρτηση με το χρόνο.

Για κάθε χρονική στιγμή δειγματοληψίας υπολογίζεται το ποσοστό απομάκρυνσης των ολικών αιωρούμενων στερεών από το σχήμα 1 καθώς και ο ρυθμός υπερχείλισης.

Ο ρυθμός υπερχείλισης δίνεται από τον τύπο:

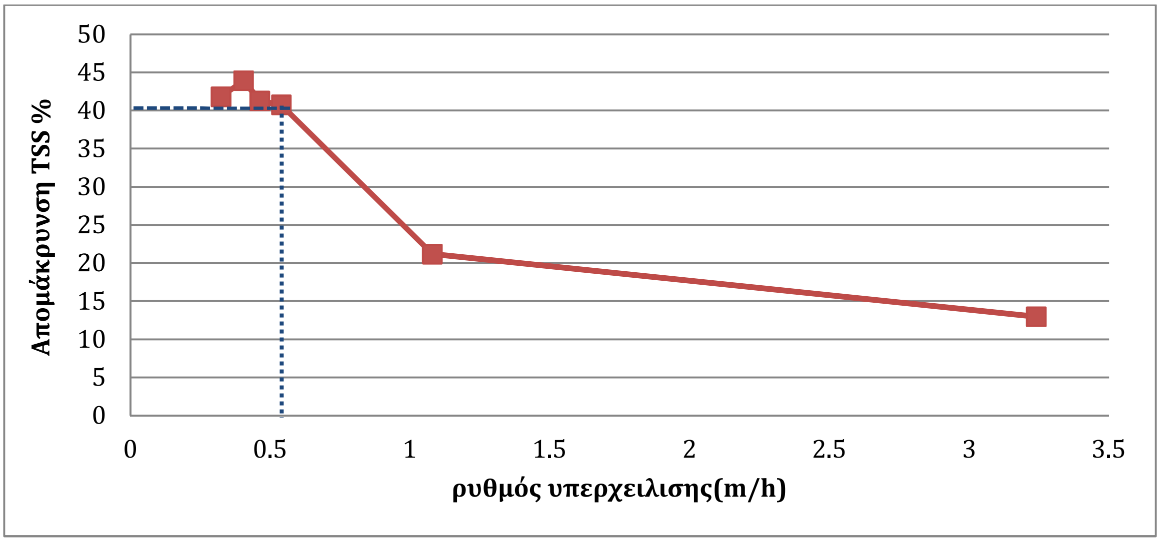
$V_0 = \frac{H}{t}$ (m/h)

Όπου:

H: βάθος σημείου δειγματοληψίας=0,27m

t : χρόνος παραμονής

Έτσι προκύπτει το σχήμα 2.



Σχήμα 2: Απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών σε συνάρτηση με τον ρυθμό υπερχείλισης.

Στα πειράματα που έγιναν με τον υγροβιότοπο η μέση τιμή των ολικών αιωρούμενων στερών στην είσοδο ήταν 655 (mg/l). Στις δυο δειγματοληψίες που έγιναν πρωί και απόγευμα για τον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών των λυμάτων οι τιμές των TSS ήταν 2085 mg/l και 960 mg/l, αντίστοιχα. Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι χρειαζόμαστε μια αρχική απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών πριν τον τεχνητό υγροβιότοπο, από 40% και πάνω. Έτσι από το σχήμα 2 επιλέγουμε ρυθμό υπερχείλισης 0,5 m/h.

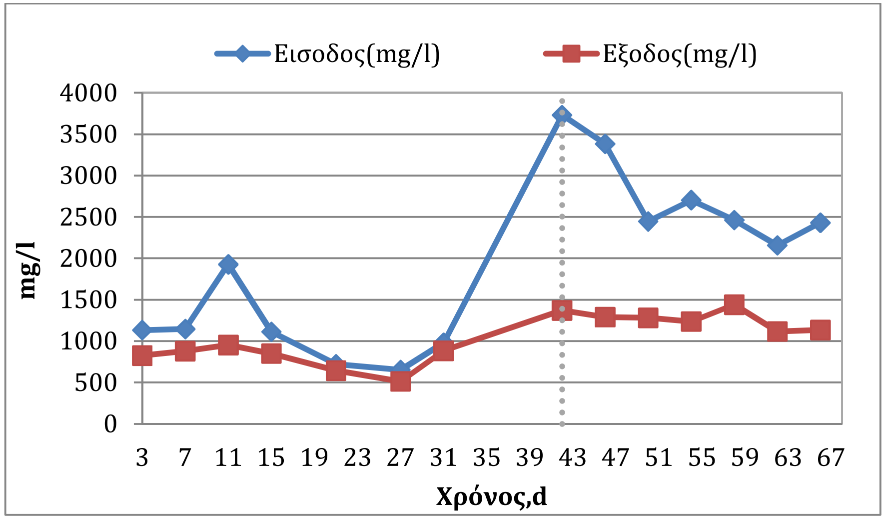
4.1.4 Αποτελέσματα από τον τεχνητό υγροβιότοπο

4.3.1 Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

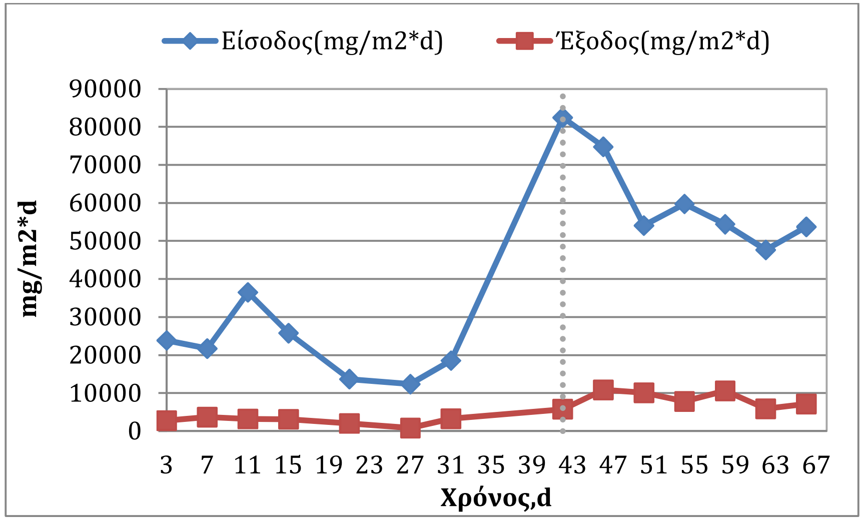
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το οργανικό φορτίο εκφρασμένο σε μονάδες συγκέντρωσης (COD mg/l) στην είσοδο και την έξοδο για τις δυο περιόδους του πειράματος. Στην Α περίοδο οι τιμές στην είσοδο και στην έξοδο δεν έχουν μεγάλη διαφορά σε αντίθεση με την Β περίοδο όπου η συγκέντρωση στην είσοδο είναι μεγαλύτερη άλλα στην έξοδο μειώνεται αισθητά. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η ποσοστιαία απομάκρυνση του COD για όλο το διάστημα των πειραμάτων. Στην Α περίοδο το μέσο ποσοστό απομάκρυνσης είναι 29,5%, ενώ στη Β περίοδο είναι μεγαλύτερο 52,7%.

Κατά τη διάρκεια των πειρατών παρατηρήθηκε να λαμβάνει χώρα εξατμισοδιαπνοή στον υγροβιότοπο, με αποτέλεσμα η εκροή του συστήματος να είναι στην πραγματικότητα συμπυκνωμένη. Για την εξάλειψη αυτής της παραμέτρου έγιναν τα διαγράμματα και σε μονάδες μάζας ανά ημέρα.

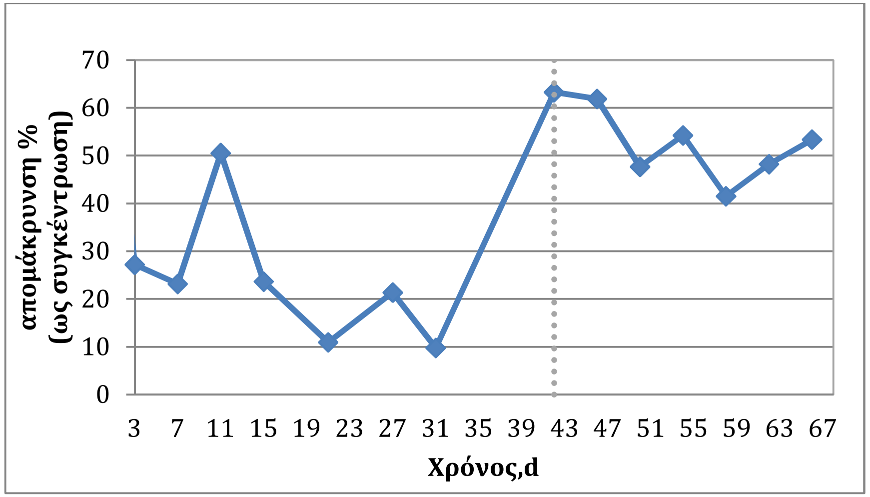
Έτσι στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται το οργανικό φορτίο σε μονάδες μάζας ανά ημέρα (COD, mg/m^2*d),το όποιο επιτυγχάνεται με την εφαρμογή απλών ισοζυγίων μάζας. Η διαφορά τιμών εισόδου-εξόδου (COD, mg/m^2*d) είναι μεγαλύτερη στο Σχήμα 3, από ότι στο Σχήμα 1 στην Α περίοδο, το ίδιο συμβαίνει και στην Β περίοδο. Παρατηρείται πως η έξοδος και στις δυο περιόδους τείνει να σταθεροποιηθεί. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η ποσοστιαία απομάκρυνση του COD. Στην Α περίοδο το μέσο ποσοστό απομάκρυνσης είναι 86,5% και στη Β περίοδο είναι 85,9%.



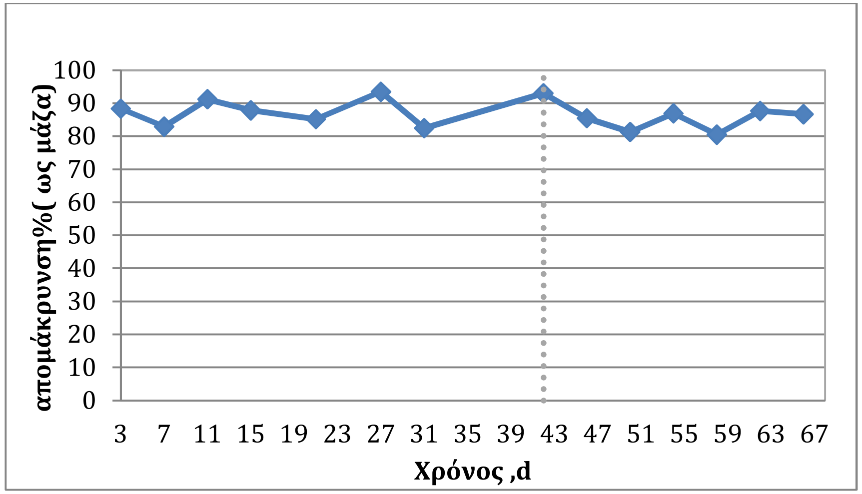
Σχήμα 3: Οργανικό φορτίο του COD(mg/l) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος



Σχήμα 5: Οργανικό φορτίο του COD(mg/m^2*d) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής



Σχήμα 4: Ποσοστό απομάκρυνσης COD %

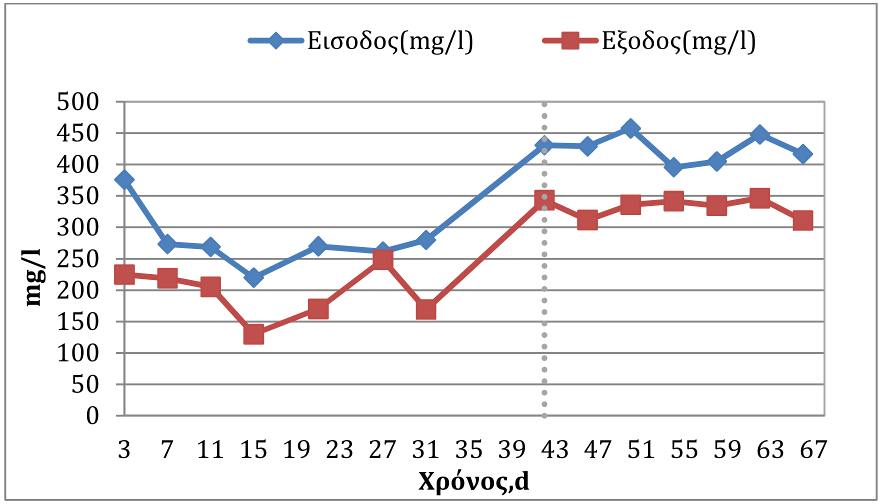


Σχήμα 6: Ποσοστό απομάκρυνσης COD %

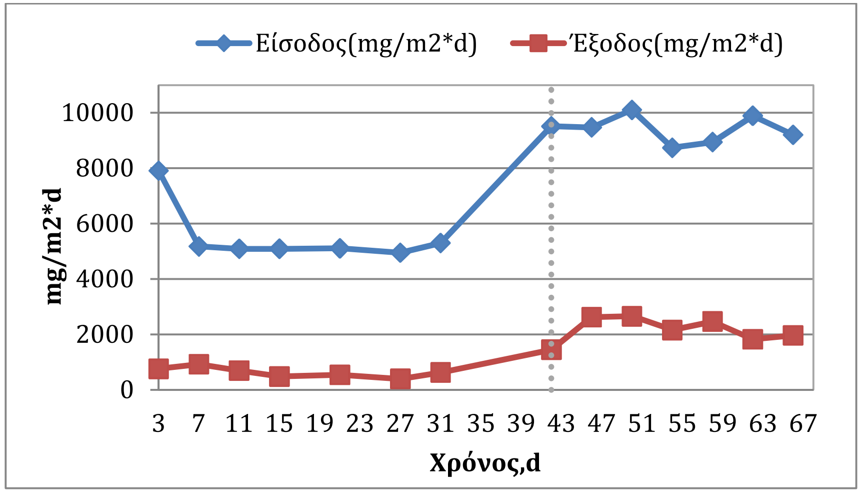
4.3.2 Διαλυτός οργανικός άνθρακας (DOC)

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η συγκέντρωση του διαλυτού οργανικού άνθρακα σε μονάδες (mg/l) στην είσοδο και την έξοδο του τεχνητού υγροβιότοπου και για τις δυο περιόδους. Η έξοδος έχει αρκετά μικρότερες τιμές από την είσοδο εκτός κάποιων σημείων. Στο Σχήμα 8 φαίνεται η ποσοστιαία απομάκρυνση του διαλυτού οργανικού άνθρακα DOC, η όποια παρουσιάζει μεγάλη αστάθεια και στις δυο περιόδους. Στην Α περίοδο η μέση απομάκρυνση είναι 29,5%, ενώ στη Β 21,9%.

Το Σχήμα 9 δείχνει τον διαλυτό οργανικό άνθρακα (DOC) σε μονάδες μάζας (mg/m^2*d) ανά ημέρα στην είσοδο και στην έξοδο του τεχνητού υγροβιότοπου και για τις δυο περιόδους. Η έξοδος τείνει να σταθεροποιηθεί και για τις δυο περιόδους. Το Σχήμα 10 δείχνει την ποσοστιαία απομάκρυνση του DOC. Το μέσο ποσοστό απομάκρυνσης του διαλυτού οργανικού άνθρακα στην Α περίοδο είναι 88,5% και στη Β περίοδο 76,9%

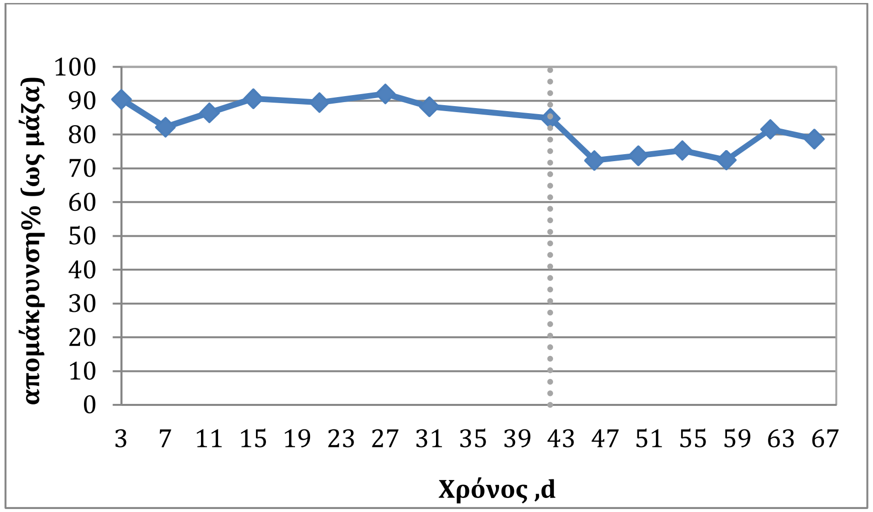


Σχήμα 7: Οργανικό φορτίο του DOC(mg/l) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος



Σχήμα 9: Οργανικό φορτίο του DOC (mg/m2*d) στην είσοδο και έξοδο της πιλοτικής μονάδος.

Σχήμα 8: Ποσοστό απομάκρυνσης DOC

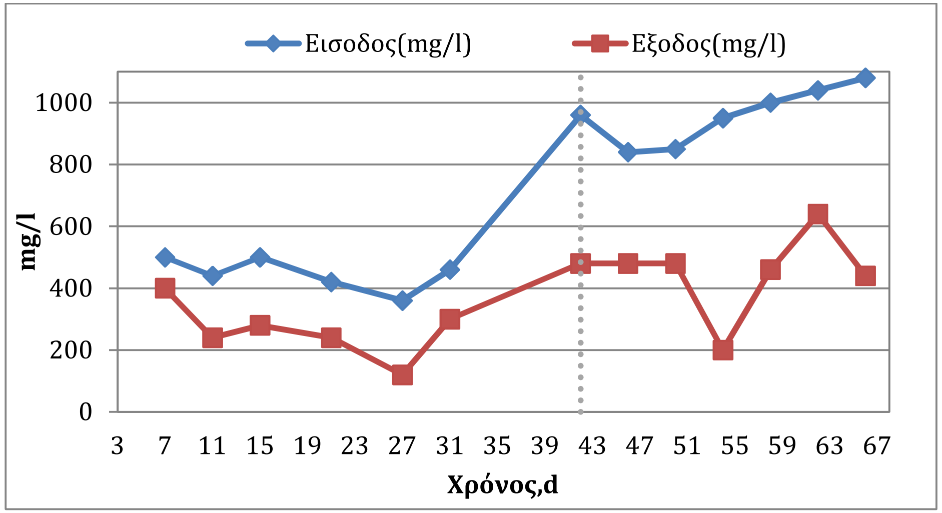


Σχήμα 10: Ποσοστό απομάκρυνσης DOC

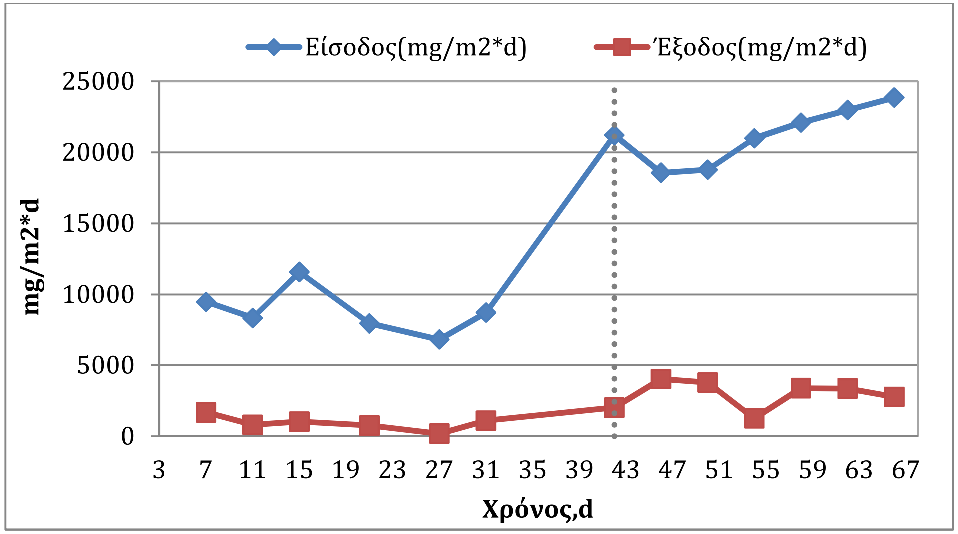
4.3.3 Βιοχημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (BOD_5)

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται η συγκέντρωση του βιοχημικώς απαιτούμενου οξυγόνου (BOD_5) σε μονάδες (mg/l) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος, στην Α και Β περίοδο. Στη Β περίοδο παρατηρείται πως οι τιμές της εξόδου παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση από ότι οι τιμές στην είσοδο. Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται το ποσοστό απομάκρυνσης BOD_5. Το ποσοστό απομάκρυνσης έχει μεγάλες διακυμάνσεις. Το μέσο ποσοστό απομάκρυνσης στην Α περίοδο είναι 42,3% και αντίστοιχα στην Β περίοδο 52,5%.

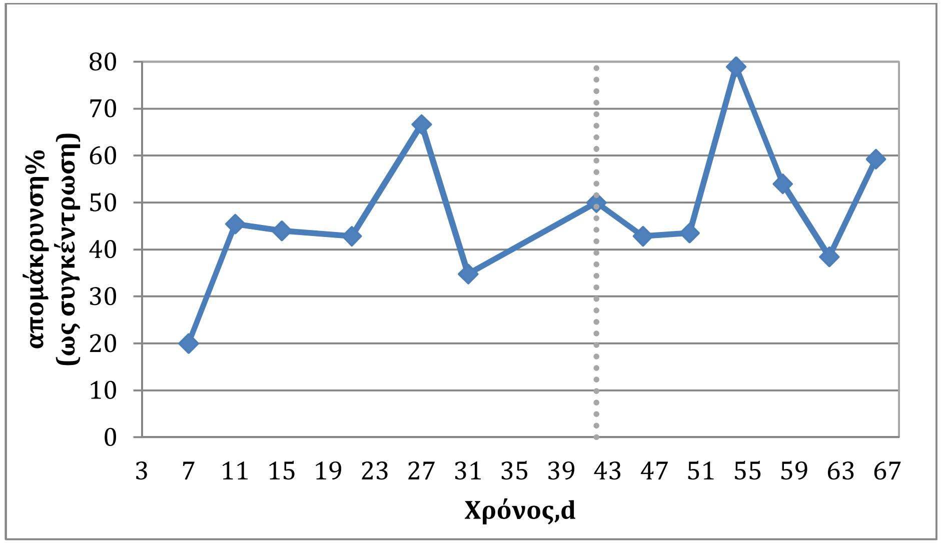
Το Σχήμα 13 παρουσιάζει την είσοδο και έξοδο του BOD_5 σε μονάδες μάζας (mg/m^2*d) στην πιλοτική μονάδα. Στο διάγραμμα φαίνεται πως η είσοδος δεν είναι σταθερή ενώ η έξοδος τείνει να σταθεροποιηθεί. Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται η ποσοστιαία απομάκρυνσης του BOD_5. Οι τιμές της απομάκρυνσης είναι σε ψηλά επίπεδα. Στην Α περίοδο η μέση απομάκρυνση φτάνει στο 89,8%, ενώ στη Β στο 85,8%.



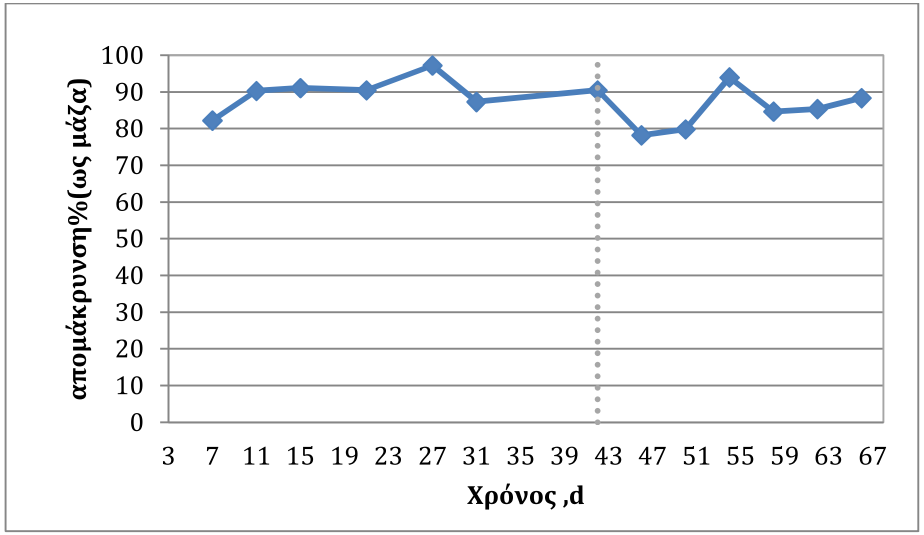
Σχήμα 11: Οργανικό φορτίο του BOD(mg/l) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδας.



Σχήμα 13: Οργανικό φορτίο του BOD(mg/m^2*d) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος



Σχήμα 12: Ποσοστό απομάκρυνσης BOD %

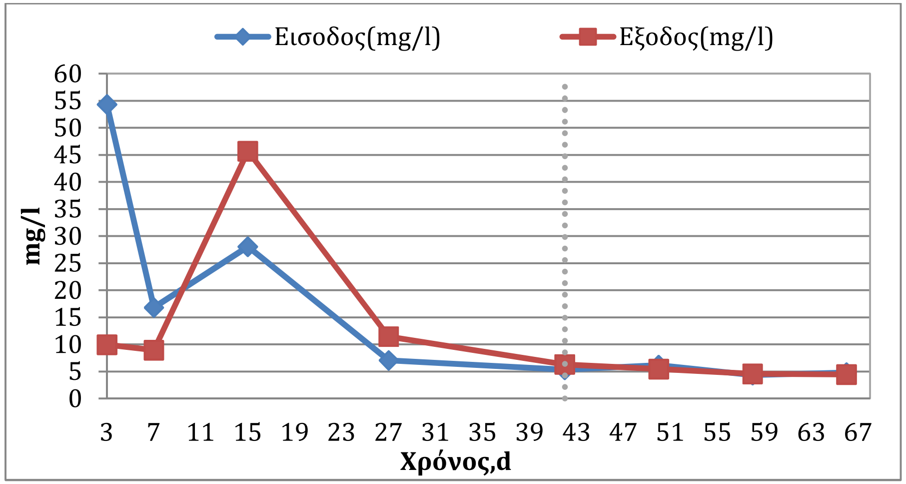


Σχήμα 14: Ποσοστό απομάκρυνσης BOD %

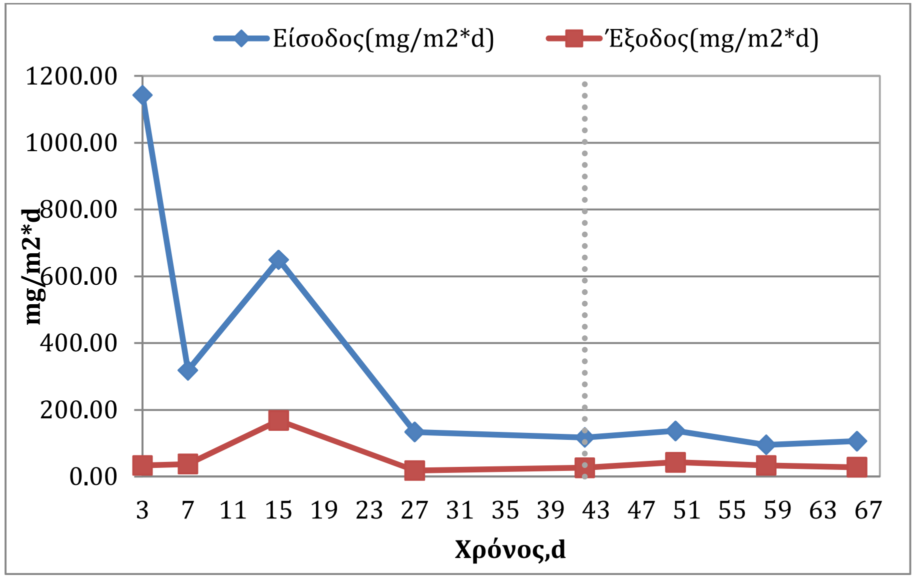
4.2.1 Ολικό Άζωτο (TN)

Το Σχήμα 15 δείχνει την συγκέντρωση του ολικού αζώτου (TN) σε μονάδες (mg/l) στην είσοδο και την έξοδο της πιλοτικής μονάδος. Στην Α περίοδο υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις και κάποιες τιμές της εξόδου είναι μεγαλύτερες από την είσοδο. Στην Β περίοδο η είσοδος με την έξοδο φαίνεται να είναι σταθερά χαμηλές και να συμπίπτουν.
Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η ποσοστιαία απομάκρυνσης του TN (mg/l), φαίνεται να έχει μεγάλη διακύμανση και πρακτικά δεν υπάρχει απομάκρυνση.

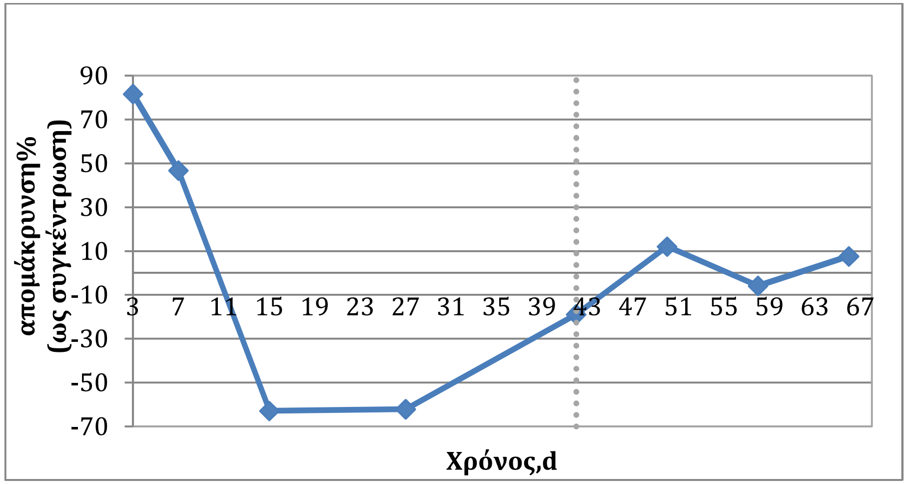
Στο Σχήμα 17 φαίνονται οι τιμές του TN σε μονάδες μάζας (mg/m^2*d) στην είσοδο και την έξοδο της πιλοτικής μονάδος. Παρατηρείται μεγάλη διάφορα στις δυο περιόδους, στη πρώτη περίοδο παρουσιάζετε απόκλιση της εισόδου με την έξοδο σε αντίθεση με την δεύτερη περίοδο όπου οι τιμές είναι πολύ κοντά και δείχνουν να σταθεροποιούνται. Το Σχήμα 18 παρουσιάζει η ποσοστιαία απομάκρυνσης του TN σε μονάδες μάζας (mg/m^2*d). Η επί τις εκατό απομάκρυνση φαίνεται να είναι μεγαλύτερη στην Α περίοδο. Το μέσο ποσοστό απομάκρυνσης % στην Α περίοδο είναι 86,5 % και στην Β 71,1 %.



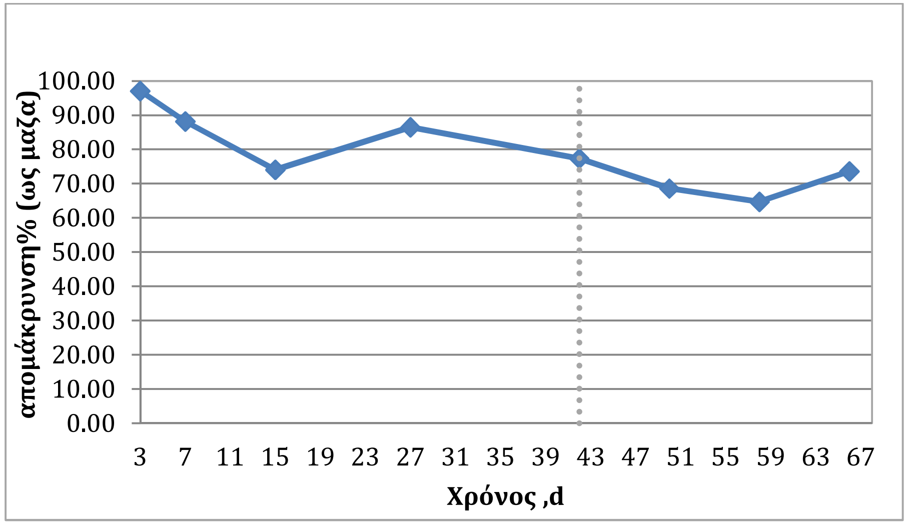
Σχήμα 15: Οργανικό φορτίο του ΤΝ(mg/l) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος.



Σχήμα 17: Οργανικό φορτίο του ΤΝ (mg/l) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος



Σχήμα 16: Ποσοστό απομάκρυνσης ΤΝ %

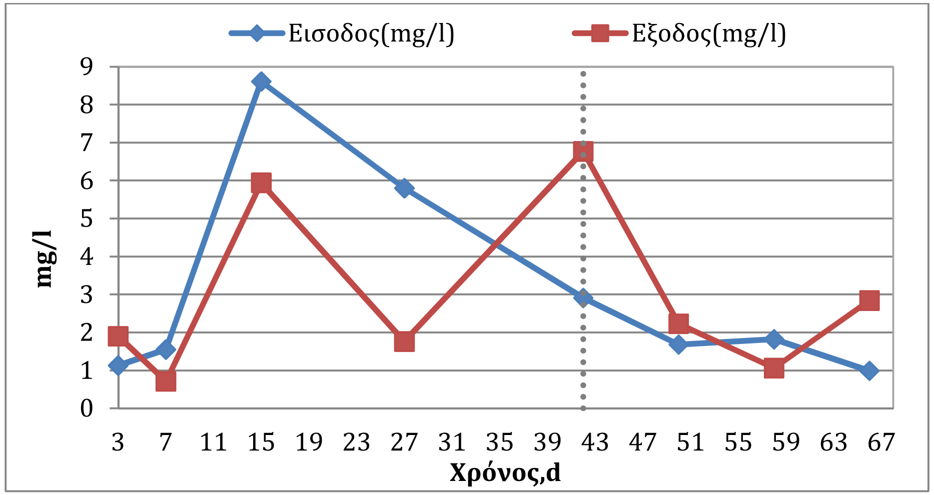


Σχήμα 18: Ποσοστό απομάκρυνσης ΤΝ %

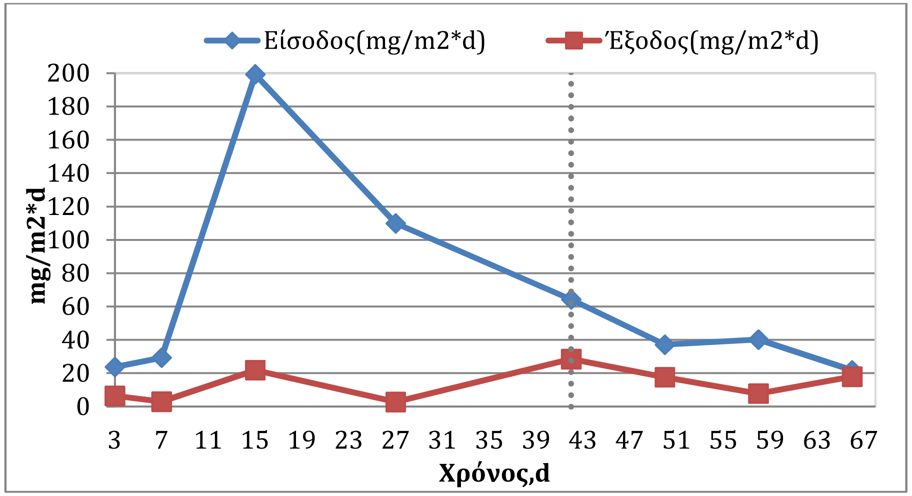
4.2.2 Ολικός Φώσφορος (TP)

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται η συγκέντρωση του ολικού φωσφόρου TP(mg/l) στην είσοδο και την έξοδο της πιλοτικής μονάδας. Οι διακυμάνσεις είναι πολύ μεγάλες ιδίως στην δεύτερη περίοδο κάποιες τιμές της εξόδου ξεπερνούν τις τιμές της εισόδου. Το επόμενο Σχήμα 20 δείχνει την απομάκρυνση του ολικού φώσφορου TP.

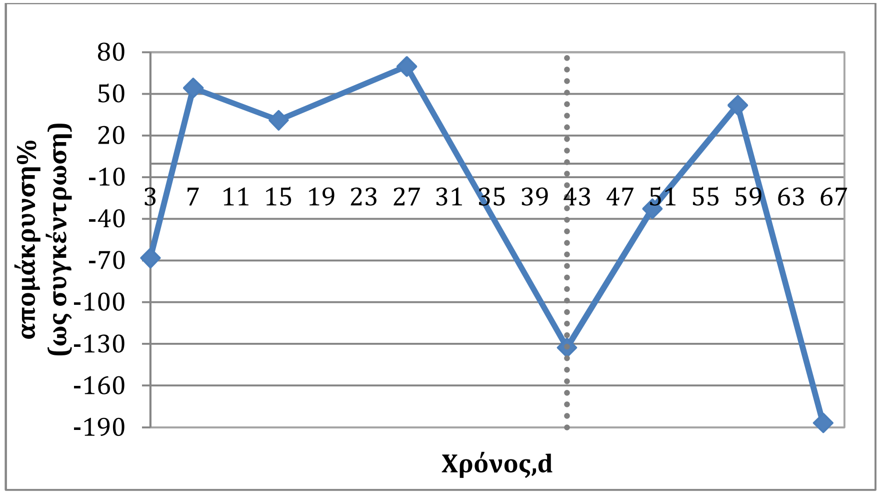
Το Σχήμα 21 δείχνει τον ολικό φώσφορο TP σε μονάδες μάζας (mg/m^2*d). Εδώ η έξοδος φαίνεται να σταθεροποιείται και στις δυο περιόδους, ενώ η είσοδος δεν είναι σταθερή ιδιαίτερα στη Α περίοδο. Στο Σχήμα 22 φαίνεται η ποσοστιαία απομάκρυνσης του ολικού φώσφορου TP. Το ποσοστό απομάκρυνσης φαίνεται να είναι μεγαλύτερο στην πρώτη περίοδο, όπου η μέση απομάκρυνση είναι 87,4%, ενώ στη δεύτερη περίοδο μειώνεται στο 51,7%.



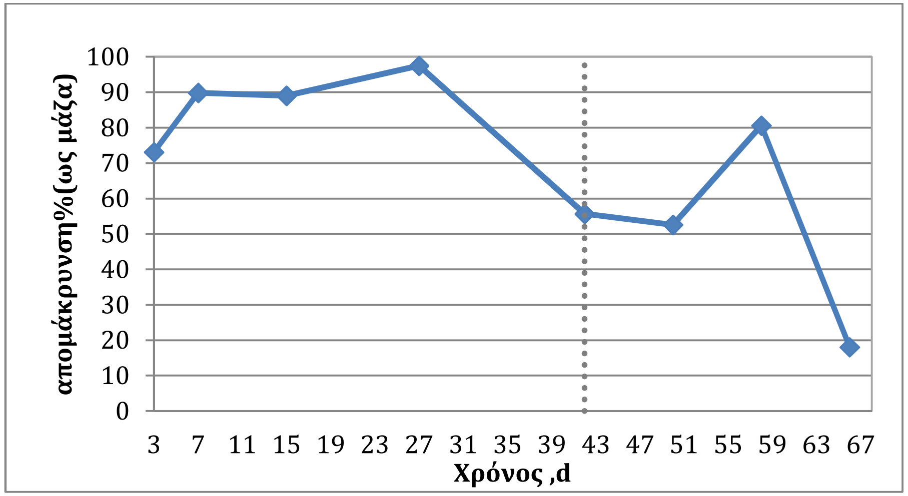
Σχήμα 19: Οργανικό φορτίο του TP(mg/l) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος.



Σχήμα 21: Οργανικό φορτίο του TP (mg/l) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος.



Σχήμα 20: Ποσοστό απομάκρυνσης TP %

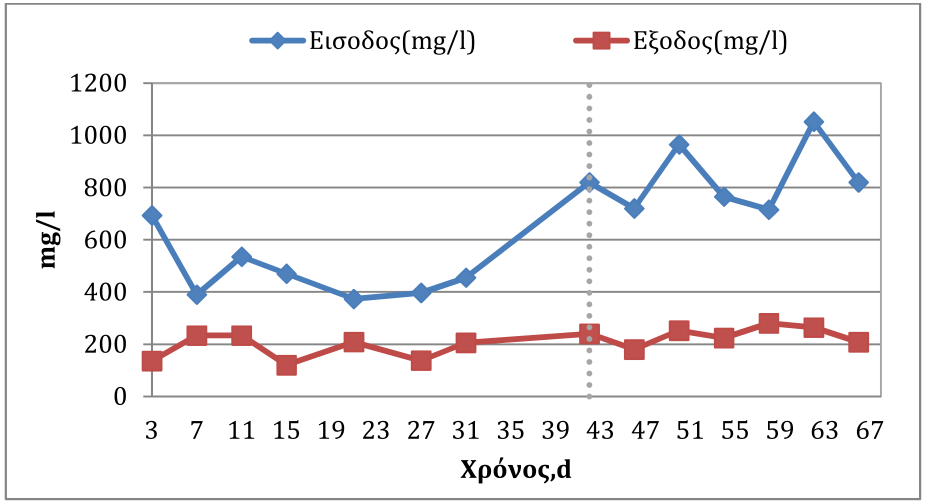


Σχήμα 22: Ποσοστό απομάκρυνσης TP %

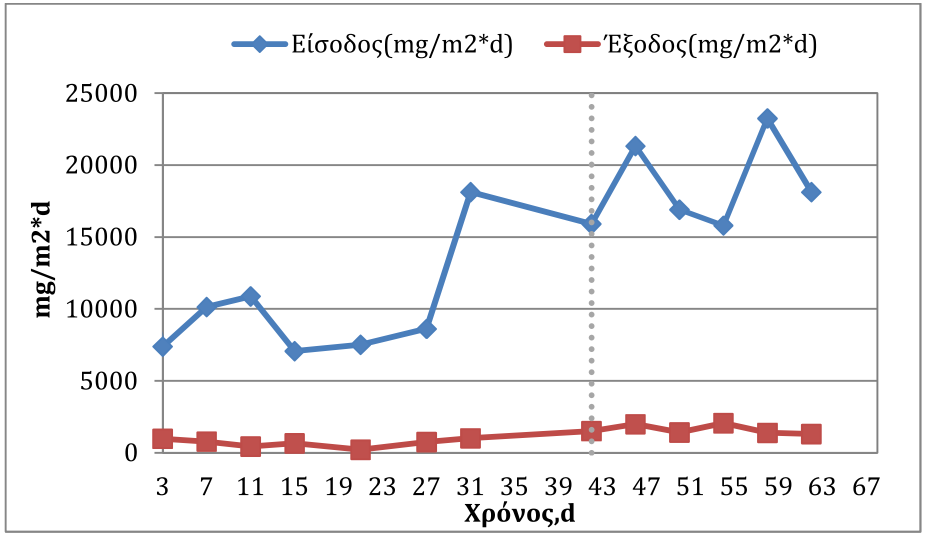
4.2.3 Ολικά Αιωρούμενα στερεά (TSS)

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζονται τα ολικά αιωρούμενα στερεά TSS στην είσοδο και την έξοδο της πιλοτικής μονάδος και για τις δυο περιόδους σε μονάδες (mg/l). Φαίνεται πως η έξοδος τείνει να σταθεροποιηθεί και στις δυο περιόδους, αν και η είσοδος δεν είναι σταθερή. Το Σχήμα 24 δείχνει την ποσοστιαία απομάκρυνσης των TSS. Στην Α περίοδο η μέση απομάκρυνσης είναι 59,4%, αν και παρουσιάζει διακυμάνσεις, ενώ στη Β περίοδο είναι περισσότερο σταθερή και η μέση τιμή της είναι 74,6%.

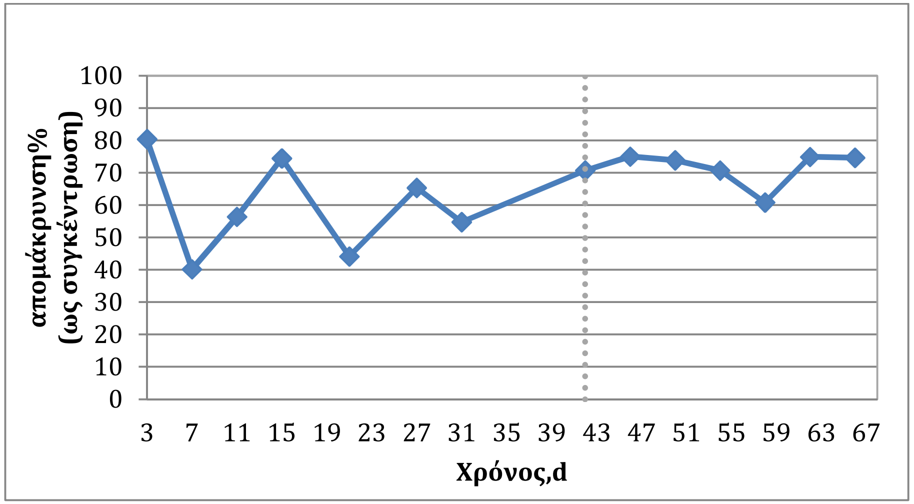
Στο Σχήμα 25 φαίνονται τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) σε μονάδες μάζας (mg/m^2*d), στην είσοδο και την έξοδο της πιλοτικής μονάδος. Οι τιμές της εξόδου είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα με μικρές διακυμάνσεις, ενώ η είσοδος έχει πολύ μεγαλύτερες τιμές και δεν είναι σταθερή. Στο Σχήμα 26 φαίνεται το ποσοστό απομάκρυνσης TSS, το όποιο είναι σε πολύ ψηλά επίπεδα. Το μέσο ποσοστό απομάκρυνσης στην Α περίοδο είναι 92,8% και στη Β 91,6%.



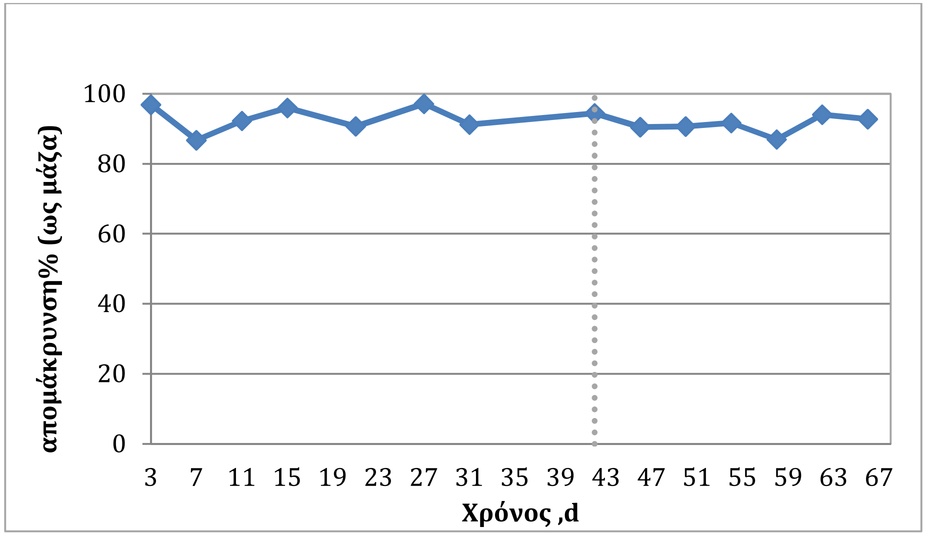
Σχήμα 23: TSS (mg/l) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος.



Σχήμα 25: TSS (mg/m²*d) στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος.



Σχήμα 24: Ποσοστό απομάκρυνσης TSS %



Σχήμα 26: Ποσοστό απομάκρυνσης TSS %

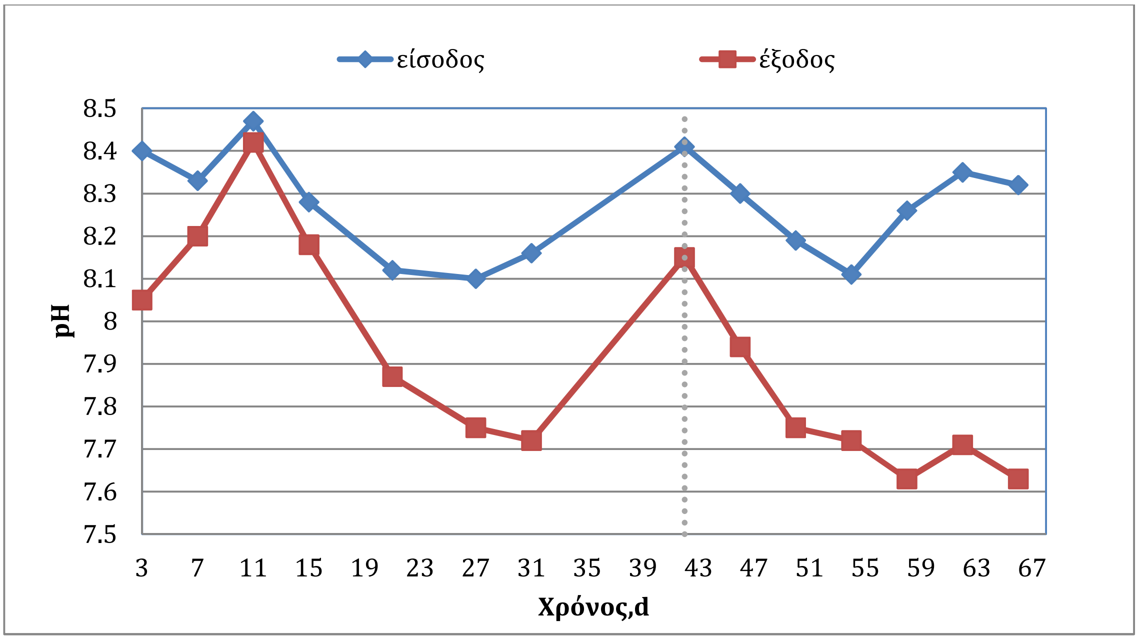
Οι μεσοί οροί των απομακρύνσεων % σε mg/l και σε mg/m²*d παρουσιάζονται στον παρακάτω πινάκα και για τις δυο περιόδους.

Πίνακας 9: Ποσοστά απομάκρυνσης % των παραμέτρων.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Α ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/l)	Β ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/l)	Α ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/m²*d)	Β ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/m²*d)
COD	29,5%	52,7%	86,5%	85,9%.
DOC	29,5%	21,9%	88,5%	76,9%
BOD_5	42,3%	52,4%.	89,8%	85,8%
TN	–	–	86,5%	71,1%
TP	–	–	87,35%	51,8%.
TSS	59,4%	74,6%.	92,8%	91,6%

4.2.4 Ενεργός οξύτητα (PH)

Στο Σχήμα 27 παρουσιάζεται η ενεργός οξύτητα(pH) στην είσοδο και την έξοδο της πιλοτικής μονάδος. Οι τιμές δεν είναι σταθερές, αλλά η είσοδος και η έξοδος ακολουθούν και στις δυο περιόδους την ιδία διακύμανση.



Σχήμα 27: pH στην είσοδο και στην έξοδο της πιλοτικής μονάδος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥ

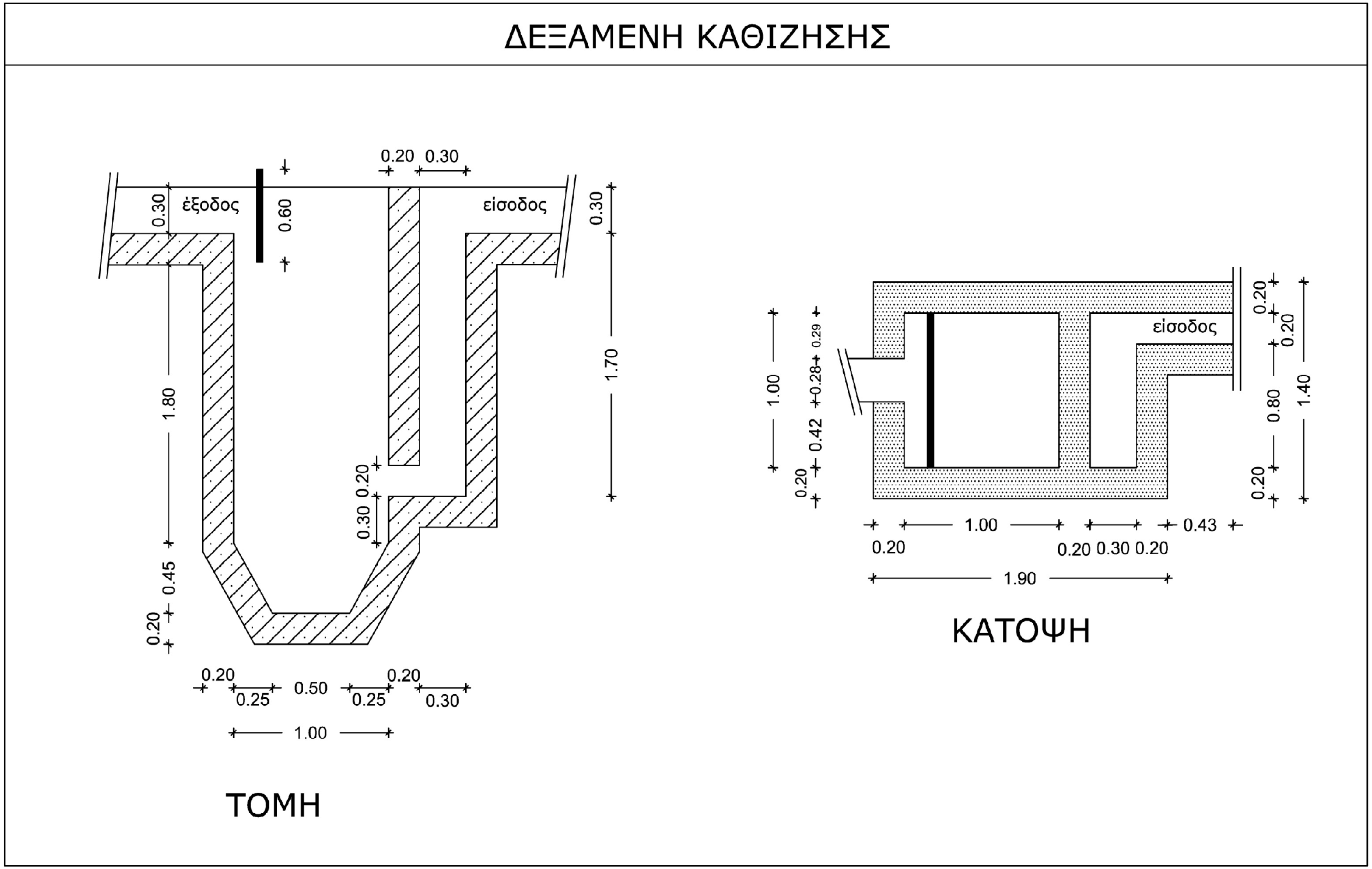
Με βάση τη λειτουργία της πιλοτικής μονάδας θα σχεδιαστεί ο τεχνητός υγροβιότοπος στις φύλακες τις Αγιάς. Η οργανική φόρτιση θα είναι 60 $\left(\frac{g*COD}{d*m^2}\right)$, εφόσον, όπως προαναφέρθηκε, έχουμε ψηλά ποσοστά απομάκρυνσης. Τα πληρωτικά υλικά θα είναι τα ίδια με την πιλοτική μονάδα και η βλάστηση επίσης.

5.1 Διαστασιολόγηση δεξαμενής καθίζησης

Η διαστασιολόγηση της δεξαμενής καθίζησης θα γίνει με βάση των αποτελεσμάτων του πειράματος που έγιναν για αυτή.
Δεδομένου όμως του μικρού όγκου και της διακοπτόμενης παροχής λυμάτων είναι αρκετή μια δεξαμενή καθίζησης όγκου 2 m^3, αφού ο χρόνος παραμονής για κάθε μια από τις τρεις φορτίσεις θα είναι από 4 ώρες και πάνω. Όμως θα προβλέπεται χώρος για κατασκευή και δεύτερης δεξαμενής σε περίπτωση που αυξηθούν οι παροχές.
Ο όγκος της δεξαμενής καθίζησης θα είναι 2 m^3, ενώ στον πυθμένα θα υπάρχει χοάνη, όπου θα συγκεντρώνεται η λάσπη. Η λάσπη θα απομακρύνεται με αντλία προοδευτικής κοιλότητας προς την δεξαμενή ιλύος που ήδη υπάρχει. Από την επιφάνεια της δεξαμενής καθίζησης με υπερχείλιση τα λύματα θα οδηγούνται με φυσική ροή στους τεχνητούς υγροβιότοπους με σωλήνες διαμέτρου 20 cm.
Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαστάσεις της δεξαμενής καθίζησης, η τομή και η κάτοψή της.

Πίνακας 10:Διαστάσεις δεξαμενής καθίζησης

Μήκος	1 m
Πλάτος	1 m
Βάθος	2 m



Εικόνα 11: Τομή και κάτοψη δεξαμενής καθίζησης

5.2 Διαστασιολόγηση τεχνητού υγροβιότοπου

Ο συνολικός όγκος των κτηνοτροφικών απόβλητων καθημερινά είναι περίπου 4500 (l), που κατανέμονται: 1500(l) το πρωί, 1500 (l) το μεσημέρι και 1500 (l) το βράδυ.

Η συγκέντρωση COD των λυμάτων το πρωί εκτιμήθηκε σε 4800 mg/l και το απόγευμα σε 1500 mg/l. Υποθέτουμε ότι η συγκέντρωση COD των λυμάτων το μεσημέρι θα είναι ίση με αυτήν του απογεύματος, αφού από τον προηγούμενο καθαρισμό των αγελάδων μεσολαβούν και για τις δυο περιπτώσεις οι ίδιες περίπου ώρες.

Χρησιμοποιώντας τον νόμο της αραίωσης υπολογίζεται το ημερήσιο μέσο COD.

$C_{ολικό}*V_{ολικό}=C_{πρωί}*V_{πρωί}+C_{μεσημέρι}*V_{μεσημέρι}+C_{απόγευμα}*V_{απόγευμα}$

$C_{ολικό}*4500\ (l)=4800(mg/l)*1500(l)+1500(mg/l)*1500(l)+1500(mg/l)*1500(l)$

$C_{ολικό}*4500\ (l)=11700000(mg)$

$C_{ολικό}=2600\ (mg/l)$

Έτσι στο σύστημα θα μπαίνουν 4500 l λυμάτων καθημερινά με μέσο COD 2600 mg/l. Άρα τα συνολικά γραμμάρια COD που θα δέχεται το σύστημα θα είναι 11700 gr .

Σύμφωνα με τα πειράματα η οργανική φόρτιση που μπορεί να επεξεργαστεί ο τεχνητός υγροβιότοπος αποτελεσματικά είναι $60\left(\frac{g*COD}{d*m^2}\right)$.

Έτσι $\frac{11700(gr)}{60(\frac{gr}{m^2})}=195\ m^2$

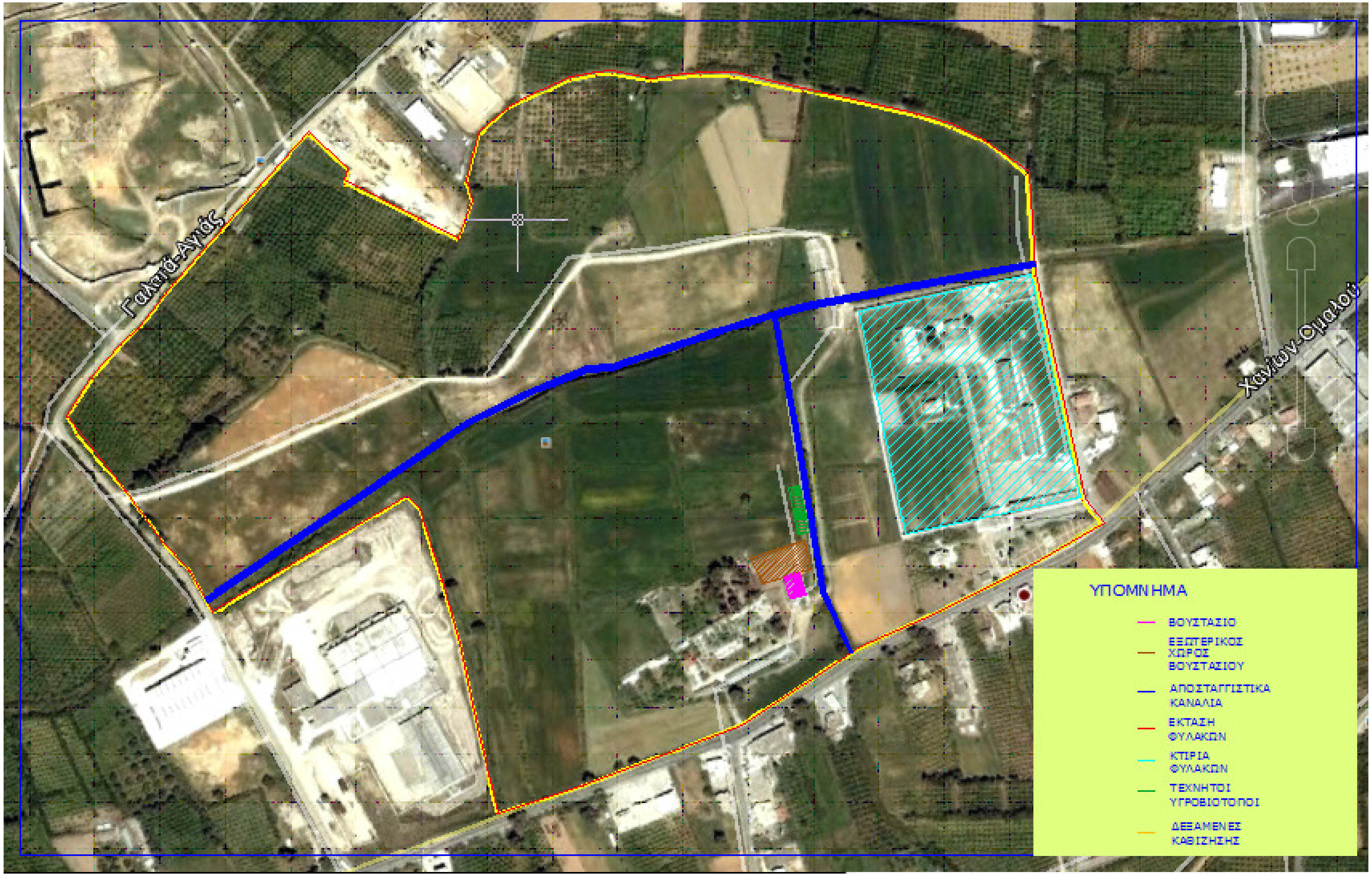
Λαμβάνοντας υπόψη πως η τροφοδοσία της πιλοτικής μονάδας με κτηνοτροφικά απόβλητα γινόταν κάθε δυο ημέρες για να υπάρχει περίοδος ξεκούρασης, θα κατασκευαστούν δυο τεχνητοί υγροβιότοποι. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι θα είναι ίδιων διαστάσεων και η τροφοδοσία τους θα γίνεται εναλλάξ με σωλήνες διαμέτρου 20 cm. Οι διαστάσεις τους θα είναι 20 m μήκος και 10 m πλάτος και θα έχουν κλίση 1 %.

Οι τεχνητοί υγρότοποι πρέπει να στεγανοποιούνται προς όλες τις κατευθύνσεις για την προστασία των υπόγειων νερών, έτσι ως στεγνωτικό υλικό θα χρησιμοποιήσουμε μεμβράνη από πολυαιθυλένιο πάχους 1mm. Στο πυθμένα του τεχνητού υγροβιότοπου θα τοποθετηθεί ένας διάτρητος αγωγός αποστράγγισης το όποιο θα βρίσκεται κατά τι μήκος της κλίνης με κλίση 2%.Ο αγωγός θα οδηγεί τα επεξεργασμένα λύματα στο φρεάτιο εξόδου.

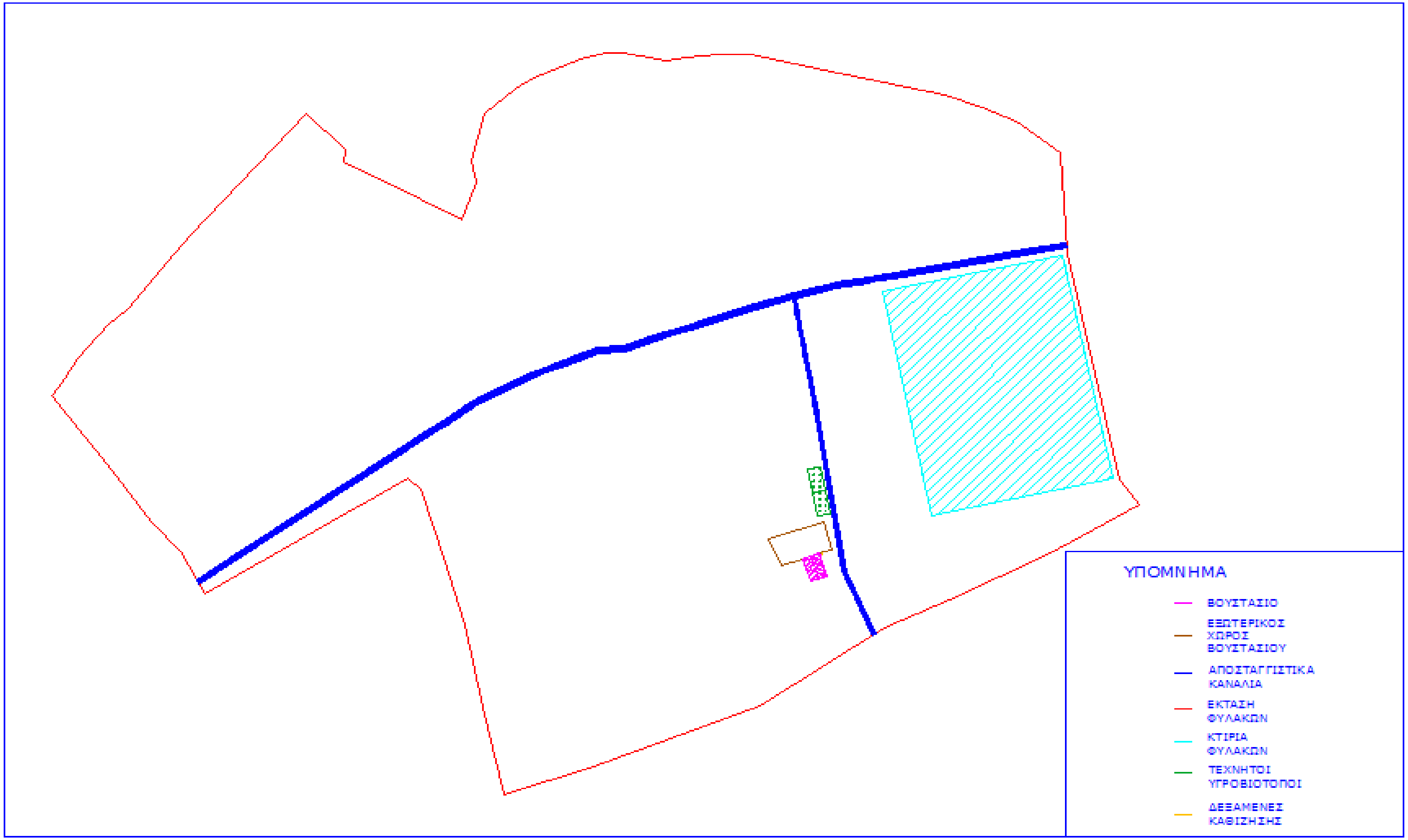
Πίνακας 11: Διαστάσεις φρεάτιο εξόδου.

Μήκος	0,75 m
Πλάτος	0,75 m
Βάθος	1,65 m

Παρακάτω παρουσιάζεται η κάτοψη των εγκαταστάσεων επεξεργασίας κτηνοτροφικών απόβλητων σε σχέση με το διαθέσιμο χώρο.

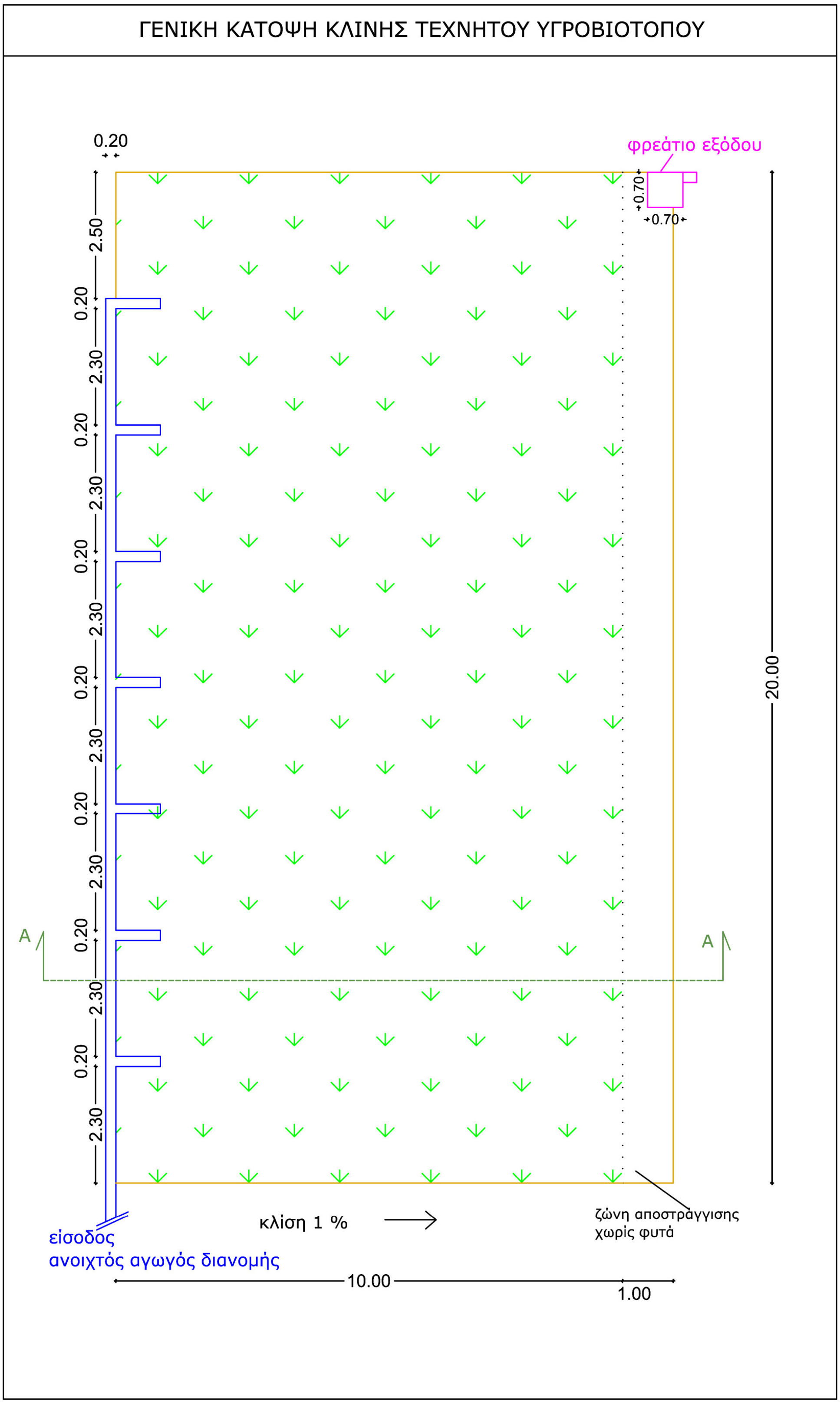


Εικόνα 12: Τοπογραφικό της έκτασης των φυλάκων και των εγκαταστάσεων με φόντο το χάρτη της περιοχής.

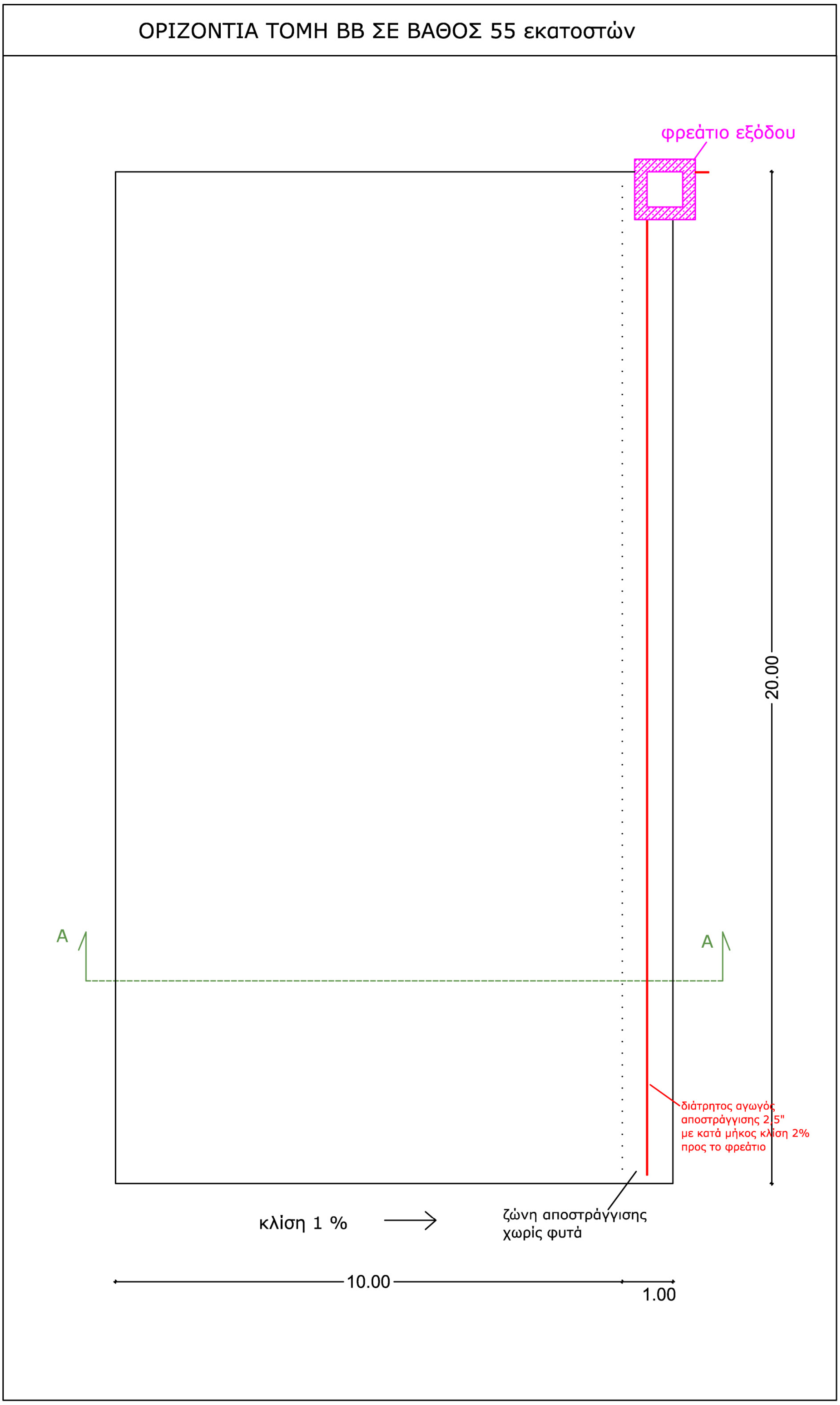


Εικόνα 13: Τοπογραφικό της έκτασης των φυλάκων και των εγκαταστάσεων.

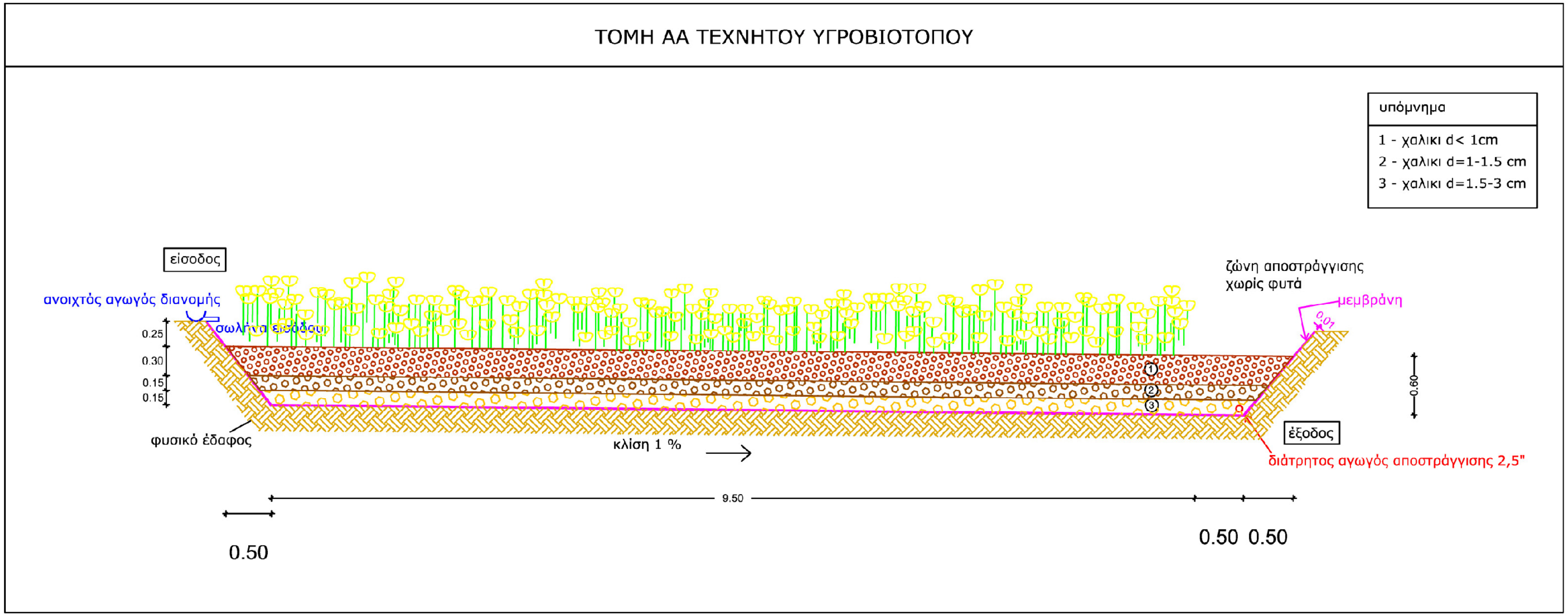
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η κάτοψη και η τομή των τεχνητών υγροβιότοπων και η τομη και η κάτοψη του φρεάτιο εξόδου.



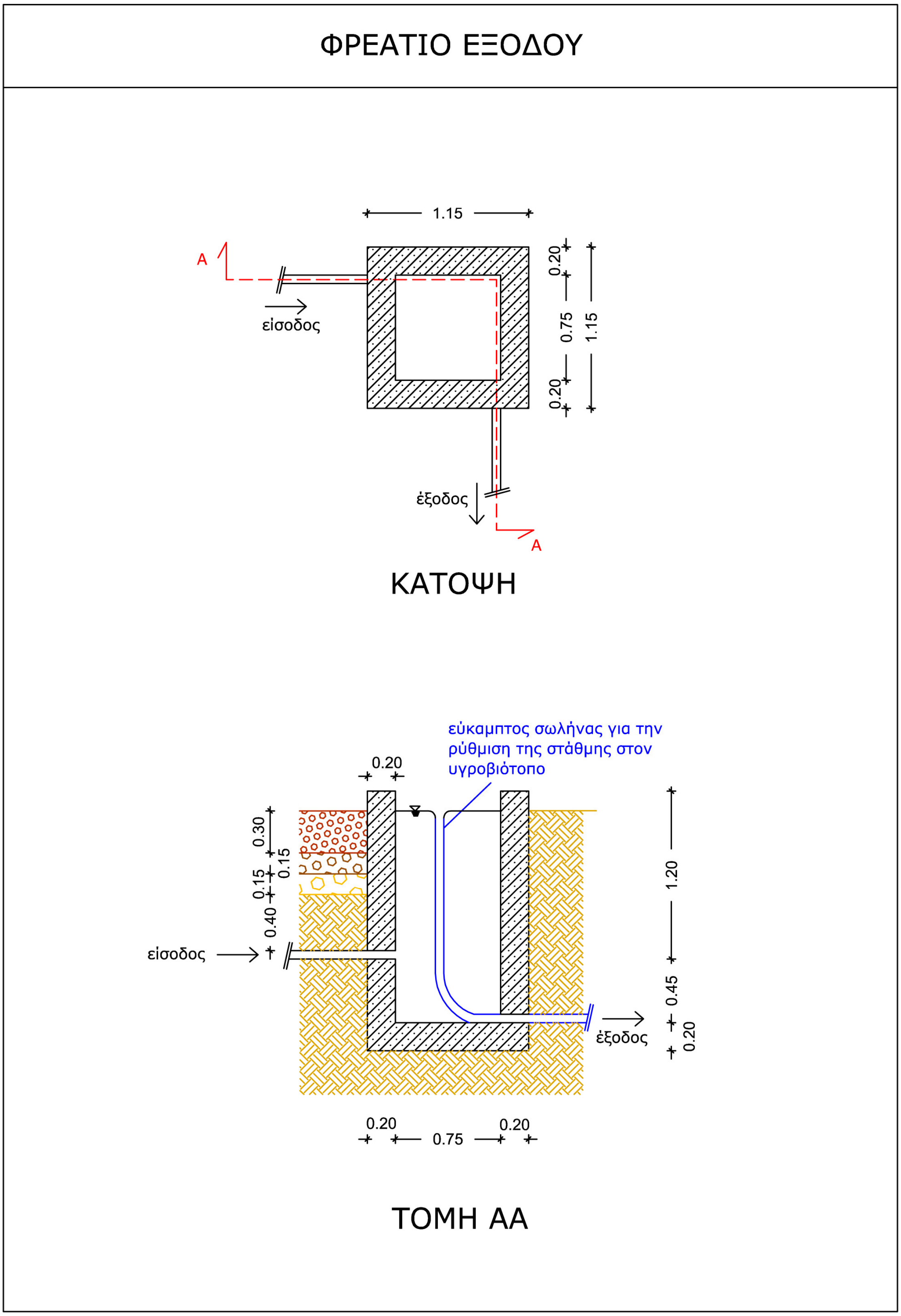
Εικόνα 14: Κάτοψη τεχνητού υγροβιότοπου.



Εικόνα 15: Οριζόντια τομή τεχνητού υγροβιότοπου.



Εικόνα 16: Τομή τεχνητού υγροβιότοπου.



Εικόνα 17: Κάτοψη και τομή φρεάτιο εξόδου.

ΚΑΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Συμπεράσματα λειτουργίας

Με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

1. Οι απομακρύνσεις των περισσότερων παραμέτρων που αναλύθηκαν ήταν υψηλές και στις δυο περιόδους των πειραμάτων. Οι απομακρύνσεις και στις δυο περιόδους φαίνεται στο παρακάτω πινάκα.

Πίνακας 12: Απομακρύνσεις των παραμέτρων και στις δυο περιόδους.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Α ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/l)	Β ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/l)	Α ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/m^2*d)	Β ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/m^2*d)
COD	29,5%	52,7%	86,5%	85,9%.
DOC	29,5%	21,9%	88,5%	76,9%
BOD_5	42,3%	52,4%.	89,8%	85,8%
TSS	59,4%	74,6%.	92,8%	91,6%

2. Τα ποσοστά απομάκρυνσης του ολικού φωσφόρου και αζώτου είναι χαμηλά σε σχέση με τις άλλες απομακρύνσεις. Στον Πινάκα 12 παρουσιάζονται οι απομακρύνσεις του ολικού φώσφορου και αζώτου. Γενικά αυτά τα συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων δεν έχουν μεγάλα ποσοστά απομάκρυνσης στις συγκεκριμένες παραμέτρους.

Πίνακας 13: Απομακρύνσεις TN και TP στις δυο περιόδους.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Α ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/l)	Β ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/l)	Α ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/m^2*d)	Β ΠΕΡΙΟΔΟΣ (mg/m^2*d)
TN	–	–	86,5%	71,1%
TP	–	–	87,35%	51,8%.

3. Στην Β περίοδο αν και η οργανική φόρτιση ήταν διπλάσια, τα ποσοστά απομάκρυνσης έχουν υψηλές τιμές.
4. Βάση των αποτελεσμάτων σχεδιάστηκε η μονάδα τεχνητού υγροβιότοπου. Οι μονάδες πλήρους κλίμακας έχουν τα εξής χαρακτηρίστηκα:

   Α)Δεξαμενή καθίζησης

   Πλάτος 1m, Μήκος 1m, Βάθος 2m.

   Β)Τεχνητοί υγροβιότοποι

   Πλάτος 10 m, Μήκος 20 m, Βάθος 0,60 m.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

- Αγγελάκης, Α.Ν. και Tchobanoglous, G., 1995, «Υγρά Απόβλητα – Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επαναχρησιμοποίηση και Διάθεση Εκροών», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Αποσέρκογλου Δ. 2009 «Βοοτροφια στο Νομό Κοζανης» Τεχνικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Θεσσαλονίκης. Σχολή Τεχνολογίας γεωπονίας, τμήμα ζωικής παραγωγής.
- Γραφιάς Π. 2008 «Συνδυασμένη Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων Πυρηνελαιουργείου με Ηλεκτοχημική Οξείδωση και Σύστημα Τεχνητού Υγροβιοτόπου» Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Διαμαντής, Ι.Β., 1999, «Επιλεγμένα Θέματα Υδρογεωλογίας», Εκδόσεις Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης
- Ζουραράκη, Ε., 2002, «Σχεδιασμός και Λειτουργία Τεχνητών Υγροβιοτόπων Επεξεργασίας Λυμάτων», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εκδόσεις Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης.
- Καραμούζης, Δ., 2003, «Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων (Τεύχος 1: Τεχνητοί Υγρότοποι)», Εκδόσεις Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.
- Ντεντιδάκης, Μ., 2000, «Επεξεργασία Λυμάτων σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εκδόσεις Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης.
- Οικονομόπουλους Α. Οικονομοπούλου Μ. 2005, «Ρύπανση και Έλεγχος Ρύπανσης Νερών», Πανεπιστημιακες σημειώσεις Κρήτης
- Τσιχριντζής, Β.Α., 2000, «Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία ,Τόμος Ι (Διαχείριση Απορροής, Ρύπων και Φερτών) και Τόμος ΙΙ (Φυσικές Μέθοδοι Επεξεργασίας Αποβλήτων - Πρόληψη Ρύπανσης)», Εκδόσεις Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης.
- Φραγκάκη Γ. 2008 «Ενεργειακό δυναμικό από τα κτηνοτροφικά απόβλητα στο Νομό Ηρακλείου» ΤΕΙ Φυσικών πόρων και περιβάλλοντος

Διεθνής βιβλιογραφια

- Kadlec, R. and Knight, R., 1995, “Treatment Wetlands”, Lewis Publishers, New York
- Kadlec, R. and Knight, R., 1996, “Treatment Wetlands”, CRC Press.
- Metcalf and Eddy, 1991, “Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, (Third Edition)”, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series.
- Reed, S.C. and Crites, R.W., 1984, “Handbook of Land Treatment Systems for Industrial and Municipal Wastes”, Noyes Publications, Park Ridge.
- Reed, S.C. and Crites, R.W., Middlebrooks E.J., 1995, “Natural Systams for Waste Management and Treatment”, 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, USA.

Επιστημονικά άρθρα

- Ayaz, S.C. and Akca, L., 2001, “Treatment of Wastewater by Natural Systems”, Environmental International, Vol. 26, pp.189-195.
- Artificial wetlands and water quality improvement. Shutes, 2001 R.B.E. s.l. : Environment International, , Vol. 26, pp. 441-447.
- Bachand, A.M.P. and Horne, J.A., 2000, “Denitrification in constructed free-water surface wetlands: II. Effects of vegetation and temperature.”, Ecological Engineering, Vol. 14, pp.17-32.
- Bendoricchio, G., Cin, L.D. and Persson J., 2000, “Guidelines for Free Water Surface Wetland Design.”, EcoSys Bd., Vol. 8, pp. 51-91
- Brix, H. and Arias, C.A., 2005, “The Use of Vertical Flow Constructed Wetlands for On-Site Treatment of Domestic Wastewater: New Danish Guidelines”, Ecological Engineering, Vol. 25, pp. 491-500.
- Burka, U. and Lawrence, P.C., 1990, “A New Community Approach to Waste Treatment with Higher Water Plants, in Constructed Wetlands in Water Pollution Control, IAWPCR, London, pp. 359-371.

- Haberl, R., Perfeler, R. and Mayer, H., 1995, “Constructed Wetlands in Europe“, Water Science and Technology, Vol. 32, pp. 305-15.
- Hammer, D.A., 1989, “Designing constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint source pollution.”, Ecological Engineering, Vol. 1, pp. 49-82.
- IWA (Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, Constructed Wetlands for Pollution Control – Processes, Performance, Design and Operation, Scientific and Technical Report No:8., Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. and Haberl, R. (eds)), 2000, International Water Association, London, UK.
- Kadlec, R.H., 1995, “Overview Surface Flow Constructed Wetlands”, Water Sience Technology, Vol. 32, pp. 1-2.
- Kadlec, R.H., 1999, “Constructed Wetlands for Treating Landfill Leachate.”, In: Mulamoottil G., McBean E.A. and Rovers F. (Eds), Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates, Lewis Publishers, Boca Raton, FL., pp 187-204.
- Knight, R.L., 1992, “Ancillary Benefits and Potential Problems with the Use of Wetlands for Nonpoint Source Pollution Control.”, Ecological Engineering, Vol. 1, pp. 97-113.
- Korkusuz, E.A., Beklioglu, M. and Demirer, G.N., 2004, “Treatment Efficiencies of the Vertical Flow Pilot-Scale Constructed Wetlands for Domestic Wastewater Treatment”, Turkish J. Eng. Env. Sci., Vol. 28, pp. 333-344.
- Langergraber, G., Haberl, R., Laber, J. and Pressl, A., 2003, “Evaluation of Substrate Clogging Processes in Vertical Flow Constructed Wetlands”, Water Science Technology, Vol. 48 (5), pp. 25-34.
- Mæhlum, T., Jenssen, P.D. and Warner, W.S., 1995, “Cold-climate Constructed Wetlands”, Water Science Technology, Vol. 32 (3), pp. 95-101.
- Mitsch, W.J., 1992, “Landscape Design and the Role of Created, Restored, and Natural Riparian Wetlands in Controlling Nonpoint Source Pollution.”, Ecological Engineering, Vol. 1, pp. 27-47.
- Ottovà, V., Balcarovà, J. and Vymazal, J., 1997, “Microbial Characteristics of Constructed Wetlands”, Water Science and Technology, Vol. 35 (5), pp. 117-123.
- Prescott, K.L. and Tsanis, I.K., 1997, “Mass balance modeling and wetland restoration”, Ecological Engineering, Vol. 9, pp. 1-18.

- Rousseau, D.P.L., Vanrolleghem, P.A. and Pauw, N.D., 2004, "Model-based Design of Horizontal Subsurface Flow Constructed Treatment Wetlands: A Review", Water Research, Vol. 38, pp. 1484-1493.
- Rousseau, D.P.L., Vanrolleghem, P.A. and Pauw, N.D., 2004, "Constructed Wetlans in Flanders: A Performance Analysis", Ecological Engineering, Vol. 23 (3), pp. 151-163.
- Tsihrintzis, V.A., 1999, "Protection of Wetlands from Development Impacts", Proceedings of the International Conference ECOSUD 99 – Ecosystems and Sustainable Development, Wessex Institute of Technology, May 31 – June 2, Lemnos, Greece, pp.273-282.
- US Environmental Protection Agency (USEPA), 1981, "Process Design Manual for Land Treatment of Municipal Wastewater", EPA 625/1-81-013, Cincinnati, OH.
- US Environmental Protection Agency (USEPA), 2000, "Wastewater Technology Fact Sheet- Free Water Surface Wetlands, Office of Water.", US Environmental Protection Agency, Washington D.C., USA.
- Vymazal, J., 2002, "The Use of Sub-surface Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in the Czech Republic: 10 Years Experience", Ecological Engineering, Vol. 18, pp. 633-646.
- Walton, W.E., 2003, "Managing Mosquitoes in Surface-Flow Constructed Treatment Wetlands, Division of Agriculture and Natural Resources.", University of California, Riverside.

Διαδικτυακοί τόποι

www.ramsar.org

www.fujitaresearch.com

www.tu-berlin.de