



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΥΠΟΛΛΕΙΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ
ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Η Αξιοποίηση Τεχνητών Υγροβιότοπων στην Επεξεργασία
Υδάτινων Εκρμών Αυτοκινητοδρόμων»**



ΖΑΡΜΑΚΟΥΤΗΣ ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ

ΤΜ. ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΘΟΚΟΜΙΑΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΘΡΑΣΥΒΟΥΛΟΣ ΜΑΝΙΟΣ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2006

*Στους γονείς και
την αδερφή μου.*

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα πτυχιακή εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και πρώτα από όλα τον Δρ. Θρασύβουλο Μανιό για την επιλογή του θέματος και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω:

Τους υπευθύνους του εργαστηρίου « Διαχείρισης Στερεών Υπολειμμάτων & Υγρών Αποβλήτων» της Σχολής Τεχνολογίας Γεωπονίας του ΤΕΙ Κρήτης, κυρία Γεωργάκη Ειρήνη , κυρία Δρακοπούλου Σταυρούλα, κύριο Μανιαδάκη Κωνσταντίνο και τον κύριο Σαμπαθιανάκη Ιωάννη για την άψογη συνεργασία καθώς και για το ευχάριστο κλίμα και το πνεύμα συνεργασίας που επικρατεί στους χώρους του εργαστηρίου.

Τον συνεργάτη μου στην προσπάθεια αυτή, μηχανολόγο μηχανικό κ. Αλμπαντάκη Δημήτριο, για την πολύτιμη βοήθεια του στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης τους συναδέλφους μου Τσαμούκα Αριστεΐδη ,Ρουκουνάκη Κωνσταντίνο και Δασκαλάκη Γεώργιο για την βοήθεια τους.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περιεχόμενα	2
Περίληψη.....	6
Abstract.....	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
A.1. Γενικά περί περιβαλλοντικών οχλήσεων από υδάτινες εκροές αυτοκινητόδρομων	10
A.2. Διεθνής Εμπειρία επεξεργασίας υδάτινων εκροών αυτοκινητόδρομων από υγροβιότοπους και Προβληματισμοί περί της απόδοσης τους σε Μεσογειακό Περιβάλλον.	11
A.3. Εκτιμήσεις περί του ρυπαντικού φορτίου των εκροών αυτοκινητόδρομων.....	12
A.4. Σύντομη περιγραφή πιλοτικής διάταξης των υγροβιότοπων.....	13
A.5. Στόχοι Προγράμματος – Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	18
1. ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ...	18
1.1 Εισαγωγή	18
1.2 Πλεονεκτήματα φυσικών συστημάτων	19
1.3 Μειονεκτήματα φυσικών συστημάτων επεξεργασίας.....	20
1.4 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων από φυσικά συστήματα επεξεργασίας.....	20
1.5 Τύποι φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	21
1.5.1 Βραδείας εφαρμογής (Slow-rate systems).....	21
1.5.2 Ταχείας διήθησης ή εφαρμογής (Rapid Infiltration)	23
1.5.3 Επιφανειακής ροής (Overland Flow systems).....	24
1.5.4 Λίμνες σταθεροποίησης (Stabilization Ponds).....	25
1.5.5 Υγροβιότοποι (Wetlands).....	25
1.5.5.1. Γενικά	26
1.5.5.2. Φυσικοί υγροβιότοποι	26
1.5.5.3. Συστήματα υποεπιφανειακής ροής (SSF).....	26
1.5.5.4. Συστήματα επιφανειακής ροής (FWS).....	28
1.5.6. Συστήματα επιπλεόντων υδροχαρών φυτών (Floating aquatic plant systems)	29

1.5.7. Υδατοκαλλιέργεια	30
1.6. Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρυπαντών	30
1.6.1 Απομάκρυνση BOD/ άνθρακα	31
1.6.2 Απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών	33
1.6.2.1. Γενικά	33
1.6.2.2. Καθίζηση	34
1.6.2.3. Φίλτραση/ Συγκράτηση	34
1.6.2.4. Επαναιώρηση.....	35
1.6.3 Απομάκρυνση Αζώτου	36
1.6.3.1. Γενικά	36
1.6.3.2. Οργανικό άζωτο.....	36
1.6.3.3. Αμμωνιακό άζωτο	37
1.6.3.4. Βιολογική νιτροποίηση.....	37
1.6.3.5. Νιτρικό άζωτο	38
1.6.3.6. Βιολογική απονιτροποίηση	39
1.6.4 Απομάκρυνση φωσφόρου.....	39
1.6.4.1. Γενικά	39
1.6.4.2. Φυσικοί – Χημικοί διαχωρισμοί.....	39
1.6.4.3. Βιολογικοί μετασχηματισμοί φωσφορικών.....	40
1.6.5 Απομάκρυνση παθογόνων οργανισμών	41
1.6.6 Απομάκρυνση μετάλλων	42
1.6.7 Άλλα οργανικά συστατικά.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	46
2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ	46
2.1 Εισαγωγή	46
2.2 Περιγραφή του συστήματος υγροβιότοπων	46
2.3 Σχεδιασμός των 4 υγροβιότοπων (με βάση τον HRT)	55
Δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης (ST).....	56
Υγροβιότοποι ελεύθερης επιφάνειας νερού ή επιφανειακής ροής (FWS)	56
Υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής (SSF).	57
2.5 Αναλυτικές μέθοδοι μέτρησης	59

2.5.1 COD Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο	60
2.5.2 Προσδιορισμός ολικού φωσφόρου TP	60
2.5.3 Προσδιορισμός ολικού αζώτου TN	61
2.5.4 Προσδιορισμός NO ₃	61
2.5.5 Μέτρηση ολικών αιωρούμενων στερεών TSS	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	63
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΒΡΟΧΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΚΡΟΗΣ....	63
3.1 Εισαγωγή	63
3.2 Ανάλυση επεισοδίων βροχής - συνολικές βροχοπτώσεις.....	63
3.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων περί εκτίμησης ετήσιας HRO και Μέγιστης Ημερήσιας εκροής.	72
3.4 Υπολογισμός ετήσιων εκροών HRO και Μέγιστης Ημερήσιας εκροής με βάση τα στοιχεία της ενόργανης παρακολούθησης ποσοτικά.....	73
3.5 Υπολογισμός του συντελεστή απορροής RR με βάση τα στοιχεία της ενόργανης παρακολούθησης ποσοτικά	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	77
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
4.1 Εισαγωγή	77
4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων	78
4.2.1 Γενικές παρατηρήσεις και συμπεράσματα	78
4.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα σχετικά με τα βαρέα μέταλλα Ni, Pb, Cu, Zn.....	79
4.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα σχετικά με το COD, TSS, TN, NO ₃ , και TP.....	81
4.2.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα σχετικά με τον Υδραυλικό χρόνο παραμονής HRT	83
4.3 Τελικά Συμπεράσματα.....	85
Βιβλιογραφία.....	94
Κατάλογος Πινάκων.....	96
Κατάλογος Σχημάτων.....	97
Κατάλογος εικόνων	98

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η απόδοση τεσσάρων τεχνητών υγροβιότοπων για την επεξεργασία υδάτινων εκροών αυτοκινητόδρομων.

Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος, τέσσερις πιλοτικού μεγέθους τεχνητοί υγροβιότοποι, που τροφοδοτούνται από μια δεξαμενή συλλογής ST χωρητικότητας περίπου 39 m^3 , που συλλέγει τις εκροές (Highway Run Off - HRO) ενός τμήματος συνολικής επιφάνειας $2.752,0 \text{ m}^2$ της Εθνικής Οδού Ηρακλείου Αγίου Νικολάου στο ύψος της Χερσονήσου. Δύο από αυτούς είναι επιφανειακής ροής (Free Water Surface) και ονομάζονται (FWS 12), & (FWS 24), στους οποίους χρησιμοποιήθηκε εδαφικό υπόστρωμα. Οι άλλοι δύο είναι υποεπιφανειακής ροής (Sub Surface Flow) και ονομάζονται (SSF 12), & (SSF 24), στους οποίους χρησιμοποιήθηκαν χαλίκια διαφόρων διαστάσεων.

Οι δύο τύποι υγροβιότοπων διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς τον υδραυλικό χρόνο παραμονής των εκροών HRT, που στο ζεύγος [FWS 12 & SSF 12] είναι 12 ώρες, ενώ τροφοδοτούνται και επεξεργάζονται $12,6 \text{ m}^3/\text{day}$. Στο άλλο ζεύγος [FWS 24 & SSF 24] ο χρόνος παραμονής είναι 24 ώρες, ενώ τροφοδοτούνται και επεξεργάζονται $6,3 \text{ m}^3/\text{day}$ αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό, στο τέλος της περιόδου παρατήρησης, μπορεί να εκτιμηθεί ποιο από τα δύο συστήματα και με ποιο υδραυλικό χρόνο παραμονής είναι το καταλληλότερο, απομακρύνοντας πληρέστερα τις ρυπογόνες ουσίες που βρίσκονται στις εκροές των αυτοκινητόδρομων.

Η λειτουργία των 4 μονάδων ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 2005 και συνεχίστηκε ολόκληρο τον χειμώνα και την άνοιξη του 2006, όπου παρατηρήθηκαν, μελετήθηκαν και αναλύθηκαν, όλα τα φαινόμενα βροχόπτωσης της περιόδου αυτής. Η συνολική βροχόπτωση για την περίοδο αυτή ήταν $461,2 \text{ mm}$ που έπεσε κατά την διάρκεια 68 βροχερών ημερών, με μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση $52,4 \text{ mm}$.

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων των βροχοπτώσεων και των αντίστοιχων εκροών, προσδιορίστηκαν στην συνέχεια οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού για τους υγροβιότοπους. Αυτές είναι η συνολική ετήσια εισροή HRO στο σύστημα, που προσδιορίστηκε με την βοήθεια ενός συστήματος μέτρησης της παροχής (monitoring) τύπου Parsall σε 715 m^3 και η μέγιστη ημερήσια εισροή μετρήθηκε σε $106,0 \text{ m}^3$, ενώ υπολογίστηκε

σε 43,32 m³. Από την συνολική ετήσια εισροή HRO, με την χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης ST να είναι 39 m³, το 20% περίπου δεν έτυχε επεξεργασίας, αφού σε τρεις περιπτώσεις υπερχείλισε δια μέσου της δεξαμενής ST στο παρακείμενο ρέμα.

Με δεδομένη την δυσκολία προσδιορισμού του συντελεστή απορροής RR των εκροών, αναπτύχθηκε στην συνέχεια μία εξίσωση προσδιορισμού του, με βάση το ύψος των συνολικών βροχοπτώσεων και τα επεισόδια βροχής (ημέρες βροχής) ετησίως. Εφαρμόζοντας την εξίσωση αυτή για τον συντελεστή απορροής RR, υπολογίστηκε στην συνέχεια η συνολική ετήσια εισροή HRO και η μέγιστη ημερήσια εισροή, και προσδιορίστηκαν οι τιμές αντίστοιχα σε 716 m³ και 45,7 m³.

Οι παράμετροι που μελετήθηκαν για τον προσδιορισμό της απόδοσης καθενός από τους 4 υγροβιότοπους είναι: COD, TN, NO₃, TP, TSS, συμπεριλαμβανομένων και των βαρέων μετάλλων Cu, Ni, Pb, και Zn.

Τα αποτελέσματα της παρακολούθησης των εισροών HRO στην δεξαμενή αποθήκευσης ST έδωσε μέσο όρο για το COD τιμή 103,6 mg/L, ενώ οι μέσες τιμές για TSS, Ολικό N (TN) και Ολικό P (TP) ήταν αντίστοιχα 208,9 mg/L, 5,62 mg/L και 4,90 mg/L. Για τα τέσσερα μέταλλα Cu, Ni, Pb, και Zn, οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στην εισροή HRO, ήταν αντίστοιχα 59,63 ± 72 µg/L, 146,6 ± 337 µg/L, 43,8 ± 91 µg/L και 259,1 ± 220 µg/L.

Τα αποτελέσματα της απόδοσης των τεσσάρων υγροβιότοπων, με βάση την ανάλυση ANOVA (p<0,001) στις μετρήσεις των παραπάνω παραμέτρων, δεν φαίνεται να διαφοροποιούνται σημαντικά, γεγονός που υποδηλώνει ότι όλοι οι υγροβιότοποι έχουν παρόμοια απόδοση.

Εντούτοις, βασισμένοι στις μέσες τιμές εκροών, ο υγροβιότοπος SSF24 φαίνεται να παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τους υπόλοιπους τρεις, επιτυγχάνοντας μέσους όρους απομάκρυνσης 51,36 % για το COD, 90,04 % απομάκρυνση των TSS, 58,93 % απομάκρυνση για το TN, 72,00 % απομάκρυνση για το NO₃ και 66,63 % απομάκρυνση για τον TP. Όσον αφορά τα τέσσερα βάρεια μέταλλα, ο μέσος όρος των συγκεντρώσεων των εκροών από τον υγροβιότοπο SSF24 ήταν 18,26 ± 25 µg/L, 85,4 ± 159 µg/L, 33,9 ± 81 µg/L and 74,6 ± 56 µg/L για τον Cu, Ni, Pb and Zn αντίστοιχα.

Ένας από του λόγους αυτού του μικρού πλεονεκτήματος, εξηγείται από το γεγονός ότι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής που μετρήθηκε για τον υγροβιότοπο SSF24 ήταν 18 ώρες, μεγαλύτερος λοιπόν σε σχέση με τους χρόνους παραμονής για τους υπόλοιπους τρεις, που ήταν για τον SSF12 16 ώρες, για τον FWS12 10 ώρες και για τον FWS24 14 ώρες.

Abstract

Two Free Water Surface (FWS) and two Subsurface Flow (SSF) pilot size constructed wetlands together with a Storage Tank (ST) were used to treat highway runoff (HRO). The total amount of HRO treated from the four wetlands between September 2005 and August 2006 was 715 m³, collected from a highway section in the heart of the South-Central Mediterranean region, in the island of Crete, Greece, with total surface 2,752 m². One FWS and one SSF were designed with a HRT of 12 hours named respectively FWS12 and SSF12, with each one able to treat in a controlled manner maximum 12.6 m³/day HRO. The other couple were designed with a HRT of 24 hours, named respectively FWS24 and SSF24, receiving maximum 6.3 m³/day HRO each. As a result the total HRO treating capacity of the system in 24hrs was approximately 38 m³, with the ST capacity approximately 39 m³. From the total HRO collected less than 20 % overflow through the ST into the near by stream without been treated by the wetlands. Influent and effluents were monitored for a number of physiochemical parameters including Cu, Ni, Pb and Zn. The influent had an average COD value of 103.6 mg/L, where for TSS, Total N (TN) and Total P (TP) the mean values were 208.9 mg/L, 5.62 mg/L and 4.90 mg/L, respectively. For the four metals the respective influent concentrations were 59.63 ± 72 µg/L, 146.6 ± 337 µg/L, 43.8 ± 91 µg/L and 259.1 ± 220 µg/L. The performance among the four beds was not significantly different based on ANOVA analysis (at p < 0.001) for almost all the above mentioned physiochemical parameters, suggesting that all systems performed similarly. However, based on mean effluent values, SSF24 performed better than the other wetlands, achieving in average 51.36 % removal of COD, 90.04 % removal of TSS, 58.93 % removal of TN, 72.00 % removal of NO₃ and 66.63 % removal of TP. Regarding the four heavy metals the average effluent concentration of SSF24 was 18.26 ± 25 µg/L, 85.4 ± 159 µg/L, 33.9 ± 81 µg/L and 74.6 ± 56 µg/L for Cu, Ni, Pb and Zn respectively. One of the reasons for this slight advantage might be explained by the fact that SSF24 recorded the largest mean retention time of 18 hours, compared to the 16 hours of SSF12, 10 hours of FWS12 and 14 hours of FWS24.

Keywords: Reedbeds, heavy metals, motorway, COD, TSS, nitrogen, phosphorus, wastewater, hydraulic retention time.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

A.1. Γενικά περί περιβαλλοντικών οχλήσεων από υδάτινες εκροές αυτοκινητόδρομων

Ένας αυτοκινητόδρομος είναι ένα έργο που δημιουργεί πάντα μια ουσιαστική αλλαγή, και συχνά υποβάθμιση του περιβάλλοντος στην περιοχή του οποίου κατασκευάζεται. Αυτό συμβαίνει και κατά την φάση της κατασκευής του έργου, αλλά και κυρίως κατά την περίοδο λειτουργίας του. Οι προβληματισμοί που αναπτύσσονται συνήθως αφορούν την ατμοσφαιρική ρύπανση και τον θόρυβο που παράγονται από την κίνηση των οχημάτων. Δεν μπορούμε να ισχυριστούμε το ίδιο και για το πρόβλημα της μόλυνσης των υδάτων γενικότερα από την λειτουργία ενός αυτοκινητόδρομου. Όμως συχνά διαπιστώνεται ότι τα επίπεδα μόλυνσης των υδάτων που εκρέουν από ένα αυτοκινητόδρομο, φτάνουν σε τέτοια επίπεδα μόλυνσης, που θα πρέπει να ληφθούν μέτρα προστασίας για τα υδάτινα συστήματα στα οποία εκρέουν.

Θα πρέπει να θυμίσουμε ότι προτού καταλήξει στο υπέδαφος, το νερό της βροχής που πέφτει σε ένα αυτοκινητόδρομο, ξεπλένει, διαλύει και μεταφέρει στην συνέχεια σε αυτό, ουσίες που προέρχονται από τα καυσαέρια και από την διέλευση των οχημάτων. Αναλύσεις σε δοκίμια αυτών των υδάτων αποδεικνύουν την ύπαρξη μόλυνσης, που κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορεί να συγκριθεί με την μόλυνση από αστικά απόβλητα. Αυτή η όψη του προβλήματος, μέχρι σήμερα, έχει παντελώς αγνοηθεί από την Νομοθεσία, δεδομένου ότι στα πλαίσια της έγκρισης των Περιβαλλοντικών Όρων ενός έργου οδοποιίας, σπανίως αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της διαχείρισης των υδάτων αυτών.

Είναι φανερό από τα παραπάνω, ότι η διοχέτευση απευθείας στο έδαφος των υδάτων αυτών, μπορεί να προκαλέσει μόλυνση των υδάτων, αλλά και αλλαγές στο οικοσύστημα, συμπεριλαμβανομένης σε βαριές περιπτώσεις και της εξαφάνισης ειδών της χλωρίδας και πανίδας.

Τα ελληνικά εθνικά οδικά δίκτυα είναι κατά τέτοιο τρόπο σχεδιασμένα έτσι ώστε να επιτρέπουν τη γρήγορη και απ' ευθείας διοχέτευση των εκροών που δημιουργούνται από τις βροχές στο κοντινότερο ποτάμι, χείμαρρο ή ρυάκι. Ένα τέτοιο σύστημα αγνοεί εντελώς την πιθανή μόλυνση που προκαλούν οι εκροές των κατακρημνισμάτων αυτών στους φυσικούς αποδέκτες που τελικά καταλήγουν.

Όπως είναι λογικό λοιπόν, απαιτούνται κάποιου είδους μέτρα για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις εκροές HRO των αυτοκινητόδρομων. Το πρόβλημα αυτό, αν και στην Ελλάδα δεν έχει αντιμετωπιστεί παρά σε ελάχιστες περιπτώσεις, εντούτοις έχει αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά σε άλλα κράτη, που χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους επεξεργασίας, ανάλογα με την φύση και το ρυπαντικό φορτίο των εκροών που πρέπει να τύχει επεξεργασίας. Η βιβλιογραφία είναι πλούσια όσον αφορά τα αποτελέσματα της επεξεργασίας από τα διάφορα συστήματα που χρησιμοποιούνται, που κατά βάση είναι Φυσικά Συστήματα επεξεργασίας, όπως υδροβιότοποι, λίμνες καθίζησης, συστήματα φίλτρανσης.

Στην περίπτωση μας, το ειδικό ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται στην περίπτωση επεξεργασίας με την βοήθεια υδροβιότοπων. Οι τεχνητοί υδροβιότοποι έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στη βόρεια Ευρώπη για την επεξεργασία των εκροών HRO των εθνικών δικτύων αυτοκινητόδρομων.

A.2. Διεθνής Εμπειρία επεξεργασίας υδάτινων εκροών αυτοκινητόδρομων από υδροβιότοπους και Προβληματισμοί περί της απόδοσης τους σε Μεσογειακό Περιβάλλον.

Η επεξεργασία απορροών εθνικών οδών HRO που χρησιμοποιούν τους υδροβιότοπους σε περιοχές όπως της βόρειας Ευρώπης και των ΗΠΑ, έχει μελετηθεί λεπτομερώς στην προηγούμενη δεκαετία, όπως για παράδειγμα στις εργασίες των Mungur *et al.* (1995), Shutes *et al.* (1997 & 1999), Mitchel *et al.* (2002) και Bulc and Slak (2003). Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών συνοψίζονται στο γεγονός ότι αυτά τα συστήματα αποδίδουν πολύ καλά, μετριάζοντας σημαντικά ποικίλους ρύπους που υπάρχουν στις εκροές των αυτοκινητόδρομων.

Εντούτοις, η μεγάλη πλειοψηφία των μελετών που υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία, αφορούν συστήματα που βρίσκονται στην βόρεια Ευρώπη, τις κεντρικές ΗΠΑ ή τον Καναδά, (με εξαίρεση μια εργασία σχετικά με τις λίμνες διήθησης στην Πορτογαλία από Barbosa και Hvitved-Jacobsen, 1999), δηλαδή σε περιοχές όπου οι βροχοπτώσεις είναι κατανεμημένες με έναν μάλλον ισορροπημένο τρόπο καθ' όλη την διάρκεια του έτους.

Το πρόβλημα με τα ξηρότερα κλίματα, όπως αυτό που βρίσκεται στη νότια-κεντρική περιοχή της Μεσογείου, είναι ότι τα καλοκαίρια είναι παρατεταμένα και ξηρά, συχνά χωρίς βροχοπτώσεις για περισσότερο από τρεις έως τέσσερις μήνες, ενώ οι χειμώνες χαρακτηρίζονται από βαριές βροχοπτώσεις, θυελλώδους φύσης (Manios και Tsanis, 2005).

A.3. Εκτιμήσεις περί του ρυπαντικού φορτίου των εκροών αυτοκινητόδρομων.

Το νερό της βροχής, όταν φτάνει στο έδαφος παρουσιάζει ήδη ένα επίπεδο μόλυνσης, οφειλόμενο στο γεγονός ότι παρασύρει και διαλύει τις ουσίες που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Φτάνοντας στο έδαφος τα νερά αυτά φορτίζονται επιπλέον, διαλύοντας και παρασύροντας τις ουσίες που βρίσκονται πάνω στο οδόστρωμα και έχουν προέλευση είτε την ίδια την κίνηση των οχημάτων, είτε ανθρωπογενείς αιτίες μόλυνσης. Το ρυπαντικό φορτίο αυτών των νερών εξαρτάται από τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα φυσικά χαρακτηριστικά του αυτοκινητόδρομου, αλλά και από τους κυκλοφοριακούς φόρτους που αυτός έχει.

1. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που συνεισφέρουν στην εκτίμηση του ρυπαντικού φορτίου των υδάτων αυτών είναι:

- Το ύψος της βροχής
- Η διάρκεια της βροχής
- Ο αριθμός των ημερών που προηγούνται ενός επεισοδίου βροχής

Οι δύο πρώτοι παράγοντες έχουν να κάνουν με τον τρόπο ξεπλύματος της επιφάνειας του δρόμου, ενώ ο τρίτος παράγοντας αφορά την ποσότητα του ρυπαντικού φορτίου που συσσωρεύεται την ξηρά περίοδο.

2. Τα φυσικά χαρακτηριστικά του αυτοκινητόδρομου που επιδρούν στην συσσώρευση ρυπαντικού φορτίου και αφορούν:

- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, με την έννοια ότι η παρουσία ή η απουσία τάφρων απορροής, ή άλλων ειδικών έργων, μπορεί να ευνοήσει ή όχι την συσσώρευση ρυπαντικού φορτίου.
- Ο τύπος του οδοστρώματος, με την έννοια του συντελεστή απορροής RR των υδάτων από την επιφάνεια του οδοστρώματος.
- Οι κλίσεις του οδοστρώματος, με την έννοια της επιφάνειας απορροής των υδάτων, αλλά και της απόστασης που τα ύδατα αυτά διανύουν ξεπλένοντας το οδόστρωμα
- Η σχέση μεταξύ της επιφάνειας που είναι αδιαπέραστη (αποτελούμενη από την επιφάνεια του οδοστρώματος, των τάφρων απορροής, των πεζοδρομίων αν υπάρχουν, κλπ) και της συνολικής επιφάνειας της λεκάνης απορροής,

δεδομένου ότι αυτή η σχέση καθορίζει την ποσότητα των υδάτων που δεν απορροφάται από το έδαφος και κατά συνέπεια ξεπλύνει την επιφάνεια του οδοστρώματος για να καταλήξει στον αποδέκτη.

3. Τέλος τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας των οχημάτων που επιδρούν στην διαμόρφωση του ρυπαντικού φορτίου είναι:

- Η μέση ημερήσια κίνηση
- Η σύνθεση της κίνησης
- Τα χαρακτηριστικά των οχημάτων

Από την κίνηση ακριβώς εξαρτάται η ποσότητα των εκπομπών και άρα του ρυπαντικού φορτίου των υδάτων, ενώ από τα χαρακτηριστικά των οχημάτων εξαρτάται ο τύπος αυτών των εκπομπών και άρα τα χαρακτηριστικά του ρυπαντικού φορτίου

Η τεχνική βιβλιογραφία αναφέρει διάφορες μεθόδους και μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του ρυπαντικού φορτίου των εκροών αυτών.

Για παράδειγμα μια από τις μεθόδους αυτές χρησιμοποιεί την υπόθεση, ότι η ποσότητα του ρυπαντικού φορτίου που υπάρχει στα εκρέοντα ύδατα είναι απευθείας ανάλογη με το ρυπαντικό φορτίο που έχει συσσωρευτεί στην επιφάνεια του οδοστρώματος μετά από το τελευταίο επεισόδιο βροχής (Federal Highway Administration ΗΠΑ).

A.4. Σύντομη περιγραφή πιλοτικής διάταξης των υγροβιότοπων.

Η Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας του Υπουργείου Ανάπτυξης, χρηματοδότησε στις αρχές του 2004 την κατασκευή τεσσάρων πιλοτικού μεγέθους τεχνητών υγροβιότοπων, δύο επιφανειακής ροής ύδατος (FWS Free Water Surface) και δύο υποεπιφανειακής ροής (SSF Sub Surface Flow), που τροφοδοτούνται από μια κοινή δεξαμενή αποθήκευσης (ST Storage Tank), προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση τους στην επεξεργασία της εκροής της εθνικής οδού (HRO) στην καρδιά της νότιας - κεντρικής περιοχής της Μεσογείου, στο νησί της Κρήτης.

Και τα δύο είναι οριζόντια συστήματα ροής. Σε αυτούς που είναι επιφανειακής ροής και ονομάζονται (FWS 12), & (FWS 24), χρησιμοποιήθηκε εδαφικό υπόστρωμα, ενώ σε αυτούς που είναι υποεπιφανειακής ροής και ονομάζονται (SSF 12), & (SSF 24), χρησιμοποιήθηκαν χαλίκια διαφόρων διαστάσεων.

Στα συστήματα FWS το υπό επεξεργασία απόβλητο ρέει οριζόντια τις εγκαταστάσεις πάνω από το εδαφικό υπόστρωμα και την βλάστηση, ενώ στην περίπτωση των συστημάτων SSF η ροή γίνεται πάλι οριζόντια, αλλά μέσω του υποστρώματος αμμοχάλικου, κάτω από την επιφάνεια και μερικώς μέσω του ριζώματος των εγκαταστάσεων (Tchobanoglous και Burton, 1991, EPA, 2002).

A.5. Στόχοι Προγράμματος – Σκοπός Πτυχιακής Εργασίας

Ο στόχος του προγράμματος αλλά και ο σκοπός της Πτυχιακής εργασίας αυτής ήταν να καθορίσει:

1) α) Την ανάγκη για τη επεξεργασία των εκροών HRO με βάση τις εκτιμήσεις ποιότητας και ποσότητας των εκροών αυτών,

β) Τον συσχετισμό της ροής βροχοπτώσεων και των αντίστοιχων εκροών, για μια συγκεκριμένη εθνική οδό, μεγέθους και σχηματισμού, σε αυτό το χαρακτηριστικό μεσογειακό περιβάλλον.

γ) Την προσπάθεια να αναπτυχθούν εξισώσεις ικανές να προβλέψουν τις ρεαλιστικές τιμές και για τον ετήσιο όγκο HRO καθώς επίσης και της μέγιστης ροής. Αυτές είναι ουσιαστικές παράμετροι για τον βέλτιστο σχεδιασμό των υδροβιότοπων, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος υποδιστασιολόγησης ή υπερδιστασιολόγησης των συστημάτων αυτών.

Η Διεθνής Βιβλιογραφία έχει αρκετά παραδείγματα για αυξημένες τιμές ρύπων και ειδικά για τα βαριά μέταλλα στην απορροή εθνικών οδών από διάφορες περιοχές της Ευρώπης (Scholes και λοιποί. (1998), Barbosa και Hvitved-Jacobsen (1999) και Revitt και λοιποί. (2004)).

Εντούτοις, αυτές οι τιμές δεν συσχετίζονται με την ποσότητα απορροών που συλλέγεται από μια συγκεκριμένη οδική επιφάνεια, μην επιτρέποντας κατά συνέπεια μια πλήρη αξιολόγηση για το πόσο σημαντική η όχι είναι η διαχείριση ενός τέτοιου απόβλητου ύδατος της εκροής των αυτοκινητόδρομων.

2) Τις αναγκαίες τροποποιήσεις σχετικά με την διαστασιολόγηση και την κατασκευή των τεχνητών υδροβιότοπων σε σύγκριση με εκείνους που λειτουργούν στη βόρεια Ευρώπη και τις ΗΠΑ.

Στην Βιβλιογραφία, Pontier και λοιποί (2004), παραθέτουν δεδομένα και παραμέτρους σχεδιασμού από έναν υδροβιότοπο FWS που επεξεργάζεται την απορροή από έναν δρόμο πορώδους ασφάλτου 1,6 εκταρίων. Αυτός είναι ένας από τους εννέα παρόμοιους υδροβιότοπους που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των εκροών της παράκαμψης Newbury στη Μεγάλη Βρετανία. Οι υδροβιότοποι που σχεδιάστηκαν για τις Βρετανικές καιρικές συνθήκες και τις συγκεκριμένες συνθήκες κυκλοφορίας αποτελούνται από δύο διαχωριστές πετρελαίου και μια δεξαμενή καθίζησης απροσδιόριστου όγκου. Ομοίως Scholes και λοιποί (1998) σε ένα άλλο σύστημα υδροβιότοπου FWS που λειτουργεί επίσης στη Μεγάλη Βρετανία, χρησιμοποίησαν μια αρχική ζώνη με φυτά για την αύξηση της καθίζησης των στερεών. Και οι δύο δομές μπορούν να χαρακτηριστούν ως μονάδες με προεπεξεργασία, εντούτοις, ο ρόλος τους στον έλεγχο της ροής είναι απροσδιόριστος.

Η μορφή των βροχοπτώσεων στην περιοχή της Μεσογείου, που συχνά έχουν θυελλώδη χαρακτήρα θα απαιτούσαν μια δεξαμενή εξισορρόπησης για τον έλεγχο της ροής και την εξασφάλιση του απαραίτητου ελάχιστου υδραυλικού χρόνου παραμονής (HRT).

3) Το πιο κατάλληλο σύστημα υδροβιότοπου, με τη σύγκριση της απόδοσης των υδροβιότοπων επιφανειακής ροής (FWS) με αυτό της απόδοσης των υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής (SSF) και τους αντίστοιχους καταλληλότερους υδραυλικούς χρόνους παραμονής (διαφορετικό HRT) στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Revit και λοιποί (2004) συγκρίνουν έναν υδροβιότοπο υποεπιφανειακής ροής SSF με ένα σύστημα παρόμοιο με σύστημα επιφανειακής ροής FWS που αποτελείται από μια λίμνη εξισορρόπησης με φυτά. Η σύγκριση εντούτοις θεωρείται από τους συντάκτες ως ανεπαρκής οφειλόμενη στις διαφορετικές συνθήκες δειγματοληψίας και στις μεγάλες μεταβολές στις τιμές συγκέντρωσης των ρύπων.

Μια ποικιλία παραμέτρων (COD, TSS, TN, TP, βαριά μέταλλα, υδραυλικός χρόνος παραμονής κλπ) θα χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία εκτίμησης και σύγκρισης της λειτουργίας των τεχνητών υδροβιότοπων

4) Την συμπεριφορά και επιβίωση των φυτών που χρησιμοποιούνται στους υδροβιότοπους. Στην μελέτη τους οι Barbosa και Hvitved-Jacobsen (1999) δεν παρέχουν οποιεσδήποτε συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με το ρόλο της βλάστησης στις λίμνες καθίζησης, καθώς επίσης και για την επιβίωση της ίδιας της βλάστησης κατά τη διάρκεια των ξηρών θερινών περιόδων.

5) Το εκτιμώμενο κόστος κατασκευής αυτών των συστημάτων. Κανένα συγκεκριμένο στοιχείο σχετικά με το κόστος δεν βρέθηκε στην βιβλιογραφία.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία θα ασχοληθεί κυρίως με δύο επιμέρους ζητήματα.

Το πρώτο ζήτημα αφορά την ανάλυση των βροχοπτώσεων σε επίπεδο ημέρας, με σκοπό την ανάπτυξη ενός μοντέλου και την ανάπτυξη εξισώσεων ικανών να προβλέψουν τις ρεαλιστικές τιμές για τον ετήσιο όγκο HRO καθώς επίσης και αυτόν της μέγιστης ροής. Η πρόβλεψη των τιμών αυτών έχει άμεση σχέση με την ρεαλιστική διαστασιολόγηση των συστημάτων, και ελαχιστοποίηση αστοχιών οφειλόμενων σε υπέρ ή υπό διαστασιολόγηση.

Για τον λόγο αυτό στην δομή του συστήματος τοποθετήθηκε μια μετρητική διάταξη της παροχής, που αποτελείται από ένα μετρητή τύπου Parshal, ένα ηλεκτρονικό βροχόμετρο, και το αντίστοιχο hardware & software για την καταγραφή των εισερχόμενων ποσοτήτων στην δεξαμενή αποθήκευσης εκροών του αυτοκινητόδρομου. Το επίπεδο του άνω εξοπλισμού επιτρέπει την λεπτομερέστατη καταγραφή των δεδομένων, ανάλογα με την παρακολουθούμενη παράμετρο, με την λήψη τιμών ανά 5 min έως και 6 h πχ για το ύψος του νερού της εισροής στο σημείο διαύλου στον μετρητή Parshal ή για την θερμοκρασία αντίστοιχα.

Το δεύτερο ζήτημα με το οποίο θα ασχοληθεί η Διπλωματική Εργασία αυτή, είναι η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ των τεσσάρων υγροβιότοπων, με στόχο τον καθορισμό του καταλληλότερου συστήματος για τις συγκεκριμένες κλιματολογικές Μεσογειακές συνθήκες.

Για να επιτευχθεί ο άνω στόχος οργανώθηκε η δειγματοληψία ανά επεισόδιο βροχής, από συγκεκριμένα σημεία δειγματοληψίας στην έξοδο κάθε υγροβιότοπου αλλά και από συγκεκριμένα σημεία της εισροής στην δεξαμενή αποθήκευσης.

Στην συνέχεια τα δείγματα που είχαν ληφθεί ανά επεισόδιο βροχής αναλύθηκαν στο εργαστήριο για μια σειρά παραμέτρων όπως COD, TSS, TN, TP, NO₃, κλπ. για κάθε κλίση υγροβιότοπου, προκειμένου να διαπιστωθεί η απόδοση κάθε συστήματος, με σύγκριση μεταξύ των τιμών εισροής και των αντίστοιχων τιμών εκροών ανά υγροβιότοπο.

Η εργασία αυτή, τέλος, σχολιάζει τα αποτελέσματα των αποδόσεων των συστημάτων, με βάση τις μέσες τιμές απόδοσης, όπως αυτές έχουν υπολογιστεί από τις τιμές των παραμέτρων που έχουν μετρηθεί, χρησιμοποιώντας τεχνικές στατιστικής ανάλυσης ANOVA.

Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ευκόλως κατανοητά θα παραχθούν και τα αντίστοιχα ανά παράμετρο διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ της εισροής και των εκροών συγκεντρωτικά από κάθε ένα υδροβιότοπο αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΦΥΣΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Φυσικές διεργασίες πάντα καθάριζαν το νερό καθώς έρεε διαμέσου ποταμών, λιμνών, ρευμάτων και υδροβιότοπων. Τις τελευταίες δεκαετίες κατασκευάστηκαν συστήματα που χρησιμοποιούν τις φυσικές αυτές διαδικασίες για να βελτιώσουν την ποιότητα του νερού. Αυτά είναι τα Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων. Γενικά, φυσικά συστήματα ονομάζονται αυτά που η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου διενεργείται με φυσικά μέσα και διεργασίες, όπως είναι οι φυσικές, χημικές ή συνδυασμός τους, που συμβαίνουν στο περιβάλλον έδαφος- φυτό- απόβλητο.

Πολλές φορές, οι διεργασίες που εμπλέκονται στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι οι ίδιες με αυτές που συμβαίνουν στα μηχανικά ή συμβατικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι η καθίζηση, το φιλτράρισμα, η μεταφορά αερίων, η προσρόφηση, η ιοντική εναλλαγή, η χημική κατακρήμνιση, η χημική οξειδωση και αναγωγή και η βιολογική μετατροπή και αποδόμηση και άλλες, που είναι μοναδικές σε φυσικά συστήματα, όπως είναι η φωτοσύνθεση, η φωτοοξείδωση και η πρόσληψη από φυτά.

Στα φυσικά συστήματα οι διεργασίες συντελούνται με φυσικές ταχύτητες και τείνουν να διενεργούνται περισσότερες από μία συγχρόνως, σε ένα «οικοσυστηματικό αντιδραστήρα», σε αντίθεση με τα μηχανικά συστήματα στα οποία συμβαίνουν διαδοχικά και σε διαφορετικούς, σε σειρά αντιδραστήρες ή δεξαμενές, με επιταχυνόμενες ταχύτητες ως αποτέλεσμα της εισρέουσας σε αυτές ενέργειας. Τα φυσικά συστήματα κατατάσσονται σε δυο βασικές κατηγορίες

1) Αυτά που βασίζονται στο έδαφος ή τα γήινα συστήματα επεξεργασίας. Μετά την εφαρμογή προεπεξεργασμένων υγρών αποβλήτων στην επιφάνεια του εδάφους, επιταχύνεται περαιτέρω επεξεργασία τους δια μέσου των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, που συμβαίνουν στο έδαφος και βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς. Τα υδραυλικά φορτία εφαρμογής πρέπει να είναι συμβατά με το δυναμικό του κάθε συστήματος. Οι κύριοι τύποι συστημάτων επεξεργασίας με εφαρμογή τους στο έδαφος και σε βαθύτερους

γεωλογικούς σχηματισμούς είναι οι: α) βραδείας εφαρμογής, β) ταχείας διήθησης, γ) επιφανειακής ροής και δ) συνδυασμένοι τύποι.

2) Τα συστήματα που βασίζονται στα υδροχαρή φυτά, όπως είναι οι φυσικοί και τεχνητοί υδροβιότοποι και τα συστήματα των επιπλεόντων υδροχαρών φυτών.

1.2 Πλεονεκτήματα φυσικών συστημάτων

Η τεχνογνωσία της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με μικρά αποκεντρωμένα συστήματα, σε συνδυασμό με την επαναχρησιμοποίηση των εκροών τους σε γεωργικές χρήσεις, έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια σε πολλές προηγμένες χώρες και ιδιαίτερα στις Η.Π.Α. Ιδιαίτερα, οι εξελίξεις και η τεχνογνωσία σε θέματα φυσικών συστημάτων έδωσε ενθαρρυντικά αποτελέσματα για εφαρμογή των συστημάτων αυτών σε μικρούς πληθυσμούς (μέχρι 10.000 κ.). Τα συστήματα αυτά εντάσσονται πλήρως στη νέα νοοτροπία επιστροφής στα απλά, αποτελεσματικά συστήματα, συμβατά με φυσικές διεργασίες, χωρίς πολύπλοκους και ενεργοβόρους μηχανισμούς. Τέτοια συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και το κόστος λειτουργίας τους είναι συνήθως μικρό. Επίσης χαρακτηρίζονται από απλότητα και συμβατότητα με το φυσικό περιβάλλον. Τέλος τα κλιματολογικά δεδομένα περιοχών της Μεσογείου, ευνοούν μεγάλους ρυθμούς ανάπτυξης φυσικών συστημάτων, καθώς και ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης εκροών επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων κυρίως για άρδευση.

Γενικά τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας είναι υψηλού κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους, αντιμετωπίζουν συχνά λειτουργικά προβλήματα και είναι ενεργοβόρα, κυρίως κατά τη εφαρμογή τους σε μικρούς σχετικά ΟΤΑ. Οι τρεις κυριότερες περιβαλλοντικές συνέπειες των συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας είναι α) η μείωση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, β) η συμπληρωματική επιβάρυνση του περιβάλλοντος που σχετίζεται με την εξαγωγή και χρήση των μη ανανεώσιμων αυτών πηγών ενέργειας και γ) η τύχη των εναπομεινάντων υποπροϊόντων της επεξεργασίας σε συμβατικά συστήματα, όπως για παράδειγμα η ενεργός ιλύς.

Έτσι τα φυσικά συστήματα προτιμώνται από τα συμβατικά συστήματα λόγω: α) της απλότητάς τους, β) του χαμηλού κόστους κατασκευής και λειτουργίας των εγκαταστάσεων καθώς και των μικρών απαιτήσεών τους σε ενέργεια, και γ) της δυνατότητας συμβολής τους στην αναβάθμιση του περιβάλλοντος και στη δημιουργία χώρων αναψυχής.

1.3 Μειονεκτήματα φυσικών συστημάτων επεξεργασίας

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι οι μεγάλες απαιτήσεις τους σε φυσικό χώρο σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλα για εφαρμογή σε μικρούς πληθυσμούς αφού η έκταση και συνεπώς και το κόστος της γης που θα ήταν απαραίτητο για μια μεγαλύτερη πόλη θα ήταν απαγορευτικό. Παρόλα αυτά, φυσικά συστήματα επεξεργασίας έχουν χρησιμοποιηθεί και σε μεγαλύτερες πόλεις σε συνδυασμό με συμβατικά συστήματα για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας εκροών με πιο οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας έχουν τυπικά μεγαλύτερους χρόνους παραμονής (3 έως 200 μέρες) από τα συμβατικά συστήματα (λιγότερο από 1 έως 2 μέρες) και για αυτό είναι αποτελεσματικά μετά από ρύθμιση του όγκου και της ποιότητας της εισροής. Εξαιτίας του μεγάλου χρόνου παραμονής και επειδή τα φυσικά συστήματα βρίσκονται στην ύπαιθρο και εκτείνονται σε μεγάλες περιοχές που επηρεάζονται από καταιγίδες, ανέμους, φωτιές, έντομα, πλημμύρες και σεισμούς, τα συστήματα αυτά ανταποκρίνονται σχετικά αργά σε λειτουργικές αλλαγές αλλά ανταποκρίνονται σε φυσικές αλλαγές που δεν μπορούν να ελεγχθούν από τους διαχειριστές του συστήματος.

1.4 Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων από φυσικά συστήματα επεξεργασίας

Η συνεχής πληθυσμιακή αύξηση, η ρύπανση και η συνεχής υποβάθμιση τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων νερών, η άνιση κατανομή των υδατικών πόρων και οι περιοδικές ξηρασίες καθιστούν αναγκαία τη διερεύνηση και ανάπτυξη νέων πηγών νερού. Στις βιομηχανικές χώρες υπάρχουν αυξανόμενα προβλήματα, που σχετίζονται με τη διασφάλιση της αναγκαίας τροφοδοσίας με νερό και τη διάθεση των αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Αντίθετα στις αναπτυσσόμενες χώρες και ιδιαίτερα σε αυτές με ξηρικές και ημιξηρικές περιοχές υπάρχει η ανάγκη τεχνολογίας προσιτού κόστους, για αύξηση των διαθέσιμων ποσοτήτων νερού και παράλληλη προστασία των υπαρχόντων πηγών νερού.

Γι' αυτό η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων φαίνεται ότι αποτελεί το πιο κατάλληλο μέσο στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ελλειμματικές περιοχές σε διαθέσιμους υδατικούς πόρους αναπτύσσουν νέες τεχνολογίες και προγραμματίζουν την επαναχρησιμοποίηση προεπεξεργασμένων υγρών αποβλήτων. Τέτοιες περιοχές, συνήθως, χαρακτηρίζονται από: α) περιορισμένους υδατικούς πόρους, που αντιμετωπίζουν και προβλήματα ρύπανσης οφειλόμενα κυρίως στην ελλιπή αραίωση, διασπορά και έκπλυση και β) μια αυξημένη ζήτηση νερού, κυρίως για άρδευση, ιδιαίτερα την περίοδο περιορισμένων βροχοπτώσεων.

Η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων, εκτός του ότι εξοικονομεί πηγές νερού όπως προαναφέρθηκε, μειώνει το κόστος επεξεργασίας και διάθεσής τους, περιορίζει την απαιτούμενη υποδομή για εκμετάλλευση και χρήση άλλων πηγών νερού και φυσικά περιορίζει το κόστος χρήσης τους και τις ρυπαντικές επιπτώσεις τους. Οι κύριες κατηγορίες επαναχρησιμοποίησης προεπεξεργασμένων υγρών αποβλήτων με τη σειρά όγκου χρησιμοποιούμενου νερού είναι η γεωργική και κυρίως η άρδευση, η βιομηχανική, ο εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων και διάφορες άλλες. Από αυτές η άρδευση αντιπροσωπεύει στις μέρες μας αλλά ασφαλώς και στο προσεχές μέλλον τον πιο σημαντικό χρήστη νερού και προσφέρει σοβαρές δυνατότητες για απορρόφηση όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων ανακτώμενων υγρών αποβλήτων.

1.5 Τύποι φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Όλοι οι τύποι φυσικών συστημάτων επεξεργασίας απαιτούν προεπεξεργασία των χρησιμοποιούμενων υγρών αποβλήτων, με κάποια μηχανική ή συμβατική διεργασία. Η ελάχιστη προεπεξεργασία που συνιστάται είναι η εσχάρωση ή η πρωτοβάθμια καθίζηση, με σκοπό την απομάκρυνση των στερεών, που θα μπορούσαν να προξενήσουν προβλήματα στα δίκτυα διανομής ή να δημιουργήσουν ενοχλητικές συνθήκες στον περιβάλλοντα χώρο.

Οι τύποι των φυσικών συστημάτων είναι οι παρακάτω:

1.5.1 Βραδείας εφαρμογής (Slow-rate systems)

Η βραδεία εφαρμογή αποτελεί τον επικρατέστερο τύπο φυσικού συστήματος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Αυτό συνοπτικά περιλαμβάνει την ελεγχόμενη εφαρμογή

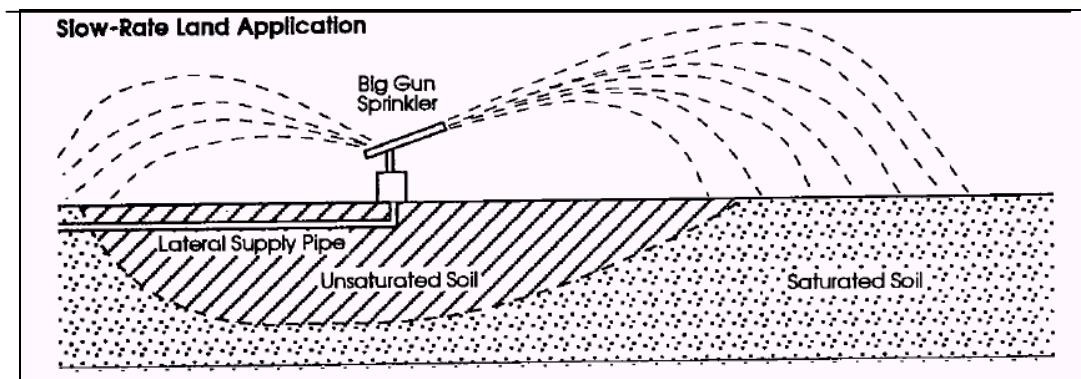
του προεπεξεργασμένου αποβλήτου σε έδαφος με φυτική βλάστηση, με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία του και την ικανοποίηση εξατμισοδιαπνευστικών αναγκών της φυτικής βλάστησης.

Η επεξεργασία διενεργείται καθώς αυτό διηθείται στο έδαφος. Στις περισσότερες περιπτώσεις το απόβλητο κατεισδύει στον υποκείμενο υδροφορέα, αλλά είναι δυνατό να συναντηθεί με επιφανειακό νερό ή να ανακτηθεί με στραγγιστικά ή φρεατικά έργα. Η εφαρμογή του υγρού αποβλήτου στο έδαφος μπορεί να γίνει με ποικιλία μεθόδων, όπως είναι οι επιφανειακές μέθοδοι (λεκάνες, αύλακες, και άλλες) ή με καταιονισμό. Με σκοπό την επικράτηση ακόρεστων συνθηκών στο έδαφος επιβάλλεται η μη συνεχής εφαρμογή του αποβλήτου σε αυτό.

Η σχετικά βραδεία εφαρμογή του αποβλήτου, σε συνδυασμό με την παρουσία της φυτικής βλάστησης και την ενδογενή δυνατότητα του εδαφικού οικοσυστήματος, δημιουργούν στα συστήματα βραδείας εφαρμογής υψηλό δυναμικό επεξεργασίας.

Τα συνηθέστερα προβλήματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή των συστημάτων βραδείας εφαρμογής σχετίζεται με την υπερεκτίμηση της μακροχρόνιας ικανότητας διήθησης του χώματος. Τα προβλήματα αυτά έχουν να κάνουν με τη δυσκολία υπολογισμού και επαλήθευσης του ρυθμού διήθησης κατά τις αρχικές έρευνες της περιοχής αλλά και με αλλαγές στη δομή του χώματος που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια κατασκευής ή λειτουργίας του συστήματος. Τα προβλήματα αυτά εμφανίζονται σε περιοχές με αργιλώδη εδάφη και σε εδάφη που κατά περιόδους ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα ή σε εδάφη που εξαιτίας χημικών και φυσικών διεργασιών μειώνεται η διαπερατότητά τους.

Εξαιτίας της μεγάλης απαίτησής των φυσικών συστημάτων βραδείας εφαρμογής σε επιφάνεια γης και εξαιτίας του κόστους των απαιτούμενων σωληνώσεων και αντλιών για τη διανομή του αποβλήτου, τα συστήματα αυτά έχουν σχετικά μεγαλύτερο κόστος από τα υπόλοιπα φυσικά συστήματα επεξεργασίας.



Σχήμα 1.1 - Σύστημα Βραδείας Εφαρμογής

1.5.2 Ταχείας διήθησης ή εφαρμογής (Rapid Infiltration)

Τα συστήματα αυτά ονομάζονται επίσης SAT (Soil-Aquifer-Treatment). Με τα συστήματα αυτά το υγρό απόβλητο, που έχει υποστεί προεπεξεργασία, εφαρμόζεται σε αβαθείς επιφανειακές λεκάνες διήθησης και επαναλαμβανόμενους κύκλους. Η εφαρμογή του αποβλήτου είναι δυνατή και με εκτοξευτές υψηλής ταχύτητας. Συνήθως σε τέτοιες περιπτώσεις δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη φυτικής βλάστησης πλην της περιπτώσεως όπου η εφαρμογή του αποβλήτου διενεργείται με εκτοξευτές.

Επειδή σε τέτοια συστήματα τα φορτία και οι ταχύτητες εφαρμογής είναι σχετικά υψηλά, οι απώλειες με εξάτμιση είναι μικρές και γι' αυτό ο μεγαλύτερος όγκος του εφαρμοζόμενου αποβλήτου κατεισδύει στο έδαφος, όπου διενεργείται περαιτέρω επεξεργασία του. Τα συστήματα ταχείας διήθησης περιλαμβάνουν επεξεργασία, που ακολουθείται από: α) εμπλουτισμό υπόγειου υδροφορέα για αναπλήρωση ή προστασία του κυρίως από διείσδυση και ανάμειξη με αλμυρό νερό, β) ανάκτηση με στράγγιση ή άντληση και γ) φυσική ροή του υπόγειου και απόληξη σε επιφανειακή πηγή.

Το δυναμικό επεξεργασίας με τέτοια συστήματα είναι κατά κάποιον τρόπο μικρότερο από αυτό των συστημάτων βραδείας εφαρμογής, εξαιτίας της μικρότερης κατακράτησης σε πιο περατά εδάφη εφαρμογής και με μεγαλύτερες ταχύτητες υδραυλικού φορτίου. Παρόλο που απομακρύνονται ένα σημαντικό μέρος σωματιδιακής οργανικής ύλης και των θρεπτικών που περιέχονται στα προεπεξεργασμένα απόβλητα, οι διαλυμένες στο νερό ουσίες δεν ελαττώνονται.

Ένα από τα πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν στα συστήματα ταχείας εφαρμογής είναι η οξειδωση των αζωτούχων συστατικών στην αερόβια ζώνη του εδάφους με αποτέλεσμα την πιθανή αύξηση των νιτρικών στον υποκείμενο υδροφόρο. Ένα άλλο πιθανό πρόβλημα είναι η λανθασμένη εκτίμηση του ρυθμού διήθησης μακροχρόνια.

1.5.3 Επιφανειακής ροής (Overland Flow systems)

Τα συστήματα επιφανειακής ροής βασίζονται στην εφαρμογή του προεπεξεργασμένου υγρού αποβλήτου κατά μήκος της υψηλότερης πλευράς μιας διαβαθμισμένης, κεκλιμένης επιφάνειας με φυτική βλάστηση, που επιτρέπει τη ροή του σε όλη την έκτασή της και τη συλλογή της επεξεργασμένης εκροής στο τέλος της κλίσης της. Συνήθως, τα συστήματα επιφανειακής ροής εφαρμόζονται σε θέσεις με εδάφη σχεδόν αδιαπέραστα, αν και οι διεργασίες αυτών των συστημάτων έχουν εφαρμογή σε μια ποικιλία εδαφικών τύπων και υδραυλικών αγωγιμοτήτων, επειδή η περατότητα του εδάφους σε τέτοια συστήματα μειώνεται σημαντικά με το χρόνο.

Με αυτά τα συστήματα η εδαφική διήθηση του αποβλήτου είναι περιορισμένη και αποτελεί μια μειωμένη υδραυλική δίοδο του αποβλήτου. Ο κύριος όγκος του εφαρμοζόμενου αποβλήτου συλλέγεται ως επιφανειακή απορροή. Μέρος του εφαρμοζόμενου αποβλήτου εξατμισοδιαπνέεται. Οι συνολικές απώλειες του αποβλήτου εξαρτώνται από την εποχή του έτους, τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες και το είδος της φυτικής βλάστησης.

Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με εναλλασσόμενες περιόδους εφαρμογής και ανάπαυσης (ξήρανσης). Η χρονική διάρκεια κάθε περιόδου εξαρτάται από το σκοπό της επεξεργασίας. Σ' αυτά τα συστήματα η διανομή γίνεται με εκτοξευτές υψηλής ή χαμηλής πίεσης ή με επιφανειακές μεθόδους, όπως είναι οι σωλήνες με ρυθμιζόμενες εξόδους.

Τα προβλήματα που εμφανίζονται στα συστήματα επιφανειακής ροής είναι 1) προβλήματα που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση της φυτικής βλάστησης και 2) προβλήματα που έχουν να κάνουν με την επίτευξη της απαιτούμενης απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών. Και τα δυο είδη αυτά προβλημάτων οφείλονται στη δυσκολία διατήρησης ομοιόμορφης ροής στις πλαγιές του κάθε συστήματος.

Η δημιουργία μικρών λιμνών στις πλαγιές ενός συστήματος επιφανειακής ροής με μικρή κλίση και έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του οξυγόνου του χώματος και τελικά το θάνατο της φυτικής βλάστησης. Επίσης μεγαλύτερες κλίσεις μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα

τη διάβρωση του εδάφους και τελικά την αύξηση της συγκέντρωσης ανόργανων στερεών συστατικών στην εκροή. Ένας άλλος παράγοντας που επίσης μπορεί να συνεισφέρει στην αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών είναι η αδυναμία των συστημάτων επιφανειακής ροής να απομακρύνουν άλγη.

1.5.4 Λίμνες σταθεροποίησης (Stabilization Ponds)

Οι λίμνες σταθεροποίησης χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία μεγάλης ποικιλίας υγρών αποβλήτων, από οικιακά απόβλητα μέχρι και σύνθετα βιομηχανικά απόβλητα, και λειτουργούν κάτω από ένα μεγάλο εύρος καιρικών συνθηκών. Οι λίμνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μοναδικό μέσο επεξεργασίας ή σε συνδυασμό με άλλα συστήματα επεξεργασίας.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος λιμνών είναι οι επαμφοτερίζουσες λίμνες. Οι λίμνες αυτές έχουν βάθος 1,2 έως 2,5 m, με μια αερόβια ζώνη να βρίσκεται πάνω από μια αναερόβια ζώνη. Στην αναερόβια ζώνη λαμβάνουν χώρα αναερόβιες ζυμώσεις. Ο αερισμός της αερόβιας ζώνης επιτυγχάνεται από τη φωτοσύνθεση των αλγών και τον αερισμό από την επιφάνεια. Τα άλγη που αναπτύσσονται στις λίμνες αυτές αποτελούν το κυριότερο πρόβλημα κατά τη λειτουργία τους.

Ένας άλλος τύπος λιμνών είναι οι αεριζόμενες λίμνες. Στις λίμνες αυτές ο αερισμός επιτυγχάνεται κυρίως με μηχανικό τρόπο και όχι μέσω της φωτοσύνθεσης και του επαναερισμού μέσω της επιφάνειας. Το κύριο πλεονέκτημα των αεριζόμενων λιμνών είναι ότι έχουν μικρότερες απαιτήσεις σε γη.

Οι αναερόβιες λίμνες λαμβάνουν τόσο βαριά οργανικά φορτία έτσι ώστε δεν υπάρχει δυνατότητα αερισμού τους. Οι κύριες βιολογικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι στις αναερόβιες λίμνες είναι ο σχηματισμός οξέων και η ζύμωση μεθανίου. Τυπικά οι αναερόβιες λίμνες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία δυνατών βιομηχανικών και γεωργικών αποβλήτων ή αποτελούν ένα στάδιο προεπεξεργασίας. Δεν έχουν εκτεταμένη χρήση στην επεξεργασία οικιακών λυμάτων.

1.5.5 Υγροβιότοποι (Wetlands)

1.5.5.1. Γενικά

Οι υγροβιότοποι είναι τμήματα εδάφους κατακλυζόμενα με νερό συνήθως μικρού βάθους (<0,6 m) στα οποία αναπτύσσονται φυτά όπως είναι: διάφορα είδη κύπερης (φυτά της οικογένειας Cyperaceae, κυρίως του γένους Carex spp.), καλάμια (φυτά του γένους Phragmites, κυρίως του είδους P.communis) είδη βούρλων (φυτά του γένους Scirpus) και άλλα όπως είναι είδη ψαθιού και αφράτου (φυτά του γένους Typha). Η φυτική βλάστηση προσφέρει το βασικό υπόστρωμα ανάπτυξης των βακτηριακών μεμβρανών, βοηθά στο φιλτράρισμα και την προσρόφηση συστατικών του αποβλήτου, μεταφέρει οξυγόνο στη μάζα νερού και περιορίζει την ανάπτυξη αλγών με τον έλεγχο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων έχουν χρησιμοποιηθεί οι τεχνητοί, όσο και οι φυσικοί υγροβιότοποι.

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, που βασίζεται στη χρησιμοποίηση φυτών που αναφέρονται όπως νεροκάλαμα, βούρλα και ψαθί. Σε τέτοια συστήματα, η εφαρμογή του αποβλήτου διενεργείται πάνω ή κάτω από την επιφάνεια εδάφους. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν όλες τις δυνατότητες των φυσικών υγροβιότοπων, αλλά χωρίς τους περιορισμούς, που αφορούν τη διάθεση εκροών σε φυσικά οικοσυστήματα. Για την περαιτέρω επεξεργασία προεπεξεργασμένων υγρών αποβλήτων με συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί δύο τύποι: α) Αυτά της ελεύθερης επιφάνειας (FWS) και β) τα υποεπιφανειακής ροής (SSF).

1.5.5.2. Φυσικοί υγροβιότοποι

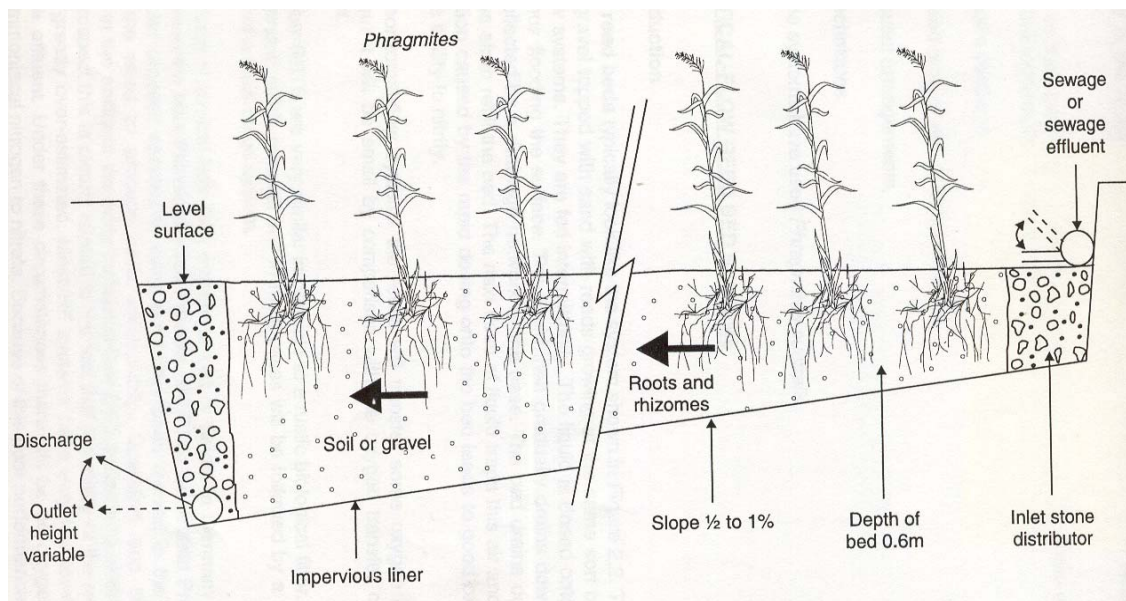
Από μια κανονιστική άποψη οι φυσικοί υγροβιότοποι μπορούν να θεωρηθούν ως υδατικοί αποδέκτες. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις, που οι φυσικοί υγροβιότοποι δέχονται εκροές δευτεροβάθμιας ή προωθημένης επεξεργασίας, πληρούν κανονιστικές απαιτήσεις. Επιπλέον, το κύριο αντικείμενο χρησιμοποίησης φυσικών υγροβιότοπων ως αποδεκτών εκροών επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, είναι η ενίσχυση προϋπάρχοντος εθίμου. Τροποποιήσεις σε υπάρχοντες υγροβιότοπους με σκοπό τη βελτίωση των συνθηκών επεξεργασίας πρέπει γενικά να αποφεύγονται, γιατί μπορεί να προξενήσουν προβλήματα στο φυσικό οικοσύστημα.

1.5.5.3. Συστήματα υποεπιφανειακής ροής (SSF)

Τα συστήματα τύπου (SSF) σχεδιάζονται με σκοπό την επίτευξη δευτεροβάθμιας ή προωθημένης επεξεργασίας. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται επίσης συστήματα «ριζόσφαιρας» ή «φίλτρων εδάφους-καλαμιών» και αναπτύσσονται μέσα σε κανάλια ή τάφρους με σχετικά στεγανούς πυθμένες που περιέχουν άμμο ή άλλα γήινα μέσα υποστήριξης της αναπτυσσόμενης (επιφανειακά) φυτικής βλάστησης.

Στα συστήματα αυτά η επιφάνεια του νερού διατηρείται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή του χρησιμοποιούμενου μέσου. Η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου οφείλεται σε φυσικές και βιοχημικές αποκρίσεις του μέσου, καθώς επίσης στην επαφή του με το ριζικό σύστημα των φυτών. Τα επίπεδα απομάκρυνσης των ρυπαντών είναι ισοδύναμα των συστημάτων FWS και παρουσιάζουν μειωμένα προβλήματα, σχετικά με την ανάπτυξη κουνουπιών και δυσάρεστων οσμών. Για την κατασκευή των υποστρωμάτων χρησιμοποιείται κυρίως έδαφος, άμμος και διάφορα άλλα χονδρόκοκκα ή ακόμη και πλαστικά ή άλλα αδρανή υλικά.

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



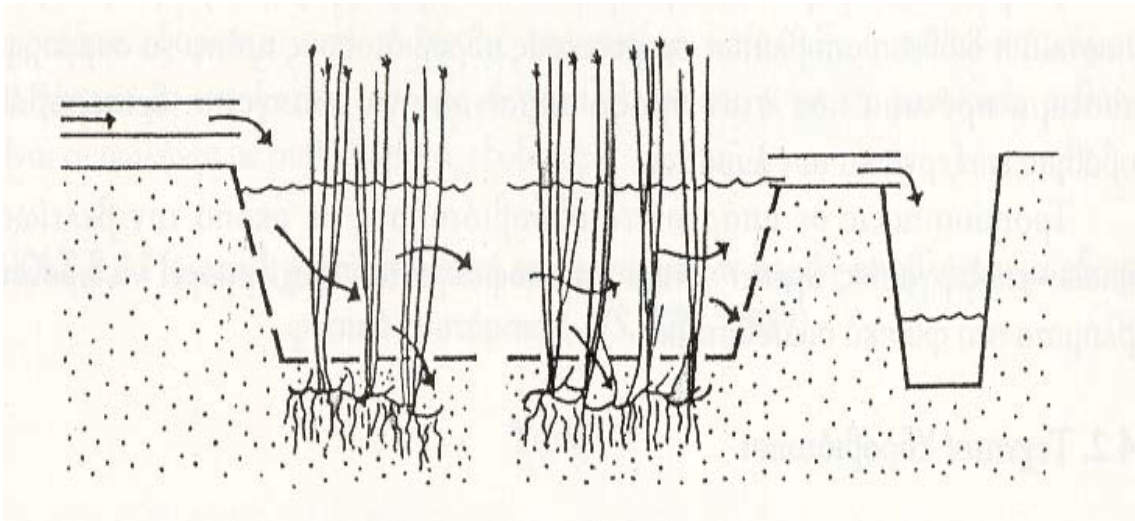
Σχήμα 1.2 Σχηματική παρουσίαση συστήματος τεχνητών υγροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής (SSF) (Tchobanoglous and Burton, 1996)

1.5.5.4. Συστήματα επιφανειακής ροής (FWS)

Τα συστήματα επιφανειακής ροής FWS αποτελούνται, συνήθως, από παράλληλες λεκάνες, κανάλια ή τάφρους με αδιαπέρατους πυθμένες, με αναφύομενη φυτική βλάστηση και μικρό βάθος νερού (0,1-0,6 m). Σε τέτοια συστήματα εφαρμόζονται συνεχώς προεπεξεργασμένα απόβλητα και η περαιτέρω επεξεργασία τους διενεργείται, καθώς η εφαρμοζόμενη εκροή του ρέει με μικρή ταχύτητα διαμέσου των στελεχών και ριζωμάτων της υφιστάμενης φυτικής βλάστησης και του υφιστάμενου υποστρώματος. Επίσης, τα συστήματα αυτά μπορούν να σχεδιάζονται με σκοπό τη δημιουργία νέων εθίμων και την ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για την αποδοχή υγροβιότοπων ή ενίσχυση υφιστάμενων φυσικών υγροβιότοπων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, αναπτύσσεται ένας συνδυασμός υδατικών επιφανειών, με βλάστηση και ανοικτών και μικρών νησίδων με την κατάλληλη βλάστηση και ενίσχυση της ροής του νερού με αναζωογόνηση των υφιστάμενων εθίμων.

Στα συστήματα FWS κύρια πηγή οξυγόνου είναι η ελεύθερη επιφάνειά του, αλλά η ύπαρξη βιολογικής βλάστησης παρεμποδίζει τον επιφανειακό επαναερισμό, που είναι δυνατό να διενεργείται με τον άνεμο. Γι' αυτό θα πρέπει να εφαρμόζονται μικρά οργανικά φορτία. Αντίθετα, η ύπαρξή τους επιδρά ανασταλτικά στην ανάπτυξη αλγών. Η απομάκρυνση

στερεών σε αιώρηση οφείλεται κυρίως στο μηχανισμό της καθίζησης και διενεργείται, κυρίως, σε μικρές αποστάσεις από το σημείο εισροής του αποβλήτου στο σύστημα. Η απομάκρυνση του αζώτου οφείλεται, κυρίως, στις διεργασίες νιτροποίησης- απονιτροποίησης και λιγότερο στην πρόσληψή του από τα φυτά και γι' αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα εφαρμογής του οργανικού φορτίου και το χρόνο συγκράτησης. Ακόμη και όταν τα φυτά που χρησιμοποιούνται συγκομίζονται περιοδικά, η απομάκρυνση του αζώτου η οφειλόμενη στην πρόσληψή του από τα φυτά, αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό 10-15% της συνολικής απομάκρυνσής του. Τέλος, η απομάκρυνση του φωσφόρου σε τέτοια συστήματα είναι περιορισμένη, εξαιτίας της περιορισμένης επαφής του αποβλήτου με το έδαφος.

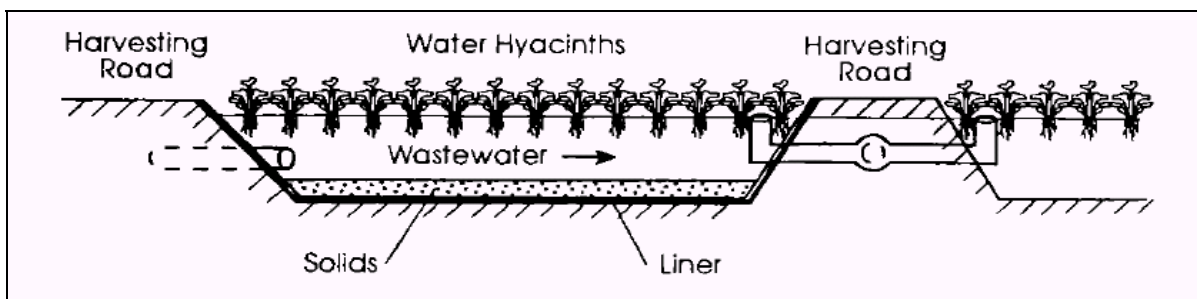


Σχήμα 1.3 Σχηματική παρουσίαση συστημάτων ελεύθερης επιφάνειας νερού (FWS) (Tchobanoglous and Burton, 1996).

1.5.6. Συστήματα επιπλεόντων υδροχαρών φυτών (Floating aquatic plant systems)

Τα συστήματα επιπλεόντων υδροχαρών φυτών ομοιάζουν στη βασική τους σύλληψη με αυτά των υγροβιότοπων ελευθέρως επιφανείας με τη διαφορά ότι τα χρησιμοποιούμενα φυτά είναι επιπλέοντα είδη, όπως είναι ο υάκινθος του νερού (*Eichhornia crassipes*) και διάφορα είδη της οικογένειας Lemnaceae. Σ' αυτά τα συστήματα το βάθος του νερού είναι συνήθως μεγαλύτερο από αυτό των συστημάτων των τεχνητών υγροβιότοπων ελεύθερης επιφάνειας και συνήθως κυμαίνεται από 0,5 ως 1,8 m. Επίσης, σ' αυτά τα συστήματα

εφαρμόζεται συνήθως συμπληρωματικός αερισμός για την αύξηση της ικανότητας επεξεργασίας και τη διατήρηση αερόβιων συνθηκών και βιολογικού ελέγχου της ανάπτυξης κουνουπιών. Τέτοια επιπλέοντα υδροχαρή φυτά έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση αλγών από εκροές λιμνών σταθεροποίησης. Τα συνήθη υδραυλικά φορτία και η ειδική έκταση των συστημάτων επεξεργασίας με επιπλέοντα υδροχαρή φυτά είναι ισοδύναμα των αντιστοίχων συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων.



Σχήμα 1.4 - Σύστημα επιπλεόντων υδροχαρών φυτών

1.5.7. Υδατοκαλλιέργεια

Υδατοκαλλιέργεια είναι η ανάπτυξη ψαριών και άλλων υδρόβιων οργανισμών σε εκροές υγρών αποβλήτων για την παραγωγή πηγών φυτικών τροφών και κυρίως βιομάζας. Σε διάφορες χώρες, τα υγρά απόβλητα έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλαπλές περιπτώσεις υδατοκαλλιέργειών. Στις περισσότερες, όμως, περιπτώσεις το κύριο αντικείμενο τέτοιων συστημάτων ήταν η παραγωγή βιομάζας και η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου αποτελούσε επί μέρους ή δευτερεύοντα σκοπό. Η επιτυγχανόμενη με τέτοια συστήματα επεξεργασία οφείλεται εξ ολοκλήρου στα βακτήρια που αναπτύσσονται και εγκαθίστανται στα επιπλέοντα υδροχαρή φυτά. Γενικά, ο συνδυασμός της υδατοκαλλιέργειας και της επεξεργασίας του υγρού αποβλήτου, ως μιας ενιαίας λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, απαιτεί περαιτέρω έρευνα. Ιδιαίτερα, θα πρέπει να καθορισθεί η επικινδυνότητα για τη δημόσια υγεία, που μπορεί να οφείλεται στους υδρόβιους οργανισμούς που αναπτύσσονται σε τέτοια συστήματα.

1.6. Μηχανισμοί απομάκρυνσης ρυπαντών

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία του αποβλήτου στους τεχνητούς υδροβιότοπους είναι όμοιες με αυτές που συμβαίνουν στα φυσικά οικοσυστήματα. Η αποδόμηση της οργανικής ύλης μπορεί να προκύψει είτε μέσω αερόβιων είτε μέσω αναερόβιων διεργασιών. Η ισορροπία μεταξύ των διεργασιών αυτών εξαρτάται από το οργανικό φορτίο καθώς και από την παροχή οξυγόνου. Το οργανικό φορτίο προέρχεται κυρίως από την εισροή του αποβλήτου. Η παροχή του οξυγόνου γίνεται μέσω της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και των αλγών που είναι προσκολλημένα στην επιφάνεια των αναδύμενων φυτών. Σαν συνέπεια των παραπάνω, οι διεργασίες στη στήλη του νερού είναι αερόβιες κατά τη διάρκεια της μέρας, ενώ γίνονται αναερόβιες τη νύχτα.

Η παροχή οξυγόνου στα ιζήματα του υδροβιότοπου είναι αρκετά χαμηλή και έτσι οι διεργασίες εκεί είναι κυρίως αναερόβιες. Παρόλα αυτά από τις ρίζες των φυτών διαρρέεται κάποια ποσότητα οξυγόνου. Όπου η πυκνότητα των ριζών είναι υψηλή η διαρροή αυτή συνεισφέρει στην παροχή οξυγόνου και στα επιφανειακά στρώματα εδάφους. Σε σύγκριση όμως με το BOD του αποβλήτου η ροή οξυγόνου από τις ρίζες είναι μικρή και δεν είναι ο κύριος μηχανισμός αποδόμησης των φορτίων του άνθρακα. Η παραγωγή οξυγόνου από τη φυτική ριζόσφαιρα μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική σε άλλες διεργασίες όπως αυτή της νιτροποίησης.

Πολλοί από τους μηχανισμούς επεξεργασίας είναι τουλάχιστον μερικώς διαδοχικοί. Για παράδειγμα σε απλές μικροβιακές καλλιέργειες, το μεγαλύτερο μέρος του BOD αποδομείται πριν ξεκινήσει η νιτροποίηση. Ένα από τα πλεονεκτήματα ενός πιο περίπλοκου συστήματος επεξεργασίας, όπως το σύστημα ενός τεχνητού υδροβιότοπου, είναι, ως ένα σημείο, ότι αυτοί οι διαδοχικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης μπορούν να συμπιεστούν στο χώρο και στο χρόνο. Παρακάτω ακολουθεί μια πιο λεπτομερής ανάλυση των μηχανισμών απομάκρυνσης κάθε ρυπαντή.

1.6.1 Απομάκρυνση BOD/ άνθρακα

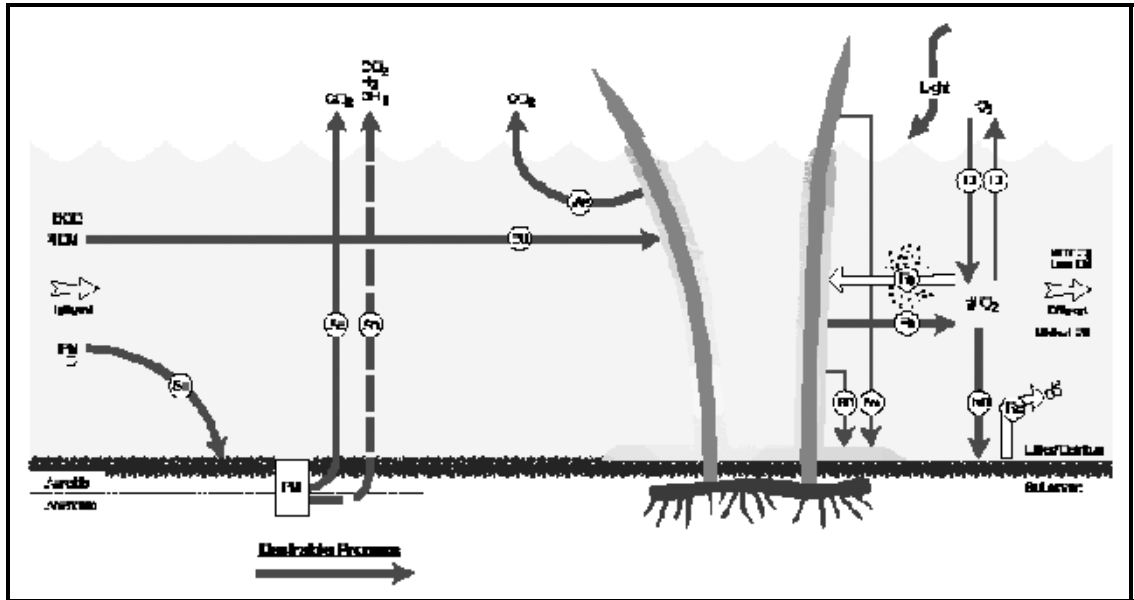
Το διαλυμένο ή σε αιώρηση BOD απομακρύνεται με διάφορους μηχανισμούς στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Το διαλυτό BOD απομακρύνεται με την βιολογική δραστηριότητα και την προσρόφησή του στα φυτά και στην επιφάνεια των υποστρωμάτων και στη στήλη του

νερού. Οι χαμηλές ταχύτητες και τα αναφυόμενα φυτά διευκολύνουν τη συσσωμάτωση, καθίζηση και την παγίδευση του BOD σε αιώρηση.

Ένας τεχνητός υγροβιότοπος έχει μια ποικιλία πηγών ή φορτίων άνθρακα. Το απόβλητο που εισρέει αντιπροσωπεύει το κύριο φορτίο άνθρακα. Υπάρχουν όμως και άλλες σημαντικές πηγές άνθρακα από την ανάπτυξη της φυτικής βλάστησης και από την ανάπτυξη της βιομάζας των μικροοργανισμών.

Η φύση των πηγών του άνθρακα διαφέρει. Παραδείγματος χάριν, ο οργανικός άνθρακας στα αστικά απόβλητα μπορεί να είναι εύκολα βιοαποικοδομήσιμος και δημιουργεί άμεσα υψηλό BOD. Αντίθετα τα υπολείμματα των φύλλων που πέφτουν από τα φυτά είναι δύσκολα βιοαποικοδομήσιμα και διασπώνται αργά.

Οι μηχανισμοί αποσύνθεσης του φορτίου του άνθρακα καθορίζεται από μια ισορροπία μεταξύ του φορτίου του άνθρακα και της παροχής οξυγόνου. Το οξυγόνο διοχετεύεται στη στήλη νερού του υγροβιότοπου με διάχυση από τον ατμοσφαιρικό αέρα, μέσω της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτών στη στήλη νερού. Αν η παροχή οξυγόνου ικανοποιεί την απαίτηση σε οξυγόνο, η αποικοδόμηση του BOD προκύπτει με αερόβιες διεργασίες. Αν η απαίτηση σε οξυγόνο είναι μεγαλύτερη από την παροχή οξυγόνου, η αποικοδόμηση γίνεται με αναερόβιες διεργασίες. Η ισορροπία μεταξύ του αερόβιου και αναερόβιου μεταβολισμού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις διόδους απομάκρυνσης του άνθρακα σε έναν υγροβιότοπο. Στα περισσότερα συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων και οι δυο διεργασίες μπορούν να φέρουν αποτελέσματα. Η αποικοδόμηση της οργανικής ύλης προκύπτει και στα ιζήματα και στο στρώμα των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται στη φυτική βλάστηση.



Σχήμα 1.5 - Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών απομάκρυνσης του BOD (Sinclair Knight Merz, 2000)

1.6.2 Απομάκρυνση ολικών αιωρούμενων στερεών

1.6.2.1. Γενικά

Τα ολικά αιωρούμενα στερεά των υγρών αποβλήτων αποτελούνται από μια ποικιλία οργανικών και ανόργανων συστατικών. Η πυκνότητα και το μέγεθος των σωματιδίων διαφέρουν αξιοσημείωτα. Σωματίδια διαφορετικού μεγέθους και πυκνότητας απομακρύνονται με διαφορετικούς μηχανισμούς.

Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης των ολικών αιωρούμενων στερεών είναι η συσσωμάτωση και η καθίζηση στο κυρίως υγρό, και η φίλτραση στα διάκενα του υποστρώματος. Τα περισσότερα από τα στερεά που έχουν καθιζάνει απομακρύνονται στα 50 με 100 ft από το σημείο εφαρμογής. Η ιδανική απομάκρυνση στερεών απαιτεί τη διευκόλυνση της φίλτρασης και της καθίζησης από τη βλάστηση και την αποφυγή επανεμφάνισης αλγών. Τα στερεά που προέρχονται από άλγη απαιτούν 6 με 10 μέρες χρόνο συγκράτησης έτσι ώστε να απομακρυνθούν.

Τα μεγαλύτερα και βαρύτερα σωματίδια κατακάθονται στη ζώνη του υδροβιότοπου που εισρέει το απόβλητο. Ελαφρότερα και μικρότερα σωματίδια κατακάθονται με τη βοήθεια

της φυτικής βλάστησης. Η φυτική βλάστηση του υδροβιότοπου προωθεί την κατακάθιση μειώνοντας την ανάμιξη της στήλης νερού και την επαναιώρηση των σωματιδίων. Τα μικρότερα σωματίδια (βακτήρια, άργιλοι, κολλοειδή κ.λ.π.) δε συσσωματώνονται ώστε να κατακαθίσουν όσο βρίσκονται στον υδροβιότοπο. Για τα σωματίδια αυτά ο μοναδικός μηχανισμός απομάκρυνσης είναι η προσκόλλησή τους σε επιφάνειες στη στήλη νερού. Οι επιφάνειες αυτές είναι οι επιφάνειες των φυτών καθώς και οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται πάνω σε αυτά.

1.6.2.2. Καθίζηση

Η διαδικασία της καθίζησης εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος του σωματιδίου που καθιζάνει, τη βαρύτητα και το ιξώδες. Η καθίζηση λαμβάνει χώρα τόσο από μεμονωμένα σωματίδια, όσο και από συσσωματωμένα σωματίδια. Η αντίσταση που επηρεάζει την ταχύτητα καθίζησης εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου την τύρβη και το ιξώδες. Όσον αφορά στα σωματίδια που έχουν προκύψει από συσσωματώσεις, η ταχύτητα καθίζησης αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς η μάζα τους μεγαλώνει συνεχώς. Η συσσωμάτωση λαμβάνει χώρα είτε εξαιτίας φυσικών διεργασιών, είτε εξαιτίας της χημικής προσρόφησης. Ο σχηματισμός ολοένα και μεγαλύτερων σωματιδίων εξαρτάται από την ηλεκτρική φόρτιση στην επιφάνεια της συσσώρευσης. Ποσότητα διαλυμένης ύλης μπορεί να προσροφηθεί στη σωματιδιακή επιφάνεια ως αποτέλεσμα διάφορων μηχανισμών συγκράτησης, οι οποίοι έχουν σαν αποτέλεσμα την αποσταθεροποίηση των σωματιδίων και συνεπώς τη σωματιδιακή συσσωμάτωση.

1.6.2.3. Φίλτραση/ Συγκράτηση

Η απομάκρυνση εξαιτίας της φίλτρασης δεν είναι σημαντική στους υδροβιότοπους επιφανειακής ροής. Το σώμα των αναφερόμενων φυτών και των φυτικών καταλοίπων δεν παγιδεύει σε μεγάλο βαθμό τα σωματίδια της εισροής. Η συγκράτηση όμως και η συγκόλληση των σωματιδίων στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης αποτελεί σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης. Η αποτελεσματικότητα του μηχανισμού αυτού εξαρτάται από το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, την ταχύτητα ροής και την επιφάνεια της φυτικής βλάστησης στην οποία προσκρούουν τα σωματίδια. Η επιφάνεια της φυτικής βλάστησης

καλύπτεται σταδιακά με ένα στρώμα μικροοργανισμών το οποίο προσροφά κολλοειδή ή υπερκολλοειδή σωματίδια και απορροφά διαλυμένα μόρια. Ανάλογα με τη φύση των στερεών αυτά μπορούν να μεταβολιστούν και να μετατραπούν σε διαλυτά σωματίδια, αέρια και βιομάζα ή μπορούν να προσκολληθούν φυσικά στην επιφάνεια του στρώματος αυτού και να αποδεσμευτούν στη στήλη νερού.

1.6.2.4. Επαναιώρηση

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής η φυσική επαναιώρηση δεν είναι κυρίαρχη διεργασία. Οι ταχύτητες του νερού είναι συνήθως πολύ μικρές για να προκαλέσουν την αιώρηση σωματιδίων που έχουν ήδη καθιζάνει. Η πιθανότητα ύπαρξης διαβρωτέων ταχυτήτων βρίσκεται μόνο σε περιπτώσεις υγροβιότοπων με μεγάλο λόγο μήκους ανά πλάτος που λαμβάνουν μεγάλα φορτία.

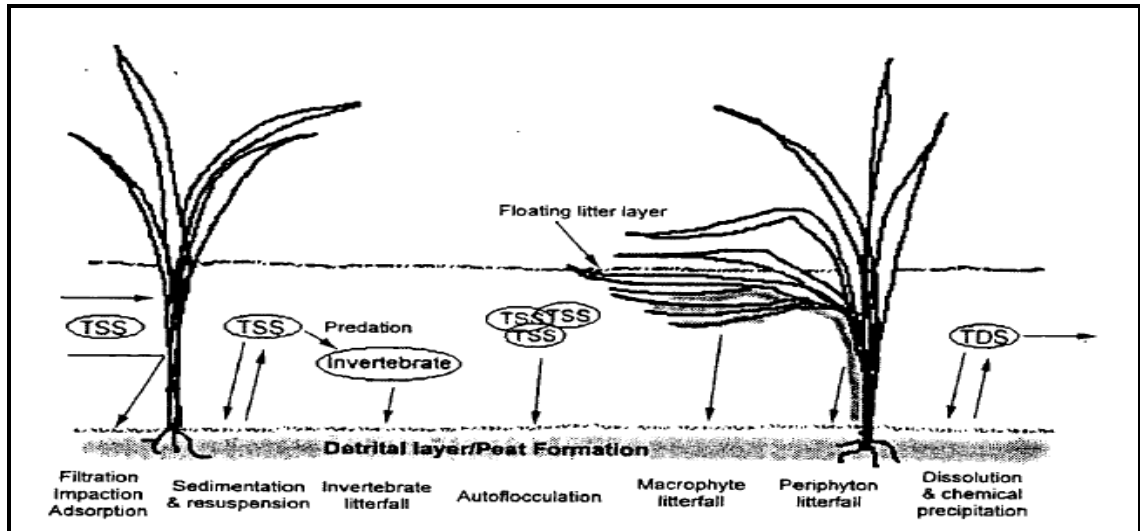
Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί που μπορούν να προκαλέσουν επαναιώρηση σε υγροβιότοπους επιφανειακής ροής: η τύρβη που δημιουργείται από τον άνεμο, η διατάραξη που προκαλεί η πανίδα του συστήματος και η επίπλευση που προκαλείται από την παραγωγή αερίων. Σε ανοικτές επιφάνειες νερού ο άνεμος προκαλεί επιφανειακή ροή κατά τη κατεύθυνση του ανέμου και ροή στο βυθό του υγροβιότοπου με αντίθετη κατεύθυνση.

Πολλά ζώα διάφορων ειδών και μεγεθών μπορούν να προκαλέσουν επαναιώρηση των ιζημάτων σε ένα υγροβιότοπο. Παραδείγματα τέτοιων ζώων που έχουν παρατηρηθεί είναι ψάρια όπως κυπρίνοι και ψάρια του γένους *alosa*. Η επαναιώρηση μέσω των αερίων που παράγονται στο σύστημα προκύπτει όταν τα αέρια αυτά παγιδεύονται ή ενσωματώνονται στα σωματίδια του ιζήματος. Τα αέρια που παράγονται από το σύστημα είναι κυρίως το οξυγόνο που παράγεται με τη φωτοσύνθεση και η παραγωγή μεθανίου στις αναερόβιες ζώνες.

Σε υγροβιότοπους που είναι πλήρως καλυμμένοι με βλάστηση, το στρώμα των υπολειμμάτων και το ριζικό σύστημα της βλάστησης εξασφαλίζουν τη σταθεροποίηση των ιζημάτων και του εδάφους. Το γεγονός αυτό περιορίζει, αλλά δεν εξαλείφει το πρόβλημα της επαναιώρησης.

Η ποσότητα TSS στην εκροή του υγροβιότοπου συνήθως αποτελείται από στερεά τα οποία δημιουργούνται εντός του συστήματος και σπάνια από σωματίδια τα οποία δεν μπορούν να απομακρυνθούν από την εισροή. Για το λόγο αυτό οι συγκεντρώσεις των TSS στην εκροή δεν μπορούν να είναι μηδενικές, κυμαίνονται όμως κοντά στις ελάχιστες συγκεντρώσεις που

παράγονται από το σύστημα (συγκεντρώσεις υποβάθρου). Οι συγκεντρώσεις υποβάθρου κυμαίνονται από 2 έως 10 mg/L.



Σχήμα 1.6 - Περιγραφή μηχανισμών απομάκρυνσης και επαναιώρησης TSS (EPA, 1999)

1.6.3 Απομάκρυνση Αζώτου

1.6.3.1. Γενικά

Η απομάκρυνση του αζώτου στους τεχνητούς υγροβιότοπους επιτυγχάνεται με νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Η πρόσληψή του από τα φυτά αντιπροσωπεύει περίπου το 10% της συνολικής απομάκρυνσης του αζώτου. Η νιτροποίηση και απονιτροποίηση είναι μικροβιακές αντιδράσεις που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και το χρόνο συγκράτησης. Οι οργανισμοί για την νιτροποίηση απαιτούν οξυγόνο και επαρκής επιφάνεια να αναπτυχθούν και γι' αυτό δεν είναι παρόντες σε μεγάλους αριθμούς, είτε όταν το οργανικό φορτίο είναι ιδιαίτερα υψηλό είτε συστήματα σχετικά νέα με ατελής κάλυψη φυτικής βλάστησης.

1.6.3.2. Οργανικό άζωτο

Το οργανικό άζωτο, που περιέχεται στα αιωρούμενα στερεά των υγρών αποβλήτων, απομακρύνεται όπως αναφέρεται σε μεγάλο ποσοστό με διήθηση και φιλτράρισμα. Επίσης το οργανικό άζωτο, υπό τη μορφή στερεών συστατικών του αποβλήτου, που συνήθως περιέχεται σε πολύπλοκες μεγαλομοριακές ενώσεις, όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιγνίνη, μπορεί να ενσωματώνεται κατ' ευθείαν στην οργανική μάζα ή στο χούμο του εδάφους. Ένα ποσοστό του οργανικού αζώτου υδρολύεται σε διαλυτά αμινοξέα και μπορεί να υποστεί περαιτέρω διάσπαση κατά την οποία ελευθερώνεται ιονισμένο αμμώνιο (NH_4^+).

1.6.3.3. Αμμωνιακό άζωτο

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

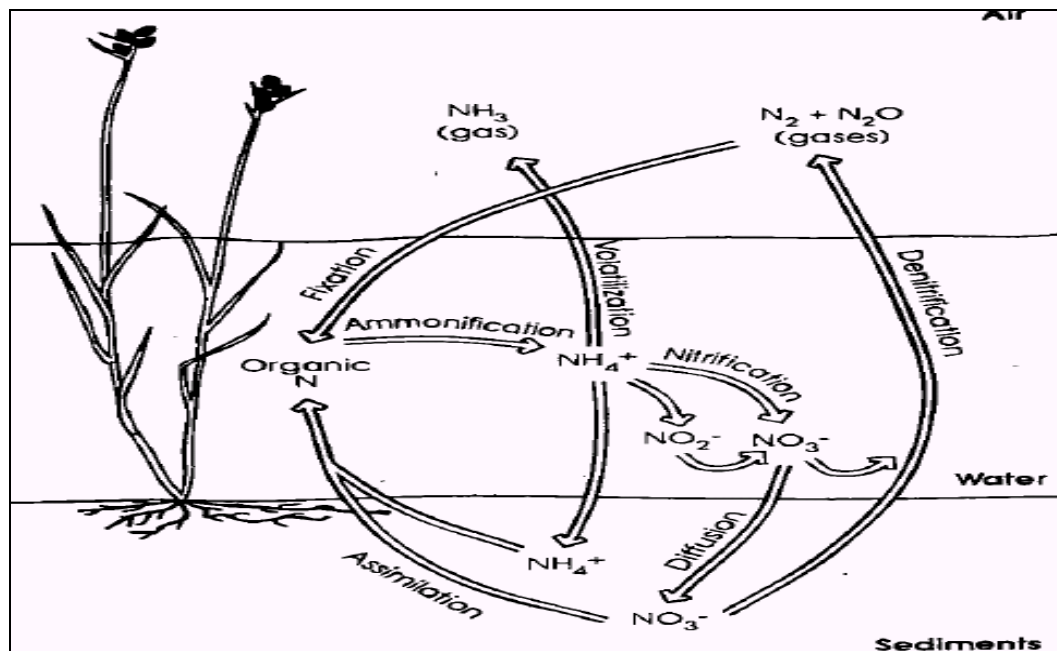
1.6.3.4. Βιολογική νιτροποίηση

Το αμμώνιο μπορεί, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, να δράσει και σαν υπόστρωμα για μικροβιακούς μετασχηματισμούς. Η νιτροποίηση είναι μια αερόβια οξειδωση του αμμωνίου σε νιτρικά. Μεγάλος αριθμός μικροοργανισμών που χρησιμοποιούν τον οργανικό άνθρακα σαν πηγή ενέργειας είναι ικανοί να παράγουν οξειδωμένες νιτρικές ενώσεις. Εν τούτοις η νιτροποίηση από αυτότροφους μικροοργανισμούς θεωρείται ο κύριος μηχανισμός μετατροπής του αμμωνίου σε νιτρικό άζωτο. Η νιτροποίηση είναι μια διεργασία που συντελείται σε δυο στάδια από μια ομάδα βακτηρίων. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την οξειδωση του αμμωνίου σε νιτρώδη, κυρίως από βακτήρια του γένους *Nitrosomas*, ενώ το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την οξειδωση των νιτρωδών σε νιτρικά, κυρίως από βακτήρια

του γένους *Nitrobacter*. Η απόδοση της νιτροποίησης εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων όπως η παροχή αμμωνίου, η παροχή οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα, η πυκνότητα του πληθυσμού των βακτηρίων, η θερμοκρασία, pH και αλκαλικότητα. Η παροχή οξυγόνου περιορίζει την νιτροποίηση στην επιφάνεια όπου είναι δυνατή η παροχή οξυγόνου και στα φίλμ των μικροοργανισμών στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης.

1.6.3.5. Νιτρικό άζωτο

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



Σχήμα 1.7 - Περιγραφή μηχανισμών απομάκρυνσης αζώτου

1.6.3.6. Βιολογική απονιτροποίηση

Το νιτρικό άζωτο απομακρύνεται επίσης με τη διεργασία της βιολογικής απονιτροποίησης και στη συνέχεια με τη διάχυσή του στην ατμόσφαιρα, κυρίως ως οξειδίου του αζώτου ή ως ελεύθερου αζώτου. Η απονιτροποίηση διενεργείται με επαμφοτερίζοντα βακτήρια υπό ανοξικές συνθήκες. Γι' αυτή τη διεργασία δεν είναι απαραίτητο να επικρατούν ανοξικές συνθήκες σε όλο το σύστημα. Έτσι απονιτροποίηση είναι δυνατό να συμβαίνει σε ανοξικές μικροπεριοχές, παρακείμενες σε ευρύτερες αερόβιες περιοχές. Για μεγιστοποίηση, όμως, της απονιτροποίησης θα πρέπει να βελτιστοποιούνται οι απαιτούμενες συνθήκες γι' αυτή τη διεργασία. Για την ολοκλήρωση της βιολογικής απονιτροποίησης, εντός των ανοξικών συνθηκών, απαιτείται και μια αυξημένη αναλογία άνθρακα/ αζώτου. Μια αναλογία άνθρακα/ αζώτου 2:1 είναι απαραίτητη. Βιομάζα από τη φυτική βλάστηση μπορεί να αποτελέσει μερική πηγή άνθρακα. Σε συστήματα όμως με υψηλά φορτία η πηγή άνθρακα θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στο απόβλητο. Έτσι σε συστήματα με εκροές δευτεροβάθμιας επεξεργασίας που έχουν αναλογία άνθρακα/ αζώτου <1, δεν μπορεί να μεγιστοποιηθεί η απομάκρυνση αζώτου, χωρίς να ληφθούν πρόσθετα μέτρα.

1.6.4 Απομάκρυνση φωσφόρου

1.6.4.1. Γενικά

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

1.6.4.2. Φυσικοί – Χημικοί διαχωρισμοί

Τα φωσφορικά που βρίσκονται υπό τη μορφή σωματιδίων μπορούν να εναποτεθούν στον πυθμένα του υδροβιότοπου μέσω της καθίζησης ή να παγιδευτούν στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης και να δεσμευτούν από το στρώμα των μικροοργανισμών. Τα διαλυμένα φωσφορικά μπορούν να δεσμευτούν από τα στρώματα των μικροοργανισμών που βρίσκονται στην επιφάνεια της φυτικής βλάστησης και στα κατάλοιπά της που επιπλέουν, ή που βρίσκονται στο ίζημα. Η ανταλλαγή των διαλυμένων φωσφορικών ανάμεσα στο νερό που είναι εγκλωβισμένο στους πόρους και στην υδάτινη στήλη διαμέσου της διάχυσης ή της ρόφησης / εκρόφησης αποτελεί τη κύρια πηγή των διαλυμένων φωσφορικών. Στο εγκλωβισμένο, στους πόρους, νερό του ιζήματος τα φωσφορικά αυτά μπορούν να κατακρημνιστούν ως αδιάλυτα σιδηρούχα, ασβεστούχα και αλουμινούχα φωσφορικά ή να προσροφηθούν σε σωματίδια ιλύος, οργανική τύρφη και σιδηρούχα και αλουμινούχα οξείδια και υδροξείδια. Τα φωσφορικά μπορούν να απελευθερωθούν από τα μεταλλικά σύμπλοκα ανάλογα με το οξειδοαναγωγικό δυναμικό του συστήματος. Επίσης, τα φωσφορικά απελευθερώνονται από τα σιδηρούχα και αλουμινούχα σύμπλοκα με υδρόλυση η οποία λαμβάνει χώρα κάτω από ανοξικές συνθήκες. Τα ροφημένα φωσφορικά στα σωματίδια ιλύος και ένυδρα οξείδια μπορούν επίσης να επιστρέψουν στην υδάτινη στήλη μέσω της ανταλλαγής ιόντων. Αν το pH του συστήματος μειωθεί, ως αποτέλεσμα του βιολογικού σχηματισμού οργανικών οξέων, νιτρικών ή θεικών, κάποια ποσότητα φωσφορικών μπορεί να εκλυθεί. Με την πάροδο του χρόνου ένα σημαντικό μέρος των φωσφορικών που έχουν απομακρυνθεί, δεσμεύεται στο ίζημα και με αυτό τον τρόπο απομακρύνεται από το σύστημα. Κατά την αρχική περίοδο προσαρμογής ενός συστήματος FWS μέχρις ότου αυτό σταθεροποιηθεί παρατηρείται μεγάλου βαθμού απομάκρυνση λόγω των αρχικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στον πυθμένα του υδροβιότοπου.

1.6.4.3. Βιολογικοί μετασχηματισμοί φωσφορικών

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

γρήγορο κυκλικό μηχανισμό. Με το θάνατο και την αποσύνθεση της βλάστησης η μεγαλύτερη ποσότητα των φωσφορικών επιστρέφει πίσω στην υδάτινη στήλη, ενώ κάποια ποσότητα απομακρύνεται στα καινούρια σχηματιζόμενα ιζήματα. Η λήψη φωσφορικών από τα μακρόφυτα πραγματοποιείται μέσω του ριζικού συστήματος. Η λήψη πραγματοποιείται κατά την περίοδο ανάπτυξης της βλάστησης ενώ κάποια ποσότητα φωσφορικών αποδεσμεύεται κατά τη γήρανση των φυτών κατά το τέλος του καλοκαιριού ή το φθινόπωρο, συνοδευόμενη από την αποσύνθεση των φυτικών κατάλοιπων.

Η μορφή των φωσφορικών, ο τύπος και η πυκνότητα της φυτικής βλάστησης, ο ρυθμός υδραυλικού φορτίου των φωσφορικών και οι κλιματικές συνθήκες καθορίζουν τον τύπο και την ποσότητα των φωσφορικών που απομακρύνονται από το σύστημα σε κάποια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η απομάκρυνση των φωσφορικών δια μέσου των φυτών λαμβάνει χώρα εποχιακά, καθώς κατά την περίοδο γήρανσης των φυτών, η μεγαλύτερη ποσότητα φωσφορικών που έχει απομακρυνθεί, ελευθερώνεται πίσω στην υδάτινη στήλη.

Συνήθως σε υγροβιότοπους επεξεργασίας οι ευκαιρίες επαφής μεταξύ των υγρών αποβλήτων και του εδάφους είναι περιορισμένες, ενώ η απομάκρυνση της βλάστησης δεν πραγματοποιείται με ιδιαίτερα εύκολο τρόπο. Αποτελεσματική απομάκρυνση του φωσφόρου παρατηρείται ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των πρώτων 12- 24 μηνών. Όταν όλο το σύστημα φτάσει σε ένα επίπεδο ισορροπίας, η απομάκρυνση του φωσφόρου μειώνεται. Σε γενικές γραμμές με βάση διάφορες εκτιμήσεις και έρευνες, η ετήσια απομάκρυνση φωσφόρου από συστήματα FWS παρουσιάζεται περιορισμένη. Μια απομάκρυνση ολικού φωσφόρου (TP) 30 – 50% πραγματοποιείται συνήθως σε υγροβιότοπους με χρόνο συγκράτησης <10 μέρες. Σε κάποια συστήματα FWS με χρόνους παραμονής > 20 μέρες παρατηρήθηκαν εκροές < 4 mg/L με εισροή > 10 mg/L. Απαιτείται μεγάλη έκταση και επιπρόσθετη επεξεργασία για μεγάλο βαθμού απομάκρυνση του φωσφόρου σε τυπικά συστήματα υγροβιότοπων.

1.6.5 Απομάκρυνση παθογόνων οργανισμών

Οι παθογόνοι οργανισμοί που εισέρχονται σε ένα τεχνητό υγροβιότοπο μπορεί να είναι ενσωματωμένα στα ολικά αιωρούμενα στερεά ή μπορεί να αιωρούνται στην εισροή του αποβλήτου. Αυτοί που είναι ενσωματωμένοι στα ολικά στερεά απομακρύνονται με τους ίδιους μηχανισμούς που απομακρύνονται και τα TSS. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν αναλυθεί παραπάνω και είναι η καθίζηση, η φίλτραση και η ρόφηση. Αφού διαχωριστούν από τη

στήλη νερού, οι ζωντανοί μικροοργανισμοί διαχωρίζονται από τη στήλη νερού μπορούν να αποδεσμευτούν και να συγκρατηθούν στα στρώματα των μικροοργανισμών ή στους πόρους των ιζημάτων που περιέχουν νερό, ή να εισέλθουν ξανά στη στήλη νερού. Ανεξάρτητα από το πού θα βρεθούν, πρέπει να ανταγωνιστούν με το σύνολο των οργανισμών που τους περιβάλλουν. Σαν εντερικοί οργανισμοί, συνήθως απαιτούν πλούσιο υπόστρωμα και υψηλές θερμοκρασίες. Οι περισσότεροι δεν μπορούν να επιζήσουν τον ανταγωνισμό αυτό. Οι περισσότεροι θα καταστραφούν σαν θηράματα άλλων οργανισμών ή από την ακτινοβολία UV, αν βρεθούν κοντά στην επιφάνεια του νερού.

Η απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών στους υδροβιότοπους φαίνεται να έχει άμεση σχέση με την απομάκρυνση των ολικών αιωρούμενων στερεών και το χρόνο συγκράτησης. Έχουν διεξαχθεί λίγες μελέτες για την επίδραση των τεχνητών υδροβιότοπων στους παθογόνους μικροοργανισμούς που βρήκαν παρόμοια απομάκρυνση σε εισροές μολυσμένες με σαλμονέλα και κολοβακτηρίδια MS2. Πολλοί παθογόνοι μικροοργανισμοί είναι πιο ευαίσθητοι στο περιβάλλον των υδροβιότοπων από ότι οι οργανισμοί που χρησιμοποιούνται σα δείκτες, όπως τα βακτήρια E.coli και οι στρεπτόκοκκοι. Μερικοί όμως ιοί και πρωτόζωα μπορεί να είναι πιο ανθεκτικοί. Μεμονωμένα αποτελέσματα που αφορούν σε ιούς έχουν καταγραφεί, και οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την απομάκρυνσή τους είναι διαφορετικοί από αυτούς που καταστρέφουν τους δείκτες.

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι παθογόνοι μικροοργανισμοί μπορούν να αναπτυχθούν μέσα στον υδροβιότοπο. Επίσης τέτοιοι οργανισμοί μπορούν να βρεθούν ακόμα και στους φυσικούς υδροβιότοπους. Η ποσότητα αυτή των μικροοργανισμών μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την εποχή και άλλες λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος. Θα έπρεπε επίσης να αναφερθεί ότι γενικά οι μικροοργανισμοί δεν προέρχονται πάντα από ανθρώπινες πηγές. Παρόλα αυτά οι εκροές των τεχνητών υδροβιότοπων όσον αφορά στους παθογόνους οργανισμούς είναι απίθανο να βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων από την νομοθεσία. Γι' αυτό απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για τη διάθεσή τους στο περιβάλλον.

1.6.6 Απομάκρυνση μετάλλων

Παρόλο που ίχνη μερικών μετάλλων είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη φυτών και ζώων αυτά τα ίδια μέταλλα μπορεί να είναι τοξικά σε υψηλότερες συγκεντρώσεις. Άλλα

μέταλλα δεν έχουν καμία βιολογική σημασία και μπορούν να είναι τοξικά ακόμα και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις.

Τα μέταλλα που εισέρχονται σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο σαν αδιάλυτα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται από τη στήλη νερού από τους ίδιους μηχανισμούς που απομακρύνονται τα TSS. Ανάλογα με το pH και το δυναμικό οξειδοαναγωγής, τα αδιάλυτα σωματίδια μπορεί να διαλυθούν ξανά και να επιστρέψουν στην υδατική φάση. Σημαντικοί μηχανισμοί απομάκρυνσης μετάλλων είναι η ανταλλαγή κατιόντων με τα ιζήματα του υγροβιότοπου, η δέσμευση από οργανική ύλη, η χημική κατακρήμνιση σε αδιάλυτα άλατα, σουλφίδια, ανθρακικά και η πρόσληψη από φυτά, άλγη και βακτήρια. Τα δεσμευμένα μέταλλα παραμένουν στα ανοξικά ιζήματα όπου προκύπτουν. Αυτά τα δεσμευμένα μέταλλα δεν είναι συνήθως βιοδιαθέσιμα και παραμένουν απομακρυσμένα από το σύστημα. Αν τα ιζήματα διαταραχθούν ή προκληθεί επαναιώρηση τους, τα απομονωμένα μέταλλα θα επιστρέψουν στην υδατική φάση.

Τα μέταλλα ενσωματώνονται στη βιομάζα των υγροβιότοπων. Απορροφώνται από τη φυτική βλάστηση μέσω του ριζικού συστήματος και έπειτα κατανέμονται σε όλο το φυτό. Ο βαθμός της απορρόφησης αυτής εξαρτάται από το είδος του μετάλλου και το είδος του φυτού. Ορισμένοι μελετητές βρήκαν ότι η πρόσληψη των μετάλλων από τα φυτά είναι μικρή σε συστήματα υποεπιφανειακής ροής, ενώ άλλοι ισχυρίζονται ότι μέταλλα μπορούν να βρεθούν στις ρίζες των φυτών εξαιτίας της χημικής κατακρήμνισης και της προσρόφησης. Σε ένα σύστημα επεξεργασίας στο New Jersey βρέθηκε ότι το κάδμιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος, το νικέλιο και ο ψευδάργυρος συσσωρεύτηκαν στα υπολείμματα των φυτών στο τέλος της περιόδου ανάπτυξης σε πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις από ότι στα φυτά. Άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι μέταλλα όπως το κάδμιο, το χρώμιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το νικέλιο και ο ψευδάργυρος μπορούν να απομονωθούν στο χώμα και στη χλωρίδα και πανίδα του συστήματος.

Ως τώρα δεν υπάρχουν επαρκή μακροχρόνια στοιχεία για τεχνητούς υγροβιότοπους μεγάλης κλίμακας, που να παρέχουν μια αξιόπιστη εκτίμηση για την απόδοση της απομάκρυνσης των μετάλλων από τα απόβλητα. Εν τούτοις, σε συστήματα υποεπιφανειακής ροής και σε συστήματα επιφανειακής ροής πλήρως καλυμμένα με βλάστηση, οι αναερόβιες συνθήκες συντελούν στην κατακράτηση των περισσότερων μετάλλων με την κατακάλιση των ολικών αιωρούμενων στερεών και την μείωση της επαναιώρησης.

1.6.7 Άλλα οργανικά συστατικά

Υπάρχει μια ανησυχία για την τύχη πολλών ιχνών οργανικών ενώσεων, που περιέχονται στα απόβλητα, στο περιβάλλον. Οι οργανικές αυτές ενώσεις είναι μικροβιοκτόνα, θρεπτικά και άλλες ουσίες που προκύπτουν από χημικές διεργασίες και ανήκουν στην κατηγορία των πιο σημαντικών ρυπαντών. Η τύχη των ρυπαντών αυτών σε έναν υδροβιότοπο εξαρτάται από τις ιδιότητες της κάθε ένωσης, τα χαρακτηριστικά του υδροβιότοπου, το είδος της φυτικής βλάστησης και από άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι πιο σημαντικοί μηχανισμοί διαχωρισμού και απομάκρυνσης είναι η εξάτμιση, η καθίζηση, η βιοαποικοδόμηση, η προσρόφηση και η απορρόφησή τους από τα φυτά. Αυτοί οι μηχανισμοί έχουν ήδη αναλυθεί. Οι συντηρητικές οργανικές ενώσεις που έχουν διαχωριστεί από τη στήλη νερού συσσωρεύονται στα ιζήματα του υδροβιότοπου. Ένα μέρος απορροφάται από τα φυτά και επιστρέφει στο σύστημα με την αποσύνθεσή τους. Από τη βιοαποικοδόμηση ορισμένων οργανικών ενώσεων προκύπτει η παραγωγή ανόργανων τελικών προϊόντων, ή η παραγωγή τελικών προϊόντων περισσότερο τοξικών από τις αρχικές ενώσεις. Προς το παρόν όμως δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για την αποτελεσματικότητα της μακροπρόθεσμης απομάκρυνσης και για την καταστροφή των κυριότερων ρυπαντών.

Στην συνέχεια παρατίθενται στον Πίνακα 1.1 συνοπτικά οι βασικές αρχές διεργασιών και οι μηχανισμοί απομάκρυνσης που υπάρχουν σε ένα φυσικό σύστημα.

Πίνακας 1.1 Βασικές αρχές των διεργασιών που υπάρχουν σε ένα φυσικό σύστημα

Διεργασίες	Ρόλος ή δραστηριότητα
<u>Φυσικές</u>	
Φιλτράρισμα	Καθώς το νερό περνά μέσα από το σύμπλεγμα των φυτών και το υπόστρωμά τους, κολλοειδή και άλλα σωματίδια φιλτράρονται. Οι ρίζες των φυτών ανοίγουν διαδρόμους μέσα στο έδαφος δημιουργώντας οδούς κίνησης του νερού.
Καθίζηση	Συσσωμάτωση και καθίζηση με τη βοήθεια της βαρύτητας στερεών
Προσρόφηση	Προσρόφηση κολλοειδών στερεών μέσω διασωματειακών μοριακών δυνάμεων.
<u>Χημικές</u>	
Κατακρήμιση	Δημιουργία και κατακρήμιση αδιάλυτων μορίων όπως CaPO_4 . η προσθήκη Al, Fe ή Ca θα οδηγήσει στην καθίζηση του φωσφόρου.
Αποσύνθεση	Οξειδωση και μείωση των λιγότερο σταθερών μορίων
Προσρόφηση	Προσρόφηση βαρέων μετάλλων από το έδαφος
<u>Βιολογικές</u>	
Μικροβιακός μεταβολισμός	Μικροβιακή αποδόμηση οργανικής ουσίας, νιτροποίηση-απονιτροποίηση. Αποτελεί το βασικό μηχανισμό για την απομάκρυνση BOD5 και N
Χρόνος παραμονής	Φυσική θανάτωση των παθογόνων μικροοργανισμών.
Αύξηση των φυτών	Προσωρινή και εποχιακή απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων και μετάλλων από τα φυτά η οποία μπορεί να γίνει μόνιμη αν υπάρχει απομάκρυνση μέσω συλλογής της φυτικής μάζας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο δίνονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικές με τον σχεδιασμό της πιλοτικής μονάδας που χρησιμοποιήθηκε για την παρακολούθηση των παραμέτρων ελέγχου των εισροών – εκροών.

2.2 Περιγραφή του συστήματος υδροβιότοπων

Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει ένα τοπογραφικό σχεδιάγραμμα της Εθνικής οδού από την οποία συλλέγονται οι εκροές HRO και στην συνέχεια επεξεργάζονται μέσω των τεχνητών υδροβιότοπων.

Είναι ένα τμήμα της Εθνικής οδού που συνδέει την πόλη του Ηρακλείου με την πόλη του Αγίου Νικόλαου, και διατρέχει την βόρεια ακτή του νησιού. Μεταξύ αυτών των δύο πόλεων και σχεδόν στη μέση βρίσκεται η περιοχή της Χερσονήσου, πιθανώς ένας από τους μεγαλύτερους τόπους τουριστικού προορισμού στην Κρήτη. Η κυκλοφορία που υπάρχει στον δρόμο, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι έντονη, με εξαιρετικά αυξημένους κυκλοφοριακούς φόρτους κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Από ένα συγκεκριμένο τμήμα της εν λόγω Εθνικής οδού, μήκους περίπου 198 m και πλάτους περίπου 13,9 m (ένθετη πρώτη φωτογραφία στο Σχήμα 2.1) συλλέγεται το σύνολο των νερών που κυλούν πάνω στο πορώδες οδόστρωμα ασφάλτου και συλλέγεται από την βόρεια τάφρο όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 2.1 (κύκλος και δεύτερη ένθετη φωτογραφία) από το φρεάτιο συλλογής. Η συνολική επιφάνεια συλλογής των εκροών ανέρχεται σε 2.752 m² και καταλήγει σε ένα φρεάτιο που αρχικά οδηγούσε τις απορροές του δρόμου στο παρακείμενο ρέμα, ενώ για τις ανάγκες της εγκατάστασης διαμορφώθηκε κατάλληλα ώστε να τις διοχετεύει στην δεξαμενή αποθήκευσης μέσω ενός πλέγματος ανοίγματος 10 X 10 mm και ενός αγωγού από PVC Φ315 mm.

Ακριβώς δίπλα από τον δρόμο και από το ρέμα που ελάμβανε την απορροή του δρόμου, σε ένα οικόπεδο περίπου 2.000 m² εκ των οποίων τα 1.200 m² ήταν επίπεδα, σε υψομετρική διαφορά περίπου 6 μέτρων χαμηλότερα από το επίπεδο του δρόμου,

Οι τέσσερις υγροβιότοποι κατασκευάστηκαν στην επίπεδη περιοχή του οικοπέδου.

Στην συνέχεια παρατίθενται το Σχήμα 2.2 γενικής διάταξης του υγροβιότοπου (σε κάτοψη), και τα Σχήματα 2.3 και 2.4 με κατασκευαστικές τομές για τους υγροβιότοπους επιφανειακής ροής και υποεπιφανειακής ροής αντίστοιχα.

Από το φρεάτιο συλλογής ξεκινάει ο αγωγός μεταφοράς Φ 315 mm και καταλήγει σε μια διάταξη μέτρησης της παροχής τύπου Parshall και στην συνέχεια υπάρχει η δεξαμενή αποθήκευσης ST.

Ο Διάυλος Parshall (φώτο 2.1) τοποθετήθηκε παράλληλα ως προς την μια πλευρά της δεξαμενής αποθήκευσης και στο πάνω χείλος αυτής. Στο Σχέδιο 2.5 φαίνεται η κάτοψη και η κατά μήκος τομή του Διαύλου Parshall.

Ο διάυλος αυτός αποτελείται από ένα συγκλίνον τμήμα εισόδου, από τον λαιμό και από ένα αποκλίνον τμήμα εξόδου. Καθώς η ροή διέρχεται διαμέσου του στένωσης του λαιμού παρατηρείται ανύψωση της στάθμης ανάντι, έτσι ώστε να αποκαθίστανται συνθήκες κρισίμου ροής. Η στάθμη του υγρού μετριέται στο σημείο της στένωσης και η τιμή h_a αποτελεί μεταβλητή μέσω της οποίας υπολογίζεται η παροχή, σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (w = πλάτος λαιμού) του διαύλου.

Ο υπολογισμός της παροχής γίνεται (Τσώνης 2004) με την βοήθεια της σχέσης της μορφής:

$$Q = C h_a^n \quad 2.1$$

Όπου: Q = η παροχή διαμέσου του αύλακος σε ft^3/s

h_a = το ύψος της στάθμης του υγρού στην στένωση σε ft

C , n = συντελεστές που εξαρτώνται από το πλάτος (w) του λαιμού και λαμβάνονται από πίνακα.

Σημειώνεται ότι η θέση τοποθέτησης του διαύλου σε σχέση με την ανώτατη στάθμη υγρού στην δεξαμενή αποθήκευσης εξασφαλίζουν συνθήκες ελεύθερης και ανεμπόδιστης ροής. Επίσης θα πρέπει να επισημάνουμε ότι τα εν λόγω κανάλια διαύλου τύπου Parshall, είναι κατάλληλα για μέτρηση της ροής και παρέχουν ικανοποιητικές μετρήσεις ακόμα και όταν η ροή συμπαρασύρει αιωρούμενο υλικό, διότι οι σχετικά μεγάλες ταχύτητες στον λαιμό δεν επιτρέπουν κατακάλιση του υλικού αυτού.

Στην περίπτωση μας το πλάτος λαιμού είναι $w = 7,62$ cm, κατά συνέπεια ο υπολογισμός της παροχής σε m^3 γίνεται επιλέγοντας από τον σχετικό πίνακα με βάση το

πλάτος του Διαύλου, τους συντελεστές C και n. Για την περίπτωση του διαύλου μας, οι συντελεστές έχουν τις ακόλουθες τιμές: Συντελεστής C = 0,992 Συντελεστής n = 1,55

Με βάση τον παραπάνω τύπο 2.1 καταλήγουμε στην Ημερήσια Παροχή σε m³.

Ο σχεδιασμός των υδροβιότοπων βασίζεται σε δυο χαρακτηριστικές παραμέτρους: Την μέγιστη ημερήσια παροχή αιχμής (daily peak) , καθώς επίσης και τις συνολικές ετήσιες εκροές HRO.

Με βάση τα στοιχεία βροχόπτωσης για την επιλεγμένη περιοχή, που χορηγήθηκαν από το αρχείο του Τμήματος Υδατικών Πόρων Περιφέρειας Κρήτης, με αναφορά στην μέση τιμή βροχοπτώσεων των είκοσι τελευταίων ετών, το συνολικό ποσό εκροών που αφορά το συγκεκριμένο οδικό τμήμα σε ένα έτος υπολογίστηκε (χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.2 και 2.3 που ακολουθούν) μεταξύ 1.746 και 2.182 m³. Η μέγιστη ημερήσια παροχή αιχμής υπολογίστηκε σε 138 m³ (ανάλογα με την τιμή του συντελεστή απορροής RR). *[Τα σχετικά στοιχεία και ο τρόπος υπολογισμού των παραπάνω τιμών αναλύονται στο κεφάλαιο 3 που ακολουθεί και συνοψίζονται στην πρώτη στήλη του πίνακα 3.1 του ίδιου κεφαλαίου].*

Το απαραίτητο μέγεθος των υδροβιότοπων, καθώς επίσης και της δεξαμενής αποθήκευσης RT, με βάση τις παραπάνω τιμές θα ήταν πολύ μεγάλο για πιλοτικού μεγέθους μονάδα, και για τον διαθέσιμο προϋπολογισμό. Κατά συνέπεια αποφασίστηκε να μειωθεί το μέγεθος των υδροβιότοπων και της δεξαμενής αποθήκευσης ST, ώστε να μπορεί να γίνει και από τους 4 υδροβιότοπους συνολικά ανά 24ωρο επεξεργασία συνολικά περίπου 38 m³ εκροών HRO από την Εθνική Οδό. Προκειμένου να αποφευχθούν οποιαδήποτε προβλήματα με τη λειτουργία του συστήματος από μια πιθανή υπερχείλιση, κατασκευάστηκε στην δεξαμενή αποθήκευσης ST, υπερχειλιστής με αγωγό κατάλληλης διατομής Φ 315 mm που παρακάμπτει το σύστημα των υδροβιότοπων, και οδηγεί τα υπερχειλίζοντα ύδατα μέσω της δεξαμενής ST στο κοντινό ρέμα.

Από την δεξαμενή αποθήκευσης ST, χρησιμοποιώντας μια ηλεκτρονικά ελεγχόμενη βαλβίδα, διοχετεύονται στους τέσσερις υδροβιότοπους οι ημερήσιες ποσότητες, προκειμένου να υλοποιηθεί η παρακάτω περιγραφόμενη διάταξη.

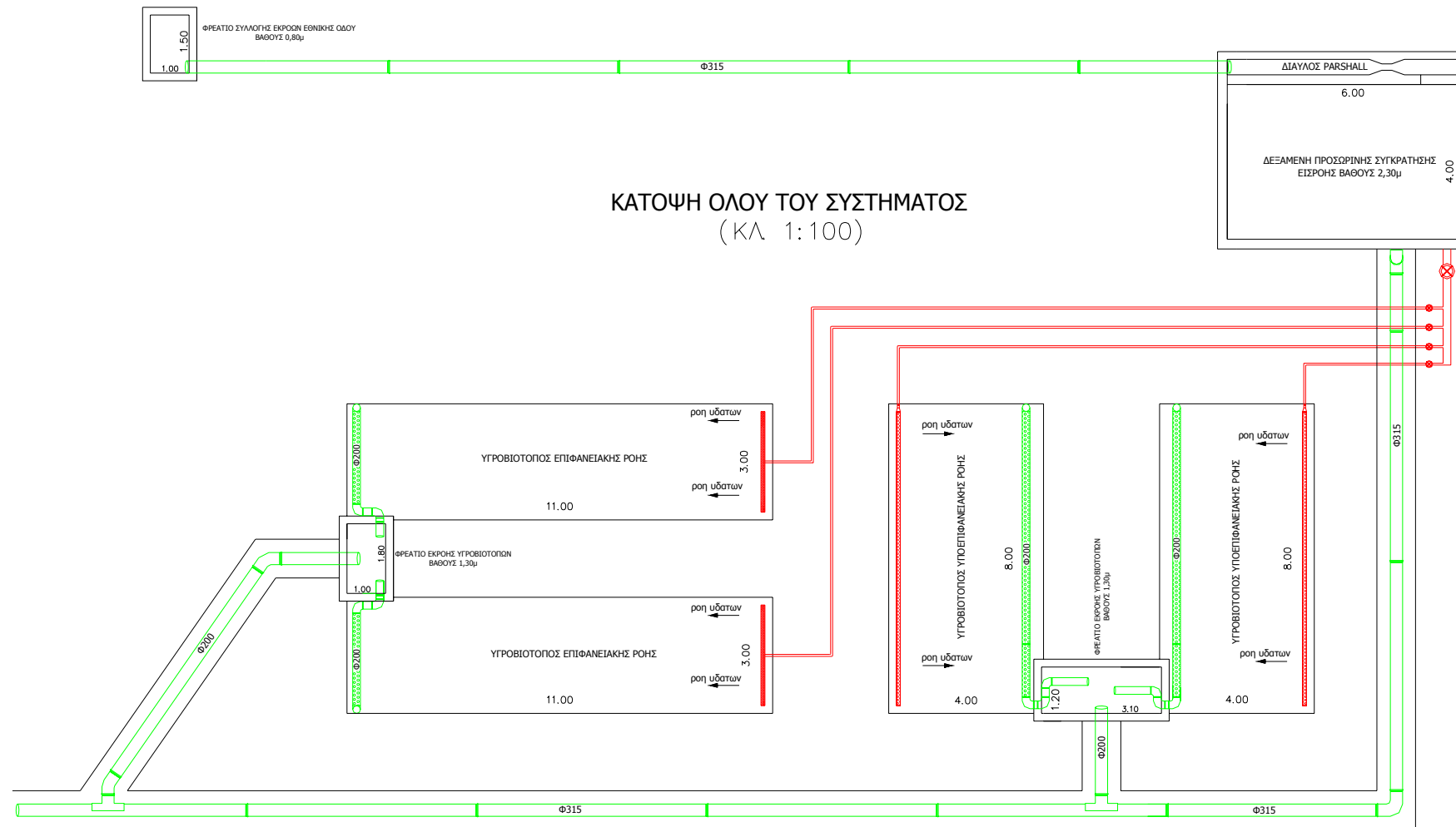
- Ένα υδροβιότοπος FWS και ένας υδροβιότοπος SSF, που έχουν ένα σχεδιασμένο υδραυλικό χρόνο παραμονής HRT 12 ωρών. Οι ως άνω υδροβιότοποι κωδικοποιούνται χάριν συντομίας αντίστοιχα σε FWS12 και SSF12. Καθένα από τα δύο συστήματα λαμβάνουν 12,6 m³/day HRO από την δεξαμενή αποθήκευσης ST.

- Ένα υγροβιότοπος FWS και ένας υγροβιότοπος SSF, που έχουν ένα σχεδιασμένο υδραυλικό χρόνο παραμονής HRT 24 ωρών. Οι ως άνω υγροβιότοποι κωδικοποιούνται χάριν συντομίας αντίστοιχα σε FWS24 και SSF24. Καθένα από τα δύο συστήματα λαμβάνουν 6,3 m³/day HRO από την δεξαμενή αποθήκευσης RT.

Επισημαίνεται ότι το ζεύγος συστημάτων FWS έχει τις ίδιες διαστάσεις, και αντίστοιχα, έχει τις ίδιες διαστάσεις το ζεύγος συστημάτων SSF.

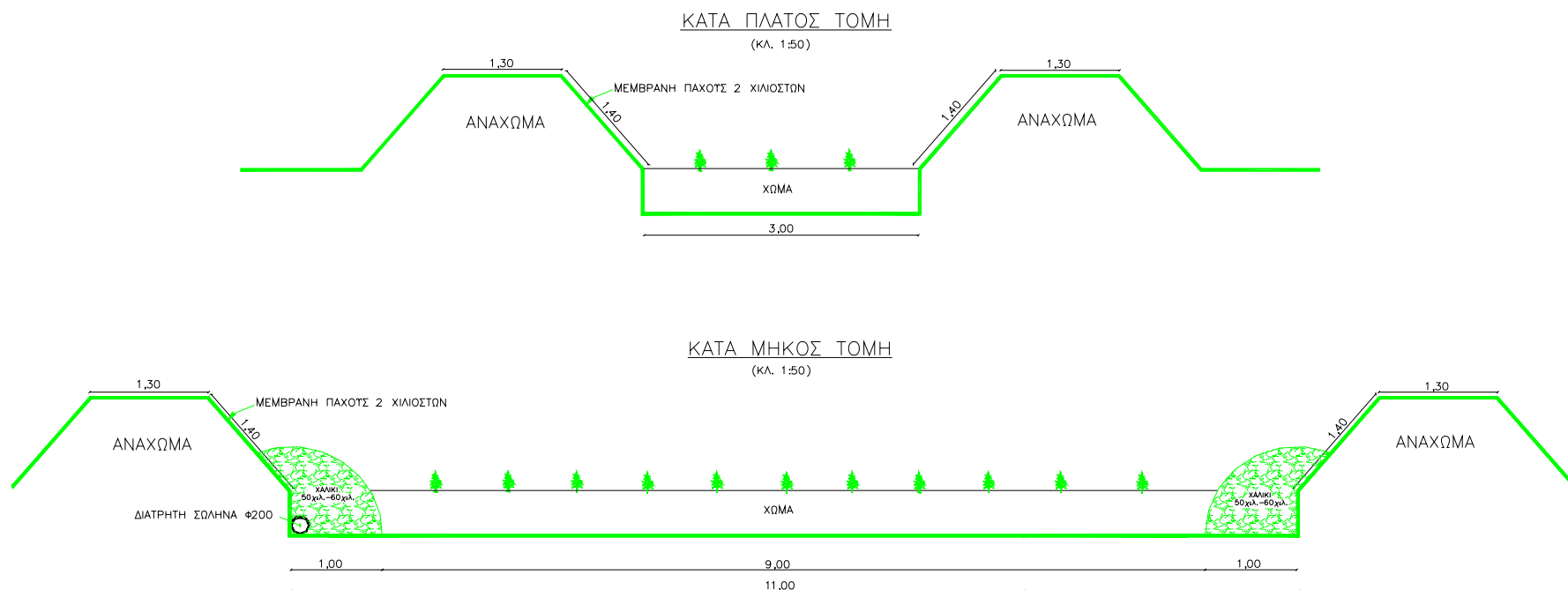


Φώτο 2.1 Ογκομετρητής υδάτων Parshal



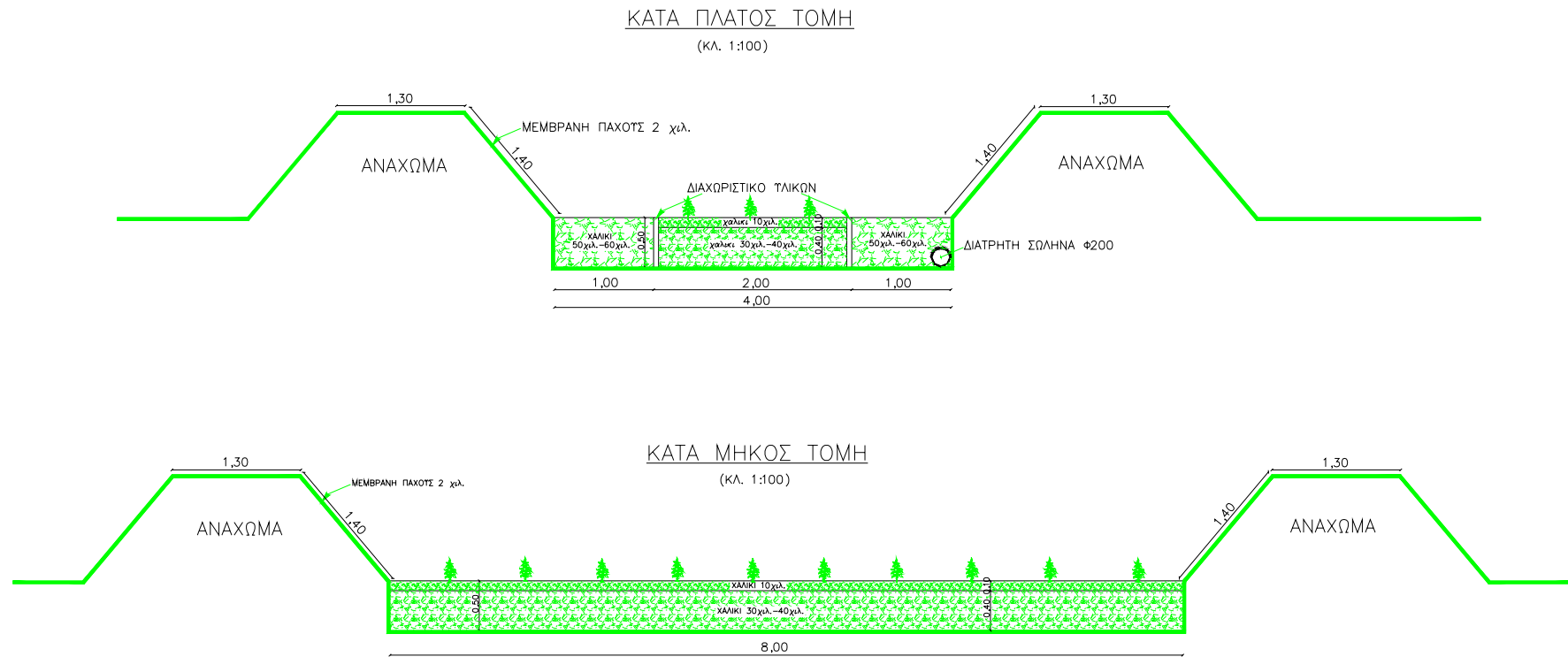
Σχήμα 2.2. Γενική διάταξη των υγροβιότοπων σε κάτοψη

ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ

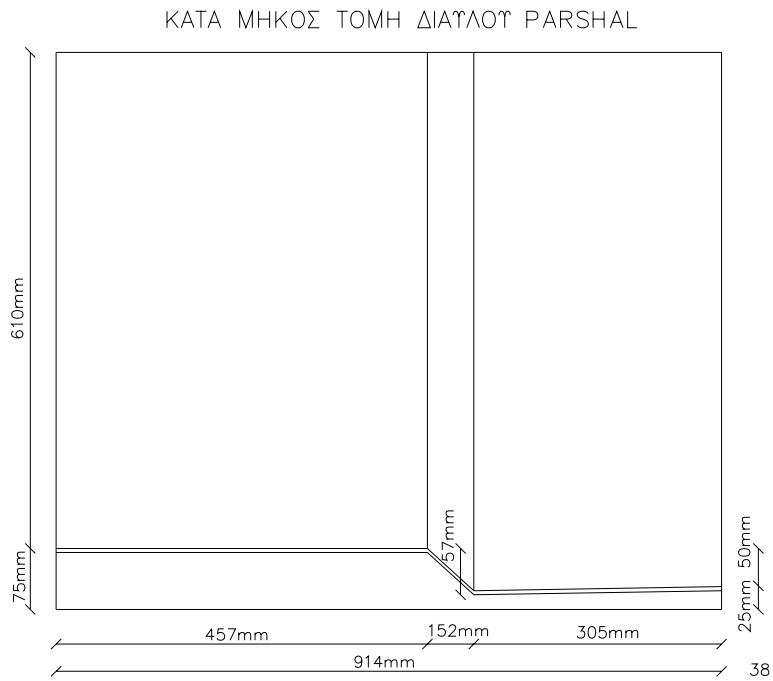
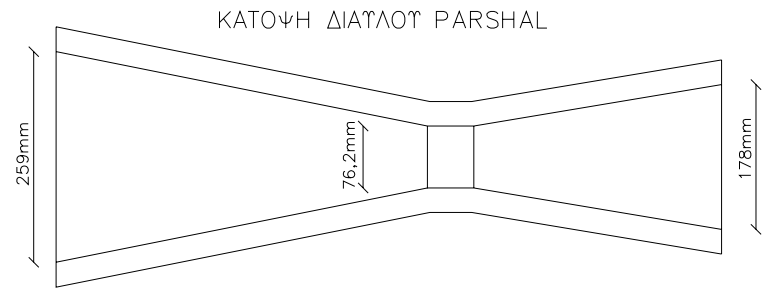


Σχήμα 2.3. Κατά μήκος και κατά πλάτος τομή των υγροβιότοπων επιφανειακής ροής FWS

ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΙ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ



Σχήμα 2.4. Κατά μήκος και κατά πλάτος τομή των υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής SSF



Σχέδιο 2.5 Κάτοψη και κατά μήκος τομή του Διαύλου Parshall

2.3 Σχεδιασμός των 4 υγροβιότοπων (με βάση τον HRT)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν υπάρχουν στην βιβλιογραφία τυπικές τιμές για BOD₅ ή TSS για τα εκρέοντα ύδατα από αυτοκινητόδρομους, σχετικές με συστήματα αναπτυγμένα στην περιοχή της Μεσογείου, όπου η συγκέντρωση των ρύπων στο επίπεδο του οδοστρώματος, κατά τη διάρκεια των ξηρών θερινών περιόδων μπορεί ξεφύγει του ελέγχου. Για τον λόγο αυτό, για τις διάφορες εκτιμήσεις και τους υπολογισμούς και στα δύο συστήματα χρησιμοποιήθηκαν δύο γενικές εξισώσεις, που εφαρμόστηκαν για τον σχεδιασμό των υγροβιότοπων, για τον υπολογισμό του θεωρητικού χρόνου παραμονής HRT. Στην πράξη αυτές οι δύο εξισώσεις είναι οι ίδιες, δεδομένου ότι χρησιμοποιούν αμφότερες παραμέτρους περατότητας, πορώδους και βάθους ύδατος. Για τα συστήματα υγροβιότοπου FWS χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση σχεδιασμού (EPA, 1999):

$$t = \frac{A d n}{Q} \quad (2.2)$$

Όπου:

t = θεωρητικό HRT

A = η επιφάνεια του υγροβιότοπου σε m²

d = το βάθος ύδατος, που εκτιμάται από 0,20 έως 0,40 m

n= συντελεστής σχετικός με την περατότητα των υγροβιότοπων, από 0,70 έως 0,90

Q = η παροχή σε m³/d

Για τα συστήματα υγροβιότοπου SSF χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση σχεδιασμού (Tchobanoglous και Burton (1991)):

$$t_p = (L W a d) / Q \quad (2.3)$$

Όπου:

t_p = χρόνος παραμονής στο πορώδες υπόστρωμα (σε αυτήν την περίπτωση HRT), d

L = μήκος λεκανών, m

W = πλάτος λεκανών, m

a = περατότητα δια μέσου των λεκανών ως ποσοστό

d = βάθος της λεκάνης, m και

Q = παροχή ροής (m³/d)

Σύμφωνα με αυτές τις εξισώσεις, οι σημαντικές παράμετροι για τον σχεδιασμό των υγροβιότοπων, είναι η κατ' εκτίμηση ετήσια ποσότητα των εκροών HRO και η κατ' εκτίμηση μέγιστη ημερήσια παροχή αιχμής.

Με βάση τις παραδοχές που έγιναν παραπάνω, για την επεξεργασία συνολικά περίπου 38 m^3 συνολικά ανά 24ωρο και από του 4 υγροβιότοπους, τα τελικά γεωμετρικά στοιχεία των υγροβιότοπων έχουν ως ακολούθως:

Δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης (ST)

Η ύπαρξη της δεξαμενής προσωρινής αποθήκευσης ST είναι αναγκαία για την ρύθμιση των εκροών, κι αυτό γιατί τα προς επεξεργασία λύματα προέρχονται από την βροχή, δηλαδή από μία μη σταθερή πηγή ροής.

Τεχνικά χαρακτηριστικά Δεξαμενής αποθήκευσης ST

Μέγιστο Ωφέλιμο Μήκος 5,4 m

Πλάτος: 4,4 m

Μέγιστο Ύψος: 1,8 m

Μέγιστο Ωφέλιμο Ύψος: 1,65 m

Μέγιστος Ωφέλιμος Όγκος: περίπου 39 m^3

Συνολικός Όγκος: 40 m^3

Οι τεχνικές λεπτομέρειες σχεδιασμού για κάθε ένα από τα δύο ίδια συστήματα FWS, βασίστηκαν στην εξίσωση (2.2) και στους περιορισμούς εισροής και υπολογίστηκαν όπως παρακάτω:

Υγροβιότοποι ελεύθερης επιφάνειας νερού ή επιφανειακής ροής (FWS)

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Σχέση Πλάτους – Μήκους : $\approx 1: 3,5$ (σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία)

Διαστάσεις (Π x Μ): $3 \times 11 = 33 \text{ m}^2$

Μέσο Ωφέλιμο Βάθος Νερού: 0,25 m (με δυνατότητα ρύθμισης)

Μέσο Ύψος Υποστρώματος (Εδαφος) στο Κέντρο: 0,40 m

Μέσο Ύψος Κροκάλων (50 – 100 mm) στα Άκρα: 0,80 m

Συνολικό Βάθος: 1,10 m

Περατότητα δια μέσου των λεκανών : 0,75

Συνολική ικανότητα επεξεργασίας : $6,3 \text{ m}^3$

Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί καταγράφονται τα απαραίτητα υλικά και οι ποσότητες που απαιτούνται για την κατασκευή των δύο αυτών υδροβιότοπων FWS.

Πίνακας 2.1

Υλικά κατασκευής δύο υδροβιότοπων επιφανειακής ροής FWS

Υλικό	Τεχνικά χαρακτηριστικά	Ποσότητα
Έδαφος (Υπόστρωμα)	Από τις εκσκαφές	15 m ³
Κροκάλες	50 – 100 mm	8 m ³
Αγωγός απορροής	Φ 150	10 m
Αρθρωτή Γωνία	Φ 150	2 τεμ.
Φυτά	≈ 1,2 / m ²	≈ 40 τεμ.

Με ανάλογο τρόπο, για κάθε ένα από τα δύο ίδια συστήματα SSF, την εξίσωση (2.2) και στους περιορισμούς εισροής, υπολογίστηκαν οι διαστάσεις τους όπως παρακάτω:

Υδροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής (SSF).

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Σχέση Πλάτους - Μήκους: 2:1

Διαστάσεις (ΠxΜ): 8 x 4= 32 m²

Ωφέλιμο βάθος: 0,45 m

Μέσο Ύψος Πληρωτικού Υποστρώματος (Χαλίκι) στο Κέντρο: 0,50 m

Μέσο Ύψος Πληρωτικού Υποστρώματος (Κροκάλες) στα Άκρα: 0,60 m

Συνολικό Βάθος: 1,06 -1,10 m

Μέγιστο Βάθος Εκσκαφών: 1,0 m

Υπολογισμός ωφέλιμου όγκου: 6,3 m³ όπως στον Πίνακα 2.2

Πληρωτικά Υλικά: όπως στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.2

Μέγεθος, πορώδες, διαστάσεις, ποσότητα πληρωτικών υλικών υγροβιότοπων SSF

Χαρακτηριστικά	Υλικό		
	10 – 20 mm	30 – 40 mm	50 - 100 mm
Πορώδες	0,35	0,42	0,48
Αριθμός κελιών	1	1	2
Διαστάσεις κελιών (Π x Μ x Υ)	8 x 2,6 x 0,1	8 x 2,6 x 0,4	8 x 0,7 x 0,6
Συνολικός όγκος υλικού	2,08 m ³	8,32 m ³	6,72 m ³
Ωφέλιμες διαστάσεις κελιών (Π x Μ x Υ)	8 x 2,6 x 0,05	8 x 2,6 x 0,4	8 x 0,7 x 0,45
Συνολικός ωφέλιμος όγκος υλικού	1,04 m ³	3,5 m ³	5,04 m ³
Ωφέλιμος κενός όγκος	0,364 m ³	3,5 m ³	2,42 m ³
Σύνολο ωφέλιμου κενού όγκου	0,364 + 3,50 + 2,42 = 6,3 m ³		

Πίνακας 2.3 Υλικά κατασκευής δυο υγροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής SSF

Υλικό	Τεχνικά χαρακτηριστικά	Ποσότητα
Χαλίκι Α	10 – 20 mm	2,5 m ³
Χαλίκι Β	30 – 40 mm	7,5 m ³
Κροκάλες	50 – 100 mm	11,0 m ³
Αγωγός απορροής	Φ 150	24 m
Αρθρωτή Γωνία	Φ 150	2 τεμ
Φυτά	≈ 1,2 / m ²	≈ 40 τεμ

2.4 Τρόπος δειγματοληψίας

Τα δείγματα των εκροών από τον αυτοκινητόδρομο HRO συλλέχθηκαν αυτόματα από την είσοδο της δεξαμενής αποθήκευσης ST (αμέσως μετά από το σύστημα Parshall για τη μέτρηση του εισερχόμενου όγκου εκροής) με την βοήθεια κατάλληλης διάταξης. Τα δείγματα από τα φρεάτια εξόδου των υδροβιότοπων συλλέχθηκαν με το χέρι με την βοήθεια χειροκίνητης αντλίας, σε χρόνους σύμφωνους με τον σχεδιασμένο υδραυλικό χρόνο παραμονής HRT.

Ειδικότερα ο υδραυλικός χρόνος παραμονής ελέγχθηκε μεταξύ της 8^{ης} και 9^{ης} Φεβρουαρίου, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι η δεξαμενή αποθήκευσης ήταν γεμάτη, χρησιμοποιώντας χρωστική ουσία. Τα δείγματα συλλέχθηκαν ανά δύο ώρες για ένα 24ωρο, προκειμένου να διαπιστωθεί η μεταβολή της συγκέντρωσης της χρωστικής στα δείγματα με τον χρόνο, με την βοήθεια φασματοφωτόμετρο ικανού να ανιχνεύσει τις συγκεντρώσεις αυτές. Σαν μέσος υδραυλικός χρόνος παραμονής θεωρήθηκε, δεδομένου του τρόπου που λειτουργούν οι υδροβιότοποι, ο χρόνος από τον οποίο και μετά η συγκέντρωση ήταν σχετικά σταθερή, με την έννοια ότι μέχρι τον χρόνο αυτό, όλο το νερό που βρισκόταν στην αρχή μέσα στους γεμάτους υδροβιότοπους είχε αντικατασταθεί από το χρωματισμένο με χρωστική νερό.

Όλα τα δείγματα αναλύθηκαν για τις ακόλουθες παραμέτρους χρησιμοποιώντας τυποποιημένες μεθοδολογίες όπως περιγράφονται παρακάτω:

- Χημική απαίτηση οξυγόνου σε mg/L (COD)
- Συνολικά αιωρούμενα στερεά σε mg/L (TSS)
- pH
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα σε mS/cm (EC)
- NO₃ και συνολικό άζωτο σε mg/L (TN)
- Συνολικός φώσφορος σε mg/L (TP)
- Βαριά μέταλλα (Cd, Cu, Ni, Pb και Zn) σε μg / L

2.5 Αναλυτικές μέθοδοι μέτρησης

Στην συνέχεια περιγράφονται οι αναλυτικές μέθοδοι μέτρησης που ακολουθήθηκαν για την ανάλυση των δειγμάτων που συλλέχθηκαν στο εργαστήριο « Διαχείρισης Στερεών Υπολειμμάτων & Υγρών Αποβλήτων» της Σχολής Τεχνολογίας Γεωπονίας του ΤΕΙ Κρήτης.

Έλεγχος ποιότητας οργανικού φορτίου

Για τον έλεγχο της ποιότητας του οργανικού φορτίου των αποβλήτων καθιερώθηκαν ορισμένες παράμετροι, γνωστές ως παράμετροι ελέγχου οργανικής ρύπανσης νερών. Στην περίπτωση μας, ο έλεγχος του οργανικού φορτίου γίνεται με την μέτρηση του COD, όπως περιγράφεται στην συνέχεια.

2.5.1 COD Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (chemical oxygen demand, COD) είναι η ποσότητα του οξυγόνου που καταναλώνεται για τη χημική οξείδωση των οργανικών συστατικών νερών ή λυμάτων, δηλαδή τη πλήρη οξείδωση τους σε ανόργανα τελικά προϊόντα.

Το COD είναι μια σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση της ρύπανσης. Περιλαμβάνεται στις παραμέτρους για τις οποίες έχουν τεθεί ανώτατες επιτρεπτές τιμές προκειμένου τα λύματα-απόβλητα να διατεθούν σε υδάτινους αποδέκτες

Ο προσδιορισμός του COD γίνεται γρήγορα, σε τρεις περίπου ώρες, γεγονός σημαντικό για ένα γρήγορο έλεγχο του οργανικού φορτίου λυμάτων-αποβλήτων ως ακολούθως:

Συλλογή δειγμάτων και προκατεργασία: Η ανάλυση για COD πρέπει να γίνεται το συντομότερο δυνατό. Το δείγμα ομογενοποιείται αν έχει καθιζάνοντα ή αιωρούμενα στερεά. Το δείγμα διατηρείται στους 4-5 βαθμούς μέχρι την ανάλυση. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρείας Merck

1.14540.0001 για COD 10 - 150 mg/l 1.14690.0001 για COD 50 - 500 mg/l

Η μέτρηση γίνεται με χώνευση του αντιδραστηρίου με 3 ml αδιάθητου δείγματος για 2 ώρες στους 148 °C και μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο στα 449 nm για τα αντιδραστήρια με εύρος 50 – 500 και στα 447 nm για τα αντιδραστήρια με εύρος 10 – 150.

2.5.2 Προσδιορισμός ολικού φωσφόρου TP

Ο φώσφορος είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Συνήθως τα αστικά λύματα περιέχουν 4-15 mg/l. Η συνηθέστερες μορφές του φωσφόρου στα απόβλητα είναι τα ορθοφωσφορικά, τα πολυφωσφορικά και οι οργανοφωσφορικές ενώσεις.

Μέτρηση:

Πρακτικά ακολουθούμε τη σειρά των εργασιών που περιλαμβάνονται στη μέθοδο 1.14546.0001 0,5 – 25,0 mg/l της εταιρείας Merck. Η μέτρηση γίνεται με εισαγωγή 5 ml αδιήθητου δείγματος, ανακάτεμα και μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο στα 313 nm

2.5.3 Προσδιορισμός ολικού αζώτου TN

Το Άζωτο είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Περίσσεια αζώτου οδηγεί σε ανάπτυξη άλγεων (ευτροφισμός) στα νερά και ιδιαίτερα στο θαλασσινό νερό αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα, ενώ έλλειψη αζώτου οδηγεί σε μη κατάλληλο νερό για ανάπτυξη μικροβίων (βιολογικός καθαρισμός). Οι κύριες μορφές του αζώτου στα νερά και λύματα είναι τα νιτρικά ,τα νιτρώδη , οι οργανικές ενώσεις του αζώτου (ουρία , αμινοξέα, πρωτεΐνες, νουκλεοτίδια κ.α.), η αμμωνία και το ελεύθερο άζωτο. Το άζωτο που μετράμε σε ένα για παράδειγμα δείγμα υγρών αποβλήτων είναι το άθροισμα των παραπάνω αυτών διαφορετικών μορφών και ονομάζεται ολικό άζωτο.

Μέτρηση:

Το δείγμα αναλύεται αμέσως μετά την δειγματοληψία. Η μέθοδος στηρίζεται στη μετατροπή των οργανικών και ανόργανων ενώσεων του αζώτου σε νιτρικά με την χώνευση του δείγματος 10 ml στους 120 °C επί 1 ώρα, με ένα οξειδωτικό αντιδραστήριο. Για κάθε μέτρηση απαιτούνται 1 ml δείγματος και 9 ml απιονισμένου νερού

Χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρείας Merck 1.14537.0001 για εύρος τιμών από 0,5 – 15,0 mg/l. Στη συνέχεια ακολουθεί προσδιορισμός με φασματοφωτόμετρο στα 338 nm.

2.5.4 Προσδιορισμός NO₃

Χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα αντιδραστήρια της εταιρείας Merck 1.14542.0001 για εύρος τιμών από 0,5 – 18 mg/l

Απαιτούνται 1,5 ml δείγματος και η μέτρηση γίνεται στα φασματοφωτόμετρο στα 517 nm .

2.5.5 Μέτρηση ολικών αιωρούμενων στερεών TSS

Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στα στερεά υλικά που αιωρούνται στο νερό, επειδή βρίσκονται σε πολύ λεπτό διαμερισμό. Αποτελούνται από υλικά ανόργανης και οργανικής προέλευσης.

Ο προσδιορισμός γίνεται με διήθηση υπό κενό με την βοήθεια σχετικής αντλίας, συγκεκριμένου όγκου 10 ml, σε φίλτρα που έχουν ζυγιστεί πριν τη διαδικασία. Στη συνέχεια τα φίλτρα μεταφέρονται σε ένα προ-πυρωμένο δίσκο αλουμινίου και τοποθετούνται σε φούρνο ξήρανσης στους 105°C, για 30 με 60 λεπτά. Το δείγμα αφήνεται να κρύνει σε θερμοκρασία δωματίου, ακολουθεί νέα ζύγιση του φίλτρου και από τη διαφορά του βάρους και με τη διαίρεσή της με τον όγκο του δείγματος υπολογίζεται η συγκέντρωση. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε mg/L δείγματος.

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ανάλυση ANOVA για να εξετάσει τη σημασία των μετρήσεων των εκροών των τεσσάρων υδροβιότοπων καθώς επίσης και των εισροών, για όλες τις προαναφερθείσες φυσικοχημικές παραμέτρους ($p < 0,001$).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης καθώς και τα συμπεράσματα της ανάλυσης, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΒΡΟΧΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΚΡΟΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Στις εγκαταστάσεις των υγροβιότοπων τέθηκε σε λειτουργία από την 1^η Σεπτεμβρίου 2005 ένα ηλεκτρονικό βροχόμετρο με δυνατότητα καταγραφής των βροχοπτώσεων με βήμα μιας ώρας. Εγκαταστάθηκε επίσης ένα ηλεκτρονικό θερμόμετρο για την καταγραφή των θερμοκρασιών με βήμα καταγραφής τις έξι ώρες. Τέλος, όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένα, από την ίδια ημερομηνία, έχει τεθεί σε λειτουργία η μετρητική διάταξη της εισερχόμενης στην δεξαμενή αποθήκευσης ST εκροής HRO από τον αυτοκινητόδρομο με την βοήθεια του Διαύλου Parshall. Τα στοιχεία που καταγράφηκαν με την βοήθεια αντίστοιχου hardware & software, σε τακτά χρονικά διαστήματα φορτώθηκαν σε ένα φύλλο EXCEL χρησιμοποιώντας το σχετικό λογισμικό Skye DataHog 2 της Skye Instruments Ltd.

3.2 Ανάλυση επεισοδίων βροχής - συνολικές βροχοπτώσεις

Το σύνολο των παραμέτρων επεισοδίων βροχής που έλαβαν χώρα την περίοδο από 1^η Σεπτεμβρίου 2005 μέχρι και 31^η Αυγούστου 2006 καταγράφηκαν από τα σχετικά όργανα παρακολούθησης του ύψους των βροχοπτώσεων και του ύψους νερού στο Διάυλο Parshall.

Το γεγονός αυτό μας επέτρεψε να έχουμε έναν ακριβέστατο έλεγχο των εγγραφών των συστημάτων, δεδομένου ότι οι καταγραφές έχουν κοινό χρονικό ορίζοντα, διαφοροποιούμενες μόνο ως προς το χρονικό βήμα καταγραφής. Οι ρυθμίσεις των οργάνων καταγραφής ήταν οι ακόλουθες: Ύψος νερού στον λαιμό του Διαύλου Parshall ανά πέντε λεπτά, ύψος βροχόπτωσης ανά εξήντα λεπτά, θερμοκρασία περιβάλλοντος ανά έξι ώρες. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να εκκαθαριστούν από το αρχείο εγγραφών ορισμένες λανθασμένες εγγραφές οφειλόμενες είτε σε φαινόμενα υγρασίας, είτε σε φαινόμενα παρεμβολής εμποδίων στην στένωση του Διαύλου Parsall.

Οι σχετικές εγγραφές στην συνέχεια ελέγχθηκαν ως προς την ορθότητα τους, αντιπαραβάλλοντάς τα δεδομένα των βροχοπτώσεων με τα αντίστοιχα της ίδιας περιόδου του έτους 2005-2006 του Μετεωρολογικού Σταθμού που βρίσκεται πλησιέστερα στις εγκαταστάσεις μας, στην περιοχή του Οικισμού Αβδού.

Σύμφωνα με τα υπόλοιπα στοιχεία που ελήφθησαν από τα αρχεία του Τμήματος Υδατικών Πόρων Περιφέρειας Κρήτης, στον ως άνω σταθμό (που έχει όμως υψηλότερο υψόμετρο) οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις των τελευταίων 25 ετών ήταν 793 mm, με μια ελάχιστη τιμή 440 mm (1999 - 2000) και μια μέγιστη τιμή 1.243 mm (1986 - 1987).

Από το σύνολο των βροχοπτώσεων που πέφτουν στην επιφάνεια του δρόμου, μόνο ένα μέρος εκρέει, παράγοντας απορροή. Σε μελέτη τους οι Ragab και λοιποί. (2003) διαπιστώνουν ότι το ποσοστό μεταξύ της κατ' εκτίμηση απορροής, εάν το 100% των βροχοπτώσεων που πέφτουν σε ένα δρόμο απορρέουν, και της πραγματική απορροής που συλλέγεται από τον συγκεκριμένο δρόμο, είναι μεταξύ 0,9 και 0,5, με το μικρότερο ποσοστό πιο κατάλληλο για τις θερινές περιόδους, στην Μεγάλη Βρετανία.

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των συστημάτων, οι τιμές αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του λόγου μεταξύ του 100% των βροχοπτώσεων στην απορροή προς την πραγματική απορροής (RR), θεωρήθηκε ότι είναι 0,8 και βασίστηκε στις πληροφορίες που παρουσιάστηκαν από Ragab και λοιποί (2003)

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει τις εκτιμήσεις εκροής HRO χρησιμοποιώντας αυτήν την αναλογία $RR = 0,8$ για τις μέσες βροχοπτώσεις των τελευταίων είκοσι ετών καθώς επίσης και τις μετρήσεις με τα πραγματικά στοιχεία για την περίοδο του 2005-2006. Η κατ' εκτίμηση πραγματική εκροή με βάση τα στοιχεία της μέσης τιμής βροχοπτώσεων της τελευταίας 20ετίας HRO, ήταν 244% μεγαλύτερο από αυτή που καταγράφηκε πραγματικά, ενώ σε σχέση με την τιμή που υπολογίστηκε με βάση τις βροχοπτώσεις του 2005-2006 ήταν 172% μεγαλύτερη.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα γεγονότα βροχοπτώσεων που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης, και ειδικότερα της καταγραφής της μέσης θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του ύψους βροχής σε mm στις συγκεκριμένες 24 ώρες. Επίσης στην τελευταία στήλη παρουσιάζεται η εκροή HRO που έχει πραγματικά καταγραφεί να έχει περάσει μέσω του συστήματος Parshall.

Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά, το ύψος των συνολικών βροχοπτώσεων που καταγράφηκαν από 68 επεισόδια βροχής ήταν 461.2 mm, και πρέπει να θεωρηθεί ως χαμηλό σε σύγκριση με τις μέσες τιμές των είκοσι ετών. Η μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση καταγράφηκε στις 7 Φεβρουαρίου 2006 και ήταν 52.4 mm.

Πίνακας 3.1. Τιμές σχεδιασμού υδροβιότοπων, μετρηθείσες τιμές μεταξύ Σεπτεμβρίου 2005 και Αυγούστου 2006.

Παράμετρος	Τιμές Σχεδιασμού	Τιμές 2005 - 06
Ύψος ετήσιων βροχοπτώσεων (mm)	793	461,2
Αριθμός ημερών Βροχής ετησίως	56	68
Μέση ημερήσια βροχόπτωση (mm)	14,16	6,78
Μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση (mm)	50	52,4
Ετήσια απορροή HRO (m ³)	2.182**	1.269**
Πραγματική Ετήσια απορροή HRO (m ³)	1.746*	715
Εκτιμώμενη Μέγιστη Ημερήσια απορροή (m ³)	137,6**	144**
Εκτιμώμενη Μέγιστη Ημερήσια απορροή (m ³)	110*	106

* Εκτίμηση με συντελεστή απορροής RR= 0,80

** Εκτίμηση με συντελεστή απορροής RR= 1,0

Με αυτό το ύψος βροχής 52.4 mm να εκρέει από τα 2.752 m² της οδικής επιφάνειας, η μέγιστη ημερήσια εκροή HRO που θα έπρεπε να έχει καταγραφεί, δεχόμενοι ότι μόνο ένα ποσοστό RR ίσο με 0,8 πραγματικά εκρέει, θα έπρεπε να ήταν 115 m³. Αντ' αυτού μόνο 71.1 m³ καταγράφηκαν να έχουν περάσει μέσω του συστήματος Parshall. Σε αυτήν την περίπτωση η τιμή RR σχετική με την μέγιστη ημερήσια βροχόπτωση ήταν 0,62.

Από τα ίδια στοιχεία του πίνακα, η μέγιστη καταγραμμένη καθημερινή εκροή ήταν 106,0 m³, και καταγράφηκε με μόλις 27,4 mm βροχόπτωσης, παράγοντας μια τιμή για τον δείκτη RR 1,37. Φαίνεται δηλαδή να εκρέει περισσότερο νερό από αυτό που πραγματικά έπεσε στη επιφάνεια των 2.752 m². Αυτό το υπερβολικό ποσό εκροής HRO θα μπορούσε να οφείλεται σε:

- Σε εισροές στον δρόμο από τα πρανή του λόφου που βρίσκεται νότια του δρόμου, οι οποίες δεν μπορούν ούτε να ελεγχθούν ή να υπολογιστούν (ένθετη φωτογραφία στο Σχέδιο 2.1).
- Ροή από άλλα μέρη του δρόμου, η οποία υπό κανονικές συνθήκες δεν θα μπορούσε να απορρέει προς το σημείο συλλογής (φρεάτιο), συλλέγεται όμως από το συγκεκριμένο οδικό τμήμα, είτε λόγω της δυνατής βροχής, είτε λόγω παρεμπόδισης από διάφορα υλικά που μπορεί να βρίσκονται στις παρυφές του οδοστρώματος.

- Πρόσθετες εκροές HRO που πέρασαν μέσω του Parshall λόγω των βροχοπτώσεων που εμφανίστηκαν στις προηγούμενες 24 ώρες. Παραδείγματος χάριν και σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 για τα επεισόδια βροχής 63 και 64 στις 14 Απριλίου πέφτουν 8,8 mm με παραγωγή εκροών HRO μόνο 8,34 m³ αντί των 24 m³ που θα έπρεπε να θεωρητικά περάσουν χρησιμοποιώντας ένα RR ίσο με 1,0. Την ίδια στιγμή για το επεισόδιο 64 29,6 mm παράγουν εκροές 106,0 m³ αντί των 81,45 m³ που θα έπρεπε να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας φυσικά πάντα RR ίσο με 1,0. Με άλλα λόγια μια ποσότητα βροχόπτωσης που έπεσε στις 14 Απριλίου, εισέρρευσε στην δεξαμενή αποθήκευσης στις 15 Απριλίου.

Από την άλλη πλευρά ο λόγος RR μεταξύ των κατ' εκτίμηση συνολικών βροχοπτώσεων 100% στην απορροή για το 2005-06 και της συνολικής καταγραμμένης απορροής σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 ήταν 0,56. Οι διαφορετικές τιμές της αναλογίας RR, που παρουσιάζονται παραπάνω, μπορεί να έχει επιπτώσεις ουσιαστικά στον σχεδιασμό των υγροβιότοπων, επηρεάζοντας ουσιαστικά τις τιμές σχεδιασμού και όσον αφορά την πραγματική ετήσια εκροή HRO καθώς επίσης και την μέγιστη ημερήσια τιμή.

Για τον λόγο αυτό η χρήση του συντελεστή απορροής RR στην εκτίμηση των συνολικών ετήσιων εκροών HRO αλλά και της ημερήσιας μέγιστης εκροής, πρέπει να είναι ανάλογα και με τις ανάγκες σχεδιασμού, όσο το δυνατόν πιο ακριβής.

Μια άλλη παράμετρος που από τα στοιχεία του Πίνακα 3.2 θέτει θέμα προς σχολιασμό, είναι η καταγραφή ορισμένων επεισοδίων βροχής με ύψος βροχής ίσο ή λιγότερο από 0,8 mm για τα οποία δεν διαπιστώθηκε αντίστοιχη εκροή HRO.

Το κατώφλι των 0,8 mm ημερήσιων βροχοπτώσεων φαίνεται να είναι μια κατώτατη τιμή ύψους της βροχής για την έναρξη της απορροής υπό τους συγκεκριμένους πειραματικούς όρους, δεδομένου ότι στις 13 Φεβρουαρίου 2006 δεν οδήγησε σε οποιαδήποτε απορροή, ενώ στις 18 Νοεμβρίου 2005 καταγράφηκαν 0,341 m³. Αυτά τα 0,8 mm φαίνεται να απορροφώνται από την επιφάνεια του οδοστρώματος, διεισδύοντας με κάποιο τρόπο στο δρόμο.

Εάν τα γεγονότα βροχής με ύψος βροχοπτώσεων χαμηλότερο από 0,8 mm αφαιρεθούν από τα συνολικά ποσά βροχοπτώσεων, το συνολικό ύψος των βροχοπτώσεων μειώνεται ελαφρώς κατά 5,7 mm μόνο. Εντούτοις, εάν από όλα τα γεγονότα βροχής, τα πρώτα 0,8 mm αφαιρεθούν ως μη παράγοντα απορροή από το σύνολο των βροχοπτώσεων ικανό να παραγάγει απορροή, τότε το συνολικό ύψος των βροχοπτώσεων μειώνεται κατά 45,8 mm ή κατά 9,93%.

Πίνακας 3.2. Επεισόδια βροχής μεταξύ Σεπτεμβρίου 2006 και Αυγούστου 2006

Επεισόδιο No	Ημερομηνία	Θερμοκρασία (°C)	Ύψος βροχής (mm)	Μέτρηση HRO (m³)
1.	15/9/2005	22.93	3.3	7.12
2.	16/9/2005	23.20	8.1	12.34
3.	23/9/2005	23.20	0.4	0
4.	1/10/2005	22.79	2.2	6.95
5.	2/10/2005	22.79	1.4	3.47
6.	11/10/2005	18.80	32.2	39.55
7.	12/10/2005	19.95	0.2	0
8.	16/10/2005	18.23	0.6	0
9.	18/10/2005	19.11	1.2	0.98
10.	1/11/2005	14.95	3.8	6.33
11.	3/11/2005	17.78	3.6	11.51
12.	17/11/2005	20.53	7.2	9.24
13.	18/11/2005	17.71	0.8	0.34
14.	19/11/2005	17.78	3.8	12.91
15.	20/11/2005	15.91	19.6	42.14
16.	21/11/2005	9.52	9.0	9.26
17.	22/11/2005	8.72	10.6	19.21
18.	23/11/2005	16.13	6.4	8.56
19.	14/12/2005	15.06	0.4	0
20.	15/12/2005	14.51	2.8	8.25
21.	16/12/2005	14.03	4.8	6.97
22.	18/12/2005	16.47	1.0	0.24
23.	19/12/2005	12.11	11.0	6.98
24.	22/12/2005	9.25	2.8	2.77
25.	23/12/2005	8.27	30.2	24.85
26.	24/12/2005	8.55	3.2	2.74
27.	28/12/2005	15.01	0.2	0
28.	6/1/2006	13.07	0.2	0

Πίνακας 3.2. Επεισόδια βροχής μεταξύ Σεπτεμβρίου 2006 και Αυγούστου 2006 (συνέχεια)

Επεισόδιο No	Ημερομηνία	Θερμοκρασία (°C)	Ύψος βροχής (mm)	Μέτρηση HRO (m³)
29.	7/1/2006	11.71	2.8	6.71
30.	9/1/2006	9.05	3.0	10.36
31.	10/1/2006	10.16	0.2	0
32.	11/1/2006	9.51	1.4	2.74
33.	12/1/2006	8.69	3.2	10.23
34.	13/1/2006	7.92	15.2	14.94
35.	14/1/2006	7.66	16.6	10.77
36.	15/1/2006	8.77	5.8	2.35
37.	20/1/2006	11.88	7.0	14.48
38.	22/1/2006	13.78	4.6	3.83
39.	23/1/2006	12.75	2.2	2.13
40.	24/1/2006	10.11	27.4	74.00
41.	25/1/2006	7.39	2.4	1.49
42.	26/1/2006	7.57	0.2	0
43.	1/2/2006	12.76	11.2	18.34
44.	2/2/2006	12.04	8.4	11.06
45.	6/2/2006	13.55	11.4	24.48
46.	7/2/2006	10.28	52.4	71.10
47.	8/2/2006	6.48	34.2	31.43
48.	12/2/2006	12.17	3.0	4.09
49.	13/2/2006	8.66	0.8	0
50.	14/2/2006	7.32	4.2	11.46
51.	15/2/2006	7.05	0.6	0
52.	20/2/2006	15.72	0.2	0
53.	7/3/2006	16.16	3.6	3.85
54.	8/3/2006	11.40	2.4	2.48
55.	9/3/2006	12.52	0.2	0
56.	12/3/2006	16.07	11.2	10.83

Πίνακας 3.2. Επεισόδια βροχής μεταξύ Σεπτεμβρίου 2006 και Αυγούστου 2006 (συνέχεια)

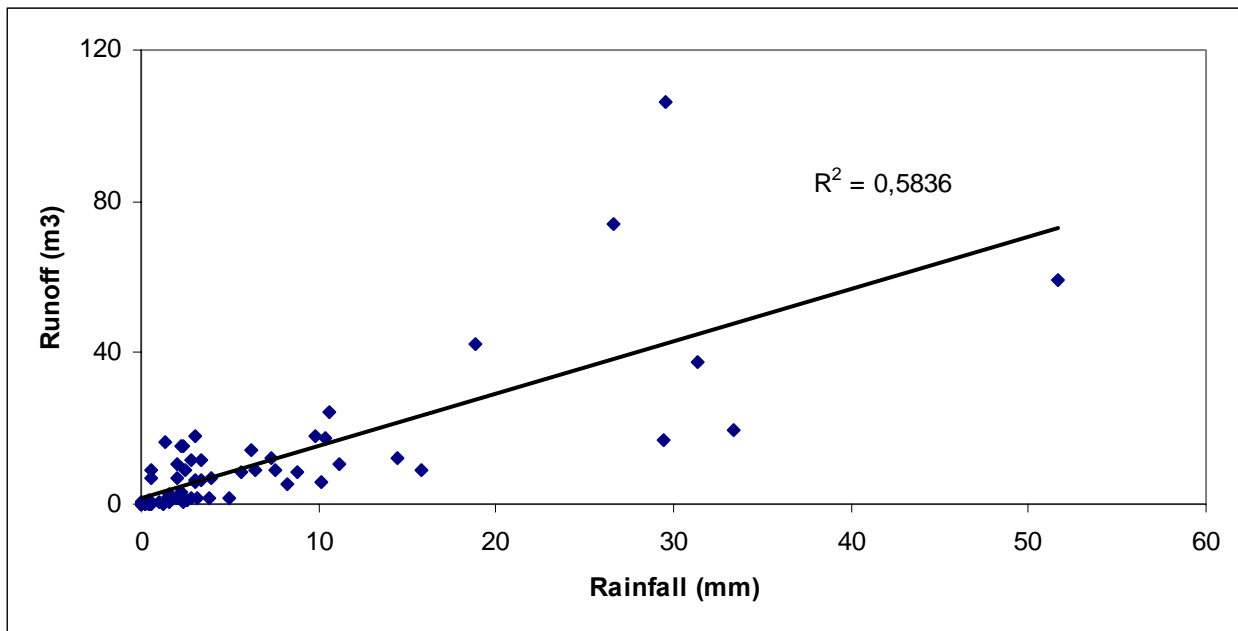
Επεισόδιο No	Ημερομηνία	Θερμοκρασία (°C)	Ύψος βροχής (mm)	Μέτρηση HRO (m ³)
57.	13/3/2006	11.06	3.2	1.37
58.	14/3/2006	11.48	1.2	0.18
59.	24/3/2006	14.43	3.0	5.94
60.	3/4/2006	18.69	0.2	0.00
61.	4/4/2006	15.12	3.4	6.31
62.	13/4/2006	17.48	0.4	0.00
63.	14/4/2006	16.14	8.8	8.34
64.	15/4/2006	20.06	29.6	106.00
65.	27/4/2006	20.85	0.6	0.00
66.	28/4/2006	22.52	2.6	1.00
67.	1/5/2006	26.87	1.0	0.58
68.	13/6/2006	22.45	0.4	0.00

Ως συνέπεια, αυτή η μείωση στην κατ' εκτίμηση απορροή (100%), διαμορφώνει μια νέα τιμή για τις συνολικές απορροές που γίνεται 1.143 m³ και το RR αυξάνεται σε 0,62.

Αυτό το συμπέρασμα θεμελιώνει τα συμπεράσματα των Ragab και λοιποί. (2003) που δηλώνουν ότι η απώλεια νερού στην απορροή που καταγράφεται στα οδικά τμήματα, είναι από 6 ως 9% και οφείλεται στην διήθηση που λαμβάνει χώρα στο πορώδες οδόστρωμα.

Στο Σχήμα 3.1, η καταγραμμένη καθημερινή απορροή HRO, συσχετίστηκε με το ύψος της καθημερινής βροχόπτωσης. Από την γραμμική ανάλυση των δεδομένων, φαίνεται να υπάρχει μια ισχυρή σχέση μεταξύ του ύψους των βροχοπτώσεων και της απορροής. Όμως ο λόγος αυτός δεν μπορεί να θεωρηθεί ως σημαντικός, δεδομένου ότι στην περίπτωση του Σχήματος 3.1 R² είναι 0,584, πολύ μικρότερος από την τιμή RR = 0,9.

Ragab και λοιποί (2003), στα συμπεράσματα της μελέτης τους, αναφέρουν ότι η σχέση μεταξύ του ύψους των βροχοπτώσεων και της απορροής που συλλέγεται στην έξοδο, είναι δυνατόν να επηρεαστεί σημαντικά από την επικρατούσα κάθε φορά θερμοκρασία περιβάλλοντος.

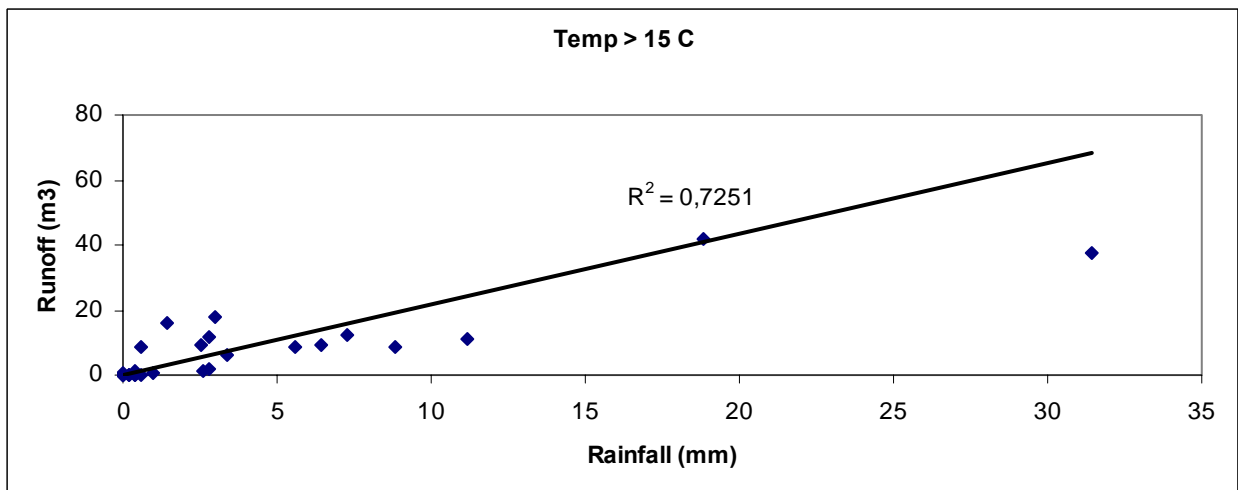
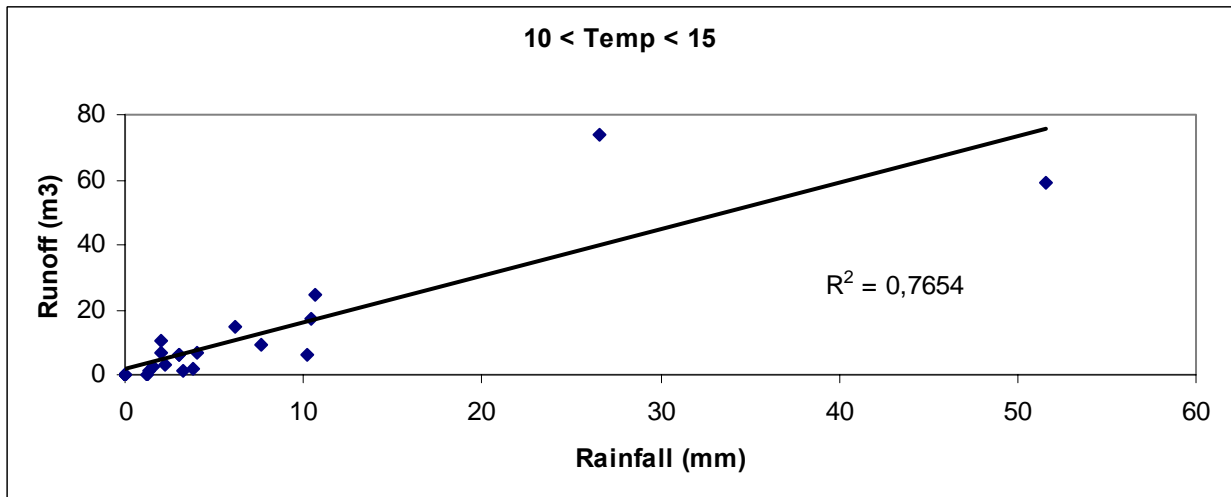
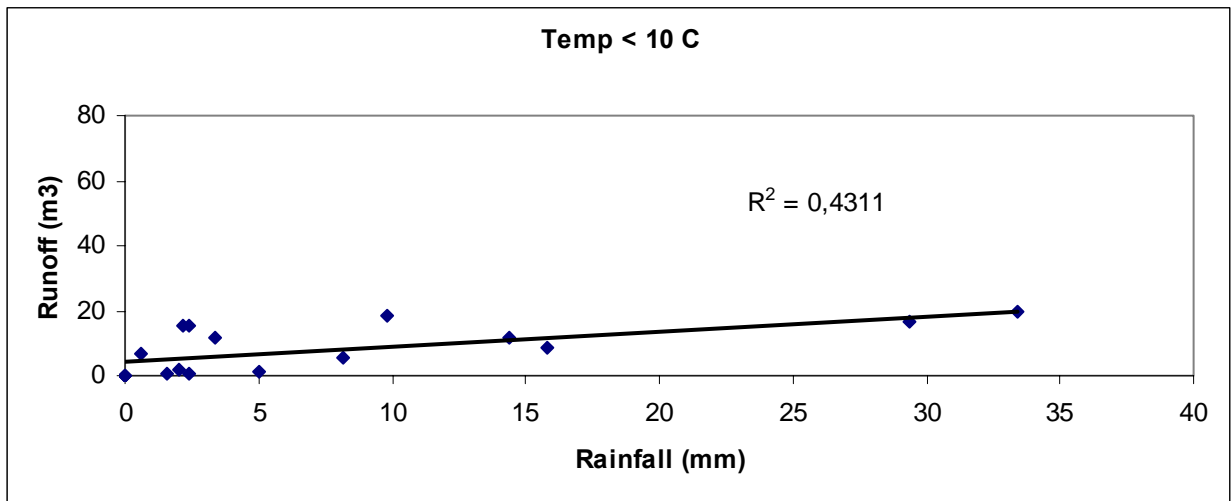


Σχήμα 3.1. Διάγραμμα ύψους Βροχοπτώσεων (mm) και εκροής HRO με βάση τις μετρήσεις μεταξύ Σεπτεμβρίου 2005 – Αυγούστου 2006

Κατά συνέπεια οι τιμές βροχοπτώσεων και απορροών χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες, με βάση την θερμοκρασία περιβάλλοντος και ειδικότερα (i) λιγότερο από 10 °C, (ii) μεταξύ 10 και 15 °C και (iii) πάνω από 15 °C.

Αυτοί οι συσχετισμοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2. Και σε αυτήν την περίπτωση, από την γραμμική ανάλυση των δεδομένων, φαίνεται να υπάρχει και πάλι μια ισχυρή σχέση μεταξύ του ύψους των βροχοπτώσεων και της απορροής HRO, εντούτοις σε καμία ομάδα αυτή η σχέση δεν μπορεί να θεωρηθεί ως καθοριστική, δεδομένου ότι ο συντελεστής R^2 έχει αντίστοιχα τιμές 0,431, 0,765 και 0,725 αντίστοιχα.

Αυτό που είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί, είναι ότι Ragab και λοιποί (2003) προτείνουν έναν πιο στενό συσχετισμό μεταξύ του ύψους των βροχοπτώσεων και των απορροών HRO, κατά τη διάρκεια των χαμηλότερων θερμοκρασιών (χειμώνας) από ότι των υψηλότερων (καλοκαίρι), σε αντίθεση με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην περίπτωση μας, όπου εδώ ο πιο στενός συσχετισμός καταγράφεται κατά τη διάρκεια των υψηλών θερμοκρασιών. Αυτή η διαφορά τονίζει ακριβώς την επίδραση των διαφορετικών κλιματολογικών συνθηκών μεταξύ αυτών των δύο περιοχών σε παρόμοιο φαινόμενο.



Σχήμα 3.2 Διαγράμματα ύψους Βροχ/σεων (mm) και εκροής ΗΡΟ με βάση τις μετρήσεις μεταξύ Σεπ 2005–Αυγ 2006, ταξιν/ση κατά θερμοκρασία περιβάλλοντος

3.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων εκτίμησης ετήσιας HRO και Μέγιστης Ημερήσιας εκροής.

Αναδιοργανώνοντας τις προαναφερθέντες πληροφορίες και τα στοιχεία για τη σωστή εκτίμηση της συνολικής ετήσιας απορροής καθώς επίσης και των ημερήσιων μέγιστων παροχών, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι εκτιμήσεις ειδικά στην περιοχή της Μεσογείου δεν πρέπει να βασιστούν εξ ολοκλήρου στις μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις, ακόμα και εάν αυτό προκύπτει ως αποτέλεσμα των βροχομετρικών στοιχείων παρατήρησης κατά τη διάρκεια μιας μακριάς χρονικής περιόδου. Και άλλες παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την διάρκεια του σχεδιασμού.
- Ένα καθημερινό κατώτατο όριο βροχοπτώσεων/απορροών πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψιν στην εκτίμηση της απορροής. Με βάση τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων μας, αυτό πρέπει να είναι το όριο των 0,8 mm ύψους των βροχοπτώσεων. Οι βροχοπτώσεις πέρα από αυτό το κατώφλι, πρέπει να αναμένονται ότι είναι ικανές για να παραγάγουν την απορροή, η οποία πρέπει να υπολογιστεί για μια συγκεκριμένη οδική επιφάνεια με την αφαίρεση από το αρχικό ποσό των ποσοτήτων που αντιστοιχούν στο κατώφλι αυτό. Για αυτόν τον λόγο, γίνεται φανερό ότι είναι ιδιαίτερης σημασίας ο αριθμός των ημερήσιων γεγονότων βροχής (ημερών βροχής ετησίως) που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν κατά τη διάρκεια των υπολογισμών σχεδιασμού.
- Η τιμή του συντελεστή απορροής RR πρέπει να χρησιμοποιηθεί και να ενσωματωθεί στους υπολογισμούς. Η έλλειψη σημαντικού συσχετισμού μεταξύ των βροχοπτώσεων και της απορροής, ειδικά στην περίπτωση μας, κατά τη διάρκεια των χαμηλότερων χειμερινών θερμοκρασιών, δείχνει ότι αυτή η τιμή του συντελεστή RR πρέπει να καθοριστεί από πρόσθετες παραμέτρους εξαρτώμενος επιπλέον από το ύψος ακριβώς των βροχοπτώσεων και την θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Τα μέγιστα επεισόδια βροχής δεν είναι κατ' ανάγκη και επεισόδια μέγιστης απορροής. Από την άλλη σκοπιά, η ανάγκη προσδιορισμού της μέγιστης ημερήσιας απορροής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν για τον υπολογισμό της και άλλες παραμέτρους εκτός από το ύψος των βροχοπτώσεων.

3.4 Υπολογισμός ετήσιων εκροών HRO και Μέγιστης Ημερήσιας εκροής με βάση τα στοιχεία της ενόργανης παρακολούθησης ποσοτικά.

Βασισμένοι στην παραπάνω ανάλυση, αναπτύχθηκε μια εξίσωση για τον υπολογισμό του συνολικού ποσού απορροής με έναν ακριβέστερο τρόπο. Στην πράξη, η ανάπτυξη αυτής της εξίσωσης υποστηρίχθηκε αρκετά από τα διαθέσιμα στοιχεία που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια του έτους παρατήρησης. Η ακρίβειά της θα εξεταστεί και στα επόμενα έτη με βάση τα στοιχεία που θα συλλέγονται από την ίδια πιλοτική εγκατάσταση, καθώς επίσης και (ενδεχομένως) από άλλους ερευνητές που εργάζονται σε αυτόν τον τομέα.

Η παρακάτω εξίσωση 3.1 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ετήσιας HRO

$$H_A = (RF - n T) RR S \quad (3.1)$$

Όπου:

H_A : το ετήσιο ποσό απορροών σε m^3

RF: ετήσιες συνολικές βροχοπτώσεις σε m

n: αριθμός (γεγονότα) βροχερών ημερών (χωρίς διαστάσεις)

T: απορροή – κατώφλι βροχοπτώσεων σε m

RR: συντελεστής μεταξύ του 100% των απορροών από τις βροχοπτώσεις, στην απορροή, και του πραγματικού ποσοστού απορροών

S: οδική επιφάνεια σε m^2

Στην περίπτωση μας, εφαρμόζοντας την ως άνω εξίσωση με τιμές για τον συντελεστή RR ίσο με 0,62, για 68 επεισόδια βροχής που παρατηρήθηκαν κατά την χρονική περίοδο Σεπτεμβρίου 2005 – Αυγούστου 2006 και για 461.2 mm που μετρήθηκαν από το βροχόμετρο την ίδια περίοδο, το συνολικό ποσό απορροής υπολογίζεται σε 694,0 m^3 πολύ κοντά στην τιμή που καταγράφεται μέσω του συστήματος Parshall και είναι 715,0 m^3 . Η σχέση μεταξύ της κατ' εκτίμηση (μέσω της εξίσωσης 3.1) τιμής και της πραγματικής καταγραφείσας ετήσιας τιμής απορροής είναι της τάξης του 97,1%, πιο κοντά από οποιαδήποτε άλλη εκτίμηση.

Η μέγιστη ημερήσια απορροή μπορεί να υπολογιστεί, βασιζόμενοι στο ύψος των ετήσιων βροχοπτώσεων και στον αριθμό επεισοδίων (ημερών βροχής) με την βοήθεια της εξίσωσης (3.2):

$$P = \frac{(RF - nT) S}{n(1 - RR)} \quad (3.2)$$

Όπου:

P: καθημερινή μέγιστη παροχή απορροών σε m³, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι είναι οι ίδιες

Στην περίπτωση μας, εφαρμόζοντας την ως άνω εξίσωση με τιμές για το RR = 0,62 και για 68 επεισόδια βροχής που παρατηρήθηκαν κατά την χρονική περίοδο Σεπτεμβρίου 2005 – Αυγούστου 2006 και για 461.2 mm που μετρήθηκαν από το βροχόμετρο την ίδια περίοδο, η μέγιστη ημερήσια απορροή υπολογίζεται σε 43,32 m³. Αυτή η τιμή είναι μόλις το 40,8% της μέγιστης ημερήσιας καταγραφείσας τιμής (106 m³) κατά την διάρκεια παρατήρησης. Αυτό είναι μια πολύ μεγάλη διαφοροποίηση.

Από την άλλη όμως πλευρά, και βασισμένοι στα στοιχεία του πίνακα 3.2, αυτή η μέγιστη ημερήσια εκροή των 43,32 m³, ξεπεράστηκε μόνο σε τρεις περιπτώσεις. Αν τα συστήματα είχαν σχεδιαστεί με αυτήν την μέγιστη ημερήσια παροχή, θα είχαν υπερχειλίσει τρεις φορές, και το συνολικό ποσό που δεν θα είχε αντιμετωπιστεί θα ήταν περίπου 120 m³ που αντιπροσωπεύει το 16,8% των συνολικών εκροών HRO που καταγράφηκαν από τον δίαυλο Parshall. Αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί ως καλό επίπεδο προσέγγισης της τιμής σχεδιασμού, δεδομένου ότι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται πιο σπάνια σύμφωνα με τις παρατηρήσεις (3 φορές σε 68 επεισόδια βροχής).

3.5 Υπολογισμός του συντελεστή απορροής RR με βάση τα στοιχεία της ενόργανης παρακολούθησης ποσοτικά

Βασική παράμετρος και στις δύο εξισώσεις, είναι η εκτίμηση του συντελεστή απορροής RR. Αυτό ήταν ένα ιδιαίτερο δύσκολο εγχείρημα, δεδομένου ότι τα διαθέσιμα στοιχεία για την εξαγωγή συμπερασμάτων από την εργασία αυτή περιορίστηκαν σε ένα έτος και για μια περιοχή παρατήρησης, όπου δεν υπάρχει κανένα σχετικό διαθέσιμο στοιχείο στην Βιβλιογραφία.

Όμως από τα μέχρι τώρα στοιχεία, η σχέση μεταξύ του ύψους των ημερήσιων βροχοπτώσεων και της ημερήσιας καταγραμμένης απορροής, για τις διάφορες θερμοκρασίες, δεν μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια την τιμή του συντελεστή απορροής RR. Απαιτείται

κατά συνέπεια ένας εναλλακτικός τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή RR, που να βασίζεται σε γνωστά και καταγεγραμμένα καιρικά στοιχεία, ανάλογα με τις ανάγκες.

Εάν όλες οι βροχοπτώσεις έπεφταν σε μια ημέρα, η εξίσωση 3.1 με αναφορά στην βροχόπτωση 1 ημέρας με το συντελεστή απορροής RR ίσο με 0,62 θα έδινε ως αποτέλεσμα 785,55 m³. Σύμφωνα με την εξίσωση 3.2 αντιστοίχως με αναφορά στις βροχοπτώσεις μιας ημέρας με τη συγκεκριμένη τιμή του συντελεστή απορροής RR = 0,62 θα έδινε ένα αποτέλεσμα 3.334,26 m³, ένα υπερβολικό νούμερο κάτω από οποιαδήποτε θεώρηση.

Θα ήταν λογικό να θεωρήσουμε όμως, ότι κατά τη διάρκεια μιας θύελλας (όπως πχ συμβαίνει στην περίπτωση των 461.2 χιλ. της βροχής σε μια ημέρα), η τιμή του συντελεστή απορροής RR πρέπει να προσεγγίζει ή να είναι ίσος με την μονάδα (1,0). Σε αυτήν την περίπτωση τα αποτελέσματα της εξίσωσης 3.1 δίδουν ως αποτέλεσμα συνολικών εκροών HRO, για την ίδια περίπτωση 1.267,0 m³. Αντιστοίχως και η μέγιστη ημερήσια απορροή θα ήταν επίσης ίση με 1.267,0 m³

Από την άλλη πλευρά, εάν οι ίδιες βροχοπτώσεις έπεφταν σταδιακά σε 365 ημέρες, με μέσες ημερήσιες βροχοπτώσεις 1,26 mm, η εξίσωση 3.1 (με τον συντελεστή απορροής RR ίσο με 0,62) θα έδινε ως αποτέλεσμα 288,78 m³, ένα ποσό εξαιρετικά υψηλό, ειδικά εάν εξεταστεί υπό το πρίσμα ότι για την κάθε καθημερινή βροχή των 1,26 mm υπάρχει το κατώφλι των 0,8 mm που από τις παρατηρήσεις επιβεβαιώνεται ότι δεν παράγει απορροές. Αντίστοιχα η μέγιστη ημερήσια ροή θα ήταν (εξίσωση 3.2) ίση με 3,36 m³, μία πραγματικά μεγάλη τιμή.

Θα ήταν πιο λογικό να θεωρηθεί ότι σε μια τέτοια περίπτωση η τιμή του συντελεστή απορροής RR, να είναι αρκετά χαμηλή και (υποθετικά) ίση με 0,1. Εάν οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονταν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.1 και 3.2, (υποθέτοντας RR = 0,1) ο ετήσιος όγκος απορροών HRO είναι ίσος με 46,5 m³, ενώ η μέγιστη ημερήσια ροή θα ήταν ίση με 1,42 m³ .

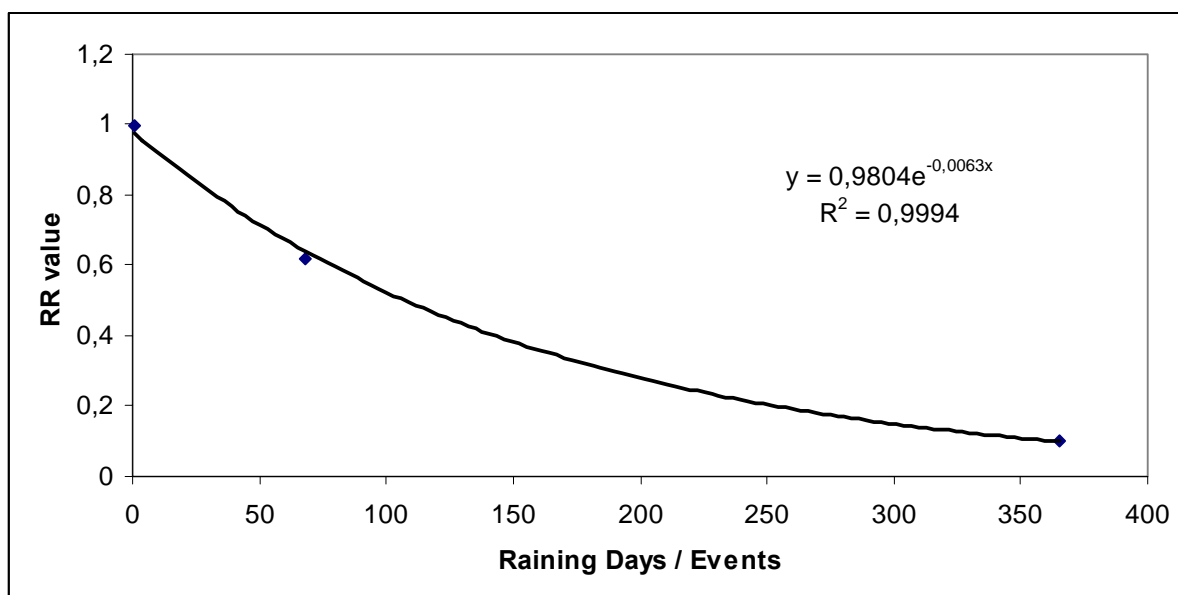
Με βάση τις παραπάνω θεωρήσεις, τα αποτελέσματα των εξισώσεων που αφορούν τον υπολογισμό των ετήσιων απορροών HRO από την μια πλευρά, και των τιμών του συντελεστή απορροής RR από την άλλη, εισήχθησαν σε ένα αρχείο EXCEL και συσχετίστηκαν όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, χρησιμοποιώντας την εκθετική μεθοδολογία.

Η εξίσωση 3.3 που ακολουθεί, προκύπτει από αυτήν την ανάλυση:

$$RR = 0,9804 \exp^{-0,0063 n} \quad (3.3)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση 3.3, η τιμή του συντελεστή απορροής RR για την περίοδο του 2005-2006, για $n = 68$ επεισόδια βροχής (ημέρες βροχής) θα ήταν ίση με $RR = 0,64$, πολύ κοντά στην τιμή $RR = 0,62$ που υπολογίστηκε νωρίτερα με βάση τα πειραματικά στοιχεία. Κατά συνέπεια οι αντίστοιχοι υπολογισμοί που προκύπτουν από την εξίσωση 3.2 θα έδιναν για την μέγιστη ημερήσια ροή αποτέλεσμα ίσο με $45,7 \text{ m}^3$, ενώ από την εξίσωση 3.1 ο ετήσιος όγκος HRO θα υπολογίζονταν ως 716 m^3 , σχεδόν ίδιος με αυτό που καταγράφεται από το σύστημα Parshall.

Με τον ίδιο τρόπο και με βάση τα στοιχεία για τις μέσες τιμές βροχοπτώσεων της τελευταίας 20ετίας του πίνακα 3.1, ο συντελεστής απορροής RR θα ήταν 0,69. Ο ετήσιος όγκος απορροής HRO (εξίσωση 3.1) θα ήταν $1.420,0 \text{ m}^3$, με την μέγιστη ημερήσια ροή (εξίσωση 3.2) ίση με $118,0 \text{ m}^3$.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα εκτίμησης Συντελεστή Απορροής RR με βάση τα επεισόδια βροχής ετησίως (days).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της παρακολούθησης των εισροών από την μια πλευρά και των εκροών από τους τέσσερεις υδροβιότοπους από την άλλη.

Υπενθυμίζουμε ότι οι παράμετροι που εξετάστηκαν, προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση των υδροβιότοπων χωριστά για τον κάθε ένα, αλλά και για να γίνει η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ τους ήταν:

- Χημική απαίτηση οξυγόνου σε mg/L (COD)
- Συνολικά αιωρούμενα στερεά σε mg/L (TSS)
- pH
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα σε mS/cm (EC)
- NO₃ και συνολικό άζωτο σε mg/L (TN)
- Συνολικός φώσφορος σε mg/L (TP)
- Βαριά μέταλλα (Cu, Ni, Pb και Zn) σε μg / L

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε με την βοήθεια στατιστικών πακέτων και ειδικότερα της Ανάλυσης ANOVA ([ANOVA: ANalysis Of VAriance between groups](#)).

Στην συνέχεια θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα για να καταλήξουμε στα συμπεράσματα σχετικά με τα θέματα που έχουν τεθεί προς διερεύνηση, και ειδικότερα των επιδόσεων των τεσσάρων κλινών των υδροβιότοπων, απαντώντας στο ερώτημα ποιος από τους τέσσερεις λειτουργεί αποδοτικότερα, απομακρύνοντας πληρέστερα τις ρυπογόνες ουσίες που βρίσκονται στις εκροές των αυτοκινητόδρομων.

4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

4.2.1 Γενικές παρατηρήσεις και συμπεράσματα

Κατά την δωδεκάμηνη διάρκεια των παρατηρήσεων, παρατηρήθηκαν 68 επεισόδια βροχής με βάση τα στοιχεία από το σύστημα παρακολούθησης.

Κατά την περίοδο αυτή ελήφθησαν 37 πλήρεις σειρές δειγμάτων, δηλαδή δείγμα από την είσοδο της δεξαμενής αποθήκευσης και 4 δείγματα από τις εξόδους των κλινών των τεσσάρων υγροβιότοπων.

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται με συνοπτικό τρόπο τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (μέση τιμή – max τιμή – min τιμή) των παραπάνω παραμέτρων από την είσοδο της δεξαμενής αποθήκευσης ST αφενός, και από τις τέσσερις εξόδους των επεξεργασμένων πλέον εκροών από τους υγροβιότοπους.

Όμοιες με τις τιμές του πίνακα 4.1 είναι και οι τιμές των παραμέτρων που παρουσιάστηκαν σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου, όπως παρατίθενται από τις εργασίες των Bulc and Salk (2003), Pontier *et al.* (2004) και Heyvaert *et al.* (2006).

Η μεγάλη διακύμανση των τιμών μεταξύ της min τιμής και της max τιμής για την παράμετρο του COD, αλλά και αντίστοιχα για τις άλλες παραμέτρους του πίνακα 4.1, μπορούν να εξηγηθούν, λαμβάνοντας υπόψιν ότι συσσωρεύονται ρύποι κατά την διάρκεια των μεγάλων ξηρών περιόδων (Prestes *et al.*, 2006).

Για αυτόν τον λόγο οι πρώτες βροχοπτώσεις μετά από τη μεγάλη ξηρά θερινή περίοδο, που συνήθως πέφτουν τον Σεπτέμβριο, αναμένεται ότι είναι αυτές που μεταφέρουν τις περισσότερες ρυπογόνες ουσίες στις εκροές HRO του αυτοκινητόδρομου.

Με βάση τις τιμές HRO που παρουσιάζονται στα σχήματα 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 και 4.5, η υπόθεση αυτή φαίνεται να επαληθεύεται τουλάχιστον για το COD, TSS, TN και μερικώς για το NO₃. Δεν φαίνεται να επαληθεύεται για την περίπτωση του TP, όπου παρουσιάζεται να αυξάνεται σε σχέση με τον χρόνο.

Scholes *et al.*, (1998) σχολιάζουν αυτήν την μεγάλη διακύμανση τιμών των παραμέτρων των εκροών HRO, ως την κύρια αιτία που δημιουργεί μεγάλες δυσκολίες στην παρακολούθηση κάθε ανάλογου συστήματος επεξεργασίας .

Με την βοήθεια της Ανάλυσης ANOVA (ANalysis Of VAriance between groups) ($p < 0,001$), που εφαρμόστηκε μεταξύ των τιμών εισροών HRO και των μέσων τιμών εκροών των παραμέτρων του COD, TSS, TN, NO_3 και TP, έγινε φανερό ότι:

Σε όλες τις περιπτώσεις υπήρξε σημαντική διαφορά μεταξύ των τιμών εισροής και των τιμών εκροής και από τους 4 υδροβιότοπους. Αυτό, με μια πρώτη ανάλυση, δείχνει ότι η απομάκρυνση των ρυπαντικών ουσιών, με τέτοιου τύπου συστήματα, είναι τουλάχιστον επαρκής.

Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο, όσον αφορά την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων, μεταξύ των εισροών και των αντίστοιχων εκροών, όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα 4.2. Σύμφωνα με τον πίνακα αυτό, ακόμα κι αν και για τα τέσσερα μέταλλα, οι μέσες τιμές που έχουν επιτύχει να παράγουν οι τέσσερις υδροβιότοποι είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες των εισροών, αυτές οι τιμές δεν φαίνεται να παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές, πάντα με βάση την ανάλυση ANOVA ($p < 0,001$).

4.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα σχετικά με τα βαρέα μέταλλα Ni, Pb, Cu, Zn

Το Ni και ο Pb παρουσιάζουν μέσες τιμές εισροής 146,6 $\mu\text{g/L}$ και 43,8 $\mu\text{g/L}$ αντίστοιχα, τιμές παρόμοιες με αυτές που παρουσιάζονται από Mungur *et al.*, (1995) και Scholes *et al.* (1998). Για αυτά τα δύο μέταλλα, οι μέσες τιμές εισροής δεν είχαν ουσιαστική διαφορά με αυτές των εκροών και από τους τέσσερις υδροβιότοπους. Ο υδροβιότοπος SSF24 ήταν αυτός που παρουσίασε στην εκροή την χαμηλότερη μέση τιμή συγκέντρωσης και για τα δύο παραπάνω μέταλλα. Την ίδια στιγμή, και σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 4.3, η ποσοστιαία απομάκρυνση των δύο μετάλλων από τον υδροβιότοπο SSF24 είναι μικρότερη από αυτή που παρουσιάζεται στον υδροβιότοπο SSF12, που παρουσιάζει επίσης κάποιο πλεονέκτημα και ως προς του υδροβιότοπους τύπου FWS. Αυτή η διαφορά μεταξύ της μέσης συγκέντρωσης και της μέσης ποσοστιαίας απομάκρυνσης, οφείλεται στον τρόπο υπολογισμού της κάθε παραμέτρου. Η μέση ποσοστιαία απομάκρυνση, είναι ο μέσος όρος της ποσοστιαίας απομάκρυνσης για κάθε υδροβιότοπο και κάθε απλή δειγματοληψία μεταξύ της τιμής εισροής και των αντίστοιχων τιμών εκροών και των τεσσάρων υδροβιότοπων.

Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν σε μερικές περιπτώσεις (και είναι κάτι που συμβαίνει και για τα δύο αυτά τα μέταλλα), οι συγκεντρώσεις στην εκροή να είναι υψηλότερες από αυτές τις αντίστοιχης εισροής, που οδηγεί σε μια αρνητική αφαίρεση ποσοστού, η οποία σημειώνεται επίσης από Scholes *et al.* (1998). Μια αιτία γι' αυτό μπορεί να είναι η χαμηλή

φόρτιση των εισροών, οπότε πολύ μικρές μεταβολές παράγουν σημαντικές μεταβολές στην ποσοστιαία απομάκρυνση.

Mungur et al. (1995) αναφέρουν ότι η παρουσία των μετάλλων σε μεγάλες ποσότητες στις εκροές, μεγαλύτερες από το εισερχόμενο ποσό στην εισροή HRO, θα μπορούσε να εξηγηθεί λόγω του ξεπλύματος του ιζήματος στις κλίνες, μετά από ένα γεγονός θύελλας. Αυτό θα μπορούσε να έχει επιπτώσεις στον υπολογισμό της μέσης ποσοστιαίας τιμής.

Από την άλλη πλευρά, η μέση τιμή συγκέντρωσης, που δεν αντιστοιχεί σε σύγκριση ίδιου γεγονότος, θα μπορούσε να παραγάγει μια παραπλανητική εικόνα της διαδικασίας επεξεργασίας. Για αυτούς τους λόγους και οι δύο παράμετροι πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά.

Όσον αφορά τον Cu και τον Zn, υπάρχει κάποια διαφοροποίηση μεταξύ των εκροών από τους υδροβιότοπους και των εισροών HRO που παρουσιάζουν τιμές 59,6 µg/L και 259,1 µg/L αντίστοιχα. Όσον αφορά τον Cu, η μέση τιμή συγκέντρωσης για SSF12 και SSF24 είναι αισθητά μικρότερη από την τιμή εισροής HRO, ενώ όσον αφορά την επίδοση των άλλων δυο, παρουσιάζουν κάποιο μικρότερο πλεονέκτημα (Πίνακες 4.2, και 4.3).

Για το Zn, είναι φανερή η διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών εισροής HRO και των επεξεργασμένων εκροών των τριών από τους τέσσερις υδροβιότοπους (εκτός από τον FWS12), οι οποίοι επιτυγχάνουν σημαντικά διαφορετικές μέσες συγκεντρώσεις. Αυτή τη φορά ο FWS24 φαίνεται να έχει καλύτερες επιδόσεις από τους άλλους υδροβιότοπους, και όσον αφορά την μέση συγκέντρωση και όσον αφορά την μέση ποσοστιαία απομάκρυνση.

Σύμφωνα με τον Tuccillo (2006) ο Cu και ο Zn στην εισροή HRO βρίσκεται ή σε διαλυμένη μορφή, ή σε πολύ μικρά σωματίδια (μικρότερα από 5 µm), γεγονός που αυξάνει την απομάκρυνση αυτών των δύο μετάλλων σε αντίθεση με το ότι συμβαίνει με την απομάκρυνση των Ni και του Pb, όπου υπεισέρχονται άλλοι παράγοντες.

Βασισμένοι στις παραπάνω πληροφορίες, μπορούμε βέβαια να υποθέσουμε ότι οι επιδόσεις των τεσσάρων υδροβιότοπων, όσον αφορά την επεξεργασία των εκροών δεν πρέπει να θεωρηθούν ως επαρκείς τουλάχιστον όσον αφορά τα βαριά μέταλλα. Κανένα σύστημα από τα συστήματα που εξετάζονται, δεν επιτυγχάνει και στα τέσσερα μέταλλα σημαντική μείωση της εισρέουσας συγκέντρωσης των μετάλλων.

Η μικρή συγκέντρωση που καταγράφηκε στις εισρέουσες συγκεντρώσεις, θα μπορούσε να εξηγήσει κάποιο επίπεδο διακύμανσης των τιμών οφειλόμενη στις χρησιμοποιούμενες αναλυτικές μεθόδους, εντούτοις, σε καμιά περίπτωση δεν μπορεί να

εξηγήσει τέτοια κακή απόδοση. Παρόμοιες χαμηλές αποδόσεις έχουν καταγραφεί επίσης από τους Maltby et al. (1994) και Scholes et al. (1998) και εξηγούνται ως, α) ξέπλυμα των ίζημάτων λόγω πιθανής εμφάνισης των γεγονότων θύελλας, β) διαφορετικό σχέδιο διαμόρφωσης των υδροβιότοπων, συμπεριλαμβανομένου του τύπου συστήματος (FWS, SSF ή και τα δύο), γ) μεγάλη διαφοροποίηση των τιμών εισροής και δ) προβλήματα λειτουργίας και κατασκευής (που δεν εμφανίστηκαν στην περίπτωση μας).

Είναι προφανές, ειδικά, εάν η αφαίρεση μετάλλων συσχετίζεται με την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών TSS (Σχήμα 4.2), ότι τα μέταλλα που απομακρύνθηκαν από τους υδροβιότοπους, ήταν πιθανώς μόνο εκείνα που συνδέθηκαν με τα αιωρούμενα στερεά που μετρήθηκαν στην έξοδο ή κατέπεσαν στον υδροβιότοπο, παράγοντας το κάποιο ίζημα (Mungur et al., 1995, Prestes et al., 2006, Tuccillo et al., 2006). Λογικά, θα πρέπει να υπάρχει ένα πολύ μικρό μέρος των μετάλλων που θα έχει κρατηθεί είτε από το υπόστρωμα (ειδικά στα συστήματα FWS) είτε από τα φυτά, εντούτοις, τα διαθέσιμα στοιχεία δεν μπορούν να υποστηρίξουν αυτήν την θεωρία.

Όσον αφορά την απόδοση των υδροβιότοπων στην απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων, φαίνεται να πλεονεκτούν τα συστήματα SSF και ειδικά ο υδροβιότοπος SSF24, η απόδοση του οποίου όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ουσιαστική (τουλάχιστον και για τα τέσσερα μέταλλα). Η ανωτερότητα των συστημάτων SSF υποστηρίζεται επίσης από τα συμπεράσματα της απόδοσης του υδροβιότοπου SSF στο Brentwood στην Μεγάλη Βρετανία, σε σύγκριση με τον υδροβιότοπο FWS στο Dagenham. (Scholes et al., 1998). Mungur et al., (1995), αναφέρουν ότι στα φυτά που πεθαίνουν - ξηραίνονται, (ένα αναπόφευκτο φαινόμενο κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου στην περιοχή της Μεσογείου) εγκλωβίζονται βαρέα μέταλλα, που στην συνέχεια θα μπορούσαν να απελευθερωθούν με τις πρώτες βροχές μετά την θερινή περίοδο. Αυτό θα αξιολογηθεί κατά τη διάρκεια του ερχόμενου χειμώνα.

4.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα σχετικά με το COD, TSS, TN, NO₃, και TP

Οι αποδόσεις, όσον αφορά τις υπόλοιπες φυσικοχημικές παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν, είναι σαφώς καλύτερες. Τα σχήματα 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 και οι πίνακες 4.1 και 4.3 επιβεβαιώνουν αυτήν την άποψη. Με τον τρόπο που παρουσιάζονται τα πέντε αυτά σχήματα, είναι εύκολο να δει κανείς τις διαφορές μεταξύ των τιμών εισροής για τις φυσικοχημικές παραμέτρους του COD, TSS, TN, NO₃, και TP, και τις αντίστοιχες τιμές εκροής από τις τέσσερις κλίνες.

Η Στατιστική Ανάλυση των μετρήσεων με την βοήθεια της εφαρμογής ANOVA, εφαρμοζόμενη και για τις πέντε φυσικοχημικές παραμέτρους, επαλήθευσε τα αποτελέσματα αυτά. Οι μέσες τιμές εκροών είναι σαφώς διαφορετικές και μικρότερες από την αντίστοιχη μέση τιμή εισροής HRO.

Βασιζόμενοι λοιπόν στις παραπάνω διαπιστώσεις, μπορούμε με ασφάλεια να διατυπώσουμε την άποψη, ότι τα εν λόγω συστήματα υγροβιότοπων είναι κατάλληλα για την επεξεργασία αυτού του τύπου των εκροών από τον αυτοκινητόδρομο.

Σύμφωνα πάντα με τα Σχήματα 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 και τους Πίνακες 4.1 και 4.3, ο SSF24, είναι ο υγροβιότοπος που σε σχέση με τους άλλους, όσον αφορά το COD, TN, NO₃, και TP, παρουσιάζει ένα ελαφρύ πλεονέκτημα, και όσον αφορά τις μέσες συγκεντρώσεις και όσον αφορά τις μέσες ποσοστιαίες απομακρύνσεις των ρύπων.

Μόνον όσον αφορά τα TSS, ο SSF12 παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερες επιδόσεις (91,19% συγκρινόμενο με το 90,04% του SSF24) καταγράφοντας την χαμηλότερη μέση τιμή συγκέντρωσης για τα αιωρούμενα στερεά TSS ίση με 9,36 mg/L.

Αυτά τα επίπεδα απόδοσης, είναι μεγαλύτερα από εκείνα που καταγράφονται από τους Bulc et Salk (2003) καθώς επίσης και από Heyvaert et al. (2006), για ανάλογα συστήματα επεξεργασίας εκροών.

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τα σχήματα και τους πίνακες, λαμβάνοντας υπόψιν και τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω όσον αφορά την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, είναι δυνατόν να ταξινομήσουμε τα συστήματα με βάση την καλύτερη απόδοση κατά σειρά ως ακολούθως:

SSF24 > SSF12 > FWS24 > FWS12.

Εντούτοις, η διαφορά απόδοσης μεταξύ του καλύτερου συστήματος (SSF24) και του χειρότερου συστήματος (FWS12), είναι πολύ μικρή. Παραδείγματος χάριν για το TN η μέση συγκέντρωση για τον υγροβιότοπο SSF24 είναι 2,26 mg/L, όπου για τον FWS12, η αντίστοιχη τιμή είναι 2,63 mg/L.

Η ανάλυση ANOVA χρησιμοποιήθηκε ξανά για να αξιολογήσει εάν υπάρχει ουσιαστική και στατιστικά επιβεβαιωμένη διαφοροποίηση μεταξύ της απόδοσης των τεσσάρων συστημάτων. Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή, η απόδοση όλων των συστημάτων ήταν παρόμοια, διευκρινίζοντας ότι ακόμα κι αν κάποιο πλεονέκτημα θα μπορούσε να δοθεί σε έναν από τους 4 υγροβιότοπους με βάση τις μέσες συγκεντρώσεις και την ποσοστιαία απομάκρυνση, στατιστικά οι διαφορές τους ήταν ασήμαντες.

4.2.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα σχετικά με τον Υδραυλικό χρόνο παραμονής HRT

Τα συστήματα των τεσσάρων υγροβιότοπων σχεδιάστηκαν, έχοντας συγκεκριμένους υδραυλικούς χρόνους παραμονής, όπως έχει ήδη σχολιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Έτσι υπάρχει ένα ζεύγος υγροβιότοπων, ο SSF 12, και ο FWS12 με υδραυλικό χρόνο παραμονής 12 ώρες, και ένα ζεύγος υγροβιότοπων, ο SSF24, και ο FWS24 με υδραυλικό χρόνο παραμονής 24 ώρες.

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής είναι μια από τις κυριότερες παραμέτρους σχεδιασμού, εξαρτώμενος κυρίως από τον τρόπο κατασκευής του υγροβιότοπου (πορώδες - περατότητα του εδάφους, βλάστηση) αλλά και από την φόρτιση που εφαρμόζεται.

Με δεδομένη την σημασία του υδραυλικού χρόνου παραμονής στην αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας και στην ποιότητα των εκροών, εκτελέστηκε πείραμα μέτρησης του υδραυλικού χρόνου, με την βοήθεια χρωστικής ουσίας. Ο έλεγχος έγινε μετρώντας την συγκέντρωση της χρωστικής σε συνάρτηση του χρόνου από την έναρξη του πειράματος.

Ως υδραυλικός χρόνος παραμονής θεωρήθηκε ο χρόνος μετά από τον οποίο, οι συγκεντρώσεις της χρωστικής ουσίας παρουσιάζονταν περίπου σταθερές, γεγονός που σημαίνει ότι όλο το νερό που υπήρχε στους υγροβιότοπους έχει αντικατασταθεί από αυτό που είχε την χρωστική ουσία.

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος μέτρησης του Υδραυλικού χρόνου παραμονής. Σύμφωνα με αυτά, ο μικρότερος HRT καταγράφηκε στον FWS12 (10 ώρες αντί του χρόνου σχεδιασμού που ήταν 12 ώρες) ακολουθούμενος από τον FWS24 με 14 ώρες HRT. Στις δύο κλίνες αμμοχάλικου μετρήθηκαν μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής με 18 και 16 ώρες αντίστοιχα για τον SSF24 και τον SSF12.

Με εξαίρεση τον υγροβιότοπο SSF12, όλοι οι άλλοι παρουσίασαν μειωμένο HRT από τον αρχικά σχεδιασμένο, γεγονός που υποδηλώνει κάποιου είδους εμπλοκή. Η μεγαλύτερη απόκλιση που παρατηρείται στα συστήματα FWS μπορεί να εξηγηθεί ως συνέπεια της πολύ πυκνής βλάστηση που αναπτύχθηκε στον υγροβιότοπο, με αποτέλεσμα την μείωση της περατότητας στην περιοχή δια μέσου της οποίας ρεεί το απόβλητο, από 0,75 που χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε πολύ λιγότερο από 0,70. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι ο μικρότερος HRT των FWS δεν επέτρεψε τη βιολογική επεξεργασία, που είναι πολύ σημαντική στα συγκεκριμένα συστήματα, να διαδραματίσει έναν σημαντικό ρόλο στην

αποδόμηση των ρύπων. Από την άλλη πλευρά, η ακραία πυκνή βλάστηση θα μπορούσε να εξηγήσει την ομοιότητα που παρουσιάζεται μεταξύ συστήματος αμμοχάλικου και του συστήματος με έδαφος, ως επιφάνειας όμοιας αυτής με το αμμοχάλικο.

Στο επόμενο έτος το επίπεδο του ύδατος μέσα στον υγροβιότοπο θα αυξηθεί κατά 0,10 m (μέσω του σωλήνα εξόδου) προκειμένου να ρυθμιστεί αυτή η διαφορά από τις αρχικές εκτιμήσεις. Τέτοιου τύπου επέμβαση δεν μπορεί να εκτελεστεί εύκολα στα συστήματα SSF, επειδή αυτό θα απαιτούσε την προσθήκη πρόσθετου αμμοχάλικου, που είναι ένα δύσκολο εγχείρημα και μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στη βλάστηση, τουλάχιστον στην αρχή. Αυτή η ευελιξία των συστημάτων FWS σε συνδυασμό και με άλλες παραμέτρους, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την φάση επιλογής του τύπου των συστημάτων.

Εάν ο υγροβιότοπος SSF12 συγκριθεί με τον FWS12, η διαφορά έξι ωρών στον υδραυλικό χρόνο παραμονής HRT, όπως επίσης η διαφορά τεσσάρων ωρών μεταξύ του SSF24 και του FWS24 θα μπορούσε να εξηγήσει το πλεονέκτημα των κλινών με αμμοχάλικο. Ομοίως η διαφορά δύο ωρών μεταξύ SSF12 και SSF24, και η διαφορά τεσσάρων ωρών μεταξύ FWS12 και FWS24, θα μπορούσαν επίσης να εξηγήσουν γιατί ενώ είχαμε διαφορετικές φορτίσεις, οι φορτίσεις αυτές δεν οδήγησαν σε μια σημαντική διαφοροποίηση στην απόδοση.

Η ανάλυση ANOVA αποδεικνύει ότι οι διαφορές στον υδραυλικό χρόνο παραμονής HRT, δεν οδήγησαν σε μια σημαντική διαφοροποίηση στην απόδοση των συστημάτων.

Με βάση την καθημερινή παρακολούθηση των συστημάτων, μπορούμε να πούμε ότι η κύρια μέθοδος απομάκρυνσης των ρύπων στους τέσσερις υγροβιότοπους, ήταν αυτή της φίλτρασης (screening) κυρίως και της καθίζησης δευτερευόντως, που είναι και οι δύο φυσικές μέθοδοι απομάκρυνσης. Το επίπεδο της βιολογικής αποδόμησης των ουσιών που βρίσκονται στην εκροή, σε σχέση με την φυσική τους διατήρηση, πρέπει να θεωρηθεί μικρό, δεδομένου ότι η πλειοψηφία των ρύπων συνδέεται με τα στερεά. Πράγματι η υψηλή τιμή συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών TSS στην εισροή HRO, που ήταν 208,9 mg/L δεν συνοδεύτηκε από μια ανάλογη τιμή για την συγκέντρωση του COD που ήταν 103,6 mg/L, σε αντίθεση με την πιο κοινή περίπτωση αστικών λυμάτων (Solano et al., 2004). Αυτό υποδεικνύει ότι μεγάλο μέρος των αιωρούμενων στερεών TSS, ήταν ανόργανης φύσης, όπως για παράδειγμα άμμος ή χαμηλού οργανικού περιεχομένου (χώμα) ή ακόμα ουσιών οργανικής φύσης δυσκόλως βιοδιασπάσιμων (υδρογονάνθρακες, λάδια, πετρέλαιο). Η μικρή

υπεροχή των συστημάτων SSF μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι στα συστήματα αυτά υπήρξε μια καλύτερη φυσική (screening) κυρίως απομάκρυνση των ρύπων στο αμμοχάλικο, από ότι στα συστήματα με χώμα.

4.3 Τελικά Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των παρατηρήσεων που έγιναν παραπάνω, μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια πρώτα συμπεράσματα που στην περίπτωση μας είναι:

- a. Και οι δυο τύποι συστημάτων υποεπιφανειακής ροής SSF ή επιφανειακής ροής FWS αποδίδουν επαρκώς, δεδομένου ότι οι τιμές εκροής είναι σαφώς μικρότερες από αυτήν της εισροής στις κλίνες και των 4 υδροβιότοπων. Επιπλέον δεν υπήρξε ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δυο τύπων συστημάτων για την πλειοψηφία των φυσικοχημικών παραμέτρων που αναλύθηκαν. Η επιλογή του ενός ή του άλλου συστήματος ως του πλέον κατάλληλου, θα πρέπει να βασίζεται και σε άλλες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα το κόστος κατασκευής, το κόστος της γης, την ευελιξία λειτουργίας.
- b. Οι διαφορετικές φορτίσεις που εφαρμόστηκαν στο ζεύγος συστημάτων FWS και στο ζεύγος συστημάτων SSF δεν είχαν ως αποτέλεσμα ουσιαστικές διαφορές στις τιμές των παραμέτρων στις εκροές τους αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει την επεξεργασία μεγαλύτερων ποσοτήτων εισροών HRO, χρησιμοποιώντας μικρότερων διαστάσεων κλίνες. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό αποτέλεσμα, για την εξασφάλιση των απαιτούμενων κάθε φορά εκτάσεων σε ένα ορεινό ανάγλυφο, όπως είναι αυτό της Κρήτης.
- c. Βασισμένοι στις μέσες τιμές εκροών και της ποσοστιαίας απομάκρυνσης από τα συστήματα για τις παρακολουθούμενες παραμέτρους, αλλά και παράλληλα στην εμπειρία από την καθημερινή παρακολούθηση των συστημάτων, μπορούμε να πούμε ότι τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής SSF λειτουργούν καλύτερα από αυτά της επιφανειακής ροής FWS και επιτρέπουν στις εγκαταστάσεις να είναι σε καλύτερη κατάσταση από ότι στα συστήματα με υπόστρωμα εδάφους.

Πίνακας 4.1. Τιμές Ποιοτικών Χαρακτηριστικών Παραμέτρων για την εισροή και τις εκροές από τους τέσσερεις υγροβιότοπους.

Παράμετρος	Εισροή			SSF12			SSF24			FWS12			FWS24		
	Μέση	Min	Max	Μέση	Min	Max	Μέση	Min	Max	Μέση	Min	Max	Μέση	Min	Max
COD (mg/L)	103.6	26.0	306.0	49.39	10	117	47.15	10	107	57.52	4	134	55.10	5	146
TSS (mg/L)	208.9	28	526	9.36	3	37	10.13	3	49	18.04	4	40	12.13	4	31
pH	7.90	7.12	8.61	7.39	6.75	7.69	7.39	6.83	7.74	7.43	6.83	8.01	7.42	7.00	7.72
EC (mS/cm²)	0.283	0.102	0.74	0.434	0.146	0.881	0.547	0.137	1.034	0.469	0.085	2.952	0.396	0.078	0.960
TN (mg/L)	5.62	1.1	29	2.84	0.2	14	2.26	0.2	11	2.63	0.8	13	2.48	0.1	13
NO₃ (mg/L)	1.9	0.6	6.4	0.7	0	8.5	0.6	0.1	2.5	0.9	0.1	3.2	0.8	0.1	3.3
TP (mg/L)	4.9	0.7	18.4	1.7	0.1	3.7	1.0	0.2	2.8	1.6	0.5	3.4	1.4	0.4	2.9

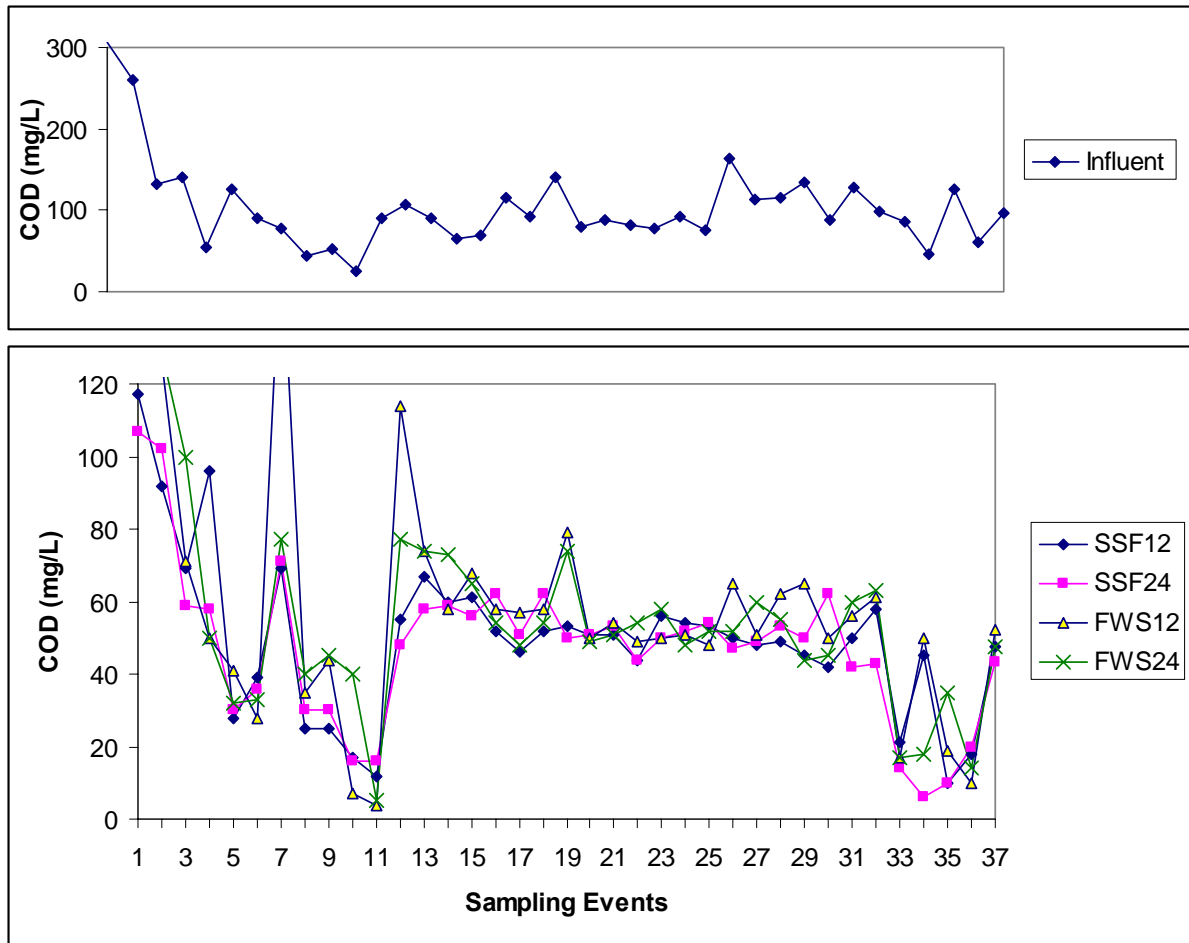
Πίνακας 4.2. Συγκεντρώσεις Βαρέων Μετάλλων σε Εισροή και στις αντίστοιχες Εκροές (Μέση τιμή).

Μέταλλα	Εισροή†	SSF12	SSF24	FWS12	FWS24
Cu (µg/L)	59.63 ± 72*	20.80 ± 24*	18.26 ± 25*	37.04 ± 61*	32.75 ± 49*
Ni (µg/L)	146.6 ± 337*	98.6 ± 338*	85.4 ± 159*	97.3 ± 196*	117.4 ± 225*
Pb (µg/L)	43.8 ± 91*	42.1 ± 71*	33.9 ± 81*	41.0 ± 81*	29.1 ± 78*
Zn (µg/L)	259.1 ± 220*	70.8 ± 75*	74.6 ± 51*	121.7 ± 113*	70.3 ± 56*

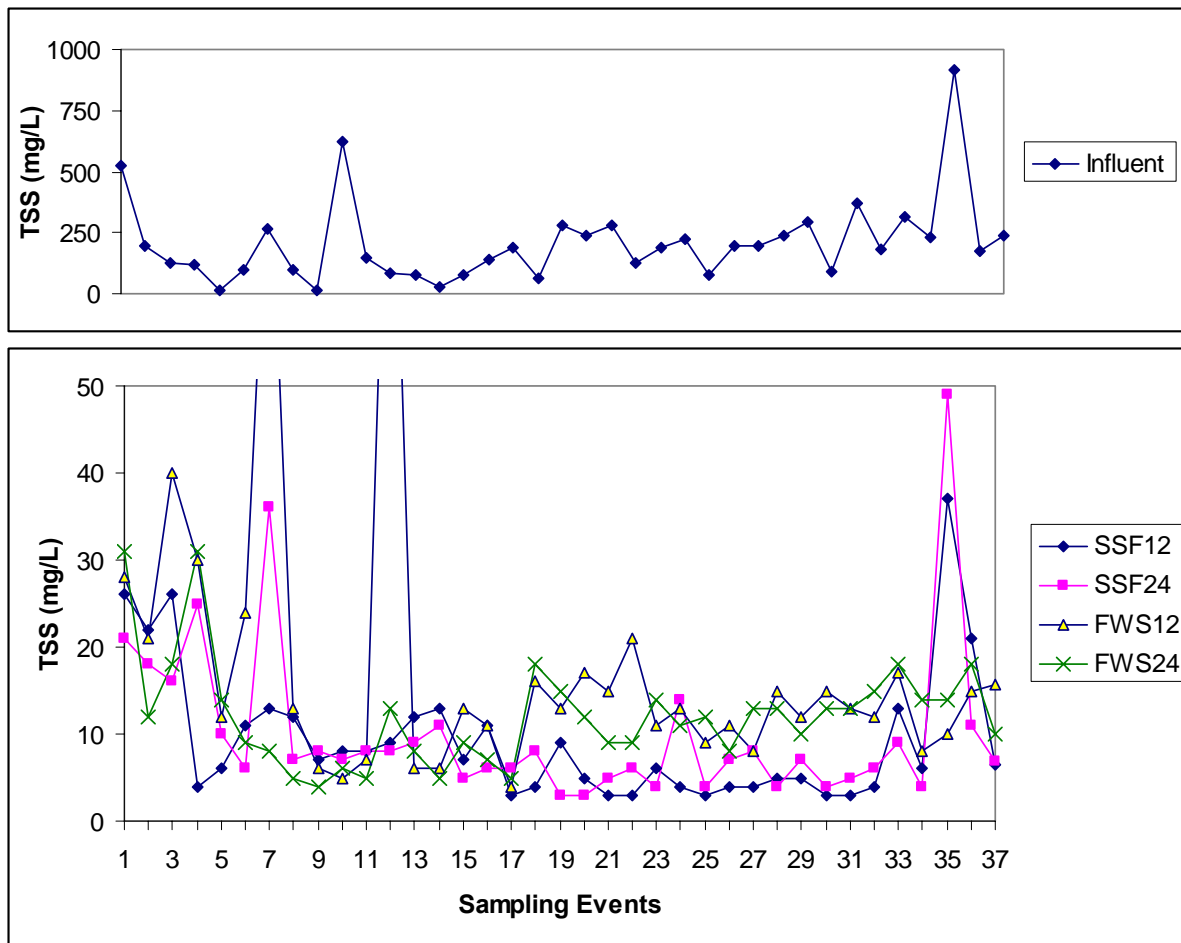
†, * *: Σε κάθε σειρά και για κάθε μέταλλο, η μέση τιμή ακολουθούμενη από διαφορετικό σύμβολο, είναι χαρακτηριστικά διαφορετική (p< 0.001).

Πίνακας 4.3. Μέση ποσοστιαία(%) απομάκρυνση των ρύπων.

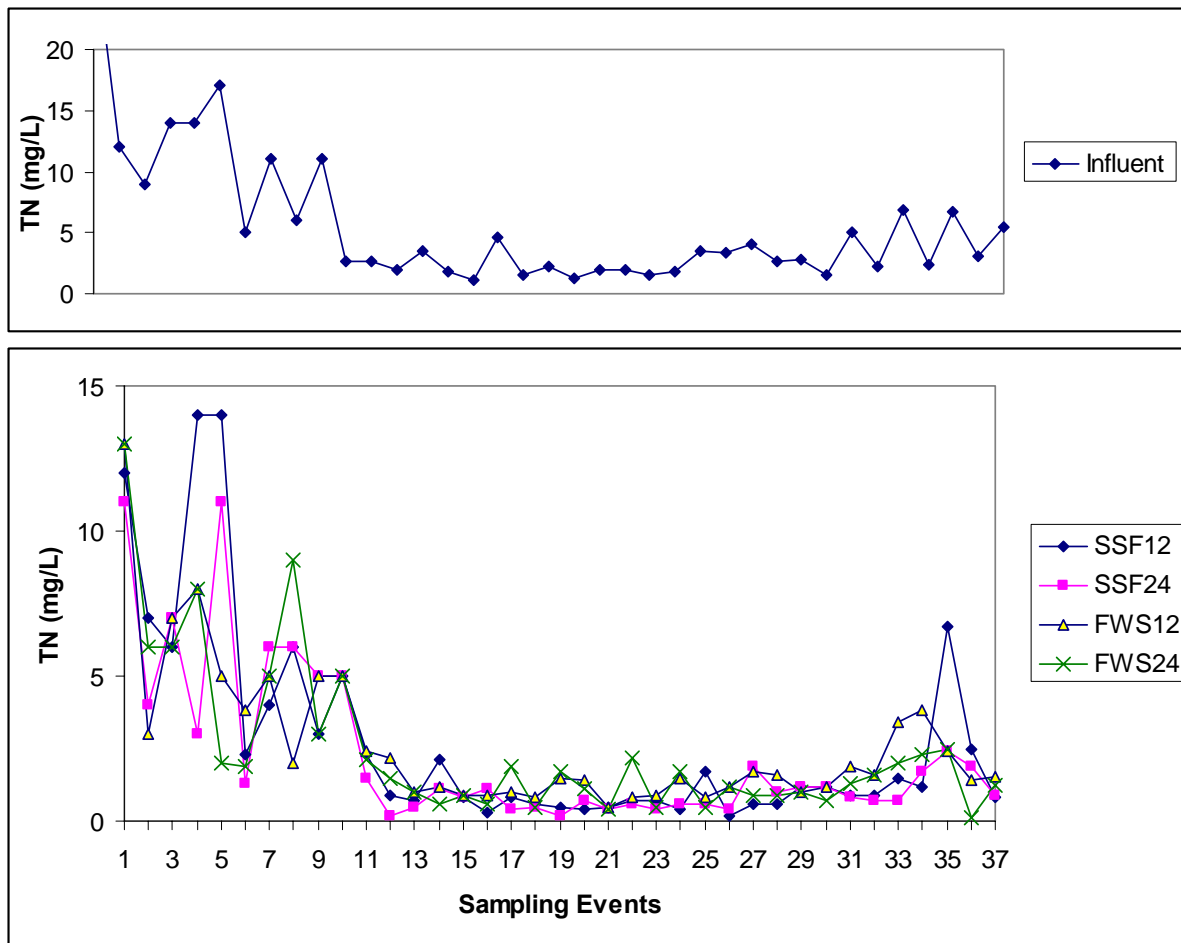
Παράμετρος	SSF12	SSF24	FWS12	FWS24
COD (mg/L)	48.97	51.36	41.30	44.45
TSS (mg/L)	91.19	90.04	83.48	88.12
TN (mg/L)	54.59	58.93	44.16	51.20
NO₃ (mg/L)	70.67	72.00	52.55	59.61
TP (mg/L)	57.76	67.44	52.89	58.80
Cu (µg/L)	61.10	55.84	31.13	33.39
Ni (µg/L)	49.17	41.11	34.82	21.23
Pb (µg/L)	42.51	27.74	30.50	56.79
Zn (µg/L)	62.61	58.48	26.53	53.42



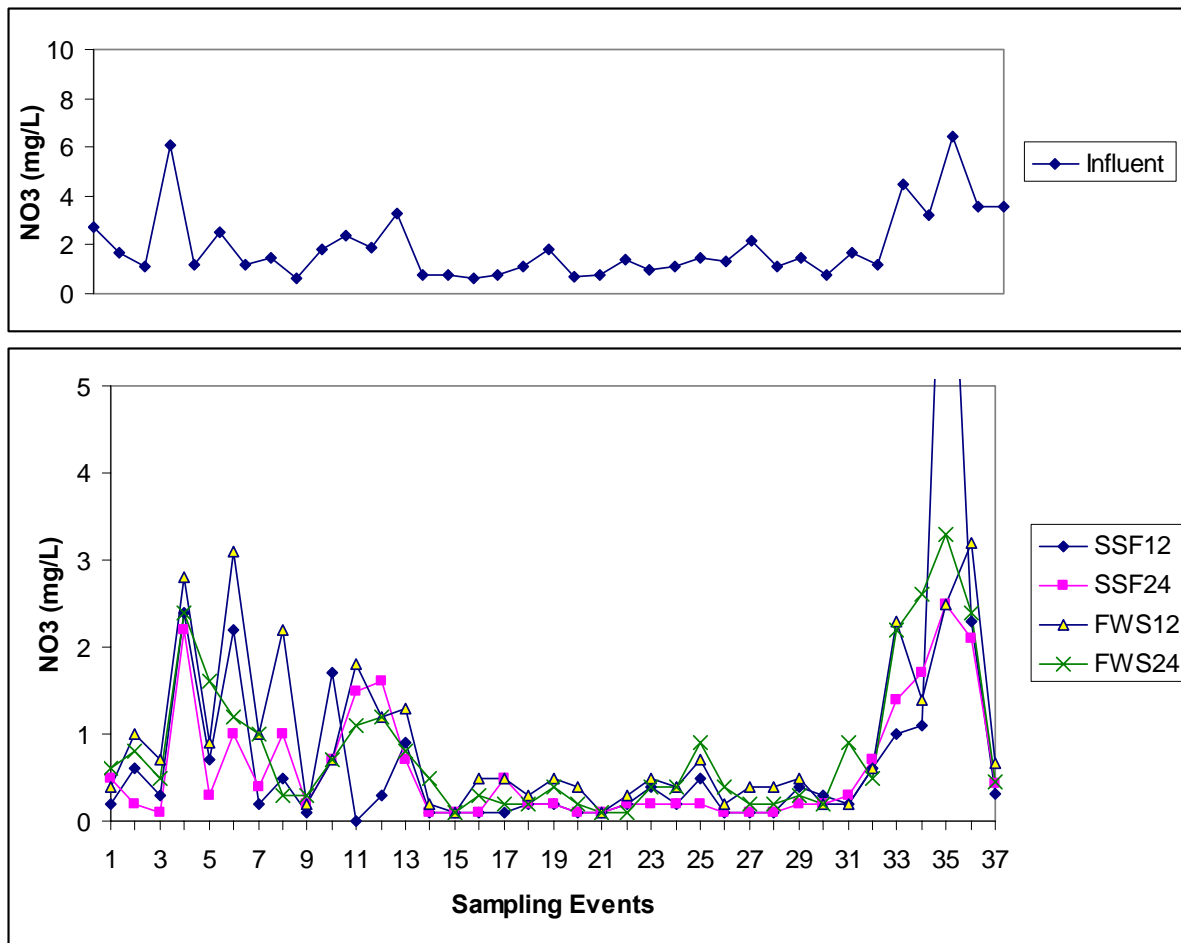
Σχήμα 4.1. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υδροβιότοπους για το COD



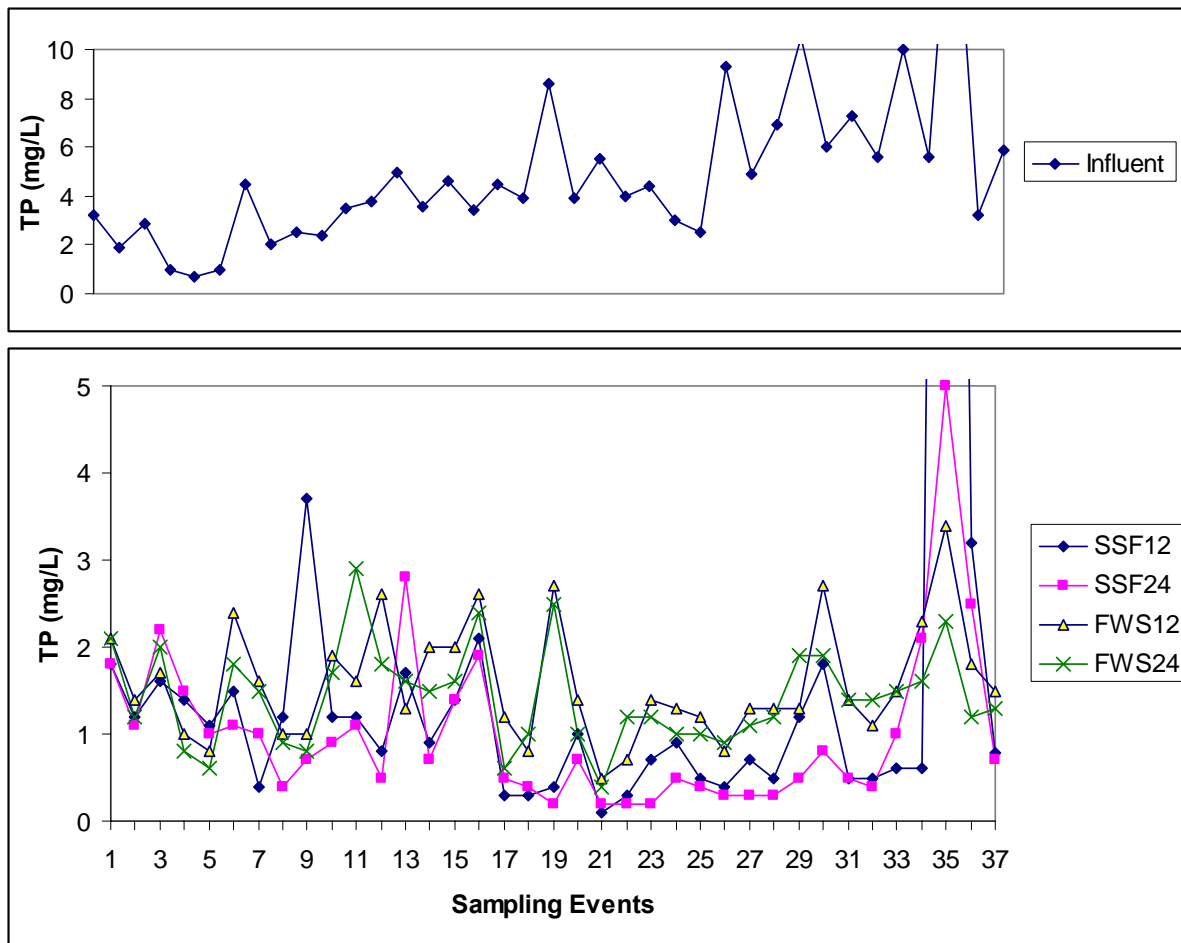
Σχήμα 4.2. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υδροβιότοπους για το TSS



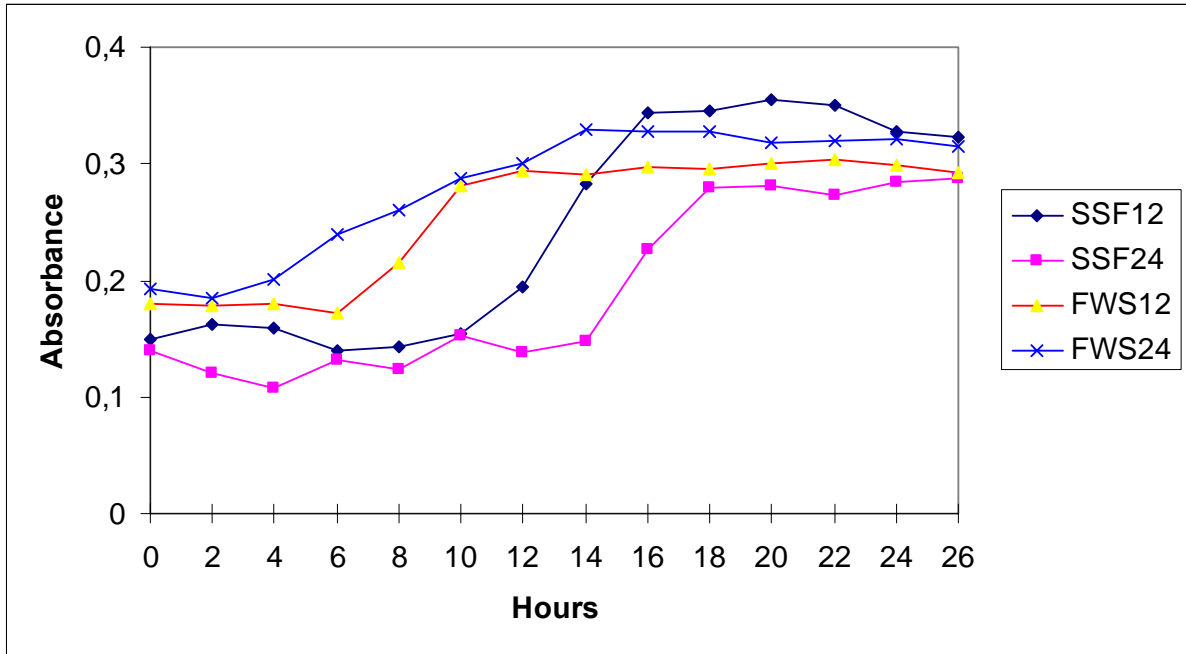
Σχήμα 4.3. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υγροβιότοπους για το TN



Σχήμα 4.4. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υδροβιότοπους για το NO₃



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υδροβιότοπους για το TP



Σχήμα 4.6. Διάγραμμα μέτρησης HRT με την βοήθεια χρωστικής ουσίας και για τους τέσσερεις υγροβιότοπους (Tracer test study).

Βιβλιογραφία

1. Barbosa AE. and Hvitved-Jacobsen T (1999). Highway runoff and potential for removal of heavy metals in an infiltration pond in Portugal. *Science of The Total Environment*, 235 (1-3): 151-159
2. Bulc T, Slak AS (2003). Performance of constructed wetland for highway runoff treatment, *Water Science and Technology*, 48 (2): 315-322
3. Dialynas G, Kefalakis N, Dialynas M, Angelakis A (2002) Performance of an innovative FWS constructed wetland in Crete, Greece. *Water Science and Technology*, 46 (4-5): 355-360
4. EPA (2002). *Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment, Design Manual*, Environmental Protection Agency - USA.
5. Heyvaert AC, Reuter JE, Goldman CR (2006). Subalpine, cold climate, stormwater treatment with a constructed surface flow wetland. *Journal of the American Water Resources Association*, 42 (1): 45-54
6. Karvelas M, Katsoyiannis A, Samara C. (2003). Occurrence and fate of heavy metals in the wastewater treatment process, *Chemosphere*, 53 (10): 1201-1210
7. Maltby L, Forrow Dm, Boxall Aba, Calow P, Betton Ci (1995) *The Effects Of Motorway Runoff On Fresh-Water Ecosystems: 1. Field-Study*, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14 (6): 1079-1092
8. Manios T, Tsanis IK (2006). Evaluating water resources availability and wastewater reuse importance in the water resources management of small Mediterranean municipal districts, *Resources Conservation and Recycling*, 47 (3): 245-259
9. Mitchell GF, Hunt CL, Su YM (2002). Mitigating highway runoff constituents via a wetland. *Soil Mechanics 2002, Transportation Research Record*, (1808): 127-133.
10. Mungur AS, Shutes RBE, Revitt DM, House MA (1995). An assessment of metal removal from highway runoff by a natural wetland, *Water Science and Technology*, 32 (3): 169-175
11. Prestes EC, dos Anjos VE, Sodre FF, Grassi MT (2006). Copper, lead and cadmium loads and Behavior in urban stormwater runoff in Curitiba, Brazil, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 17 (1): 53-60

12. Pontier H, Williams JB, May E (2004). Progressive changes in water and sediment quality in a wetland system for control of highway runoff, *Science of The Total Environment*, 319 (1-3): 215-224
13. Pontier H, Williams JB, May E (2004). Progressive changes in water and sediment quality in a wetland system for control of highway runoff, *Science of The Total Environment*, 319 (1-3): 215-224
14. Ragab R, Rosier P, Dixon A, Bromley J, Cooper JD (2003). Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation, *Hydrological Processes*, 17 (12): 2423-2437
15. Revitt DM, Shutes RBE, Jones RH, Forshaw M, Winter B (2004). The performances of vegetative treatment systems for highway runoff during dry and wet conditions, *Science of the Total Environment*, 334: 261-270
16. Scholes L, Shutes RBE, Revitt DM, Forshaw M, Purchase D (1998). The treatment of metals in urban runoff by constructed wetlands, *Science of the Total Environment*, 214 (1-3): 211-219
17. Shutes, R.B.E., Revitt, D.M., Mungur, A.S. and Scholes, L.N.L. 1997. Design of wetland systems for the treatment of urban runoff, *Water Quality International*, March/April, : 35 - 38.
18. Shutes, R.B.E., Revitt, D.M., Lageberg, I.M. and Barraud, V.C.E. 1999. The design of vegetated constructed wetlands for the treatment of highway runoff. *Science of the Total Environment*, 235 : 189 - 187.
19. Soderqvist T (2002). Constructed wetlands as nitrogen sinks in southern Sweden: An empirical analysis of cost determinants. *Ecological Engineering*, 19 (2): 161-173
20. Solano ML, Soriano P, Ciria MP (2004). Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages, *Biosystems Engineering*, 87 (1): 109-118
21. Tchobanoglous, G.; Burton, F. L. (1991) *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. (3rd edn.) Metcalf and Eddy, Inc.: San Francisco, California, USA.
22. Tuccillo ME (2006). Size fractionation of metals in runoff from residential and highway storm sewers, *Science of the Total Environment*, 355 (1-3): 288-300
23. Tsonis, S. (2004) *Επεξεργασία Λυμάτων, Παπασωτηρίου*
24. WRc and Seven Trent Water Plc, 1996. *Reed Beds and Constructed Wetlands for waste water treatment*, WRc, Swindon, England..

Κατάλογος Πινάκων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Πίνακας 1.1 Βασικές αρχές των διεργασιών που υπάρχουν σε ένα φυσικό σύστημα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Πίνακας 2.1 Υλικά κατασκευής δύο υδροβιότοπων επιφανειακής ροής FWS

Πίνακας 2.2 Μέγεθος, πορώδες, διαστάσεις, ποσότητα πληρωτικών υλικών υδροβιότοπων SSF

Πίνακας 2.3 Υλικά κατασκευής δυο υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής SSF

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 3.1. Τιμές σχεδιασμού υδροβιότοπων, μετρηθείσες τιμές μεταξύ Σεπτεμβρίου 2005 και Αυγούστου 2006.

Πίνακας 3.2. Επεισόδια βροχής μεταξύ Σεπτεμβρίου 2006 και Αυγούστου 2006

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πίνακας 4.1. Τιμές Ποιοτικών Χαρακτηριστικών Παραμέτρων για την εισροή και τις εκροές από τους τέσσερεις υδροβιότοπους.

Πίνακας 4.2. Συγκεντρώσεις Βαρέων Μετάλλων σε Εισροή και στις αντίστοιχες Εκροές (Μέση τιμή).

Πίνακας 4.3. Μέση ποσοστιαία(%) απομάκρυνση των ρύπων.

Κατάλογος Σχημάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σχήμα 1.1 Σύστημα Βραδείας Εφαρμογής

Σχήμα 1.2 Σχηματική παρουσίαση συστήματος τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής (SSF)

Σχήμα 1.3 Σχηματική παρουσίαση συστημάτων ελεύθερης επιφάνειας νερού (FWS)

Σχήμα 1.4 Σύστημα επιπλεόντων υδροχαρών φυτών

Σχήμα 1.5 Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών απομάκρυνσης του BOD

Σχήμα 1.6 Περιγραφή μηχανισμών απομάκρυνσης και επαναιώρησης TSS

Σχήμα 1.7 Περιγραφή μηχανισμών απομάκρυνσης αζώτου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2.1. Τοπογραφικό διάγραμμα του δρόμου. Με τον κύκλο και το βέλος το σημείο συλλογής της εκροής HRO.

Σχήμα 2.2. Γενική διάταξη των υδροβιότοπων σε κάτοψη

Σχήμα 2.3. Κατά μήκος και πλάτος τομή υδροβιότοπων επιφανειακής ροής FWS

Σχήμα 2.4. Κατά μήκος και πλάτος τομή υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής SSF

Σχέδιο 2.5 Κάτοψη και κατά μήκος τομή του Διαύλου Parshall

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχήμα 3.1. Διάγραμμα ύψους Βροχοπτώσεων (mm) και εκροής HRO με βάση τις μετρήσεις μεταξύ Σεπτεμβρίου 2005 – Αυγούστου 2006

Σχήμα 3.2 Διαγράμματα ύψους Βροχ/σεων (mm) και εκροής HRO με βάση τις μετρήσεις μεταξύ Σεπ 2005–Αυγ 2006, ταξιν/ση κατά θερμοκρασία περιβάλλοντος

Σχήμα 3.3. Διάγραμμα εκτίμησης Συντελεστή Απορροής RR με βάση τα επεισόδια βροχής ετησίως (days).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήμα 4.1. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υδροβιότοπους για το COD

Σχήμα 4.2. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υδροβιότοπους για το TSS

Σχήμα 4.3. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υδροβιότοπους για το TN

Σχήμα 4.4. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υδροβιότοπους για το NO₃

Σχήμα 4.5. Διάγραμμα Σύγκρισης Εισροής και των αντίστοιχων τεσσάρων Εκροών από τους υδροβιότοπους για το TP

Σχήμα 4.6. Διάγραμμα μέτρησης HRT με την βοήθεια χρωστικής ουσίας και για τους τέσσερεις υδροβιότοπους (Tracer test study).

Κατάλογος εικόνων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Φώτο 2.1 Ογκομετρητής υδάτων Parshal