



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ



Λειβαδάρος Δημήτριος

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

Επιβλέπων: Νουτσόπουλος Κωνσταντίνος

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ
ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΤΕΧΝΗΤΟΥΣ
ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΟΥΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ**

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Λειβαδάρος Δημήτριος
Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

Επιβλέπων: Νουτσόπουλος Κωνσταντίνος

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στην Αθήνα την περίοδο Ιουλίου 2016 – Φεβρουαρίου 2017 στα πλαίσια του διεπιστημονικού - διατμηματικού προγράμματος «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων» της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Νουτσόπουλο, ο οποίος με εμπιστεύτηκε για δεύτερη φορά την τελευταία διετία και μου έδωσε την ευκαιρία να εργαστώ μαζί του υπό το πρίσμα μιας διπλωματικής εργασίας που άπτεται θεμάτων της περιβαλλοντικής τεχνολογίας και, ειδικότερα, της διαδικασίας επεξεργασίας των λυμάτων με εναλλακτικές μεθόδους. Η καθοδήγησή και οι πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια διεκπεραίωσης της εργασίας έφεραν ένα ολοκληρωμένο από κάθε άποψη αποτέλεσμα. Ευχαριστώ, επίσης, όλους τους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς συμφοιτητές και φίλους, με τους οποίους η συνεργασία και η συνύπαρξη εντός και εκτός της σχολής υπήρξε καθοριστικής σημασίας για όλες τις προσωπικές και ακαδημαϊκές επιτυχίες των τελευταίων χρόνων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και την παροχή όλων των απαραίτητων εφοδίων για να πετύχω στη ζωή μου.

Περίληψη

Η διαρκώς αυξανόμενη εφαρμογή των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων την τελευταία εικοσαετία, εκτός του πλεονεκτήματος της επεξεργασίας λυμάτων με χαμηλό ενεργειακό κόστος και δίχως υψηλές τεχνολογικές απαιτήσεις λειτουργίας, έφερε στο προσκήνιο και μια αρνητική πτυχή της εν λόγω επεξεργασίας, την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία καταρτίστηκε μεθοδολογία υπολογισμού της απαιτούμενης επιφάνειας και της μεταβολής των ρυπαντικών φορτίων για την επεξεργασία λυμάτων σε συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων, καθώς και μοντέλο υπολογισμού των άμεσα εκπεμπόμενων αερίων: μεθάνιο (CH_4), υποξείδιο του αζώτου (N_2O), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Οι τεχνητοί υγροβιότοποι ελεύθερης επιφανειακής ροής (FWS CWs) αποδεικνύεται ότι απαιτούν κατά 56% μικρότερη επιφάνεια επεξεργασίας ανά ισοδύναμο κάτοικο ($5,3 \text{ m}^2/\text{i.κ.}$) από τους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (HSSF CWs) ($12,2 \text{ m}^2/\text{i.κ.}$) – επιφάνεια που προκύπτει βάσει του κριτηρίου απομάκρυνσης του φορτίου ολικού αζώτου για την επίτευξη του κριτηρίου εκροής σχετικά με το άζωτο, όπως ορίζεται από την Οδηγία 91/271/EE. Οι άμεσες αέριες εκπομπές κυμαίνονται κατά μέσο όρο περί τα 84 και 212 $\text{kg CO}_{2,\text{eq}}/\text{i.κ.}/\text{yr}$, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (από τους 10 στους $25 \text{ }^\circ\text{C}$) μπορεί να τις αυξήσει έως και 16%, ενώ η αυστηροποίηση του ορίου εξόδου για το ολικό άζωτο (από τα 20 στα 5 mg/L) προκαλεί αύξηση κατά 19% και 13%, για τους HSSF και FWS CWs αντιστοίχως. Σε κάθε περίπτωση προκύπτει ότι οι τεχνητοί υγροβιότοποι συνεισφέρουν περισσότερο στα αέρια του θερμοκηπίου μέσω του μεθανίου, με τους FWS CWs να εκπέμπουν τουλάχιστον τέσσερις φορές περισσότερο CH_4 από τους HSSF CWs. Αντιπαραβάλλοντας, τέλος, τους τεχνητούς υγροβιότοπους με ανάλογες συμβατικές και εναλλακτικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων σε όρους ανθρακικού αποτυπώματος, φαίνεται ότι οι τεχνητοί υγροβιότοποι κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής (VSSF CWs) αποτελούν μαζί με τους HSSF CWs και τους αντιδραστήρες SBR που δέχονται πρωτοβάθμια επεξεργασμένα υγρά απόβλητα την καλύτερη εναλλακτική επιλογή επεξεργασίας, ενώ διατάξεις όπως οι συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και οι FWS CWs λογίζονται μεταξύ των δυσμενέστερων σε όρους αέριων εκπομπών.

Abstract

The growing implementation of natural systems for wastewater treatment in recent years, besides the advantage of a procedure with high energy efficiency and the lack of obligation of integrating technologically advanced solutions for operational reasons, evoked questions about their impact in greenhouse gases (GHG) emissions. In the current diploma thesis, a methodology formulation for the estimation of the treatment surface, the pollutants removal and the direct gaseous emissions (CH_4 , N_2O , CO_2) in constructed wetlands during wastewater treatment process was conducted. Free water surface constructed wetlands (FWS CWs) demand 56% less treatment surface per person equivalent (PE) ($5,3 \text{ m}^2/\text{PE}$) than horizontal subsurface flow constructed wetlands (HSSF CWs) do ($12,2 \text{ m}^2/\text{PE}$) – the treatment surface is calculated based on the total nitrogen (TN) removal criterion in order to answer the maximum TN effluent concentration set by the Council Directive 91/271/EEC. The average direct gaseous emissions equal 84 and 212 $\text{kg CO}_{2,\text{eq}}/\text{PE}/\text{yr}$, a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ raise (from 10 to $25 \text{ }^\circ\text{C}$) can increase them by 16%, while a decrease in the maximum TN effluent concentration (from 20 to 5 mg/L) causes an increase by 19% and 13%, in HSSF and FWS CWs respectively. In any case the arising result is that CWs contribute more to GHG emissions through CH_4 , with CH_4 production in FWS CWs being four times greater than HSSF CWs production. Finally, collating CWs with commensurable conventional and alternative wastewater treatment facilities based on their carbon footprint, it seems that vertical subsurface flow constructed wetlands (VSSF CWs), HSSF CWs which receive primary treated wastewater and sequential batch reactors (SBR) compose the best alternative solution for wastewater treatment, whereas units such as the conventional wastewater treatment plants and FWS CWs are considered among the most adverse ones regarding gaseous emissions.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	1
Κατάλογος Σχημάτων	6
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Γενικά.....	9
1.2 Σκοπός Εργασίας	10
1.3 Διάρθρωση Εργασίας.....	11
Κεφάλαιο 2. Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων και Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου	12
2.1 Φυσικά Συστήματα	12
2.1.1 Ορισμός και Διεργασίες Φυσικών Συστημάτων.....	12
2.1.2 Κατηγοριοποίηση Φυσικών Συστημάτων.....	13
2.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι (Constructed Wetlands – CWs)	15
2.2.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιφανειακής Ροής (FWS).....	16
2.2.1.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Αναδυόμενων Φυτών.....	18
2.2.1.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Βυθισμένων Φυτών.....	19
2.2.1.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιπλεόντων Φυτών.....	20
2.2.1.4 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιπλεόντων Φυτών που το Ριζικό τους Σύστημα Αναπτύσσεται σε Υπόστρωμα.....	20
2.2.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Υποεπιφανειακής Ροής (SWS)	21
2.2.2.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής (HSSF) .	21
2.2.2.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Κατακόρυφης Υποεπιφανειακής Ροής (VSSF)	23
2.3 Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Ρύπων σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους.....	25
2.3.1 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου	25
2.3.1.1 Αερόβια Αποσύνθεση	26
2.3.1.2 Αναερόβια Αποσύνθεση	27
2.3.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	28
2.3.2.1 Πτητικοποίηση Αμμωνίας	29
2.3.2.2 Αμμωνιοποίηση (Ανοργανοποίηση).....	29
2.3.2.3 Νιτροποίηση/Απονιτροποίηση.....	30
2.3.2.4 Πρόσληψη από τα Φυτά	33
2.3.2.5 Προσρόφηση από το Εδαφικό Υπόβαθρο	34

2.3.3 Απομάκρυνση Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS)	35
2.3.3.1 Απομάκρυνση Στερεών σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους Επιφανειακής Ροής.....	35
2.3.3.2 Απομάκρυνση Στερεών σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους Υποεπιφανειακής Ροής	36
2.3.4 Απομάκρυνση Φωσφόρου	37
2.3.5 Απομάκρυνση Παθογόνων Παραγόντων.....	38
2.3.6 Απομάκρυνση Μετάλλων	40
2.4 Εκπομπές Αερίων σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους.....	40
2.4.1 Παράγοντες Επίδρασης και Ποσοτικοποίηση Εκπομπών	40
2.4.2 Διεθνείς Αναφορές – Βάση Δεδομένων.....	42
2.4.2.1 Παραγωγή και Χαρακτηριστικά Αέριων Εκπομπών	50
2.4.2.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Βιβλιογραφικής Έρευνας	51
2.4.2.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Βιβλιογραφικής Έρευνας.....	53
Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία Σχεδιασμού Τεχνητών Υγροβιότοπων και Υπολογισμού Αέριων Εκπομπών	60
3.1 Δεδομένα Εισόδου και Στόχος Επεξεργασίας Λυμάτων	60
3.2 Διαστασιολόγηση Τεχνητών Υγροβιότοπων	63
3.2.1 Διαστασιολόγηση Συστημάτων Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής	63
3.2.1.1 Κριτήριο Απομάκρυνσης Οργανικού Φορτίου.....	63
3.2.1.2 Ικανότητα Μεταφοράς Απαιτούμενης Ποσότητας Οξυγόνου.....	64
3.2.1.3 Κριτήριο Απομάκρυνσης Ολικού Αζώτου	64
3.2.1.4 Επιλογή Επιφάνειας Τεχνητού Υγροβιότοπου	65
3.2.1.5 Ορισμός Γεωμετρίας Τεχνητού Υγροβιότοπου	65
3.2.2 Διαστασιολόγηση Συστημάτων Επιφανειακής Ροής.....	66
3.2.2.1 Κριτήριο Απομάκρυνσης Οργανικού Φορτίου.....	67
3.2.2.2 Κριτήριο Απομάκρυνσης Ολικά Αιωρούμενων Στερεών.....	67
3.2.2.3 Κριτήριο Απομάκρυνσης Ολικού Αζώτου	68
3.2.2.4 Επιλογή Επιφάνειας Τεχνητού Υγροβιότοπου	69
3.2.2.5 Ορισμός Γεωμετρίας Τεχνητού Υγροβιότοπου	70
3.3 Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου από Τεχνητούς Υγροβιότοπους.....	70
3.3.1 Μεθοδολογικά Ζητήματα Υπολογισμού Εκπομπών	70
3.3.2 Επιλογή Μεθοδολογίας Υπολογισμού Εκπομπών.....	71
3.3.2.1 Εκτίμηση Εκπομπών Μεθανίου.....	71

3.3.2.2 Εκτίμηση Εκπομπών Υποξειδίου του Αζώτου	71
3.3.2.3 Συντελεστές Εκπομπής	72
3.3.2.4 Δεδομένα Δραστηριότητας	74
3.3.2.5 Συνοχή Χρονοσειράς Δεδομένων Εκπομπής.....	75
3.3.2.6 Αβεβαιότητες	76
3.4 Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα από Τεχνητούς Υγροβιότοπους	77
3.4.1 Παραγωγή CO ₂	77
3.4.1.1 Παραγωγή CO ₂ λόγω Οξειδωσης της Οργανικής Ύλης	77
3.4.1.2 Παραγωγή CO ₂ λόγω Απονιτροποίησης	78
3.4.1.3 Παραγωγή CO ₂ λόγω Φθοράς Βιομάζας.....	78
3.4.2 Κατανάλωση CO ₂	79
3.4.3 Εκπομπή CO ₂	81
3.5 Αναγωγή Αέριων Εκπομπών σε Όρους Ισοδύναμου του Διοξειδίου του Άνθρακα (CO _{2,eq}).....	81
3.5.1 Ανθρακικό Αποτύπωμα	81
3.5.2 Αναγωγή Αέριων Εκπομπών Τεχνητών Υγροβιότοπων.....	82
Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων	84
4.1 Εισαγωγή	84
4.2 Εκροή Τεχνητών Υγροβιότοπων Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής (HSSF CWs)	86
4.2.1 Σενάριο 1: Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Κανονικό Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία	86
4.2.1.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων.....	86
4.2.1.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων.....	87
4.2.1.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων.....	88
4.2.1.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων.....	89
4.2.1.5 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων.....	90
4.2.1.6 Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων.....	91
4.2.2 Σενάριο 2: Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Ευαίσθητο Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία	92
4.2.2.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων.....	92
4.2.2.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων.....	93
4.2.2.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων.....	94
4.2.2.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων.....	95

4.2.2.5	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων.....	96
4.2.2.6	Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων.....	97
4.2.3	Σενάριο 3: Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Κανονικό Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία.....	98
4.2.3.1	Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων.....	98
4.2.3.2	Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων.....	99
4.2.3.3	Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων.....	100
4.2.3.4	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων.....	101
4.2.3.5	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων.....	102
4.2.3.6	Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων.....	103
4.2.4	Σενάριο 4: Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Ευαίσθητο Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία	104
4.2.4.1	Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων.....	104
4.2.4.2	Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων.....	105
4.2.4.3	Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων.....	107
4.2.4.4	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων.....	108
4.2.4.5	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων.....	109
4.2.4.6	Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων.....	110
4.2.5	Συναξιολόγηση Αποτελεσμάτων	111
4.3	Εκροή Τεχνητών Υδροβιότοπων Ροής Ελεύθερης Επιφάνειας (FWS CWs) ..	123
4.3.1	Σενάριο 1: Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Κανονικό Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία	123
4.3.1.1	Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων.....	123
4.3.1.2	Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων.....	124
4.3.1.3	Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων.....	125
4.3.1.4	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων.....	126
4.3.1.5	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων.....	128
4.3.1.6	Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων.....	129
4.3.2	Σενάριο 2: Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Ευαίσθητο Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία	130
4.3.2.1	Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων.....	130
4.3.2.2	Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων.....	131
4.3.2.3	Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων.....	132
4.3.2.4	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων.....	133

4.3.2.5	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων.....	135
4.3.2.6	Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων.....	136
4.3.3	Σενάριο 3: Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Κανονικό Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία.....	137
4.3.3.1	Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων.....	137
4.3.3.2	Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων.....	138
4.3.3.3	Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων.....	139
4.3.3.4	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων.....	140
4.3.3.5	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων.....	142
4.3.3.6	Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων.....	143
4.3.4	Σενάριο 4: Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Ευαίσθητο Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία	144
4.3.4.1	Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων.....	144
4.3.4.2	Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων.....	145
4.3.4.3	Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων.....	146
4.3.4.4	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων.....	147
4.3.4.5	Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων.....	149
4.3.4.6	Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων.....	150
4.3.5	Συναξιολόγηση Αποτελεσμάτων	151
4.4	Συγκριτική Αξιολόγηση Τεχνητών Υδροβιότοπων	165
4.4.1	Απαιτούμενη Επιφάνεια.....	165
4.4.2	Απομάκρυνση Ρυπαντικών Φορτίων	166
4.4.3	Αέριες Εκπομπές.....	167
4.4.3.1	Αναγωγή Αέριων Εκπομπών	167
4.4.3.2	Συντελεστής Εκπομπής Αερίων.....	169
4.4.3.3	Ανθρακικό Αποτύπωμα Συμβατικών και Εναλλακτικών Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων.....	171
Κεφάλαιο 5.	Συμπεράσματα.....	179
	Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	184

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Σύγκριση Συμβατικών και Φυσικών Συστημάτων Επεξεργασίας	13
Πίνακας 2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα FWS CWs	18
Πίνακας 2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα HSSF CWs	23
Πίνακας 2.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα VSSF CWs	24
Πίνακας 2.5 Λογαριθμική Μείωση ή Απενεργοποίηση των Παθογόνων ανά Κατηγορία Συστήματος Επεξεργασίας Λυμάτων (WHO, 2006).....	39
Πίνακας 2.6 Επιλεγμένοι Παράγοντες Επίδρασης Εκπομπών CH ₄ και N ₂ O σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους (IPCC, 2006)	41
Πίνακας 2.7 Τιμές TOC _{εισ} και TN _{εισ} με τις Αντίστοιχες Τιμές Εκπομπών CH ₄ και N ₂ O (IPCC, 2006)	42
Πίνακας 2.8 Φορτία και Εκπομπές Αερίων από HSSF Τεχνητούς Υγροβιότοπους ...	44
Πίνακας 2.9 Φορτία και Εκπομπές Αερίων από VSSF Τεχνητούς Υγροβιότοπους ...	46
Πίνακας 2.10 Φορτία και Εκπομπές Αερίων από FWS Τεχνητούς Υγροβιότοπους...	48
Πίνακας 3.1 Ρυπαντικά Φορτία Εισερχόμενων Λυμάτων (Ανδρεαδάκης, et al., 2008)	60
Πίνακας 3.2 Ρυπαντικά Φορτία Εισερχόμενων Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένων Λυμάτων	61
Πίνακας 3.3 Συντελεστής Διόρθωσης CH ₄ ανά Τύπο Τεχνητού Υγροβιότοπου (IPCC, 2006)	73
Πίνακας 3.4 Εύρος Αβεβαιότητας Παραμέτρων Υπολογισμού Εκπομπών CH ₄ (IPCC, 2006)	76
Πίνακας 3.5 Εύρος Αβεβαιότητας Παραμέτρων Υπολογισμού Εκπομπών N ₂ O (IPCC, 2006)	77
Πίνακας 3.6 Το Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη για Αέρια του Θερμοκηπίου (IPCC, 2013).....	82
Πίνακας 4.1 Ποιοτική Σύσταση Εισερχόμενων Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένων Αστικών Υγρών Αποβλήτων	85
Πίνακας 4.2 Ποιοτική Σύσταση Εισερχόμενων Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένων Αστικών Υγρών Αποβλήτων	85
Πίνακας 4.3 Εμβαδόν HSSF CW για 100 ι.κ.	86
Πίνακας 4.4 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 100 ι.κ.	86
Πίνακας 4.5 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 100 ι.κ.	87
Πίνακας 4.6 Εμβαδόν HSSF CW για 200 ι.κ.	87
Πίνακας 4.7 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 200 ι.κ.	87
Πίνακας 4.8 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 200 ι.κ.	88
Πίνακας 4.9 Εμβαδόν HSSF CW για 500 ι.κ.	88
Πίνακας 4.10 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 500 ι.κ.	88
Πίνακας 4.11 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 500 ι.κ.	89
Πίνακας 4.12 Εμβαδόν HSSF CW για 1000 ι.κ.	89
Πίνακας 4.13 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1000 ι.κ.	89
Πίνακας 4.14 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1000 ι.κ.	90

Πίνακας 4.15 Εμβαδόν HSSF CW για 1500 ι.κ.	90
Πίνακας 4.16 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1500 ι.κ.	90
Πίνακας 4.17 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1500 ι.κ.	91
Πίνακας 4.18 Εμβαδόν HSSF CW για 2000 ι.κ.	91
Πίνακας 4.19 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 2000 ι.κ.	91
Πίνακας 4.20 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 2000 ι.κ.	92
Πίνακας 4.21 Εμβαδόν HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2).....	92
Πίνακας 4.22 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2).....	92
Πίνακας 4.23 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2).....	93
Πίνακας 4.24 Εμβαδόν HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2).....	93
Πίνακας 4.25 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2).....	94
Πίνακας 4.26 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2).....	94
Πίνακας 4.27 Εμβαδόν HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2).....	94
Πίνακας 4.28 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2).....	95
Πίνακας 4.29 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2).....	95
Πίνακας 4.30 Εμβαδόν HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2).....	95
Πίνακας 4.31 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2).....	96
Πίνακας 4.32 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2).....	96
Πίνακας 4.33 Εμβαδόν HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2).....	96
Πίνακας 4.34 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2).....	97
Πίνακας 4.35 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2).....	97
Πίνακας 4.36 Εμβαδόν HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2).....	97
Πίνακας 4.37 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2).....	98
Πίνακας 4.38 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2).....	98
Πίνακας 4.39 Εμβαδόν HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3).....	98
Πίνακας 4.40 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3).....	99
Πίνακας 4.41 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3).....	99
Πίνακας 4.42 Εμβαδόν HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3).....	100
Πίνακας 4.43 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3).....	100
Πίνακας 4.44 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3).....	100
Πίνακας 4.45 Εμβαδόν HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3).....	101
Πίνακας 4.46 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3).....	101
Πίνακας 4.47 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3).....	101
Πίνακας 4.48 Εμβαδόν HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3).....	102
Πίνακας 4.49 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3).....	102
Πίνακας 4.50 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3).....	102
Πίνακας 4.51 Εμβαδόν HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3).....	103
Πίνακας 4.52 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3).....	103
Πίνακας 4.53 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3).....	103
Πίνακας 4.54 Εμβαδόν HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3).....	104
Πίνακας 4.55 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3).....	104
Πίνακας 4.56 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3).....	104
Πίνακας 4.57 Εμβαδόν HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4).....	105
Πίνακας 4.58 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4).....	105

Πίνακας 4.59 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4).....	105
Πίνακας 4.60 Εμβαδόν HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4).....	106
Πίνακας 4.61 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4).....	106
Πίνακας 4.62 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4).....	106
Πίνακας 4.63 Εμβαδόν HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4).....	107
Πίνακας 4.64 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4).....	107
Πίνακας 4.65 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4).....	107
Πίνακας 4.66 Εμβαδόν HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4).....	108
Πίνακας 4.67 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4).....	108
Πίνακας 4.68 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4).....	108
Πίνακας 4.69 Εμβαδόν HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4).....	109
Πίνακας 4.70 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4).....	109
Πίνακας 4.71 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4).....	109
Πίνακας 4.72 Εμβαδόν HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4).....	110
Πίνακας 4.73 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4).....	110
Πίνακας 4.74 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4).....	110
Πίνακας 4.75 Απαιτούμενη Επιφάνεια και Μέση Απομάκρυνση Οργανικών και Ολικού Αζώτου από HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.....	111
Πίνακας 4.76 Απαιτούμενες Επιφάνειες HSSF CW ανά Πληθυσμό και Σενάριο	113
Πίνακας 4.77 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου και Ολικού Αζώτου σε HSSF CW για το σενάριο 1	114
Πίνακας 4.78 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.	116
Πίνακας 4.79 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 1).....	116
Πίνακας 4.80 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 2).....	117
Πίνακας 4.81 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 3).....	118
Πίνακας 4.82 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 4).....	118
Πίνακας 4.83 Αέριες Εκπομπές για Πιθανά Θερμοκρασιακά Δεδομένα Λυμάτων από HSSF CW για 100 ι.κ.	121
Πίνακας 4.84 Αέριες Εκπομπές για Διάφορες Τιμές Εκροής του Ολικού Αζώτου από HSSF CW για 100 ι.κ. στους 15 °C	122
Πίνακας 4.85 Εμβαδόν FWS CW για 100 ι.κ.....	123
Πίνακας 4.86 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 100 ι.κ.....	124
Πίνακας 4.87 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 100 ι.κ.	124
Πίνακας 4.88 Εμβαδόν FWS CW για 200 ι.κ.....	124
Πίνακας 4.89 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 200 ι.κ.....	125
Πίνακας 4.90 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 200 ι.κ.	125
Πίνακας 4.91 Εμβαδόν FWS CW για 500 ι.κ.....	126
Πίνακας 4.92 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 500 ι.κ.....	126
Πίνακας 4.93 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 500 ι.κ.	126
Πίνακας 4.94 Εμβαδόν FWS CW για 1000 ι.κ.....	127
Πίνακας 4.95 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1000 ι.κ.....	127
Πίνακας 4.96 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1000 ι.κ.	127
Πίνακας 4.97 Εμβαδόν FWS CW για 1500 ι.κ.....	128
Πίνακας 4.98 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1500 ι.κ.....	128

Πίνακας 4.99 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1500 ι.κ.	129
Πίνακας 4.100 Εμβαδόν FWS CW για 2000 ι.κ.	129
Πίνακας 4.101 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 2000 ι.κ.	129
Πίνακας 4.102 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 2000 ι.κ.	130
Πίνακας 4.103 Εμβαδόν FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2)	130
Πίνακας 4.104 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2)	131
Πίνακας 4.105 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2)	131
Πίνακας 4.106 Εμβαδόν FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2)	131
Πίνακας 4.107 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2)	132
Πίνακας 4.108 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2)	132
Πίνακας 4.109 Εμβαδόν FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2)	133
Πίνακας 4.110 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2)	133
Πίνακας 4.111 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2)	133
Πίνακας 4.112 Εμβαδόν FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2)	134
Πίνακας 4.113 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2)	134
Πίνακας 4.114 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2)	134
Πίνακας 4.115 Εμβαδόν FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2)	135
Πίνακας 4.116 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2)	135
Πίνακας 4.117 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2)	136
Πίνακας 4.118 Εμβαδόν FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2)	136
Πίνακας 4.119 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2)	136
Πίνακας 4.120 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2)	137
Πίνακας 4.121 Εμβαδόν FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3)	137
Πίνακας 4.122 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3)	138
Πίνακας 4.123 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3)	138
Πίνακας 4.124 Εμβαδόν FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3)	138
Πίνακας 4.125 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3)	139
Πίνακας 4.126 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3)	139
Πίνακας 4.127 Εμβαδόν FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3)	140
Πίνακας 4.128 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3)	140
Πίνακας 4.129 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3)	140
Πίνακας 4.130 Εμβαδόν FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3)	141
Πίνακας 4.131 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3)	141
Πίνακας 4.132 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3)	141
Πίνακας 4.133 Εμβαδόν FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3)	142
Πίνακας 4.134 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3)	142
Πίνακας 4.135 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3)	143
Πίνακας 4.136 Εμβαδόν FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3)	143
Πίνακας 4.137 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3)	143
Πίνακας 4.138 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3)	144
Πίνακας 4.139 Εμβαδόν FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4)	144
Πίνακας 4.140 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4)	145
Πίνακας 4.141 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4)	145
Πίνακας 4.142 Εμβαδόν FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4)	145

Πίνακας 4.143 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4)	146
Πίνακας 4.144 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4).....	146
Πίνακας 4.145 Εμβαδόν FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4)	147
Πίνακας 4.146 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4)	147
Πίνακας 4.147 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4).....	147
Πίνακας 4.148 Εμβαδόν FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4)	148
Πίνακας 4.149 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4)	148
Πίνακας 4.150 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4).....	148
Πίνακας 4.151 Εμβαδόν FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4)	149
Πίνακας 4.152 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4)	149
Πίνακας 4.153 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4).....	150
Πίνακας 4.154 Εμβαδόν FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4)	150
Πίνακας 4.155 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4)	150
Πίνακας 4.156 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4).....	151
Πίνακας 4.157 Απαιτούμενη Επιφάνεια και Μέση Απομάκρυνση Οργανικών, Ολικού Αζώτου και Ολικά Αιωρούμενων Στερεών από FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.	151
Πίνακας 4.158 Απαιτούμενες Επιφάνειες FWS CW ανά Πληθυσμό και Σενάριο....	154
Πίνακας 4.159 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου και Ολικού Αζώτου σε FWS CW για το σενάριο 1	155
Πίνακας 4.160 Αέριες Εκπομπές από FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.....	157
Πίνακας 4.161 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 1).....	157
Πίνακας 4.162 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 2).....	158
Πίνακας 4.163 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 3).....	159
Πίνακας 4.164 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 4).....	159
Πίνακας 4.165 Αέριες Εκπομπές για Πιθανά Θερμοκρασιακά Δεδομένα Λυμάτων από FWS CW για 100 ι.κ.....	162
Πίνακας 4.166 Αέριες Εκπομπές για Διάφορες Τιμές Εκροής του Ολικού Αζώτου από FWS CW για 100 ι.κ. στους 15 °C	163
Πίνακας 4.167 Απαιτούμενη Επιφάνεια CW Ανηγμένη ανά Ισοδύναμο Κάτοικο ...	165
Πίνακας 4.168 Απομάκρυνση Φορτίου BOD και TN ανά Μονάδα Επιφάνειας σε HSSF και FWS CWs.....	167
Πίνακας 4.169 Ανηγμένες Εκπομπές Αερίων από HSSF και FWS CWs για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων	168
Πίνακας 4.170 Συντελεστές Εκπομπής Αερίων από HSSF και FWS CWs	171
Πίνακας 4.171 Άμεσες Αέριες Εκπομπές Συμβατικών και Εναλλακτικών Συστημάτων Επεξεργασίας Λυμάτων	173

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Λειτουργίες Συστήματος Επιφανειακής Απορροής (Αγγελάκης & Τσομπάνογλου, 1995).....	14
Σχήμα 2.2 Επαμφοτερίζουσα Τεχνητή Λίμνη (Tilley, et al., 2014)	14
Σχήμα 2.3 Τεχνητός Υγροβιότοπος Επιφανειακής Ροής (Stauffer, 2012)	16
Σχήμα 2.4 Τεχνητός Υγροβιότοπος Αναδυόμενων Φυτών (Vymazal & Kropefelova, 2008)	19
Σχήμα 2.5 Τεχνητός Υγροβιότοπος Βυθισμένων Φυτών (Vymazal & Kropefelova, 2008)	19
Σχήμα 2.6 Τεχνητός Υγροβιότοπος Επιπλεόντων Φυτών (Vymazal & Kropefelova, 2008)	20
Σχήμα 2.7 Τεχνητός Υγροβιότοπος Επιπλεόντων Φυτών με Ριζικό Σύστημα στο Υπόστρωμα (Vymazal & Kropefelova, 2008).....	21
Σχήμα 2.8 Τεχνητός Υγροβιότοπος Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012)	22
Σχήμα 2.9 Τεχνητός Υγροβιότοπος Κατακόρυφης Υποεπιφανειακής Ροής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012)	24
Σχήμα 2.10 Απομάκρυνση οργανικών ρύπων στο εσωτερικό τεχνητών υγροβιότοπων (Giraldo & Zarate, 2001)	26
Σχήμα 2.11 Ο κύκλος του άνθρακα σε σύστημα τεχνητού υγροβιότοπου υποεπιφανειακής ροής (Ακρατος, 2006)	28
Σχήμα 2.12 Ο κύκλος του αζώτου σε τεχνητό υγροβιότοπο υποεπιφανειακής ροής (Ακρατος, 2006).....	35
Σχήμα 2.13 Κύκλος Φωσφόρου σε Τεχνητό Υγροβιότοπο Υποεπιφανειακής Ροής (Ακρατος, 2006).....	38
Σχήμα 2.14 Η συσχέτιση μεταξύ της εισερχόμενης φόρτισης TOC (TOC_{in}) και της εκπομπής CO_2-C σε όλους τους τύπους των μελετούμενων CWs (A), και μεταξύ της εκπομπής CO_2-C και του συντελεστή εκπομπής CH_4 (CH_4-C/TOC_{in}) για όλους τους τύπους CWs (B) και για τους FWS CWs (C). Λευκά διαμάντια – FWS, μαύρα διαμάντια – HSSF και σταυροί – VSSF CWs.	51
Σχήμα 2.15 Η συσχέτιση μεταξύ του εισερχόμενου φορτίου TOC (TOC_{in}) και της εκπομπής CH_4-C σε FWS, HSSF και VSSF CWs	52
Σχήμα 2.16 Η συσχέτιση μεταξύ του εισερχόμενου φορτίου TN (TN_{in}) και της εκπομπής N_2O-N σε FWS, HSSF και VSSF CWs.....	53
Σχήμα 4.1 Απαιτούμενη Επιφάνεια HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.	111
Σχήμα 4.2 Μέση Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου σε HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.	112
Σχήμα 4.3 Μέση Απομάκρυνση Φορτίου Ολικού Αζώτου σε HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.	112
Σχήμα 4.4 Απαιτούμενη Επιφάνεια HSSF CW ανά δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό για το σενάριο 1	113

Σχήμα 4.5 Απαιτούμενη Επιφάνεια HSSF CW ανά δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό για διάθεση σε κανονικό αποδέκτη.....	114
Σχήμα 4.6 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου ανά Ισοδύναμο Πληθυσμό σε Χειμερινές και Θερινές Συνθήκες σε HSSF CW για το σενάριο 1	115
Σχήμα 4.7 Απομάκρυνση Φορτίου Ολικού Αζώτου ανά Ισοδύναμο Πληθυσμό σε Χειμερινές και Θερινές Συνθήκες σε HSSF CW για το σενάριο 1	115
Σχήμα 4.8 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.	116
Σχήμα 4.9 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 1).....	117
Σχήμα 4.10 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 2).....	117
Σχήμα 4.11 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 3).....	118
Σχήμα 4.12 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 4).....	119
Σχήμα 4.13 Ποσοστιαία Κατανομή Αέριων Εκπομπών HSSF CW (σενάριο 1).....	119
Σχήμα 4.14 Ποσοστιαία Κατανομή Αέριων Εκπομπών HSSF CW (σενάριο 3).....	120
Σχήμα 4.15 Αέριες Εκπομπές για Πιθανά Θερμοκρασιακά Δεδομένα Λυμάτων από HSSF CW για 100 ι.κ.	121
Σχήμα 4.16 Αέριες Εκπομπές για Διάφορες Τιμές Εκροής του Ολικού Αζώτου από HSSF CW για 100 ι.κ. στους 15 °C	122
Σχήμα 4.17 Απαιτούμενη Επιφάνεια FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.....	152
Σχήμα 4.18 Μέση Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου σε FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.	152
Σχήμα 4.19 Μέση Απομάκρυνση Φορτίου Ολικού Αζώτου σε FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.	153
Σχήμα 4.20 Απομάκρυνση Ολικά Αιωρούμενων Στερεών σε FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.	153
Σχήμα 4.21 Απαιτούμενη Επιφάνεια FWS CW ανά δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό για το σενάριο 1	154
Σχήμα 4.22 Απαιτούμενη Επιφάνεια FWS CW ανά δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό για διάθεση σε κανονικό αποδέκτη.....	155
Σχήμα 4.23 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου ανά Ισοδύναμο Πληθυσμό σε Χειμερινές και Θερινές Συνθήκες σε FWS CW για το σενάριο 1.....	156
Σχήμα 4.24 Απομάκρυνση Φορτίου Ολικού Αζώτου ανά Ισοδύναμο Πληθυσμό σε Χειμερινές και Θερινές Συνθήκες σε FWS CW για το σενάριο 1.....	156
Σχήμα 4.25 Αέριες Εκπομπές από FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.....	157
Σχήμα 4.26 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 1).....	158
Σχήμα 4.27 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 2).....	158
Σχήμα 4.28 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 3).....	159
Σχήμα 4.29 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 4).....	160
Σχήμα 4.30 Ποσοστιαία Κατανομή Αέριων Εκπομπών FWS CW (σενάριο 1).....	160
Σχήμα 4.31 Ποσοστιαία Κατανομή Αέριων Εκπομπών FWS CW (σενάριο 3).....	161
Σχήμα 4.32 Αέριες Εκπομπές για Πιθανά Θερμοκρασιακά Δεδομένα Λυμάτων από FWS CW για 100 ι.κ.	162
Σχήμα 4.33 Αέριες Εκπομπές για Διάφορες Τιμές Εκροής του Ολικού Αζώτου από FWS CW για 100 ι.κ. στους 15 °C	164

Σχήμα 4.34 Απαιτούμενη Επιφάνεια CW βάσει κριτηρίου απομάκρυνσης TN Ανηγγεμένη ανά Ισοδύναμο Κάτοικο	165
Σχήμα 4.35 Απαιτούμενη Επιφάνεια FWS CW βάσει κριτηρίου απομάκρυνσης TN και BOD ₅ Ανηγγεμένη ανά Ισοδύναμο Κάτοικο.....	166
Σχήμα 4.36 Απομάκρυνση Φορτίου BOD ανά Μονάδα Επιφάνειας σε HSSF και FWS CWs.....	167
Σχήμα 4.37 Ανηγγεμένες Εκπομπές Αερίων ανά Μονάδα Ισοδύναμου Πληθυσμου για HSSF και FWS CWs.....	168
Σχήμα 4.38 Ανηγγεμένες Εκπομπές Αερίων ανά Μονάδα Επιφάνειας για HSSF και FWS CWs	169
Σχήμα 4.39 Άμεσες Εκπομπές GHG και CO ₂ σε Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων	174
Σχήμα 4.40 Κατανομή CH ₄ ,N ₂ O,CO ₂ στις Άμεσες Αέριες Εκπομπές Συστημάτων Επεξεργασίας Λυμάτων	174
Σχήμα 4.41 Άμεσες Αέριες Εκπομπές σε Εναλλακτικά και Συμβατικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων	175
Σχήμα 4.42 Ολικές και Άμεσες Αέριες Εκπομπές σε Εναλλακτικά και Συμβατικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων	178

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Το περιβάλλον είναι ένα σύνθετο σύστημα με μεγάλο πλήθος εσωτερικών και εξωτερικών αλληλεπιδράσεων. Ο σύγχρονος άνθρωπος με τις εντατικοποιημένες δραστηριότητές του έχει αποκτήσει την ικανότητα να επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο περιβάλλον, όχι όμως και να ασκεί ουσιαστικό έλεγχο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέοι σοβαροί κίνδυνοι για την υγεία του και τα περιβαλλοντικά στοιχεία που στηρίζουν την ανθρώπινη ευζωία. Η ρύπανση αποτελεί ευρεία και σοβαρή κατηγορία ανεπιθύμητων καταστάσεων που δημιουργεί ο άνθρωπος στο περιβάλλον.

Μια μέθοδος ταξινόμησης των διάφορων μορφών ρύπανσης βασίζεται στην αναγνώριση του μέσου που ενεργεί ως φορέας των ρύπων. Με τον τρόπο αυτό, διακρίνεται η ατμοσφαιρική ρύπανση, που προκαλείται κυρίως από διάφορες καύσεις, η ρύπανση του εδάφους, που οφείλεται στη χρήση χημικών ουσιών (όπως είναι τα λιπάσματα) για τη γεωργία καθώς και στη διάθεση στερεών και ημιστερεών αποβλήτων και η ρύπανση του νερού.

Ο έλεγχος της ρύπανσης του νερού γίνεται αφενός με την εγκατάσταση έργων επεξεργασίας του φυσικού νερού, το οποίο λαμβάνεται από το περιβάλλον για διάφορες χρήσεις, και αφετέρου με την εγκατάσταση έργων επεξεργασίας και διάθεσης στο περιβάλλον των λυμάτων, δηλαδή του ρυπασμένου νερού εξαιτίας οικιακής ή βιομηχανικής δραστηριότητας (Ανδρεαδάκης, 1986).

Η συγκεκριμενοποίηση των αναγκαίων μέτρων για τη διασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας από τις αρνητικές επιπτώσεις της διάθεσης των αστικών υγρών αποβλήτων για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έγινε με την οδηγία 91/271/ΕΕ (που ενσωματώθηκε στην Ελληνική Νομοθεσία με την ΚΥΑ 5673/400/1997), σύμφωνα με την οποία απαιτείται να υπάρχουν σε όλα τα κράτη μέλη πλήρη δίκτυα αποχέτευσης, αλλά και δευτεροβάθμια τουλάχιστον επεξεργασία των συλλεγόμενων αστικών υγρών αποβλήτων, αναλόγως του πληθυσμού των οικισμών. Η οδηγία διαχωρίζει επίσης τους υδάτινους αποδέκτες σε ευαίσθητους και μη, ενώ απαιτεί τη συμπληρωματική απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών (αζωτούχων και φωσφορικών ενώσεων), σε περίπτωση διάθεσης των υγρών αποβλήτων σε ευαίσθητους υδάτινους αποδέκτες.

Για τις περιπτώσεις κοινοτήτων, ωστόσο, με πληθυσμό κάτω των 2000 κατοίκων, δεν είναι θεσμικά αναγκαία η κατασκευή συμβατικών εγκαταστάσεων συλλογής και επεξεργασίας λυμάτων, αλλά προσφέρεται η δυνατότητα εφαρμογής εναλλακτικών συστημάτων επεξεργασίας με γνώμονα την οικονομική και χωρίς εξειδικευμένες

απαιτήσεις λειτουργία και προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος. Τα εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας μπορεί να είναι είτε μεμονωμένα χωρίς την απαίτηση κατασκευής δικτύου αποχέτευσης είτε συστήματα μικρής κλίμακας υποστηριζόμενα από δίκτυο αποχέτευσης. Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας που κάνουν χρήση των διάφορων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που συμβαίνουν στη φύση για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Η διαρκώς αυξανόμενη εφαρμογή των φυσικών συστημάτων την τελευταία εικοσαετία, εκτός του πλεονεκτήματος της επεξεργασίας λυμάτων με χαμηλό ενεργειακό κόστος και δίχως υψηλές τεχνολογικές απαιτήσεις λειτουργίας, έφερε στο προσκήνιο και μια αρνητική πτυχή της εν λόγω επεξεργασίας, την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Τα κύρια αέρια που συμβάλλουν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και προέρχονται από φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι το μεθάνιο (CH_4), το οποίο παράγεται σε φτωχά σε οξυγόνο εδάφη και ιζήματα κυρίως λόγω της αναερόβιας διάσπασης του οργανικού υλικού, και το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), το οποίο παράγεται μέσω χημικών και βιοχημικών οδών συνήθως κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης-απονιτροποίησης. Φυσικά, ιδιαίτερη μέριμνα θα πρέπει να ληφθεί και για τις αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), η αύξηση των συγκεντρώσεων του οποίου στην ατμόσφαιρα συντελεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

1.2 Σκοπός Εργασίας

Οι βιβλιογραφικές αναφορές και το ενδιαφέρον της επιστημονικής έρευνας επικεντρώνεται στην ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των διεργασιών που είναι υπεύθυνες για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων σε φυσικά συστήματα, στο είδος και τα χαρακτηριστικά της εκροής καθώς και στη συσχέτιση μεταξύ των. Στην κατεύθυνση αυτή, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του αποτυπώματος άνθρακα σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατά την επεξεργασία λυμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, διενεργήθη αναλυτική διαστασιολόγηση τεχνητών υγροβιότοπων με βάση λύματα τα χαρακτηριστικά των οποίων αντιστοιχούν τόσο σε ανεπεξέργαστα αστικά όσο και σε πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα και για διάφορα σενάρια εξυπηρετούμενων πληθυσμών και ορίων εκροής σε χειμερινές και θερινές συνθήκες. Ακολούθησε η κατάστρωση μεθοδολογίας και σύσταση μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (μεθανίου και υποξειδίου του αζώτου) και διοξειδίου του άνθρακα, η επιμέρους αξιολόγηση των τεχνητών υγροβιότοπων σε όρους απαιτούμενης επιφάνειας, απομάκρυνσης ρυπαντικών φορτίων και αερίων εκπομπών, αλλά και η συγκριτική αξιολόγηση με αντίστοιχα συμβατικά ή εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, με τα δεδομένα να προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Βάση της παρούσας έρευνας και ένα από τα στοιχειώδη ερωτήματα στο οποίο κλήθηκε να απαντήσει η παρούσα εργασία υπήρξε αφενός η αξιολόγηση των τεχνητών υδροβιότοπων ως φυσικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων και αφετέρου ο βαθμός στον οποίο μπορούν να αντικαταστήσουν συμβατικά συστήματα επεξεργασίας για κοινότητες μικρής κλίμακας χωρίς σημαντικές εκπτώσεις στην ποιότητα εκροής, αλλά και με αντισταθμιστικό όφελος τις μειωμένες εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου.

1.3 Διάρθρωση Εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο συνιστά την εισαγωγή της εργασίας και συνοψίζει το σκοπό και τη διάρθρωσή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα προς μελέτη φυσικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων, τους τεχνητούς υδροβιότοπους. Περιγράφεται η πορεία των διεργασιών που συντελούνται κατά τη φάση της επεξεργασίας και οδηγούν τελικώς στην παραγωγή των αερίων του θερμοκηπίου και γίνεται αναφορά στην ποσοτικοποίηση των αερίων, αλλά και σε υπάρχοντα δεδομένα εκπομπών από αντίστοιχες επιστημονικές έρευνες ή πειραματικά συστήματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η μεθοδολογία διαστασιολόγησης των φυσικών συστημάτων και υπολογισμού της απομακρυνόμενης ποσότητας των ρυπαντικών φορτίων, καθώς και τα μοντέλα εξαγωγής αέριων εκπομπών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν τόσο από τη διαστασιολόγηση των συστημάτων και την εκτίμηση των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων, όσο και από το μοντέλο υπολογισμού των αέριων εκπομπών. Πραγματοποιείται, ακόμα, αξιολόγηση των συστημάτων τεχνητών υδροβιότοπων και σύγκριση των τιμών εκπομπής με δεδομένα αντίστοιχων συμβατικών και εναλλακτικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο διατυπώνονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία σχετικά με την αξιολόγηση των τεχνητών υδροβιότοπων ως εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων σε όρους ποιότητας εκροής και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τέλος προτείνονται δράσεις προς μελλοντική διερεύνηση.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την καταγραφή των βιβλιογραφικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση της εργασίας.

Κεφάλαιο 2. Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας

Λυμάτων και Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου

2.1 Φυσικά Συστήματα

2.1.1 Ορισμός και Διεργασίες Φυσικών Συστημάτων

Τα φυσικά συστήματα ορίζονται ως οι διατάξεις που επιτυγχάνουν την αφαίρεση ρύπων βασίζοντας τη λειτουργία τους στην αναπαράσταση και αναπροσαρμογή των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που συντελούνται στα χερσαία και υδατικά οικοσυστήματα για την επεξεργασία των λυμάτων. Το σύνολο των παραπάνω διεργασιών λαμβάνουν χώρα σε έναν «οικοσυστηματικό» αντιδραστήρα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012), η δομή του οποίου περιγράφεται από το τετράπτυχο «υγρά απόβλητα - ατμόσφαιρα - έδαφος – φυτό» (Kadlec & Knight, 1996).

Στα συστήματα αυτά η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων βασίζεται σε διεργασίες που εφαρμόζονται και στα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι για παράδειγμα η καθίζηση, η προσρόφηση, η βιολογική μετατροπή και αποικοδόμηση, η χημική κατακρήμνιση, η οξείδωση και η αναγωγή, αλλά και άλλες, που είναι μοναδικές για τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι η φωτοσύνθεση, η φωτοοξείδωση και η πρόσληψη από τα φυτά. Επίσης, στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, οι διεργασίες επεξεργασίας συμβαίνουν συγχρόνως στον «οικοαντιδραστήρα» και με «φυσικές» (χαμηλές) ταχύτητες, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα συστήματα (βιολογικής) επεξεργασίας, όπου αυτές συνήθως συμβαίνουν με σειρά, σε διαφορετικούς αντιδραστήρες ή δεξαμενές και με σαφώς μεγαλύτερες ταχύτητες (τεχνολογικά επιτυγχανόμενες).

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φυσικών και των συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2.1 Σύγκριση Συμβατικών και Φυσικών Συστημάτων Επεξεργασίας

Συμβατικά Συστήματα	Φυσικά Συστήματα
Υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής	Μικρό αρχικό κόστος κατασκευής (εφόσον δεν απαιτείται στεγάνωση πυθμένα που, ωστόσο, δεν αποτελεί ενδεικτική περίπτωση)
Σημαντική ενεργειακή κατανάλωση, χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην κατασκευή (σκυρόδεμα, χάλυβας κ.α.) και στη λειτουργία (ηλεκτρική ενέργεια, χημικά κ.α.)	Χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική κ.α.) κυρίως κατά τη λειτουργία
Παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων παραπροϊόντων που απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία (διογκωμένη ιλύς)	Παραγωγή μικρών ποσοτήτων παραπροϊόντων που δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία (φυτική βιομάζα)
Ανάγκη ύπαρξης σταδίου τελικής καθίζησης ιλύος	Απλή απομάκρυνση υπολειμματικής βιομάζας
Δεκτά και τα ανεπεξέργαστα λύματα	Συχνά απαραίτητη η προεπεξεργασία των λυμάτων
Υψηλή απαίτηση ηλεκτρομαγνητικού εξοπλισμού	Απουσία ή απαίτηση ελάχιστων μηχανικών μερών
Δυνατότητα αυτοματισμού διαδικασιών επεξεργασίας	Απαραίτητη επί τόπου παρουσία και επέμβαση προσωπικού
Απαίτηση συστήματος παρακολούθησης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο	Παρακολούθηση σε μηνιαία βάση ή και σποραδικότερα
Απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού	Απαίτηση μη εξειδικευμένου προσωπικού
Υψηλό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος	Μικρό κόστος κατασκευής, αμελητέο κόστος λειτουργίας (όπου δεν απαιτείται τεχνητός αερισμός)
Απαίτηση μικρής διαθέσιμης έκτασης χωροθέτησης	Απαίτηση μεγάλης διαθέσιμης έκτασης χωροθέτησης
Καταμερισμός και επιτάχυνση διαδικασιών επεξεργασίας λυμάτων	Ταυτόχρονη πραγματοποίηση διεργασιών με χαμηλές ταχύτητες
Ελάχιστες οχλήσεις	Οχλήσεις (οσμές, έντομα κ.α.)

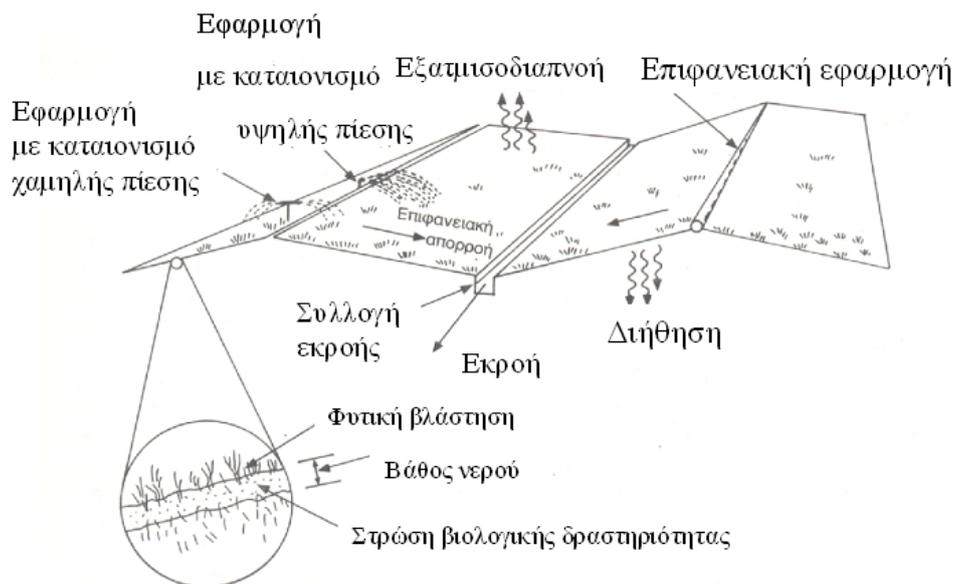
2.1.2 Κατηγοριοποίηση Φυσικών Συστημάτων

Τα φυσικά συστήματα διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. συστήματα εδαφικής εφαρμογής
2. συστήματα τεχνητών λιμνών (λίμνες σταθεροποίησης)

3. συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων

Στα συστήματα εδαφικής εφαρμογής, τα υγρά απόβλητα, μετά από προεπεξεργασία, διατίθενται σε έδαφος με φυτική κάλυψη με σκοπό την κατείδυση και τη διείσδυση στο εδαφικό στρώμα. Η αφαίρεση των ρύπων των υγρών αποβλήτων επιτυγχάνεται με τις διάφορες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα «έδαφος-ατμόσφαιρα-λύματα» ή «υδροφορέας-ατμόσφαιρα-λύματα». Τα συστήματα αυτά διακρίνονται στους εξής επιμέρους τύπους: α) τα συστήματα βραδείας διήθησης ή εφαρμογής, β) στα συστήματα επιφανειακής απορροής, γ) στα συστήματα ταχείας διήθησης και δ) στα συστήματα συνδυασμένων τύπων.



Σχήμα 2.1 Λειτουργίες Συστήματος Επιφανειακής Απορροής (Αγγελάκης & Τσομπάνογλου, 1995)

Τα πιο διαδεδομένα φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων είναι τα συστήματα των τεχνητών λιμνών. Είναι συνήθως χωμάτινες λεκάνες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των αστικών και σπανιότερα των βιομηχανικών λυμάτων. Οι τεχνητές λίμνες ανάλογα με τη συχνότητα εκκένωσής τους ταξινομούνται σε: λίμνες ολικού περιεχομένου, ελεγχόμενης εκκένωσης, υδρογραφικά ελεγχόμενης εκροής και συνεχούς εκκένωσης. Μια συνηθέστερη, όμως, ταξινόμηση γίνεται ανάλογα με το βάθος τους και τις βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν σε αυτές. Έτσι διακρίνονται σε επαμφοτερίζουσες, αερόβιες, αναερόβιες και αεριζόμενες τεχνητές λίμνες.



Σχήμα 2.2 Επαμφοτερίζουσα Τεχνητή Λίμνη (Tilley, et al., 2014)

Το σύστημα των επιπλέοντων υδροχαρών φυτών είναι ουσιαστικά ένας τεχνητός υγροβιότοπος που διαφέρει στον τύπο της φυτικής βλάστησης που χρησιμοποιείται. Στα εν λόγω συστήματα χρησιμοποιούνται υδροχαρή φυτά όπως το είδος *Eichhornia crassipes*, είδη του γένους *Hydrocotyle* και είδη της οικογένειας *Lemnaceae*. Τα συστήματα με επιπλέοντα υδροχαρή φυτά είναι αποτελεσματικά στη μείωση του BOD, του αζώτου καθώς και διαφόρων μετάλλων και οργανικών. Στην ουσία τα επιπλέοντα φυτά μετατρέπουν διαλυμένες ανόργανες ουσίες σε φυτική μάζα, ενώ οι ρίζες παρέχουν την επιφάνεια όπου συντελείται η «βιολογική δράση» ενώ ταυτόχρονα βοηθούν στη συσσωμάτωση και συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών. Η αποδοτικότητα των συστημάτων αυξάνει σε θερμά κλίματα. Με τη χρήση των υδροχαρών φυτών περιορίζονται τα προβλήματα ανάπτυξης αλγών (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012).

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι αποτελούν το κύριο αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας εργασίας και αναλύονται στην ακόλουθη ενότητα.

2.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι (Constructed Wetlands – CWs)

Οι υγροβιότοποι είναι εδαφικά πεδία που κατακλύζονται με νερό μικρού βάθους ροής (συνήθως μικρότερο των 0,6m), και στα οποία αναπτύσσονται φυτά όπως: 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 βακτηρίων, επικουρεί το φιλτράρισμα και την προσρόφηση συστατικών του λύματος, μεταφέρει οξυγόνο στη μάζα νερού και περιορίζει την ανάπτυξη αλγών μέσω του ελέγχου της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο τεχνητοί όσο και φυσικοί υγροβιότοποι.

Οι υγροβιότοποι (φυσικοί ή τεχνητοί) είναι διατάξεις που κατασκευάζονται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Αποτελούν μία απλή και αποτελεσματική λύση για την δευτεροβάθμια επεξεργασία αποβλήτων οικισμών έως και 2000 κατοίκων, για την τριτοβάθμια επεξεργασία, όταν τα όρια εκροής σε οργανικό φορτίο ($BOD_5 < 5\text{mg/L}$) και στερεά ($TSS < 10\text{mg/L}$) είναι πολύ χαμηλά, για την επεξεργασία πλημμυρικών απορροών, για τη σταθεροποίηση της ιλύος, ακόμα και για τις ειδικές περιπτώσεις επεξεργασίας απορροών από αυτοκινητοδρόμους και αγροτικών απορροών πλούσιων σε θρεπτικά και φυτοφάρμακα.

Ενώ, όμως, η αποδοτικότητα των συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων ως προς την απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα και των αιωρούμενων στερεών είναι αξιόλογη,

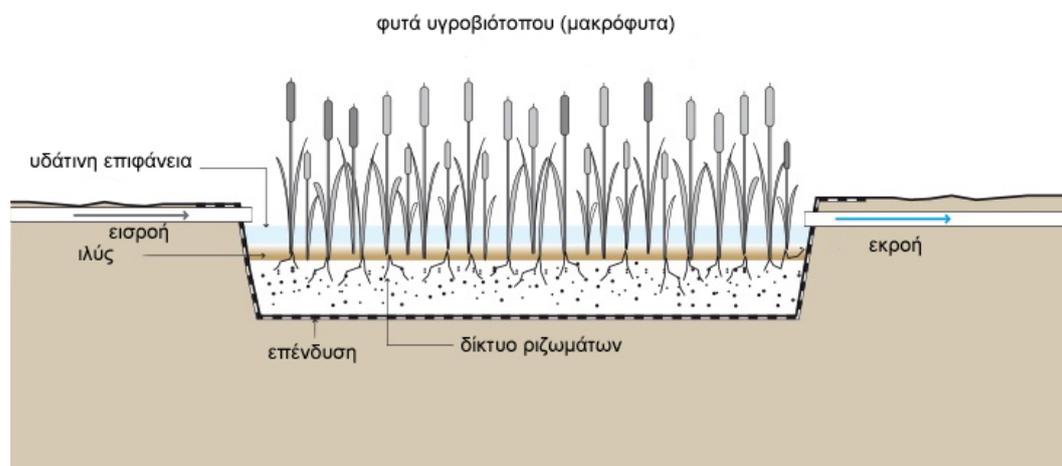
η απομάκρυνση αζώτου καθίσταται σημαντική υπό προϋποθέσεις και η απομάκρυνση του φωσφόρου δεν είναι συστηματική.

Τα συστήματα των τεχνητών υγροβιότοπων (Constructed Wetlands – CWs) κατατάσσονται σε δυο κύριες κατηγορίες:

1. Τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής ή ελεύθερης επιφάνειας (Free Water Surface Treatment Wetlands - FWS)
2. Τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής (Subsurface Flow Systems - SFS). Οι τεχνητοί υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής διακρίνονται επιπλέον σε δυο υποκατηγορίες: οριζόντιας ροής (HF) και κατακόρυφης ροής (VF).

2.2.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιφανειακής Ροής (FWS)

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής είναι διατάξεις που αποτελούνται από λεκάνες μικρού βάθους, στις οποίες τοποθετείται μια εδαφική στρώση ή οποιοδήποτε άλλο υλικό – υπόστρωμα υποστηρίζει την ανάπτυξη βλάστησης και μια υδάτινη στήλη μικρού ύψους. Ταυτόχρονα, καλλιεργούνται υδροχαρή φυτά, όπως είναι οι κοινές καλαμιές (*Phragmites communis*), τα διάφορα είδη βούρλων (*Juncus spp.*), οι σύφες (*Scripus spp.*) και διάφορα είδη ψαθών (*Typha spp.*).



Σχήμα 2.3 Τεχνητός Υγροβιότοπος Επιφανειακής Ροής (Stauffer, 2012)

Για τη διατήρηση της δομής ενός υγροβιότοπου επιφανειακής ροής, η στεγανότητα της λεκάνης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο: σε αρκετές περιπτώσεις, κατάλληλη υδρογεωλογική έρευνα μπορεί να υποδείξει πως η μηχανική σύσταση του φυσικού εδάφους της περιοχής κατασκευής του υγροβιότοπου εξασφαλίζει μικρή υδροπερατότητα, σε άλλες όμως στις οποίες υπάρχουν χαλαρά υλικά ή μη υδατοστεγανοί σχηματισμοί, πραγματοποιείται κάλυψη του πυθμένα και των πρανών της λεκάνης με γεωμεμβράνες ή με άλλα κατάλληλα υλικά μικρής υδροπερατότητας (όπως είναι η αργιλική στρώση). Το νερό που εφαρμόζεται ρέει επιφανειακά, πάνω από το εδαφικό στρώμα και τα καθιζάνοντα στερεά. Στους τεχνητούς υγροβιότοπους

επιφανειακής ροής, η τροφοδότηση της υδάτινης στήλης με οξυγόνο είναι περιορισμένη συγκριτικά με τους υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής, καθώς το ριζικό σύστημα βρίσκεται στο εδαφικό υπόστρωμα και κάτω από την στήλη των υγρών και το μεταφερόμενο σε αυτό οξυγόνο καταναλώνεται στο εκτεταμένο βενθικό περιβάλλον. Επιπλέον, λόγω της πυκνής φυτικής βλάστησης η μεταφορά οξυγόνου διαμέσου της επιφάνειας είναι περιορισμένη.

Εκτός της δομής, και ο λειτουργικός ρόλος των τεχνητών υδροβιότοπων FWS αναπαριστά τον αντίστοιχο των φυσικών υδροβιότοπων. Εντάσσονται άμεσα στο ευρύτερο περιβάλλον στο οποίο χωροθετούνται και συχνά αποτελούν τόπους ενδημισμού της πανίδας που αναπτύσσεται στη δεδομένη περιοχή.

Οι επικρατούσες συνθήκες στο επιφανειακό στρώμα των τεχνητών υδροβιότοπων FWS είναι αερόβιες, ενώ στο πυθμενικό αναερόβιες. Το βάθος της υγρής στήλης τυπικά κυμαίνεται από λίγα εκατοστά έως 1m.

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την επεξεργασία των λυμάτων στους τεχνητούς υδροβιότοπους είναι όμοιες με αυτές που συμβαίνουν στα φυσικά οικοσυστήματα. Η αποδόμηση του οργανικού φορτίου συμβαίνει είτε υπό το καθεστώς αερόβιων είτε αναερόβιων συνθηκών. Η ισορροπία μεταξύ αερόβιων - αναερόβιων διεργασιών εξαρτάται από το οργανικό φορτίο καθώς και από την παροχή οξυγόνου. Η ανάγκη ύπαρξης οξυγόνου για την τέλεση των βιοχημικών διεργασιών ικανοποιείται μέσω της διαδικασίας του επαναερισμού της υγρής στήλης. Το οξυγόνο διοχετεύεται στη στήλη νερού του υδροβιότοπου με διάχυση από τον ατμοσφαιρικό αέρα, μέσω της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτών.

Η απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα των λυμάτων πραγματοποιείται τόσο από την αιωρούμενη όσο και από την προσκολλημένη βιομάζα. Τα περισσότερα από τα αιωρούμενα στερεά καθιζάνουν και φιλτράρονται στα πρώτα μέτρα πλησίον του σημείου εισόδου στο σύστημα. Η απομάκρυνση του αζώτου πραγματοποιείται λόγω νιτροποίησης στις αεριζόμενες περιοχές και απονιτροποίησης στις ανοξικές. Η απομάκρυνση του φωσφόρου πραγματοποιείται μέσω προσρόφησης και χημικής κατακρήμνισης και είναι κατά κανόνα περιορισμένη (όπως και σε όλα τα φυσικά συστήματα).

Το μειονέκτημα των συστημάτων υδροβιότοπων FWS έγκειται στο γεγονός ότι οι FWS ενίοτε μετατρέπονται σε ιδανικούς χώρους αναπαραγωγής κουνουπιών, που συνιστούν εν δυνάμει φορείς μεταδόσεως νόσων σε γειτονικές περιοχές.

Πίνακας 2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα FWS CWs

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλό κόστος κατασκευής	Χαμηλή απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου
Χαμηλό λειτουργικό κόστος	Φτωχή οξυγόνωση της υγρής στήλης
Αντοχή σε διακυμάνσεις υδραυλικού και ρυπαντικού φορτίου (πολύ μικρές παροχές – έως αρκετά μεγάλες)	Προβλήματα οσμών και κουνουπιών
Προσαρμογή στο ευρύτερο οικοσύστημα και την αισθητική της περιοχής	Απαίτηση μεγάλων εκτάσεων για την κατασκευή
Φυσική διεργασία → πράσινη τεχνολογία	

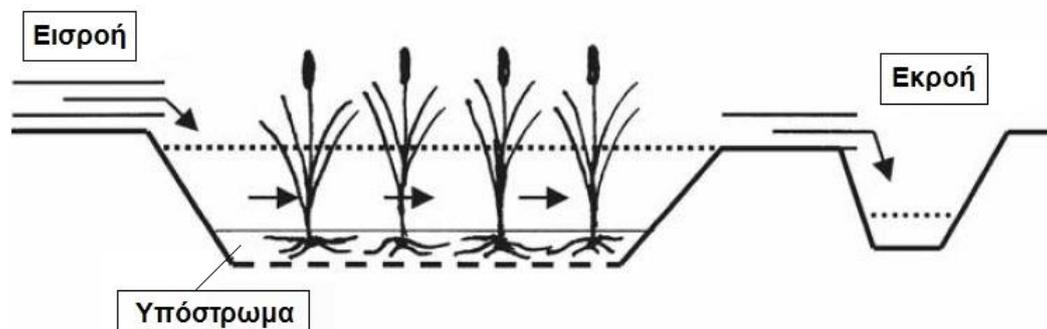
Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ροής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει του είδους της φυτικής βλάστησης που αναπτύσσεται σε αυτούς και διακρίνονται σε:

- i. αναδύμενων φυτών
- ii. βυθισμένων φυτών
- iii. επιπλεόντων φυτών
- iv. επιπλεόντων φυτών με ριζικό σύστημα στο υπόστρωμα

2.2.1.1 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Αναδύμενων Φυτών

Ένα τυπικό σύστημα υγροβιότοπου αυτής της κατηγορίας αποτελείται από μια ρηχή επενδεδυμένη λεκάνη ή μια σειρά από λεκάνες που περιέχουν 20-30 cm εδάφους όπου αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα των φυτών και 20-40 cm νερού. Σημαντικό τμήμα της επιφάνειας (μέχρι και 50%) καλύπτεται από πυκνή αναδύμενη βλάστηση (Kadlec, 1994). Τα συνηθέστερα είδη φυτών που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τα είδη *Sagittaria latifolia*, *Phragmites australis*, *Typha spp.*, *Bolboschoenus fluviatilis*, *Eleocharis sphacelata* και *Scirpus tubernaemontani*. Γενικά, οι τεχνητοί υγροβιότοποι αναδύμενων φυτών λειτουργούν ως συστήματα βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, στα οποία η εισερχόμενη ροή λυμάτων εξαπλώνεται σε μια μεγάλη έκταση ρηχών νερών και αναδύμενης βλάστησης. Κοντά στην επιφάνεια του νερού παρατηρούνται κυρίως αερόβιες ζώνες λόγω των φαινομένων της ατμοσφαιρικής διάχυσης, ενώ στον πυθμένα και κοντά σε αυτόν επικρατούν συνήθως αναερόβιες και ανοξικές συνθήκες. Όταν τα εισερχόμενα λύματα είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένα με οργανικό φορτίο, η ανοξική ζώνη μπορεί να κινηθεί αρκετά κοντά στην επιφάνεια του νερού. Η αποσυντιθέμενη βιομάζα λειτουργεί ως πηγή άνθρακα για την απονιτροποίηση, αλλά η ίδια η διεργασία της αποσύνθεσης ανταγωνίζεται αυτή της νιτροποίησης ως προς τη ζήτηση οξυγόνου. Παράλληλα, η θερμοκρασία επηρεάζει την απόδοση του συστήματος αφού, οι χαμηλές θερμοκρασίες που

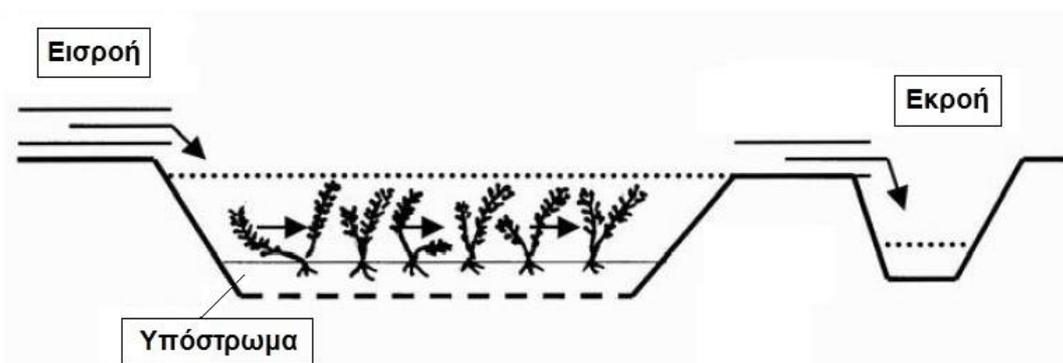
παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του χειμώνα ενισχύουν τη διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό, αλλά επιβραδύνουν σημαντικά την μικροβιακή δραστηριότητα (Kadlec & Knight, 1996).



Σχήμα 2.4 Τεχνητός Υγροβιότοπος Αναδυόμενων Φυτών (Vymazal & Kropefelova, 2008)

2.2.1.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Βυθισμένων Φυτών

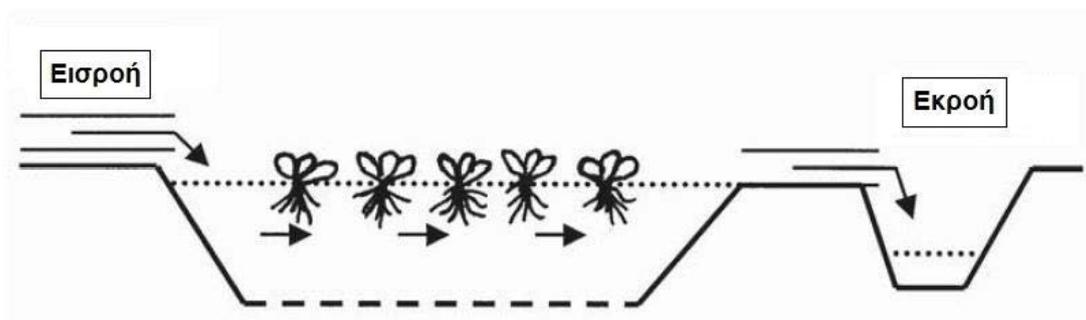
Η φυτική βλάστηση που αναπτύσσεται σε αυτή την κατηγορία τεχνητών υγροβιότοπων έχουν τους φωτοσυνθετικούς ιστούς της εξ ολοκλήρου βυθισμένους. Τα συγκεκριμένα είδη φυτών αναπτύσσονται ικανοποιητικά μόνο σε οξυγονωμένο νερό και ως εκ τούτου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία λυμάτων με υψηλές συγκεντρώσεις εύκολα βιοδιασπάσιμου οργανικού φορτίου, διότι η μικροβιακή αποσύνθεση της οργανικής ύλης τείνει να δημιουργεί ανοξικές συνθήκες, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες (Brix, 1993). Λόγω διαφόρων περιορισμών που εμφανίζουν τα συγκεκριμένα συστήματα (υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών, χαμηλή διείσδυση του φωτός, υψηλή θολότητα κ.ά.) οι τεχνητοί υγροβιότοποι βυθισμένων φυτών συνήθως προτιμώνται για την τελική επεξεργασία των δευτεροβάθμιων εκροών (Vymazal & Kropefelova, 2008).



Σχήμα 2.5 Τεχνητός Υγροβιότοπος Βυθισμένων Φυτών (Vymazal & Kropefelova, 2008)

2.2.1.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιπλεόντων Φυτών

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι με επιπλέοντα φυτά αποτελούνται από μια ή περισσότερες ρηχές λίμνες στις οποίες τα φυτά επιπλέουν στην επιφάνεια. Το ρηχό βάθος των λιμνών και η παρουσία των υδροχαρών φυτών στη θέση των αλγών είναι τα βασικά χαρακτηριστικά που διαχωρίζουν τη συγκεκριμένη κατηγορία τεχνητών υγροβιότοπων από τις τεχνητές λίμνες (Kadlec, et al., 2000). Η χρησιμοποίηση υδροχαρών φυτών στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, ξεκίνησε ως μια προσπάθεια ελέγχου των αιωρούμενων στερεών που εμφανίζονταν στις εκροές των επαμφοτερίζουσών λιμνών. Τα συστήματα αυτά είναι αποτελεσματικά στην μείωση του BOD, του αζώτου, διαφόρων μετάλλων και οργανικών ουσιών σε ίχνη, ενώ επηρεάζονται από τη θερμοκρασία καθώς στις περιοχές με ψυχρούς χειμώνες η μειωμένη ανάπτυξη των φυτών λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών οδηγεί και σε μειωμένες αποδόσεις επεξεργασίας. Τα πιο συχνά είδη βλάστησης που χρησιμοποιούνται σε αυτή την κατηγορία υγροβιότοπων είναι το είδος *Eichhornia crassipes* (υάκινθοι του νερού) και διάφορα είδη της οικογένειας *Limnaceae* (όπως είναι το φυτό *Lemna minor*, που είναι γνωστό και ως «φακή του νερού») (Αγγελάκης & Τσομπάνογλου, 1995).

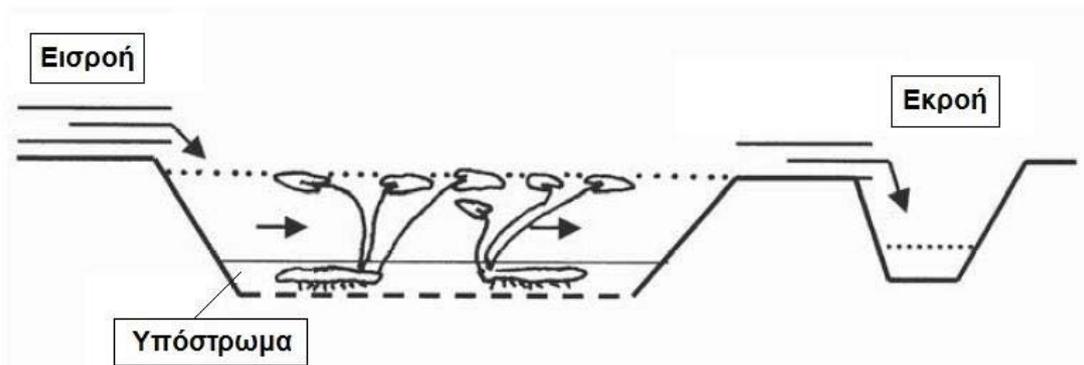


Σχήμα 2.6 Τεχνητός Υγροβιότοπος Επιπλεόντων Φυτών (Vymazal & Kropfelova, 2008)

2.2.1.4 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Επιπλεόντων Φυτών που το Ριζικό τους Σύστημα Αναπτύσσεται σε Υπόστρωμα

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει φυτά τα οποία έχουν τις ρίζες τους σε υπόστρωμα και τα φύλλα τους επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού, όπως είναι τα είδη φυτών *Nymphaea*, *Nuphar lutea* και *Nelumbo nucifera*. Αναφορικά με το δυναμικό επεξεργασίας των συστημάτων αυτών, θεωρείται ότι πραγματοποιούν ικανοποιητική απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών καθώς τα φύλλα που επιπλέουν στην επιφάνεια ελαχιστοποιούν την επίδραση του ανέμου που προκαλεί πιθανές επαναιωρήσεις των στερεών και διατάραξη της κυκλοφορίας του νερού. Οι οργανικές ουσίες των λυμάτων απομακρύνονται κυρίως μέσω της καθίζησης των αιωρούμενων σωματιδίων και της μικροβιακής αποδόμησης. Γενικά, υπάρχουν πολύ περιορισμένα στοιχεία για τη συγκεκριμένη κατηγορία τεχνητών υγροβιότοπων ωστόσο θεωρείται ότι οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτούς είναι ως επί το πλείστον αερόβιες λόγω της παραγωγής οξυγόνου που οφείλεται στην παρουσία των αλγών. Η

πιθανότητα ανάπτυξης αλγών είναι μεγάλη καθώς τα φύλλα των επιπλεόντων φυτών συχνά δεν καλύπτουν πλήρως την επιφάνεια του νερού. Οι αερόβιες συνθήκες ενδεχομένως να ευνοούν τη διεργασία της νιτροποίησης, ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο με την απονιτροποίηση, η οποία μπορεί να λάβει χώρα μόνο σε περιοχές κοντά στον πυθμένα του υδροβιότοπου όπου επικρατούν ανοξικές ζώνες. Ο φώσφορος που περιέχεται στα λύματα μπορεί να δεσμευθεί από τα άλγη αλλά μόνο βραχυπρόθεσμα καθώς τα θρεπτικά συστατικά που προσλαμβάνονται από τα άλγη επιστρέφουν εκ νέου στην υδατική φάση του συστήματος λόγω της αποσύνθεσής τους (Vymazal & Kropefelova, 2008).

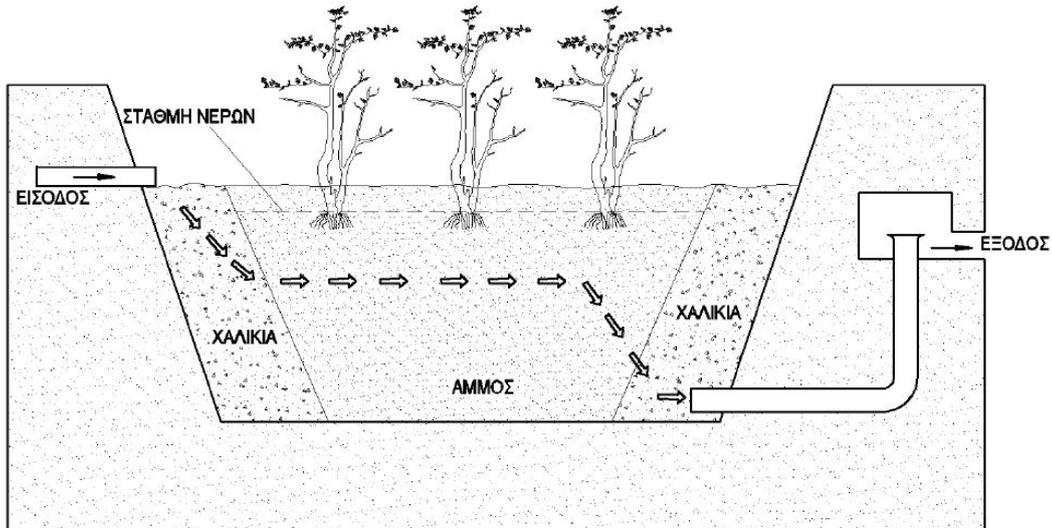


Σχήμα 2.7 Τεχνητός Υδροβιότοπος Επιπλεόντων Φυτών με Ριζικό Σύστημα στο Υπόστρωμα (Vymazal & Kropefelova, 2008)

2.2.2 Τεχνητοί Υδροβιότοποι Υποεπιφανειακής Ροής (SWS)

2.2.2.1 Τεχνητοί Υδροβιότοποι Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής (HSSF)

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, τα προς επεξεργασία υγρά απόβλητα εισρέουν στη μια άκρη του υδροβιότοπου, κινούνται οριζοντίως εντός του πορώδους μέσου κάτω από την επιφάνεια της κοίτης και με κατεύθυνση αντιδιαμετρικά της εισόδου και αφού φτάσουν στη ζώνη εκροής, συλλέγονται σε κατάλληλα διαμορφωμένο φρεάτιο συλλογής και απομακρύνονται από το σύστημα.



Σχήμα 2.8 Τεχνητός Υγροβιότοπος Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012)

Τα λύματα, κατά την κίνησή τους στους HSSF τεχνητούς υγροβιότοπους, διέρχονται μέσα από αερόβιες, ανοξικές και αναερόβιες ζώνες. Οι αερόβιες ζώνες δημιουργούνται γύρω από τις ρίζες των αναπτυσσόμενων φυτών του υγροβιότοπου. Το φυτό που συνήθως χρησιμοποιείται είναι το *Phragmites australis*, το κοινώς λεγόμενο καλάμι, το οποίο έχει την ικανότητα να μεταφέρει οξυγόνο από τα φύλλα και μέσω των ριζωμάτων στις ρίζες. Φαίνεται ότι στην περιοχή γύρω από τα ριζώματα, στη λεγόμενη ριζόσφαιρα, αναπτύσσονται οι πληθυσμοί των βακτηρίων. Το οργανικό φορτίο οξειδώνεται από τους ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς, ενώ οι νιτροποιητές οξειδώνουν την αμμωνία σε νιτρώδη και νιτρικά. Σε περιοχές γύρω και μακριά από τις ρίζες, όπου οι συνθήκες είναι ανοξικές γίνεται η απονιτροποίηση, δηλαδή η μετατροπή των νιτρικών και νιτρωδών ενώσεων σε αέριο άζωτο. Αυτός είναι και ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης αζώτου αφού η πρόσληψή του από τα φυτά θεωρείται αμελητέα. Τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται μέσω καθίζησης και σε μικρές αποστάσεις από το σημείο εισροής του αποβλήτου στο σύστημα, ενώ η απομάκρυνση φωσφόρου σε τέτοια συστήματα είναι εξαιρετικά περιορισμένη, λόγω της περιορισμένης επαφής του αποβλήτου με το έδαφος.

Τα αιωρούμενα στερεά σε συστήματα υγροβιότοπων ελεύθερης απομακρύνονται αφενός μεν με καθίζηση, που ευνοείται από τις επικρατούσες μικρές ταχύτητες ροής και το μικρό βάθος νερού, αφετέρου δε με διήθηση διαμέσου του εδαφικού στρώματος, που λειτουργεί ως βιολογικό φίλτρο, και της φυτικής βλάστησης.

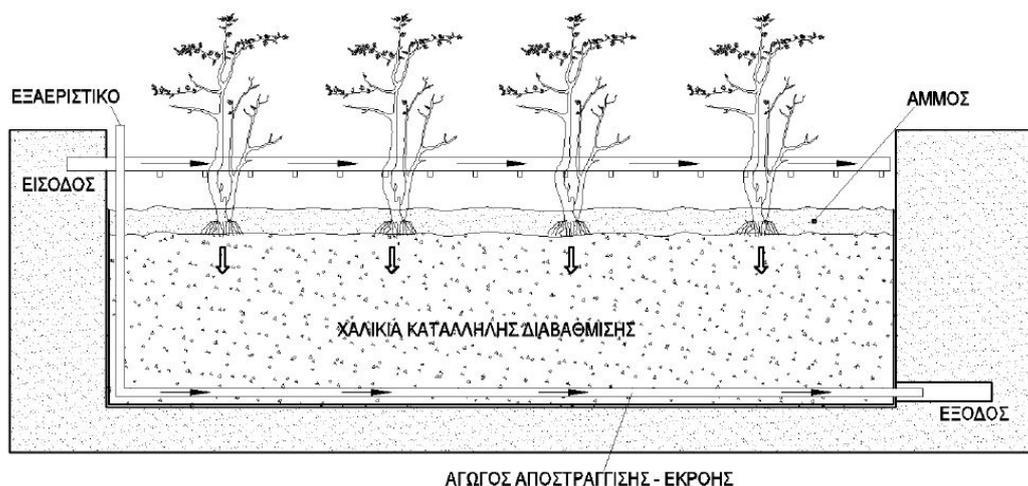
Οι υγροβιότοποι οριζόντιας ροής έχουν περιορισμένη δυνατότητα μεταφοράς οξυγόνου και δεν μπορούν να νιτροποιήσουν σε υψηλούς ρυθμούς, ούτε και να επεξεργαστούν αποτελεσματικά απόβλητα με μεγάλες συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου. Η αδυναμία αυτή οδήγησε τα τελευταία χρόνια στον σχεδιασμό υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012).

Πίνακας 2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα HSSF CWs

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Συστήματα χαμηλού κόστους κατασκευής και λειτουργίας	Αδυναμία υψηλού ρυθμού νιτροποίησης
Σχετικά αξιόπιστα συστήματα	Αδυναμία επεξεργασίας λυμάτων με μεγάλο οργανικό φορτίο
Ικανοποιητική απόδοση στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και των διαλυμένων στερεών	Περιορισμένη απομάκρυνση φωσφόρου
	Απαίτηση για περιοδική καταστροφή της ξηρής βλάστησης με σκοπό την διατήρηση των συνθηκών ελεύθερης ροής
	Απαίτηση ικανών εκτάσεων με ήπιες κλίσεις
	Ισχυρή εξάρτηση από κλιματολογικούς παράγοντες

2.2.2.2 Τεχνητοί Υγροβιότοποι Κατακόρυφης Υποεπιφανειακής Ροής (VSSF)

Το κυρίως σώμα των τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής απαρτίζεται από διαδοχικές στρώσεις κατάλληλα διαβαθμισμένων υλικών (έδαφος, άμμος, χονδρόκοκκα, αδρανή, πλαστικά), ενώ τα φυτά (καλάμια, είδη βούρλων) φυτεύονται στην άνω – συνήθως αμμώδη - στρώση. Τα υγρά απόβλητα διοχετεύονται κατακόρυφα κάτω από την επιφάνεια του τεχνητού υγροβιότοπου και συλλέγονται από ένα δίκτυο αποστραγγιστικών αγωγών που είναι τοποθετημένο στη βάση του. Η εισροή νέου αέρα στο πορώδες του υλικού του σώματος του υγροβιότοπου πραγματοποιείται καθώς η αποστράγγιση στις στρώσεις διαβαθμισμένων υλικών είναι πλήρης. Κάθε επόμενη δόση υγρών αποβλήτων που διέρχεται του υγροβιότοπου, παγιδεύει τον αέρα στους πόρους και σε συνδυασμό με τον αερισμό που δημιουργείται από την απότομη εφαρμογή της δόσης δημιουργεί άριστες συνθήκες οξυγόνωσης, διάσπασης του οργανικού φορτίου και νιτροποίησης. Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης του αζώτου και στην περίπτωση αυτή είναι αυτός της νιτροποίησης – απονιτροποίησης, ενώ η απομάκρυνση φωσφόρου εξαρτάται από τη φύση του εφαρμοζόμενου υποστρώματος. Η απομάκρυνση μετάλλων ποικίλει και επιτυγχάνεται κυρίως με κατακρήμνιση και προσρόφηση, ενώ η απομάκρυνση των παθογόνων οργανισμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του υποστρώματος και την ταχύτητα ροής. Τα αιωρούμενα στερεά απομακρύνονται κυρίως με φιλτράρισμά τους στο έδαφος ή το υπέδαφος (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012).



Σχήμα 2.9 Τεχνητός Υγροβιότοπος Κατακόρυφης Υποεπιφανειακής Ροής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012)

Το πλεονέκτημα των υγροβιότοπων κατακόρυφης ροής έγκειται στην αποτελεσματικότερη μεταφορά του οξυγόνου, ωστόσο απαιτείται σύνταξη σαφούς χρονοδιαγράμματος σχετικά με την ποσότητα των εφαρμοζόμενων υγρών αποβλήτων καθώς και της περιόδου εφαρμογής κάθε επόμενης δόσης. Επισημαίνεται ότι για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του συστήματος, κυρίως σε όρους απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών, ένας VSSF τεχνητός υγροβιότοπος συχνά συνδυάζεται με υγροβιότοπο οριζόντιας ροής ή άλλο σύστημα μικρής κλίμακας (όπως μια σηπτική δεξαμενή), διαμορφώνοντας έτσι ένα «υβριδικό» σύστημα.

Πίνακας 2.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα VSSF CWs

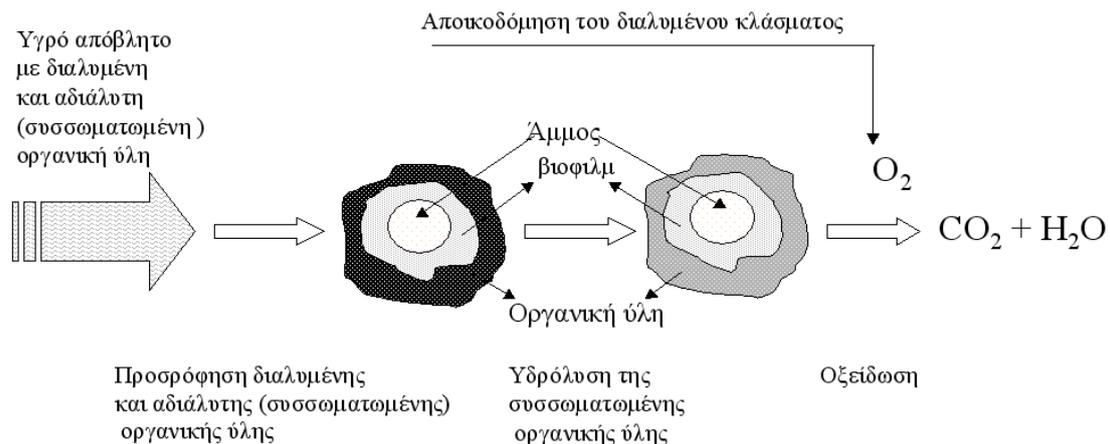
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας	Περιορισμένος ρυθμός νιτροποίησης
Λειτουργική αξιοπιστία	Αδυναμία επεξεργασίας λυμάτων με μεγάλο οργανικό φορτίο
Ικανοποιητική απόδοση απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και διαλυμένων στερεών	Περιορισμένη απομάκρυνση φωσφόρου
Μη παρατηρήσιμες οχλήσεις από έντομα	Ανάγκη περιοδικής καταστροφής ξηρής βλάστησης με σκοπό τη διατήρηση των συνθηκών ελεύθερης ροής
	Απαίτηση ικανών εκτάσεων με ήπιες κλίσεις
	Μικρές οχλήσεις από οσμές
	Ισχυρή εξάρτηση από κλιματολογικούς παράγοντες

2.3 Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Ρύπων σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι είναι πολύπλοκα συστήματα, που διαχωρίζουν και μετατρέπουν τους υπάρχοντες ρύπους ενός υγρού αποβλήτου με φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς μηχανισμούς, οι οποίοι μπορεί να συμβαίνουν ταυτόχρονα ή διαδοχικά κατά τη ροή του υγρού αποβλήτου μέσα από το εσωτερικό του υγροβιότοπου. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι γνωστές ποιοτικά, αλλά μόνο σε λίγες περιπτώσεις έχουν καθοριστεί και ποσοτικά. Οι μηχανισμοί και η σειρά με την οποία λαμβάνουν χώρα εξαρτώνται κυρίως από τη σύσταση, την ποσότητα του εφαρμοζόμενου αποβλήτου, τη συχνότητα φόρτισης, το υπόστρωμα, τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος, τη φυτική βλάστηση και τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής (Kadlec, et al., 2000).

2.3.1 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου

Η απομάκρυνση του οργανικού άνθρακα διενεργείται με μεγάλη ταχύτητα σε όλα τα συστήματα υγροβιότοπων και οφείλεται στις αδιατάρακτες συνθήκες στα συστήματα επιφανειακής ροής και στην διήθηση και την απόθεση στα συστήματα υπόγειας ροής. Το οργανικό φορτίο, που εκφράζεται με την έννοια του βιοχημικώς απαιτούμενου οξυγόνου (BOD_5), το οποίο έχει καθιζάνει, υπόκειται σε αερόβια ή αναερόβια αποσύνθεση, αναλόγως της διαθέσιμης ποσότητας του οξυγόνου στο σημείο της απόθεσης. Το απαραίτητο για την αερόβια αποσύνθεση οξυγόνο παρέχεται απευθείας από την ατμόσφαιρα μέσω διάχυσης ή διαρροής του από τις ρίζες των μακροφύτων στη ριζόσφαιρα. Το υπολειπόμενο BOD_5 , το οποίο είναι κολλοειδούς και διαλυμένης μορφής, συνεχίζει να αφαιρείται, με τη βοήθεια μικροοργανισμών που αναπτύσσονται υπό μορφή βιολογικών λεπτών μεμβρανών (βιοφίλμ) ή εκκρίσεων τους στις επιφάνειες των χρησιμοποιούμενων υποστρωμάτων, ή/και των υπογείων τμημάτων της φυτικής βλάστησης (Reed et al., 1995, Kadlec & Knight, 1996, Greenway & Woolley, 1999, Vymazal, 2002, Steer et al., 2002, Al-Omari & Fayyad, 2003). Η βιολογική αυτή διεργασία μπορεί να είναι αερόβια κοντά στην επιφάνεια των συστημάτων επιφανειακής ροής και σε αερόβιες μικροπεριοχές στα συστήματα υπόγειας ροής, αλλά η αναερόβια αποσύνθεση επικρατεί στο υπόλοιπο σύστημα. Η απορρόφηση οργανικού υλικού από τα μακρόφυτα είναι αμελητέα σε σύγκριση με τη βιολογική αποσύνθεση (Watson, et al., 1989).



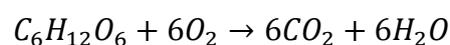
Σχήμα 2.10 Απομάκρυνση οργανικών ρύπων στο εσωτερικό τεχνητών υγροβιότοπων (Giraldo & Zarate, 2001)

Για την κατανόηση του μηχανισμού της βιολογικής επεξεργασίας είναι απαραίτητη η περιγραφή των μικροοργανισμών που ευθύνονται για αυτή. Προκειμένου να συνεχίσει να αναπαράγεται και να λειτουργεί σωστά, ένας οργανισμός πρέπει να έχει μια πηγή ενέργειας, μια πηγή άνθρακα για σύνθεση νεοκυτταρικού υλικού και ανόργανα στοιχεία (θρεπτικά), όπως είναι το άζωτο, ο φώσφορος, το θείο, το κάλιο, το ασβέστιο και το μαγνήσιο. Επίσης, μπορεί να απαιτούνται και μερικά οργανικά θρεπτικά. Συχνά οι βιομηχανικές εκροές απαιτούν την προσθήκη θρεπτικών, όπως είναι ο φώσφορος και το άζωτο, για την αποτελεσματική βιολογική τους επεξεργασία. Οι δυο κύριες πηγές κυτταρικού άνθρακα είναι τα οργανικά χημικά και το διοξείδιο του άνθρακα. Οι οργανισμοί οι οποίοι χρησιμοποιούν οργανικό άνθρακα για τη σύνθεση κυτταρικού ιστού ονομάζονται ετερότροφοι. Οι οργανισμοί των οποίων ο κυτταρικός άνθρακας προέρχεται από το διοξείδιο του άνθρακα καλούνται αυτότροφοι. Και οι δυο τύποι οργανισμών χρησιμοποιούν το φως ή μια χημική αντίδραση οξείδωσης-αναγωγής ως πηγή ενέργειας για την κυτταρική σύνθεση.

Αν ο κύριος στόχος της επεξεργασίας είναι η απομείωση του οργανικού περιεχομένου, οι ετεροτροφικοί μικροοργανισμοί είναι πρωτεύουσας σημασίας διότι χρειάζονται οργανικό υλικό σαν πηγή άνθρακα και έχουν υψηλότερο μεταβολικό ρυθμό σε σχέση με τους αυτότροφους.

2.3.1.1 Αερόβια Αποσύνθεση

Η αερόβια αποσύνθεση του διαλυτού οργανικού υλικού πραγματοποιείται πρωτίστως από αερόβιους χημικοετεροτροφικούς μικροοργανισμούς. Η εξίσωση της οξείδωσης στην περίπτωση που η γλυκόζη κατέχει το ρόλο του υποστρώματος είναι:



Επισημαίνεται ότι και οι δυο παραπάνω ομάδες βακτηρίων καταναλώνουν οργανικά (Cooper, et al., 1996), αλλά ο μεγαλύτερος μεταβολικός ρυθμός των ετερότροφων σημαίνει ότι εκείνοι είναι οι κυρίως υπεύθυνοι για τη μείωση του οργανικού άνθρακα

του συστήματος. Η ανεπαρκής τροφοδότηση οξυγόνου σε αυτή την ομάδα μικροοργανισμών μειώνει σημαντικά την απόδοση της αερόβιας βιολογικής οξειδωσης, ωστόσο, αν η παροχή οξυγόνου δεν είναι περιορισμένη, ο μόνος περιοριστικός παράγων που πλέον υφίσταται είναι το ενεργό οργανικό υλικό που είναι διαθέσιμο στους οργανισμούς.

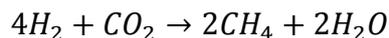
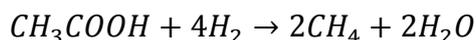
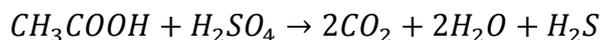
Η βιολογική αποσύνθεση μπορεί να λάβει χώρα μέσα στον όγκο των λυμάτων, όμως ο ρυθμός της είναι συνήθως χαμηλός καθώς υπάρχει μικρός αριθμός παρόντων βακτηρίων (Platzer, 1996). Το σύνολο, σχεδόν, της αποσύνθεσης πραγματοποιείται μέσα στα βακτηριακά φιλμ που δημιουργούνται σε επιφάνειες στερεών, συμπεριλαμβανομένων των ιζημάτων, εδαφών, του μέσου, των σκουπιδιών και των ζωντανών τμημάτων βυθισμένων φυτών.

2.3.1.2 Αναερόβια Αποσύνθεση

Η αναερόβια αποσύνθεση είναι μια διαδικασία πολλών βημάτων που συμβαίνει μέσα σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατά την απουσία διαλυμένου οξυγόνου (Cooper, et al., 1996). Η διεργασία μπορεί να αποδοθεί είτε από επαμφοτερίζοντα είτε από απαραίτητως αναερόβια ετεροτροφικά βακτήρια. Κατά το πρώτο βήμα τα πρωτεύοντα τελικά προϊόντα της ζύμωσης είναι λιπαρά οξέα όπως το οξικό οξύ, το βουτυρικό και το γαλακτικό οξύ, αλκοόλες και τα αέρια CO₂ και H₂.

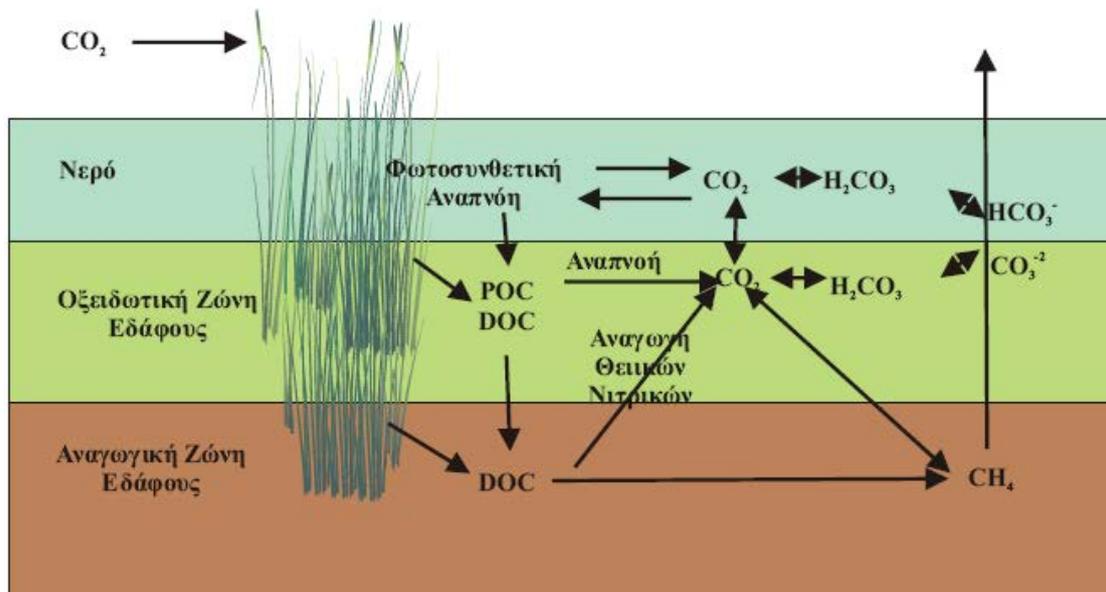


Το οξικό οξύ είναι το πρωτεύον οξύ που σχηματίζεται στα περισσότερα πλημμυρισμένα εδάφη και ιζήματα. Αυστηρά αναερόβια θειοαναγωγικά και μεθανοτροφικά βακτήρια έπειτα χρησιμοποιούν τα τελικά προϊόντα της ζύμωσης και, στην πραγματικότητα, εξαρτώνται από τη σύνθετη κοινωνία των ζυμωτικών βακτηρίων για την παροχή υποστρώματος για τις μεταβολικές τους δραστηριότητες. Και οι δυο ομάδες βακτηρίων είναι σημαντικές για την αποσύνθεση του οργανικού υλικού και τον κύκλο του άνθρακα στους υγροβιότοπους (Vymazal, 1995).



Τα οξεοποιητικά βακτήρια είναι αρκετά προσαρμόσιμα, αλλά τα μεθανογόνα είναι περισσότερο ευαίσθητα και λειτουργούν μόνο σε pH 6,5-7,5. Η υπερπαραγωγή οξέων μπορεί γρήγορα να οδηγήσει σε χαμηλές τιμές pH και, επομένως, να διακόψει τη δράση των μεθανογόνων βακτηρίων και να συντελέσει στην παραγωγή δύσσομων ενώσεων από τον τεχνητό υγροβιότοπο. Η αναερόβια αποσύνθεση του οργανικού υλικού είναι αρκετά βραδύτερη από την αερόβια αποσύνθεση. Ωστόσο, όταν το

οξυγόνο περιορίζεται κατά τη φάση υψηλής οργανικής φορτίσης, η αναερόβια αποσύνθεση υπερισχύει (Cooper, et al., 1996).



Σχήμα 2.11 Ο κύκλος του άνθρακα σε σύστημα τεχνητού υγροβιότοπου υποεπιφανειακής ροής (Ακρατος, 2006)

Η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου μπορεί να περιοριστεί από την αποσύνθεση της φυτικής μάζας και άλλων φυσικών οργανικών που περιέχονται στο σύστημα. Επίσης, η θερμοκρασία δείχνει να επηρεάζει τις συγκεντρώσεις BOD₅ (Reed, et al., 1995), όπως και η εποχιακή εναλλαγή, λόγω μεταβολών στην ανάπτυξη των φυτών (υψηλότερη φυτική παραγωγικότητα κατά τους θερμότερους μήνες του χρόνου), στο σχηματισμό νεκρής οργανικής ύλης (εντονότερη αποσύνθεση οργανικού υλικού κατά τους θερμότερους μήνες του χρόνου) άνωθεν των φίλτρων και στον κύκλο του άνθρακα. Τέλος, αναφέρεται ότι η αφαίρεση οργανικού φορτίου σε όρους BOD₅ είναι ταχύτερη στους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής από ότι στους τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής ροής (Kadlec & Knight, 1996).

2.3.2 Απομάκρυνση Αζώτου

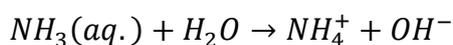
Το άζωτο είναι ένα στοιχείο κλειδί στο βιοχημικό κύκλο των υγροβιότοπων. Απαντάται σε ένα πλήθος διαφορετικών οξειδωτικών καταστάσεων στα υγρά απόβλητα και στους υγροβιότοπους επεξεργασίας λυμάτων, και πολυάριθμες βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες είναι ικανές να το μετατρέψουν από τη μια μορφή στην άλλη.

Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης του οργανικού αζώτου στους υγροβιότοπους επεξεργασίας λυμάτων είναι η συνισταμένη των εξής διαδοχικών διεργασιών: αμμωνιοποίηση, νιτροποίηση, απονιτροποίηση. Η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρικά από νιτροποιητικά βακτήρια σε αερόβιες ζώνες. Το οργανικό άζωτο ανοργανοποιείται σε αμμωνία μέσω της υδρόλυσης και της βακτηριακής αποσύνθεσης. Τα νιτρικά

μετατρέπονται σε αέριο άζωτο (N₂) και υποξείδιο του αζώτου (N₂O) από απονιτροποιητικά βακτήρια σε ανοξικές και αναερόβιες ζώνες. Το οξυγόνο που απαιτείται για τη νιτροποίηση παρέχεται μέσω της διάχυσης από την ατμόσφαιρα και της διαρροής από τις ρίζες των μακροφύτων. Το άζωτο απορροφάται επίσης από τα φυτά, ενσωματώνεται στη βιομάζα και επανέρχεται ως οργανικό άζωτο μετά από αποσύνθεση. Άλλοι μηχανισμοί απομάκρυνσης περιλαμβάνουν την πτητικοποίηση και την προσρόφηση. Κατά μέσο όρο, οι μηχανισμοί αυτοί είναι γενικά μικρότερης σημασίας από τη νιτροποίηση-απονιτροποίηση, αλλά μπορεί να είναι εποχιακά σημαντικοί.

2.3.2.1 Πτητικοποίηση Αμμωνίας

Η πτητικοποίηση της αμμωνίας είναι μια φυσικοχημική διαδικασία στην οποία το αμμωνιακό άζωτο (NH₄-N) βρίσκεται σε ισορροπία μεταξύ των αέριων και των υδροξικών μορφών όπως σημειώνεται:



Οι απώλειες NH₃ μέσω πτητικοποίησης από πλημμυρισμένα εδάφη και ιζήματα είναι αμελητέες αν το pH είναι κάτω από 7,5 και πολύ συχνά οι απώλειες είναι ασήμαντες αν το είναι κάτω από 8,0 (Reddy & Patrick, 1984). Για τιμές του pH ίσες με 9,3 ο λόγος της αμμωνίας προς το αμμωνιακό ιόν είναι 1:1, και οι απώλειες μέσω πτητικοποίησης είναι σημαντικές. Η φωτοσύνθεση των αλγών στους τεχνητούς υγροβιότοπους, όπως επίσης και η φωτοσύνθεση από τα επιπλέοντα ή βυθισμένα μακρόφυτα, συχνά προκαλεί αυξημένες τιμές του pH. Σε μια εκτενή μελέτη βάσει βιβλιογραφικών αναφορών (Vymazal, 1995), εξήχθη το συμπέρασμα ότι ο ρυθμός πτητικοποίησης ελέγχεται από τη συγκέντρωση NH₄⁺ στο νερό, τη θερμοκρασία, την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία, τη φύση και τον αριθμό των υδροχαρών φυτών, καθώς και την ικανότητα του συστήματος να μεταβάλλει το pH σε ημερήσιους κύκλους (η απουσία του CO₂ ευνοεί την πτητικοποίηση).

2.3.2.2 Αμμωνιοποίηση (Ανοργανοποίηση)

Αμμωνιοποίηση (ανοργανοποίηση) είναι η διεργασία στην οποία το οργανικό άζωτο μετατρέπεται σε ανόργανο, και κυρίως NH₄-N. Οι ρυθμοί ανοργανοποίησης είναι ταχύτεροι στην οξειδωτική ζώνη και φθίνουν όσο η ανοργανοποίηση περνά από την αερόβια στην επαμφοτερίζουσα αναερόβια και απολύτως αναερόβια μικροχλωρίδα. Ο ρυθμός αμμωνιοποίησης στους τεχνητούς υγροβιότοπους εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το pH, το λόγο C:N του υπολείμματος, τα διαθέσιμα θρεπτικά στο σύστημα και τις εδαφικές συνθήκες, όπως η σύσταση και δομή του (Reddy & Patrick, 1984). Το βέλτιστο εύρος pH για τη διεργασία της αμμωνιοποίησης είναι μεταξύ 6,5 και 8,5. Στα κορεσμένα εδάφη, το pH κυμαίνεται στα όρια της ουδετερότητας, ενώ κάτω από καλά στραγγιζόμενες συνθήκες η τιμή του pH του εδάφους φθίνει εξαιτίας της συσσώρευσης νιτρικών και της παραγωγής ιόντων H⁺ κατά την ανοργανοποίηση (Patrick & Wyatt, 1964).

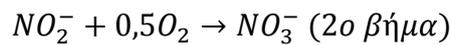
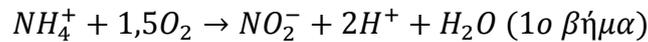


Με βάση δημοσιευμένα δεδομένα, ο ρυθμός της αερόβιας αμμωνιοποίησης διπλασιάζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 °C (Reddy, et al., 1979).

2.3.2.3 Νιτροποίηση/Απονιτροποίηση

Νιτροποίηση

Η νιτροποίηση συνήθως ορίζεται ως η βιολογική οξείδωση του αμμωνίου σε νιτρικά με τα νιτρώδη ως ενδιάμεσο στην αλληλουχία των αντιδράσεων. Η νιτροποίηση είναι μια χημικοαυτοτροφική διεργασία. Τα νιτροποιητικά βακτήρια απορροφούν ενέργεια από την οξείδωση της αμμωνίας και/ή των νιτρικών, και το διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιείται ως πηγή άνθρακα για τη σύνθεση νέων κυττάρων. Οι οργανισμοί αυτοί απαιτούν O₂ κατά τη διάρκεια της οξείδωσης της NH₄-N σε νιτρώδη και των νιτρωδών σε νιτρικά. Η οξείδωση του αμμωνίου σε νιτρικά είναι μια διεργασία δυο βημάτων (Hauk, 1984):



Το πρώτο βήμα, η οξείδωση του αμμωνίου σε νιτρώδη, εκτελείται από αυστηρά χημικολιθοτροφικά (αυστηρά αερόβια) βακτήρια, τα οποία εξαρτώνται απολύτως από την οξείδωση της αμμωνίας για την παραγωγή ενέργειας για ανάπτυξη. Στο έδαφος, είδη που ανήκουν στο γένος *Nitrosospira*, *Nitrosolobus*, *Nitrosococcus* και *Nitrosomonas* έχουν ταυτοποιηθεί. Το είδος *Nitrosomonas europaea* έχει, επίσης, βρεθεί και σε φρέσκα ύδατα (Schmidt, 1982).

Το δεύτερο βήμα στη διεργασία της νιτροποίησης, η οξείδωση των νιτρωδών σε νιτρικά, εκτελείται από επαμφοτερίζοντα χημικολιθοτροφικά βακτήρια, τα οποία μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν οργανικές ενώσεις επιπροσθέτως των νιτρωδών για την παραγωγή ενέργειας για ανάπτυξη. Σε αντίθεση με τα οξειδωτικά βακτήρια της αμμωνίας, μόνο ένα είδος οξειδωτικών βακτηρίων νιτρωδών απαντάται στο έδαφος και το φρέσκο νερό, το *Nitrobacter winogradskyi* (Grant & Long, 1981). Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι ένα ακόμα είδος (*Nitrospira*), επιπλέον του *Nitrobacter*, υπάρχει σε έδαφος και φρέσκο νερό, όπως επίσης και σε θαλάσσιο περιβάλλον (Schmidt, 1982). Επιπλέον, σε αντιπαράθεση με τα οξειδωτικά βακτήρια της αμμωνίας, τουλάχιστον μερικά είδη των οξειδωτικών βακτηρίων νιτρωδών μπορούν να αναπτυχθούν μικτοτροφικά με νιτρώδη και μια πηγή άνθρακα, ή είναι ικανά ακόμη και να αναπτυχθούν κατά την απουσία οξυγόνου (Bock, et al., 1986).

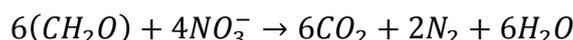
Η νιτροποίηση επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, το pH, την αλκαλικότητα, την ανόργανη πηγή άνθρακα, το μικροβιακό πληθυσμό και τις συγκεντρώσεις NH₄-N και διαλυμένου οξυγόνου. Η βέλτιστη θερμοκρασία για τη νιτροποίηση σε καθαρές καλλιέργειες κυμαίνεται μεταξύ 25 και 35 °C και σε εδάφη από 30 έως 40 °C.

Χαμηλότερες θερμοκρασίες (κάτω των 15 °C) έχουν σημαντικότερη επίπτωση στο ρυθμό νιτροποίησης από ότι έχουν οι θερμοκρασίες μεταξύ 15 και 35 °C. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες για την ανάπτυξη των Nitrobacter και Nitrosomonas είναι 4 και 5 °C αντίστοιχα.

Τα νιτροποιητικά βακτήρια είναι ευαίσθητοι οργανισμοί και απολύτως ευάλωτοι σε ένα πλήθος αναστολέων, όπως είναι οι υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνιακού αζώτου. Ένα στενό εύρος βέλτιστου pH (7,5-8,6), επίσης, υπάρχει, ωστόσο, μη εγκλιματισμένα συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν έτσι ώστε να νιτροποιούν σε συνθήκες με αρκετά χαμηλότερες τιμές pH. Περίπου 4,3 mg O₂ ανά mg αμμωνιακού αζώτου απαιτούνται ώστε να οξειδωθεί σε νιτρικό άζωτο. Κατά τη διαδικασία της μετατροπής, μια μεγάλη ποσότητα αλκαλικότητας καταναλώνεται, ήτοι 8,64 mg HCO₃⁻ ανά mg αμμωνιακού αζώτου που οξειδώνεται (Cooper, et al., 1996).

Απονιτροποίηση

Η πρώτη ανοξική διεργασία οξείδωσης που συμβαίνει μετά την εξάντληση του οξυγόνου είναι η αναγωγή των νιτρικών σε μοριακό άζωτο ή αέρια του αζώτου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται απονιτροποίηση. Από βιοχημικής άποψης, η απονιτροποίηση είναι μια βακτηριακή διεργασία στην οποία τα οξειδία του αζώτου (σε ιοντικές και αέριες μορφές) διαδραματίζουν το ρόλο των τελικών αποδεκτών ηλεκτρονίων σε ότι αφορά την κυκλοφορία των ηλεκτρονίων κατά την αναπνοή. Τα ηλεκτρόνια φέρουν ηλεκτρονοδοτικό υπόστρωμα (συνήθως, αλλά όχι αποκλειστικά, οργανικές ενώσεις) μέσα από διάφορα συστήματα μεταφοράς σε μια πιο οξειδωμένη μορφή αζώτου. Η προκύπτουσα ελεύθερη ενέργεια αποθηκεύεται υπό τη μορφή ATP, μετά από φωσφορυλίωση, και χρησιμοποιείται από τους απονιτροποιητικούς οργανισμούς για να υποστηριχτεί η αναπνοή. Η απονιτροποίηση υπό τη μορφή εξίσωσης είναι (Hauk, 1984):



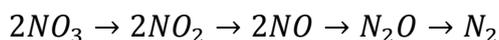
Η αντίδραση αυτή είναι μη αναστρέψιμη και συμβαίνει υπό την παρουσία διαθέσιμου οργανικού υποστρώματος μόνο κάτω από αναερόβιες ή ανοξικές συνθήκες ($E_h = -350$ ως $+100$ mV), κατά την οποία το άζωτο χρησιμοποιείται ως ένας δέκτης ηλεκτρονίων στη θέση του οξυγόνου. Βέβαια, ολοένα και περισσότερα στοιχεία παρουσιάζονται από καλλιέργειες σχετικά με την ικανότητα αναγωγής των νιτρικών υπό την παρουσία οξυγόνου. Συνεπώς, σε υδατοκορεσμένα εδάφη, η αναγωγή των νιτρικών μπορεί να ξεκινήσει πριν από την εξάντληση του οξυγόνου (Laanbroek, 1990).

Η παραγωγή αέριων μορφών αζώτου κατά την απονιτροποίηση μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί ως εξής (Hauk, 1984):



Η απονιτροποιητική ικανότητα έχει διαπιστωθεί σε 17 γένη βακτηρίων. Τα περισσότερα απονιτροποιητικά βακτήρια είναι χημικοαυτοτροφικοί οργανισμοί, αποκομίζοντας ενέργεια μόνο από χημικές αντιδράσεις και χρησιμοποιούν οργανικές ενώσεις ως δότες ηλεκτρονίων και ως πηγή κυτταρικού άνθρακα (Hauk, 1984). Τα γένη *Bacillus*, *Micrococcus* και *Pseudomonas* είναι πιθανότατα τα πιο σημαντικά στα εδάφη – στο υδατικό περιβάλλον τα πιο σημαντικά είναι τα *Pseudomonas*, *Aeromonas* και *Vibrio* (Grant & Long, 1981). Όταν το οξυγόνο είναι διαθέσιμο, αυτοί οι οργανισμοί οξειδώνουν το υδατανθρακικό υπόστρωμα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό (Reddy & Patrick, 1984). Η αερόβια αναπνοή με το οξυγόνο ως δέκτη ηλεκτρονίων, ή η αναερόβια αναπνοή που χρησιμοποιεί το άζωτο για τον ίδιο σκοπό, εκτελείται από τον απονιτροποιητή με την ίδια σειρά του ηλεκτρονιακού μεταφορικού συστήματος. Η πραγματοποίηση της λειτουργίας αυτής τόσο ως αερόβια, όσο και ως αναερόβια είναι εξέχουσας σημασίας διότι επιτρέπει στην απονιτροποίηση να προχωρήσει με ικανοποιητικό ρυθμό αμέσως με τη μετάβαση σε ανοξικές συνθήκες (με την τιμή του redox περί τα 300 mV) χωρίς τη μεταβολή του μικροβιακού πληθυσμού (Hauk, 1984). Επειδή η απονιτροποίηση εκτελείται από επαμφοτερίζοντα αναερόβια ετεροτροφικά βακτήρια που υποκαθιστούν τις οξειδωμένες αζωτούχες μορφές με O₂ ως δέκτες ηλεκτρονίων στις διεργασίες αναπνοής, και επειδή οι διεργασίες αυτές ακολουθούν αερόβιες βιοχημικές οδούς, μπορεί να είναι παραπλανητικό να αναφέρεται η απονιτροποίηση ως αναερόβια διεργασία: εναλλακτικά, είναι μια διεργασία που συντελείται υπό το καθεστώς ανοξικών συνθηκών (Hauk, 1984).

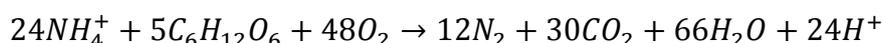
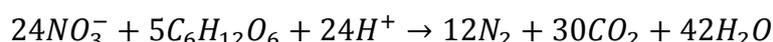
Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η πραγματική αλληλουχία των βιοχημικών μεταβολών από τα νιτρικά προς το στοιχειακό αέριο άζωτο είναι (Vymazal, 1995):



Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό απονιτροποίησης περιλαμβάνουν την απουσία οξυγόνου, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, την υγρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία, το pH, την παρουσία απονιτροποιητών, τον τύπο του εδάφους, το οργανικό υλικό και την παρουσία επικαλύπτοντος νερού. Η ποσότητα του αναπτυσσόμενου N₂O κατά την απονιτροποίηση εξαρτάται από την ποσότητα του αζώτου που απονιτροποιείται και το λόγο του N₂ προς το παραγόμενο N₂O. Ο λόγος επηρεάζεται, επίσης, από τον αερισμό, το pH, τη θερμοκρασία και το λόγο των νιτρικών προς την αμμωνία στο απονιτροποιητικό σύστημα (Vymazal, 1995).

Η παρουσία διαλυμένου οξυγόνου περιορίζει τα ένζυμα που απαιτούνται για την απονιτροποίηση και είναι καθοριστική παράμετρος (Cooper, et al., 1996). Το βέλτιστο εύρος pH κυμαίνεται μεταξύ 7 και 8, ωστόσο, η αλκαλικότητα που παράγεται κατά την απονιτροποίηση μπορεί να προκαλέσει αύξηση του pH. Η απονιτροποίηση είναι, ακόμη, θερμοκρασιακά εξαρτώμενη και εκτελείται πολύ αργά σε θερμοκρασίες κάτω των 5 °C.

Η νιτροποίηση και απονιτροποίηση είναι δεδομένο ότι συμβαίνουν ταυτόχρονα σε πλημμυρισμένα εδάφη, στα οποία υπάρχουν αερόβιες και αναερόβιες ζώνες. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να συμβαίνουν ταυτόχρονα σε ένα πλημμυρισμένο εδαφικό στοιχείο ή έναν πυθμένα νερού που περιλαμβάνει μια αερόβια επιφανειακή στρώση πάνω από μια αναερόβια στρώση, ή στην αερόβια ριζόσφαιρα εντός του κατά τα άλλα αναερόβιου εδάφους. Συνδυάζοντας τις δυο παραπάνω αντιδράσεις, μια ισορροπημένη εξίσωση που συμβαίνει εντός αερόβιων και αναερόβιων ζωνών μπορεί να διατυπωθεί ως (Reddy & Patrick, 1984):



2.3.2.4 Πρόσληψη από τα Φυτά

Ο εν δυνάμει ρυθμός πρόσληψης θρεπτικών στοιχείων από ένα φυτό περιορίζεται από την καθαρή παραγωγικότητά του (ρυθμός ανάπτυξης) και τη συγκέντρωση των θρεπτικών στον ιστό του. Η αποθηκευτική ικανότητα είναι ομοίως εξαρτώμενη από τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο φυτικό ιστό και, επίσης, το μέγιστο δυναμικό συσσώρευσης βιομάζας, που είναι η μέγιστη ηρτημένη σοδειά (βιομάζα ανά μονάδα επιφάνειας). Τα επιθυμητά, επομένως, χαρακτηριστικά ενός φυτού που χρησιμοποιείται για την απορρόφηση και αποθήκευση θρεπτικών στοιχείων θα περιελάμβαναν: ταχεία ανάπτυξη, υψηλό περιεχόμενο θρεπτικών στον ιστό και την ικανότητα να επιτυγχάνουν μεγάλη ηρτημένη σοδειά (Reddy & DeBusk, 1987).

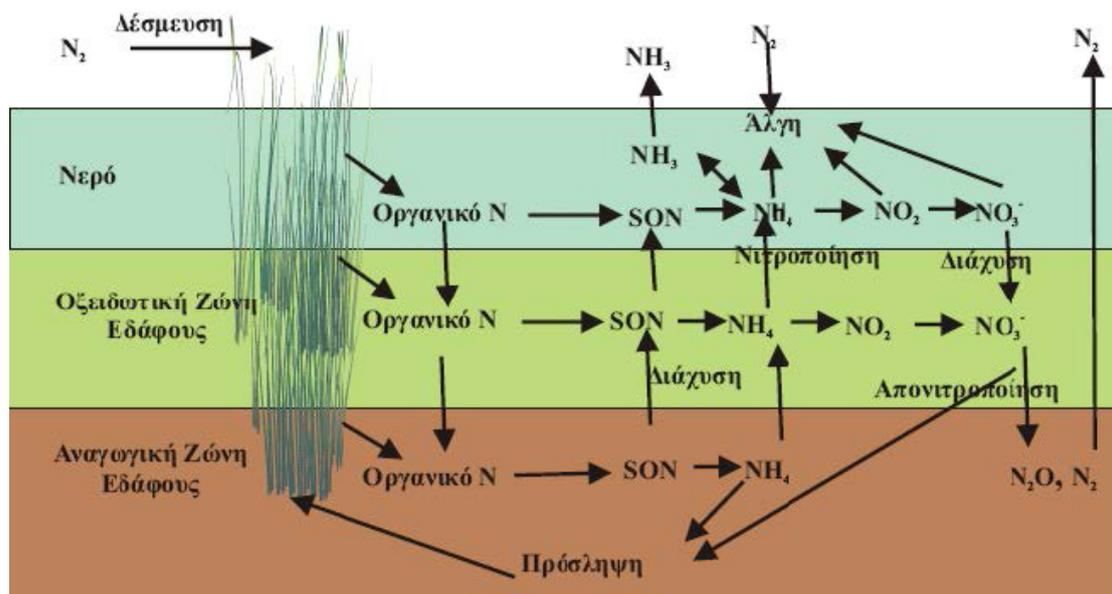
Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές για συγκεντρώσεις αζώτου σε φυτικό ιστό, όπως επίσης και για ηρτημένα αποθέματα αζώτου σε φυτά που βρέθηκαν σε φυσικά βάθρα (Vymazal, 1995). Η ικανότητα πρόσληψης των αναδυόμενων μακροφύτων και επομένως η ποσότητα που μπορεί να απομακρυνθεί εφόσον η βιομάζα συλλέγεται, κυμαίνεται οριακά μεταξύ 1000-2500 kg N ha⁻¹ yr⁻¹. Ο υψηλής παραγωγικότητας υδατικός υάκινθος (*Eichhornia crassipes*) έχει υψηλότερη ικανότητα πρόσληψης (έως 6000 kg N ha⁻¹ yr⁻¹), ενώ η ικανότητα των βυθισμένων μακροφύτων είναι υποδεέστερη (έως 700 kg N ha⁻¹ yr⁻¹) (Brix, 1994).

Μόνο ορισμένα δεδομένα έχουν καταγραφεί σχετικά με φυτά από τεχνητούς υγροβιότοπους που επεξεργάζονται υγρά απόβλητα. Επιπρόσθετα, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι ποσότητες των θρεπτικών που γίνεται να απομακρυνθούν μέσω της συγκομιδής στα συστήματα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας είναι γενικά ασήμαντες σε σύγκριση με τις φορτίσεις των λυμάτων που δέχονται οι τεχνητοί υγροβιότοποι (Brix, 1994). Η συγκεκριμένη παρατήρηση αληθεύει ιδιαίτερα σε τεχνητούς υγροβιότοπους με αναδυόμενα μακρόφυτα. Έχει καταγραφεί ότι κάτω από βέλτιστες συνθήκες η ποσότητα του αφαιρούμενου με τη βιομάζα αζώτου δεν ξεπερνά το 10% του ολικά απομακρυνόμενου αζώτου (TN) (Herskowitz, 1986).

Αν δε γίνεται συγκομιδή στον υδροβιότοπο, η συντριπτική πλειοψηφία των θρεπτικών στοιχείων που έχουν ενσωματωθεί στο φυτικό ιστό θα επανέλθουν στο νερό μέσω των διεργασιών αποσύνθεσης. Η μακροπρόθεσμη αποθήκευση θρεπτικών στο σύστημα ενός υδροβιότοπου είναι αποτέλεσμα του αποσυντιθέμενου κλάσματος των σκουπιδιών που παράγονται από διάφορα στοιχεία των βιογεωχημικών κύκλων, όπως επίσης και της απόθεσης ενώσεων πλούσιων σε θρεπτικά (Brix, 1994). Η εποχικότητα της συγκομιδής των φυτών μπορεί επίσης να είναι σημαντική όσον αφορά την ποσότητα της μάζας των θρεπτικών που δύναται να συλλεχθεί. Επί παραδείγματι, δεν είναι δυνατό να συλλέξεις το κοινό καλάμι κατά την περίοδο μέγιστου ηρητημένου αποθέματος καθώς το φυτό θανατώνεται άμεσα με τέτοια δραστηριότητα. Το *Phragmites* δε μεταθέτει τα αποθηκευμένα προϊόντα στα ριζώματά του κατά την περίοδο της ανάπτυξής του, παρά μόνο πριν ακριβώς από την ολοκλήρωσή της. Ο καλύτερος χρόνος για να συλλεχθεί το κοινό καλάμι χωρίς να τραυματιστεί η διαδικασία ανάπτυξης του φυτού είναι νωρίς την άνοιξη, ωστόσο, οι άνω του εδάφους συγκεντρώσεις θρεπτικών στο φυτικό ιστό ισούνται περίπου με το 30-50% των αντίστοιχων συγκεντρώσεων της περιόδου κατά την οποία παρατηρείται το μέγιστο της ανάπτυξης.

2.3.2.5 Προσρόφηση από το Εδαφικό Υπόβαθρο

Σε αναγωγικές συνθήκες η $\text{NH}_4\text{-N}$ είναι σταθερή και δύναται να προσροφηθεί από τα ενεργά εδάφια ενός πυθμένα τεχνητού υδροβιότοπου υποεπιφανειακής ροής ή από τα ιζήματα ενός τεχνητού υδροβιότοπου επιφανειακής ροής. Ωστόσο, η ιοντοανταλλαγή της $\text{NH}_4\text{-N}$ σε τμήματα κατιοντοανταλλαγής του εδαφικού υποβάθρου δε λογίζεται ως μακροχρόνια καταβόθρα της απομακρυνόμενης $\text{NH}_4\text{-N}$. Πιθανότερα, η ρόφηση της $\text{NH}_4\text{-N}$ θεωρείται πως είναι άμεσα αναστρέψιμη. Όσο η $\text{NH}_4\text{-N}$ χάνεται από το σύστημα μέσω νιτροποίησης, το ισοζύγιο ανταλλαγής αναμένεται να ξαναϊσορροπήσει από μόνο του. Η προσροφημένη $\text{NH}_4\text{-N}$ σε ένα σύστημα συνεχούς ροής θα είναι, επομένως, σε ισορροπία με τη διαλυμένη $\text{NH}_4\text{-N}$. Σχετικά με το περιεχόμενο του νερού σε αμμώνιο, μπορεί να πραγματοποιηθεί εναλλάξ φόρτιση και εκφόρτιση των εδαφίων όπου σημειώνεται η ρόφηση. Η διαλείπουσα φόρτιση ενός συστήματος θα δώσει ταχεία απομάκρυνση $\text{NH}_4\text{-N}$ μέσω προσροφητικών μηχανισμών που οφείλεται στην εξάντληση της $\text{NH}_4\text{-N}$ στα εδάφια προσρόφησης κατά τις περιόδους ανάπαυσης.



Σχήμα 2.12 Ο κύκλος του αζώτου σε τεχνητό υγροβιότοπο υποεπιφανειακής ροής (Ακρατος, 2006)

2.3.3 Απομάκρυνση Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS)

2.3.3.1 Απομάκρυνση Στερεών σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους Επιφανειακής Ροής

Τα αιωρούμενα στερεά είναι προϊόντα των φυσικών διαδικασιών που συντελούνται στους υγροβιότοπους και αποτελούν κοινά ρυπαντικά στοιχεία στα υγρά απόβλητα. Το εισερχόμενο σωματιδιακό υλικό συνήθως έχει άπλετο χρόνο να καθιζάνει και να παγιδευτεί μέσα σε σκουπίδια ή νεκρές ζώνες.

Στα συστήματα επιφανειακής ροής, οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης των στερεών είναι η κροκίδωση/καθίζηση και η διήθηση/αναχαίτιση, ενώ η παραγωγή των στερεών μπορεί να προέλθει από την αποσύνθεση ασπόνδυλων οργανισμών, τον κατακερματισμό των υπολειμμάτων των φυτών, την παραγωγή πλαγκτόν και μικροβίων στην υδατική φάση ή στην επιφάνεια των φυτών καθώς και το σχηματισμό χημικών ιζημάτων, όπως είναι ο θειούχος σίδηρος (USEPA, 2000). Τα περισσότερα καθιζάνοντα στερεά απομακρύνονται σε απόσταση 15 έως 30 μέτρα από την είσοδο του συστήματος. Η βέλτιστη απομάκρυνση των στερεών απαιτεί την ύπαρξη πλούσιας βλάστησης που θα διευκολύνει τις διεργασίες της καθίζησης και διήθησης ενώ παράλληλα θα εμποδίσει την εκ νέου ανάπτυξη των αλγών. Τέλος, για την απομάκρυνση των αλγών από το σύστημα υγροβιότοπων συνήθως απαιτείται υδραυλικός χρόνος παραμονής που κυμαίνεται από 6 μέχρι 10 μέρες (Crites & Tchobanoglous, 1998).

Τα ιζήματα και τα μικροσυντρίμια ενός υγροβιότοπου επιφανειακής ροής βρίσκονται τυπικά σε κατάσταση ουδέτερης πλευστότητας, είναι κολλώδη και

ευκόλως αναδεύσιμα. Ο βιοστροβιλισμός από ψάρια, θηλαστικά και πτηνά μπορεί να προκαλέσει την επαναιώρηση των υλικών αυτών και να οδηγήσει στη μέτρηση υψηλών συγκεντρώσεων TSS στην εκροή του υδροβιότοπου. Το οξυγόνο που δημιουργείται από τη φωτοσύνθεση των αλγών ή το σχηματιζόμενο σε αναερόβιες συνθήκες μεθάνιο, μπορεί να προκαλέσει την επίπλευση των κολλοειδών συσσωρεύσεων. Η επαναιώρηση (εξαιτίας διατμητικών τάσεων του ρευστού) των στερεών των πυθμένων δεν είναι συνήθως διεργασία ιδιαίτερης σημασίας, παρά μόνο στη γύρω από τη σημειακή απόθεση αποβλήτων περιοχή εξαιτίας των χαμηλών ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται υπό φυσιολογικές συνθήκες για τους σκοπούς της επεξεργασίας των λυμάτων.

2.3.3.2 Απομάκρυνση Στερεών σε Τεχνητούς Υδροβιότοπους Υποεπιφανειακής Ροής

Η δημιουργία σωματιδιακού υλικού στους τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής μπορεί να συμβεί μέσω όλων των μηχανισμών που ενεργούν και στους υδροβιότοπους επιφανειακής ροής. Υπεδαφικά τμήματα μακροφύτων – ρίζες και ριζώματα – πεθαίνουν, αποσυντίθενται και παράγουν λεπτά συνονθυλεύματα συντριμιών. Πολλοί άλλοι οργανισμοί είναι παρόντες στον πυθμένα και μπορούν να συμβάλλουν στην παραγωγή TSS μέσω της ίδιας οδού: άλγη, μύκητες και βακτήρια πεθαίνουν και συνεισφέρουν σε σωματιδιακό υλικό στο νερό που ρέει διά μέσου του κενού των πόρων. Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι ανομοιογενώς διατεταγμένοι χωρικά μέσα στο χαλικώδη πυθμένα, με τους περισσότερους να βρίσκονται κοντά στο σημείο εισροής των λυμάτων και κοντά στο βυθό (Bavor, et al., 1988).

Στα συστήματα υποεπιφανειακής ροής, ένας από τους κύριους ενδιάμεσους μηχανισμούς απομάκρυνσης των αιωρούμενων στερεών είναι η κροκίδωση και καθίζηση των κολλοειδών σωματιδίων. Τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην απομάκρυνση των στερεών λόγω των σχετικά χαμηλών ταχυτήτων που επικρατούν και της μεγάλης επιφάνειας του υποστρώματος. Πρακτικά, λειτουργούν όπως και τα φίλτρα χαλικιών παρέχοντας τη δυνατότητα διαχωρισμού των στερεών μέσω της καθίζησης λόγω βαρύτητας, των φυσικών διεργασιών στράγγισης και δέσμευσης των σωματιδίων καθώς και της προσρόφησης στο φιλμ βιομάζας που αναπτύσσεται και προσκολλάται στα χαλίκια και στο ριζικό σύστημα των φυτών (USEPA, 2000). Τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής προστατεύονται από τα ρεύματα ανέμου και την επαναιώρηση των στερεών (λόγω της έλλειψης ελεύθερης επιφάνειας ρευστού), για αυτό δίνουν τη δυνατότητα παραγωγής εκροής με χαμηλότερες συγκεντρώσεις ολικών αιωρούμενων στερεών, συγκριτικά με τα συστήματα επιφανειακής ροής. Η πλειονότητα των στερεών καθιζάνει ή παγιδεύεται σε απόσταση ίση με το 10-20% της συνολικής απόστασης του υδροβιότοπου. Η έμφραξη του υποστρώματος αποτελεί συχνό φαινόμενο στα συστήματα υποεπιφανειακής ροής και συμβαίνει κυρίως λόγω της επιβολής υψηλών οργανικών φορτίσεων και φορτίσεων στερεών στην είσοδο του υδροβιότοπου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διέλευση των λυμάτων από την επιφάνεια του υποστρώματος

και όχι διαμέσου των πόρων του, όπως θα έπρεπε να συμβαίνει υπό κανονικές συνθήκες (Crites & Tchobanoglous, 1998).

2.3.4 Απομάκρυνση Φωσφόρου

Στα λύματα, όπως και στα φυσικά ύδατα, ο φώσφορος βρίσκεται κυρίως υπό την μορφή φωσφορικών αλάτων. Οι πιθανές μορφές του στα υγρά απόβλητα είναι:

- Ανόργανος φώσφορος, κυρίως ως ορθοφωσφορικά (PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} , H_2PO_4^-), ή και πολυφωσφορικά ($\text{P}_3\text{O}_{10}^{-5}$, $\text{P}_2\text{O}_7^{-4}$)
- Οργανικός φώσφορος, σε μικρότερες ποσότητες από ότι ο ανόργανος

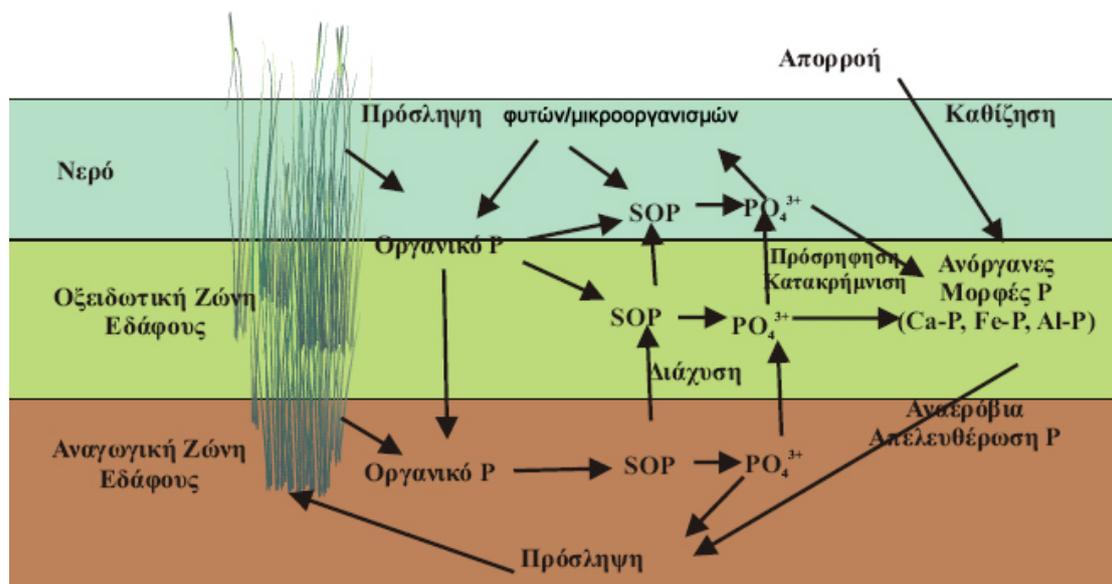
Οι μεγάλες συγκεντρώσεις φωσφορικού άλατος επιταχύνουν την ανάπτυξη των οργανισμών που βασίζονται σε αυτόν (άλγη και φύκια). Οι οργανισμοί αυτοί δεσμεύουν μεγάλες ποσότητες οξυγόνου και επιπλέον στην επιφάνεια του ανακλώντας σημαντικό μέρος της ακτινοβολίας του ηλίου, ενισχύοντας έτσι το φαινόμενο του ευτροφισμού και καθιστώντας την απομάκρυνσή του φωσφόρου από τα απόβλητα ιδιαίτερα σημαντική. Οι τεχνητοί (και φυσικοί) υγροβιότοποι είναι ικανοί να απορροφήσουν νέα φορτία φωσφόρου (P) και υπό από τις κατάλληλες συνθήκες να αποτελέσουν μια χαμηλού κόστους εναλλακτική της χημικής και βιολογικής επεξεργασίας.

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής, το μέσο μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε να διαθέτει την απαιτούμενη ικανότητα ρόφησης που θα συμβάλλει στη σημαντική απομάκρυνση του φωσφόρου (Machum, et al., 1995). Η «αποθήκη» αυτή σταδιακά κορέννεται, δημιουργώντας την ανάγκη αντικατάστασης του μέσου και επαναλειτουργίας του υγροβιότοπου.

Στους υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής, οι κύριοι μηχανισμοί που δρουν για την απομάκρυνση του φωσφόρου είναι η προσρόφηση, η χημική κατακρήμνιση και η πρόσληψη από τα φυτά. Η απομάκρυνση του φωσφόρου σε μακροχρόνια βάση κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα αφού, παρά το γεγονός ότι τα φυτά προσλαμβάνουν άμεσα τις ανόργανες μορφές του φωσφόρου, στο τέλος του κύκλου ζωής τους απελευθερώνουν κάποιες ποσότητες φωσφόρου. Οι αλληλεπιδράσεις του εδάφους και ο χρόνος παραμονής των λυμάτων, αποτελούν δύο ακόμη παραμέτρους που επηρεάζουν τις διεργασίες απομάκρυνσης φωσφόρου. Ενδεικτικά, στα συστήματα με χρόνο παραμονής 5-10 μέρες, η απομάκρυνση του φωσφόρου σπάνια ξεπερνά τα 1-3 mg/L (Crites & Tchobanoglous, 1998).

Η απομάκρυνση των φωσφορικών στα συστήματα επιφανειακής ροής συνδέεται με τη βαθμιαία συσσώρευση και εναπόθεσή τους στα ιζήματα του υγροβιότοπου. Η ανακύκλωση και αποθήκευση των φωσφορικών περιλαμβάνει ένα σύνθετο σύνολο διαδικασιών όπου εμπλέκονται διάφορες μορφές των φωσφορικών. Οι αδιάλυτες οργανικές και ανόργανες μορφές των φωσφορικών καθιζάνουν ή παγιδούνται στις στερεές επιφάνειες της υδατικής φάσης, στον πυθμένα ή σε άλλα επιπλέοντα στερεά του υγροβιότοπου. Πολλές από τις αδιάλυτες ενώσεις μπορούν και

μετασχηματίζονται μέσω χημικών και βιολογικών διεργασιών σε μορφές φωσφορικών που είναι διαθέσιμες για πρόσληψη από τα αναδυόμενα, βυθισμένα και επιπλέοντα φυτά. Οι ποσότητες των φωσφορικών που προσλαμβάνονται με αυτό το τρόπο ανακυκλώνονται πίσω στον υδροβιότοπο όπου γίνονται διαθέσιμες για άλλους οργανισμούς ή εξέρχονται εντελώς από το σύστημα μέσω της υδατικής φάσης. Αντίστοιχα, οι μορφές του φωσφόρου που αντιστέκονται στις διεργασίες αποσύνθεσης, κατακρατούνται στο πυθμένα του υδροβιότοπου και τελικά απομακρύνονται από το σύστημα ως συσσωρευμένα ιζήματα. Αυτά τα κλάσματα, μαζί με κάθε άλλη μορφή φωσφορικών που απομακρύνονται από την υδατική φάση και εναποτίθενται στον πυθμένα του υδροβιότοπου, συνεισφέρουν στην συνολική απομάκρυνση φωσφορικών από το σύστημα (USEPA, 2000). Στα συστήματα υπο-επιφανειακής ροής οι μηχανισμοί απομάκρυνσης φωσφόρου είναι παρόμοιοι με αυτούς των συστημάτων επιφανειακής ροής, με τη διαφορά ότι εάν επιθυμούνται υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης φωσφόρου, απαιτείται η χρήση κατάλληλου υποστρώματος που θα ενισχύσει τη διεργασία της προσρόφησης (Crites & Tchobanoglous, 1998).



Σχήμα 2.13 Κύκλος Φωσφόρου σε Τεχνητό Υδροβιότοπο Υποεπιφανειακής Ροής (Άκρατος, 2006)

2.3.5 Απομάκρυνση Παθογόνων Παραγόντων

Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που περιέχονται στα αστικά υγρά απόβλητα είναι κυρίως βακτήρια, ιοί, πρωτόζωα και έλμινθοι (*helminthes*). Ο προσδιορισμός τους γίνεται με τη βοήθεια ενδεικτικών μικροοργανισμών, που η παρουσία τους στο νερό σημαίνει και την πιθανή παρουσία των παθογόνων μικροοργανισμών. Ως ενδεικτικοί παθογόνοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούνται τα κολοβακτηρίδια *Escheristia Coli* (E-Coli), τα *Enterobacher Aerogenes*, τα κολοβακτηρίδια περιττωματικής

προέλευσης (Fecal Coliforms, FC) και το σύνολο των κολοβακτηριδίων (Total Coliforms, TC).

Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των βακτηρίων και παρασίτων, που είναι συνήθη στα περισσότερα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, περιλαμβάνουν καθίζηση, προσρόφηση, ακτινοβολία (ηλιακό φως), ξήρανση, εμπλοκή, ανταγωνιστικές επιδράσεις, φυσική φθορά και γενικά έκθεση τους σε άλλες αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες (Kadlec, et al., 2000).

Η επιτυγχανόμενη απομάκρυνση παθογόνων στα συστήματα των τεχνητών υδροβιότοπων κυμαίνεται μεταξύ 0,5-3 λογαριθμικών μονάδων, αναλόγως της κατηγορίας του παθογόνου.

Πίνακας 2.5 Λογαριθμική Μείωση ή Απενεργοποίηση των Παθογόνων ανά Κατηγορία Συστήματος Επεξεργασίας Λυμάτων (WHO, 2006)

Διεργασία επεξεργασίας	Λογαριθμική απομάκρυνση παθογόνων ⁽¹⁾			
	Ιοί	Βακτήρια	Πρωτόζωα (κύστες)	Έλμινθες (αυγά)
Βιολογικές διεργασίες χαμηλού ρυθμού:				
▪ Τεχνητές λίμνες	1 – 4	1 – 6	1 – 4	1 – 3 ⁽²⁾
▪ Δεξαμενές αποθήκευσης και επεξεργασίας λυμάτων	1 – 4	1 – 6	1 – 4	1 – 3 ⁽²⁾
▪ Τεχνητοί υδροβιότοποι	1 – 2	0,5 – 3	0,5 – 2	1 – 3 ⁽²⁾
Διεργασίες υψηλού ρυθμού:				
<i>Πρωτοβάθμια επεξεργασία</i>				
▪ Πρωτοβάθμια καθίζηση	0 – 1	0 – 1	0 – 1	0 – <1 ⁽²⁾
▪ Χημικά υποβοηθούμενη 1βάθμια επεξεργασία	1 – 2	1 – 2	1 – 2	1 – 3 ⁽²⁾
▪ Αναερόβιος αντιδραστήρας στρώματος ιλύος ανοδικής ροής (UASB)	0 – 1	0,5 – 1,5	0 – 1	0,5 – 1 ⁽²⁾
<i>Δευτεροβάθμια επεξεργασία</i>				
▪ Σύστημα ενεργού ιλύος + 2βάθμια καθίζηση	0 – 2	1 – 2	0 – 1	1 – <2 ⁽²⁾
▪ Βιολογικό φίλτρο + 2βάθμια καθίζηση	0 – 2	1 – 2	0 – 1	1 – 2 ⁽³⁾
▪ Αεριζόμενη λίμνη + λίμνη καθίζησης	1 – 2	1 – 2	0 – 1	1 – 3 ⁽³⁾
<i>Τριτοβάθμια επεξεργασία</i>				
▪ Συσσωμάτωση/κροκίδωση	1 – 3	0 – 1	1 – 3	2 ⁽²⁾
▪ Φίλτραση υψηλού ρυθμού με κοκκώδες υπόστρωμα ή φίλτραση χαμηλού ρυθμού με υπόστρωμα άμμου	1 – 3	0 – 3	0 – 3	1 – 3 ⁽²⁾
▪ Φίλτραση με διπλό υπόστρωμα	1 – 3	0 – 1	1 – 3	2 – 3 ^(2,4)
▪ Σύστημα μεμβρανών	2,5 – >6	3,5 – >6	>6	>3 ^(2,4)
<i>Απολύμανση</i>				
▪ Χλωρίωση (ελεύθερο χλώριο)	1 – 3	2 – 6	0 – 1,5	0 – <1 ⁽²⁾
▪ Οζόνωση	3 – 6	2 – 6	1 – 2	0 – 2 ⁽³⁾
▪ Υπεριώδης ακτινοβολία	1 – >3	2 – >4	>3	0 ⁽³⁾

1) Η λογαριθμική μείωση εκφράζεται ως $\log_{10} [(αρχική\ συγκέντρωση\ παθογόνων)/(τελική\ συγκέντρωση\ παθογόνων)]$ δηλαδή, μείωση 1 λογαριθμικής μονάδας ισούται με 90%

απομάκρυνση, 2 λογ. μονάδων με 99%, 3 λογ. μονάδων με 99,9% κ.ο.κ., (2) Αποτελέσματα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας μεγάλης κλίμακας, (3) Θεωρητική απόδοση βάσει των μηχανισμών απομάκρυνσης, (4) Πειραματικά αποτελέσματα με εισερχόμενο φορτίο παθογόνων 2 λογαριθμικών μονάδων (η πραγματική απομάκρυνση μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που καταγράφηκε στα πειράματα).

2.3.6 Απομάκρυνση Μετάλλων

Τα μέταλλα που εισέρχονται στα συστήματα των υγροβιότοπων μπορεί να είναι: χαλκός (Cu), ψευδάργυρος (Zn), χρώμιο (Cr), κάδμιο (Cd), σίδηρος (Fe), μόλυβδος (Pb), μαγγάνιο (Mn), υδράργυρος (Hg), νικέλιο (Ni), άργυρος (Ag) σύμφωνα με την καταγραφή αναφορών από την IWA. Συνήθως εισέρχονται ως αδιάλυτα αιωρούμενα στερεά και απομακρύνονται με τρόπο παρόμοιο με τα αιωρούμενα στερεά. Ανάλογα με την τιμή του pH και το δυναμικό οξειδοαναγωγής τα αδιάλυτα είδη μπορεί να επαναδιαλυθούν. Στους σημαντικούς μηχανισμούς απομάκρυνσης μετάλλων περιλαμβάνονται κυρίως η προσρόφηση, η χημική κατακρήμνιση, η ιον ανταλλαγή, ενώ σε μικρότερο βαθμό η φίλτρανση και η πρόσληψή τους από τις ρίζες των φυτών (Kadlec, et al., 2000).

2.4 Εκπομπές Αερίων σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους

2.4.1 Παράγοντες Επίδρασης και Ποσοτικοποίηση Εκπομπών

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), όπως το μεθάνιο (CH₄) και το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), λογίζονται ως ένα παραπροϊόν της λειτουργίας των τεχνητών υγροβιότοπων, η σημασία του οποίου αυξάνεται τα τελευταία χρόνια. Το μεθάνιο παράγεται από τη διεργασία της μεθανογένεσης, ενώ το υποξείδιο του αζώτου είναι προϊόν της απονιτροποίησης και/ή της νιτροποίησης αζωτούχων ενώσεων από μικροοργανισμούς. Μεταξύ των διάφορων περιβαλλοντικών παραγόντων που επηρεάζουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, ο σημαντικότερος είναι η διαθεσιμότητα του άνθρακα και των θρεπτικών (κυρίως του αζώτου) που εξαρτώνται απευθείας από τη φόρτιση των λυμάτων, τη θερμοκρασία, το υδρολογικό καθεστώς (περιοδική ή συνεχή ροή), το βάθος των υπογείων υδάτων, την υγρασία του υλικού φίλτρανσης (νερό πλήρωσης εδαφικών πόρων (WFSP)), και την παρουσία φυτών μεγάλων διακυτταρικών κενών.

Πίνακας 2.6 Επιλεγμένοι Παράγοντες Επίδρασης Εκπομπών CH₄ και N₂O σε Τεχνητούς Υγροβιότοπους (IPCC, 2006)

Παράγοντες/Διεργασίες	CH ₄	N ₂ O
Υψηλότερη θερμοκρασία νερού/εδάφους/αέρα	Αύξηση σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις πλην ελαχίστων εξαιρέσεων	Όχι σαφής σχέση
Περισσότερη υγρασία εδάφους ή υλικού φίλτρανσης	Καθαρή αύξηση	Μείωση
Υψηλότερη φόρτιση αποβλήτων	Αύξηση	Αύξηση
Παρουσία φυτών με μεγάλα διακυτταρικά κενά	Αύξηση	Αύξηση
	Μείωση (εξάρτηση από συνθήκες)	Μείωση
Περιοδικό υδρολογικό καθεστώς	Καθαρή μείωση	Αύξηση
		Μείωση σε ορισμένους FWS CWs
Βαθύτερος υδροφόρος ορίζοντας (από την επιφάνεια) σε HSSF CWs	Μείωση	Αύξηση

Η θερμοκρασία του εδάφους, το δυναμικό οξειδοαναγωγής και η εδαφική υγρασία (νερό πλήρωσης εδαφικών πόρων, βάθος στάθμης υπογείων υδάτων) είναι οι καθοριστικότεροι παράγοντες επίδρασης των εκπομπών CH₄ από τεχνητούς υγροβιότοπους (Mander et al., 2003, Van der Zaag et al., 2010). Αρκετές έρευνες έχουν δείξει ότι ένας υδροφόρος ορίζοντας ο οποίος βρίσκεται βαθύτερα από 20 cm από την επιφάνεια των υγροβιότοπων και/ή τα υδατοπλημμυρισμένα εδάφη οξειδώνουν τις περισσότερες από τις εκροές CH₄ (Soosar et al., 2011, Salm et al., 2012). Οι εκροές N₂O, ωστόσο, δεν εμφανίζουν μια σαφή συσχέτιση με την εδαφική/αέρια θερμοκρασία, και σημαντικές εκπομπές N₂O από τεχνητούς υγροβιότοπους έχουν παρατηρηθεί το χειμώνα (Sovik, et al., 2006). Ομοίως, περίοδοι ψύξης-απόψυξης ενισχύουν τις εκπομπές N₂O (Yu, et al., 2011). Το υδρολογικό καθεστώς, επίσης, διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τεχνητούς υγροβιότοπους: το καθεστώς διαλείπουσας φόρτισης (περιοδικό) και ο κυμαινόμενος υδροφόρος ορίζοντας στους τεχνητούς υγροβιότοπους αυξάνουν τις εκπομπές CO₂ και μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές CH₄ (Altor & Mitsch, 2008, Mander et al., 2011). Οι εκπομπές N₂O, βέβαια, δε φαίνεται να ακολουθούν ένα σταθερό μοτίβο αναφορικά με το περιοδικό καθεστώς.

Οι ρυθμοί μετατροπής του CH₄ και του N₂O εξάγονται από τη σχέση μεταξύ της αρχικής (εισερχόμενης) φόρτισης C και N και των αντίστοιχων εκπομπών CH₄ και N₂O από τους κύριους τύπους τεχνητών υγροβιότοπων (IPCC, 2006). Υπάρχει μια σημαντικά θετική συσχέτιση ($p < 0,05$) μεταξύ των αρχικών φορτίσεων και των εκπομπών CH₄ και N₂O από τους τεχνητούς υγροβιότοπους τόσο επιφανειακής όσο και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, ενώ καμία συσχέτιση δε βρέθηκε για τους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής υγροβιότοπους. Κατά τα φαινόμενα, η αδυναμία συσχέτισης των αρχικών φορτίσεων C και N με τις εκπομπές CH₄ και N₂O στους

HSSF CWs οφείλεται στην υψηλή διακύμανση των συνθηκών καθώς και σε συνδυασμό άλλων παραγόντων. Τέλος, εξαιτίας του επιπρόσθετου από τα ιζήματα CH₄ που συσσωρεύεται στον πυθμένα του τεχνητού υγροβιότοπου επιφανειακής ροής, εξάγεται υψηλός συντελεστής εκπομπής CH₄.

Πίνακας 2.7 Τιμές TOC_{εισ} και TN_{εισ} με τις Αντίστοιχες Τιμές Εκπομπών CH₄ και N₂O (IPCC, 2006)

Τύπος Τεχνητού Υγροβιότοπου	TOC _{εισορή} *	CH ₄ -C _{εκπομπή} *	CH ₄ -C / TOC ^{**}	TN _{εισορή} *	N ₂ O-N _{εκπομπή} *	N ₂ O-N / TN ^{**}
	mg C / m ² / h	mg CH ₄ -C / m ² / h	%	mg N / m ² / h	mg N ₂ O-N / m ² / h	%
FWS	1,04 - 173,6 (10)	0,15 - 181,0 (10,7)	42 (20)	0,76 - 202,8 (12)	0,009 - 0,65 (0,03)	0,13 (0,02)
HSSF	15,0 - 2190,2 (177)	0,048 - 17,5 (1,7)	12 (6,9)	1,04 - 295,20 (40)	0,014 - 0,89 (0,10)	0,79 (0,4)
VSSF	17,88 - 1417,5 (317)	0,3 - 5,4 (1,3)	1,17 (0,33)	102,5 - 2105,0 (155)	0,033 - 0,424 (0,03)	0,023 (0,005)

* Εύρος και τυπικό σφάλμα (εντός παρένθεσης)

** Μέσος όρος και τυπικό σφάλμα (εντός παρένθεσης)

2.4.2 Διεθνείς Αναφορές – Βάση Δεδομένων

Μια βιβλιογραφική ανάλυση 158 εργασιών δημοσιευμένων σε διεθνώς αξιολογημένα επιστημονικά περιοδικά αρχειοθετημένα από την «Thomson Reuters Web of Knowledge» από το 1994 ως το 2013, έδειξε ότι οι εκπομπές CO₂-C ήταν σημαντικά χαμηλότερες στην ελεύθερη επιφάνεια τεχνητών υγροβιοτόπων σε σχέση με τα ύδατα των τεχνητών υγροβιοτόπων υποεπιφανειακής ροής (οι μέσες τιμές κυμάνθηκαν από 95,8 ως 137 mg m⁻² h⁻¹, αντίστοιχα). Σε τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής οι εκπομπές CO₂-C ήταν σημαντικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες υγροβιοτόπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (οι μέσες τιμές ήταν 3,0 , 6,4 και 4,0 mg m² h⁻¹, αντίστοιχα). Όσον αφορά τις εκπομπές N₂O-N μεταξύ των διάφορων τύπων τεχνητών υγροβιοτόπων δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες αποκλίσεις (οι μέσες τιμές για τους υγροβιοτόπους ελεύθερης επιφάνειας, κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής και οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής ήταν: 0,09 , 0,12 και 0,13 mg m² h⁻¹, αντιστοίχως).

Η υψηλότερη τιμή του συντελεστή εκπομπών (ΣΕ) μεθανίου ((CH₄-C/inflow TOC_{in})*100%) υπολογίστηκε για τους τεχνητούς υγροβιοτόπους ελεύθερης επιφανειακής ροής (μέση τιμή 18%) και ακολούθως για τους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (3,8%) και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής (1,28%). Η μέση τιμή του συντελεστή εκπομπών (ΣΕ) υποξειδίου του αζώτου ((N₂O-N/inflow TN_{in})*100%) διέφερε σημαντικά και στους τρεις τύπους τεχνητών υγροβιοτόπων: 0,34% για τους τεχνητούς υγροβιοτόπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, 0,11% για τους ελεύθερης επιφάνειας και 0,018% για τους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής.

Παρατηρήθηκε μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ των εκπομπών TOC_{in} και $\text{CH}_4\text{-C}$ και μεταξύ των τιμών εκπομπών TN_{in} και $\text{N}_2\text{O-N}$ για όλους τους τύπους των τεχνητών υγροβιότοπων που μελετήθηκαν.

Οι υβριδικοί τεχνητοί υγροβιότοποι (δηλαδή ο συνδυασμός των κατακόρυφης υποεπιφανειακής, οριζόντιας υποεπιφανειακής και ελεύθερης επιφανειακής ροής τεχνητών υγροβιότοπων) είναι συμφέροντες και από τη σκοπιά της επεξεργασίας του ρυπασμένου νερού, αλλά και της ελαχιστοποίησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Όμοια, η διακοπτόμενη φόρτιση των τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής και ο θερισμός των μακροφύτων στους υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής και ελεύθερης επιφανειακής ροής, μπορούν να μετριάσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανάλυσης συνοψίζονται στη συνέχεια υπό τη μορφή μητρώων, με τις κύριες περιεχόμενες πληροφορίες για τους HSSF, VSSF και FWS τεχνητούς υγροβιότοπους αντίστοιχα να είναι:

- είδος εισερχόμενων λυμάτων
- είδος φυτικής βλάστησης
- οργανικό φορτίο
- φορτίο ολικού αζώτου
- εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα
- εκπομπή μεθανίου
- εκπομπή υποξειδίου του αζώτου
- συντελεστής εκπομπής μεθανίου
- συντελεστής εκπομπής υποξειδίου του αζώτου

Πίνακας 2.8 Φορτία και Εκπομπές Αερίων από HSSF Τεχνητούς Υγροβιότοπους

Είδος Λυμάτων	Είδος Φυτών	BOD	TN	CO ₂ -C _{emission}	CH ₄ -C _{flux}	N ₂ O-N _{flux}	CH ₄ -C/TOC _{in}	N ₂ O-N/TN _{in}	Αναφορά
		mg/L	mg/L	mg/m ² /h	mg/m ² /h	mg/m ² /h	%	%	
Αστικά	T.latifolia, P.Australis, Scirpus Sylvaticus		109	99,2	2,6	0,186	9,9	0,45	Mander et al. (2003, 2005a,b, 2008), Teiter and Mander (2005), Sovik et al. (2006)
Αστικά	P.Australis	62,8	43,1	41,7	3,09	0,108	1,4	0,04	Teiter and Mander (2005), Sovik et al. (2006)
Αστικά	Δίχως βλάστηση		53,4	51,9	7,1	0,894	9,6	3,01	Sovik et al. (2006)
Αστικά	Μη φυτεμένο υπόστρωμα από τ.υ.	200		128	0,048		0,03		Garcia et al. (2007)
Αστικά	P.Australis	107,3			0,76		4,3		Gui et al. (2007)
Αστικά	P.Australis			174,7	17,5		79,3		Picek et al. (2007)
Αστικά	P.Australis	200	100		7	0,4	4	0,23	Liu et al. (2009)
Αγροκτήματος γαλακτοπαραγωγής	P.Australis		73			0,133		0,07	Fey et al. (1998)
Αγροκτήματος γαλακτοπαραγωγής	T.latifolia	186	306	146	4,9	0,396	7,9	0,2	Van der Zaag et al. (2010)

Απορροές ορυχείων τύρφης	Sphagnum angustifolium, S.papillosum, M.trifoliata, Carex spp.			303	5,8	0,014	34,3	0,46	Liikanen et al. (2006)
Απορροές ορυχείων τύρφης	M.trifoliata, C.lasiocarpa, P.palustris, Sphagnum spp.			567	16,7	0,019	111,3	1,83	Liikanen et al. (2006)
Απορροές ορυχείων τύρφης	Sphagnum spp., Menyanthes trifoliata, Carex lasiocarpa, Potentilla palustris				13,1		160		Sovik et al. (2006)
Απορροές ορυχείων τύρφης	Sphagnum spp., Menyanthes trifoliata, Carex lasiocarpa, Potentilla palustris		1,8			0,005		0,47	Sovik et al. (2006)
Φρέσκα στραγγίδια ΧΥΤΑ	T.angustifolia	5275			14,3		0,7		Chiemchaisri et al. (2008)
Σταθεροποιημένα στραγγίδια ΧΥΤΑ	T.angustifolia	42			9,25		3		Chiemchaisri et al. (2008)

Πίνακας 2.9 Φορτία και Εκπομπές Αερίων από VSSF Τεχνητούς Υγροβιότοπους

Είδος Λυμάτων	Είδος Φυτών	BOD	TN	CO ₂ -C _{emission}	CH ₄ -C _{flux}	N ₂ O-N _{flux}	CH ₄ -C/TOC _{in}	N ₂ O-N/TN _{in}	Αναφορές
		mg/L	mg/L	mg/m ² /h	mg/m ² /h	mg/m ² /h	%	%	
Αστικά	P.Australis	32,2	50,9	208	3	0,225	0,88	0,021	Teiter and Mander (2005), Sovik et al. (2006), Mander et al. (2008)
Αστικά	Δίχως βλάστηση		52,6	127	5,4	0,2	0,38	0,011	Sovik et al. (2006)
Αστικά	P.Australis	107,3	73,5		0,3	0,123	1,68	0,096	Gui et al. (2007)
Αστικά	P.Australis	200	100		3	0,073	1,73	0,042	Liu et al. (2009)
Τεχνητά	P.Australis		9,8			0,003		0,001	Inamori et al. (2007)
Τεχνητά	P.Australis		18,4			0,008		0,001	Inamori et al. (2007)
Τεχνητά	Zizania latifolia		36,7			0,033		0,003	Inamori et al. (2007)
Τεχνητά	Zizania latifolia		9,8			0,005		0,002	Inamori et al. (2007)
Τεχνητά	Zizania latifolia		18,4			0,023		0,004	Inamori et al. (2007)
Τεχνητά	Zizania latifolia		36,7			0,04		0,004	Inamori et al. (2007)
Τεχνητά	Zizania latifolia		15			0,2		0,019	Inamori et al. (2008)
Τεχνητά	Zizania latifolia		30			0,353		0,017	Inamori et al. (2008)

Τεχνητά	Zizania latifolia		15			0,211		0,02	Inamori et al. (2008)
Τεχνητά	Zizania latifolia		30			0,424		0,02	Inamori et al. (2008)
Τεχνητά	P.Australis		15			0,188		0,018	Inamori et al. (2008)
Τεχνητά	P.Australis		30			0,371		0,018	Inamori et al. (2008)
Τεχνητά	Μη ελεγχόμενη βλάστ.		15			0,15		0,014	Inamori et al. (2008)
Τεχνητά	Μη ελεγχόμενη βλάστ.		30			0,162		0,008	Inamori et al. (2008)
Τεχνητά	P.Australis, T.latifolia, Z.latifolia		3,62			0,034		0,033	Wang et al. (2008a,b)
Τεχνητά	P.Australis, T.latifolia		6,65			0,11		0,058	Wang et al. (2008a,b)
Τεχνητά	P.Australis, Z.latifolia		4,5			0,043		0,034	Wang et al. (2008a,b)
Τεχνητά	Μη ελεγχόμενη βλάστ.		10			0,073		0,026	Wang et al. (2008a,b)

Πίνακας 2.10 Φορτία και Εκπομπές Αερίων από FWS Τεχνητούς Υγροβιότοπους

Είδος Λυμάτων	Είδος Φυτών	BOD	TN	CO ₂ - C _{emission}	CH ₄ -C _{flux}	N ₂ O-N _{flux}	CH ₄ -C/TOC _{in}	N ₂ O-N/TN _{in}	Αναφορά
		mg/L	mg/L	mg/m ² /h	mg/m ² /h	mg/m ² /h	%	%	
Αστικά	<i>Typha latifolia</i>	2,8	8		1,9	0,081	18	0,14	Johansson et al. (2003,2004), Tonderski and Hansson (2001) for BOD data
Αστικά	<i>Phalaris arundinacea</i>	5,2	8		3,6	0,152	19	0,25	Johansson et al. (2003,2004), Tonderski and Hansson (2001) for BOD data
Αστικά	<i>Glyceria maxima</i>	2,2	8		1,8	0,031	20	0,05	Johansson et al. (2003,2004), Tonderski and Hansson (2001) for BOD data
Αστικά	<i>Lemna minor</i>	8,2	8		7,2	0,094	23	0,14	Johansson et al. (2003,2004), Tonderski and Hansson (2001) for BOD data
Αστικά	<i>Spirogyra</i> spp.	2,7	8		1,9	0,036	17	0,05	Johansson et al. (2003,2004), Tonderski and Hansson (2001) for BOD data
Αστικά	Υποδοχές δίχως φυτά	3,3	8		2,8	0,192	20	0,29	Johansson et al. (2003,2004), Tonderski and Hansson (2001) for BOD data
Αστικά	<i>Phragmites australis</i> , <i>T.latifolia</i>		66,1	108,3	8,4	0,007	10	0,03	Sovik et al. (2006)
Αστικά	<i>Carex-Sphagnum</i>		59,7	95,8	4,4	0,106	18	0,12	Sovik et al. (2006)
Αστικά	<i>P.australis</i>			87,5	5,8		26		Sovik et al. (2006)
Αστικά	<i>P.australis</i>					0,041		0,006	Sovik et al. (2006)
Αστικά	<i>Iris pseudacorus</i> , <i>T.latifolia</i> , <i>Schoenoplectus lacustris</i>			49,6	12,4		7		Sovik et al. (2006)

Αστικά	Iris pseudacorus, T.latifolia, Schoenoplectus lacustris		43,4			0,094		0,07	Sovik et al. (2006)
Αστικά	Juncus effusus, T.latifolia, P.australis	19	75	100	4,8	0,23	19	0,11	Ström et al. (2006), www.hassleholmsvatten. se for BOD data
Αστικά	I.pseudacorus, T.latifolia, S.lacustris	15			181		446		Sovik and Clove (2007)
Αστικά	I.pseudacorus, T.latifolia, S.lacustris		38			0,13		0,13	Sovik and Clove (2007)
Αστικά	P.australis	107,3	73,5		4,6	0,079	26	0,06	Gui et al. (2007)
Αστικά	P.australis	200	100		27	0,2	16	0,12	Liu et al. (2009)
Γεωργικά, μη σημειακή ρύπανση	Λεκάνη1: T.latifolia, T.angustifolia		51		0,15	0,009	14	0,06	Wild et al. (2001)
Γεωργικά, μη σημειακή ρύπανση	Λεκάνη2: T.latifolia, T.angustifolia		23		0,88	-0,003	31	-0,05	Wild et al. (2001)
Αγροκτήματος γαλακτοπαραγωγής	T.latifolia	92,3	306	176	10,8	0,25	35	0,12	Van der Zaag et al. (2010)
Ακατέργαστα αστικά	P.australis, Acorus calamus, L.minor	460	120		5220	0,068	2247	0,06	Tai et al. (2002)
Συνθετικά αστικά	P.australis		52			0,25		0,17	Wu et al. (2009)

2.4.2.1 Παραγωγή και Χαρακτηριστικά Αέριων Εκπομπών

Ένα μειονέκτημα της διαδικασίας επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων σε τεχνητούς υγροβιότοπους έχει αποδειχθεί ότι είναι ο ρόλος τους ως πηγές εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Μετρήσεις εκπομπών CO₂ έχουν πραγματοποιηθεί σε λίγους πλήρους κλίμακας τεχνητούς υγροβιότοπους (Mander, et al., 2003), και το ισοζύγιο του άνθρακα έχει υλοποιηθεί μόνο σε έναν HSSF CW, βασισμένο σε μακροχρόνιες απευθείας μετρήσεις του εισερχόμενου και εξερχόμενου C, της συσσώρευσης στο υλικό φίλτρανης (άμμος), των μικροβίων, της ανεδαφικής και υπεδαφικής φυτικής βιομάζας και των εκπομπών CH₄ και N₂O (Mander, et al., 2008). Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν μερικές μετρήσεις που αφορούν κυρίως το CH₄ και το N₂O σε τεχνητούς υγροβιότοπους πλήρους κλίμακας. Μετρήσεις μεθανίου έγιναν από τους Tanner et al. (1997), Xue et al. (1999), Johansson et al. (2004), Chiemchaisri et al. (2008). Μετρήσεις υποξειδίου του αζώτου έγιναν από τους Fey et al. (1999) και Johansson et al. (2003), ενώ μετρήσεις τόσο CH₄ όσο και N₂O έγιναν από τους Wild et al. (2001), Tai et al. (2002), Mander et al. (2003, 2005a,b, 2008, 2011), Standmark & Leonardson (2005), Teiter & Mander (2005), Liikanen et al. (2006), Sovik et al. (2006), Strom et al. (2006), Gui et al. (2007), Picek et al. (2007), Sovik & Klove (2007), Liu et al. (2009) και Van der Zaag et al. (2010).

Πρόσφατες έρευνες έχουν αποδείξει ότι η παραγωγή N₂O μπορεί να συντελεστεί μέσα από ένα πλήθος διαφορετικών οδών, τόσο με χημικούς αλλά και βιοχημικούς τρόπους κατά τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση. Το μεθάνιο παράγεται σε ανοξικά εδάφη και ιζήματα, ενώ καλά στραγγιζόμενα εδάφη λειτουργούν ως καταβόθρες για το ατμοσφαιρικό μεθάνιο εξαιτίας της οξειδωσης του μεθανίου, μέσω είτε οξειδωτικών αμμωνίας είτε μεθανοτροπικών (Le Mer & Roger, 2001). Η απονιτροποίηση και ο σχηματισμός του μεθανίου εξαρτώνται από την κατάσταση του οξυγόνου και του δυναμικού οξειδοαναγωγής του εδάφους ή των ιζημάτων, που μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά. Για το λόγο αυτό, η διακύμανση των παρατηρούμενων εκροών του N₂O και του CH₄ είναι υψηλή (Willison, et al., 1998). Οι εκπομπές CH₄ αναμένεται να είναι μεγαλύτερες σε περισσότερο αναερόβια συστήματα (όπως είναι τα οριζόντια υποεπιφανειακής ροής) και μικρότερες σε επιφανειακής ροής ή οργανικά υπεφορτισμένα συστήματα.

Εξαιτίας της αυξανόμενης ανθρώπινης επίπτωσης στο παγκόσμιο περιβάλλον, το υποξείδιο του αζώτου, που έχει έναν ατμοσφαιρικό χρόνο ζωής περί τα 120 χρόνια και ένα δυναμικό παγκόσμιας υπερθέρμανσης 298 αναλόγων προς το CO₂ σε ένα χρονικό ορίζοντα 100 ετών και είναι υπεύθυνο για το 6% της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, αυξάνεται στην ατμόσφαιρα με ρυθμό 0,3% το χρόνο. Το μεθάνιο στην ατμόσφαιρα έχει ένα χρόνο ζωής 8,4 ετών, σε ένα χρονικό ορίζοντα 100 ετών διαθέτει ένα δυναμικό παγκόσμιας υπερθέρμανσης 34 αναλόγων προς το CO₂ (IPCC, 2013) και είναι υπεύθυνο για το 20% της αναμενόμενης υπερθέρμανσης.

2.4.2.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Βιβλιογραφικής Έρευνας

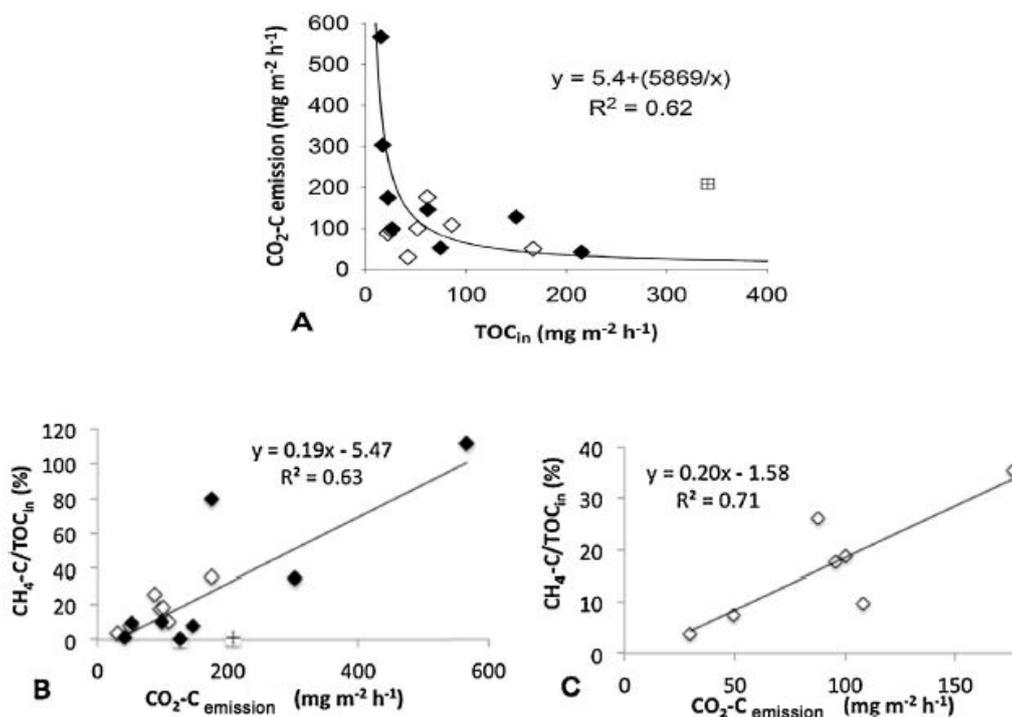
Τη διαδικασία της συλλογής των μετρήσεων ακολουθεί η στατιστική ανάλυση των δεδομένων της βάσης δεδομένων, με τα αποτελέσματα να αφορούν τους τρεις τύπους εκπομπών (CO₂, CH₄ και N₂O) ανά τύπο τεχνητού υγροβιότοπου.

Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

Η εκπομπή του CO₂-C ήταν σημαντικά χαμηλότερη στους τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής «FWS CWs» (κυμαινόμενη από 29,4 έως 176,0, με μέση και διάμεση τιμή 92,3 και 95,8 mg m⁻² h⁻¹ αντιστοίχως) από ότι στους υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής (κυμαινόμενη από 51,9 έως 567,0, με μέση και ενδιάμεση τιμή 184,7 και 137 mg m⁻² h⁻¹ αντιστοίχως).

Υπάρχει μια αξιοσημείωτη αρνητική συσχέτιση μεταξύ του εισερχόμενου φορτίου TOC (TOC_{in}) και της εκπομπής CO₂-C.

Αντιθέτως, παρουσιάστηκε μια θετική συσχέτιση μεταξύ της εκπομπής CO₂-C και του συντελεστή εκπομπής μεθανίου (CH₄-C/TOC_{in}) σε όλους τους τύπους τεχνητών υγροβιότοπων, με την ισχυρότερη από αυτές να υπολογίζεται για τους τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής.

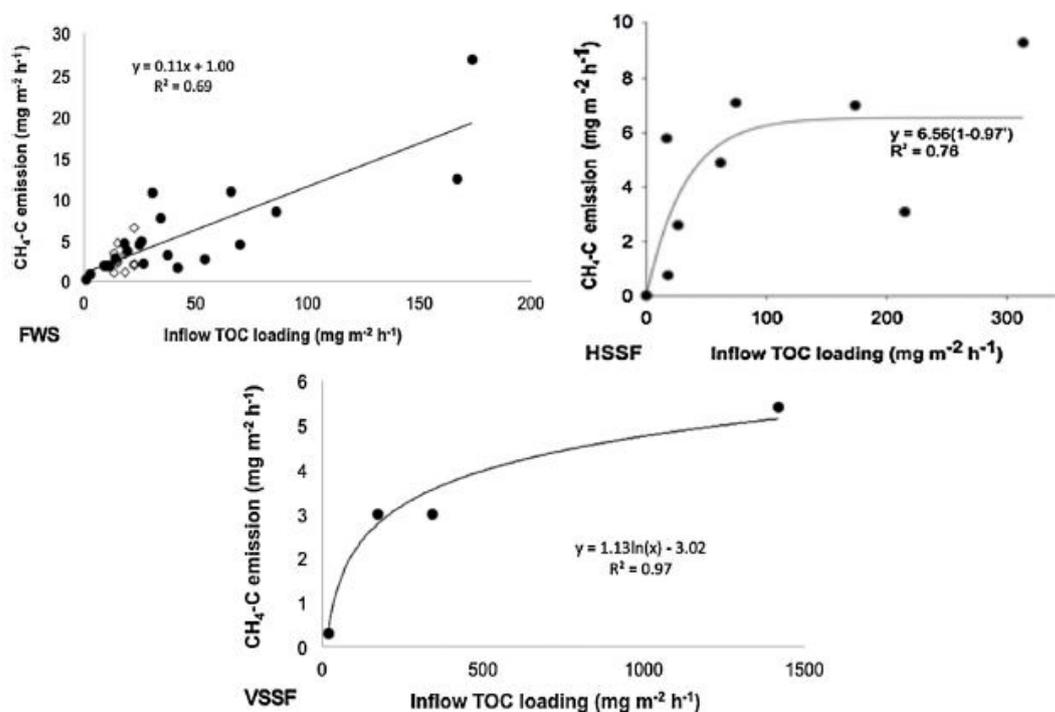


Σχήμα 2.14 Η συσχέτιση μεταξύ της εισερχόμενης φόρτισης TOC (TOC_{in}) και της εκπομπής CO₂-C σε όλους τους τύπους των μελετούμενων CWs (A), και μεταξύ της εκπομπής CO₂-C και του συντελεστή εκπομπής CH₄ (CH₄-C/TOC_{in}) για όλους τους τύπους CWs (B) και για τους FWS CWs (C). Λευκά διαμάντια – FWS, μαύρα διαμάντια – HSSF και σταυροί – VSSF CWs.

Εκπομπές Μεθανίου (CH₄)

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής η εκπομπή CH₄-C (κυμαινόμενη από 0,3 έως 5,4, με μέση και διάμεση τιμή 2,9 και 3,0 mg m⁻² h⁻¹ αντίστοιχα) ήταν σημαντικά μικρότερη από ότι στους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (στους οποίους κυμάνθηκε από 0,048 έως 17,5, με μέση και διάμεση τιμή 7,4 και 6,4 mg m⁻² h⁻¹ αντίστοιχα) και στους ελεύθερης επιφανειακής ροής (0,15-27, 5,9 και 4,0 mg m⁻² h⁻¹). Σύμφωνα με την ανάλυση πολλαπλής παλινδρόμησης, διαπιστώνεται μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ των τιμών του TOC_{in} και της εκπομπής CH₄-C σε όλους τους τύπους τεχνητών υγροβιοτόπων.

Αξιοσημείωτες διαφορές έχουν παρατηρηθεί ανάμεσα στις τιμές των συντελεστών εκπομπής σε διάφορους τύπους τεχνητών υγροβιοτόπων. Η υψηλότερη τιμή βρέθηκε για τους τεχνητούς υγροβιοτόπους ελεύθερης επιφανειακής ροής, στους οποίους κατά μέσο όρο το 16,9% του εισερχόμενου TOC μετατρέπεται σε CH₄-C (με τη διάμεση τιμή να είναι 18,0). Ακολουθούν οι τεχνητοί υγροβιοτόποι οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, στους οποίους η μέση και διάμεση τιμή του συντελεστή εκπομπής «EF» είναι 4,5% και 3,8% αντίστοιχα, ενώ στους τεχνητούς υγροβιοτόπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής μόλις το 1,17% (διάμεση τιμή 1,28%) του TOC_{in} μετατρέπεται σε μεθάνιο.



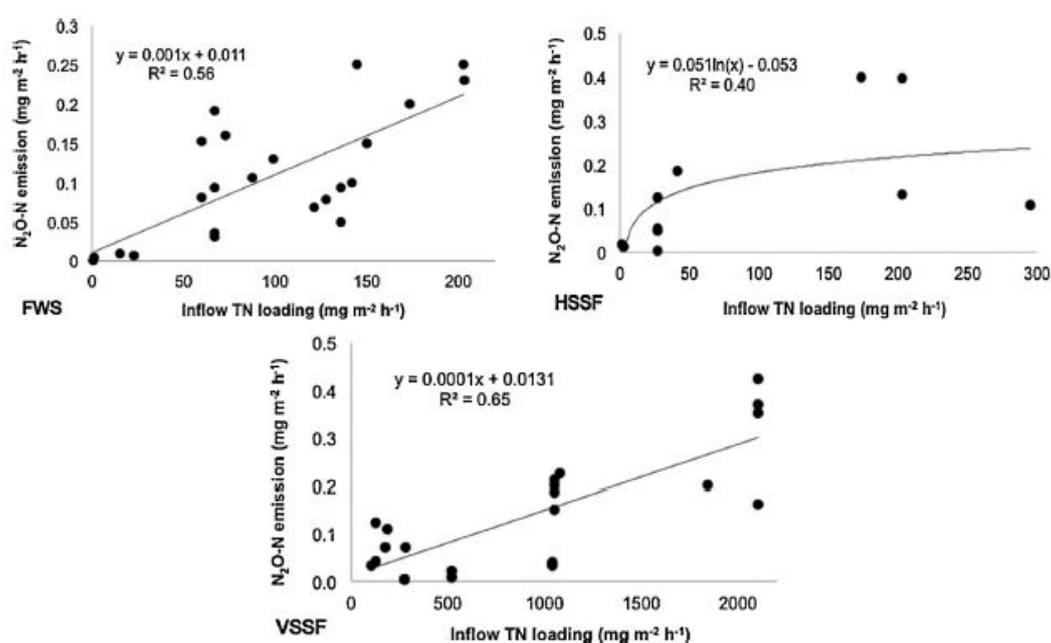
Σχήμα 2.15 Η συσχέτιση μεταξύ του εισερχόμενου φορτίου TOC (TOC_{in}) και της εκπομπής CH₄-C σε FWS, HSSF και VSSF CWs

Εκπομπές Υποξειδίου του Αζώτου (N₂O)

Όσον αφορά τις εκπομπές N₂O-N για τους διάφορους τύπους τεχνητών υγροβιοτόπων, δεν παρατηρούνται αξιολογες διαφορές. Οι μικρότερες τιμές

εντοπίστηκαν στους τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής (κυμαινόμενες από -0,003 έως 0,65, με μέση 0,13 και διάμεση τιμή 0,09 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$), ακολουθούμενες από τις τιμές των τεχνητών υγροβιότοπων κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής (0,003-0,424, μέση 0,14, διάμεση 0,12 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) και των οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (0-0,894, μέση 0,24, διάμεση 0,13 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Όλοι οι τύποι τεχνητών υγροβιότοπων φανέρωσαν μια σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ του εισερχόμενου φορτίου TN και των τιμών εκπομπής $\text{N}_2\text{O-N}$.

Οι μέσοι συντελεστές εκπομπής N_2O διαφέρουν αρκετά και στους τρεις τύπους τεχνητών υγροβιότοπων: 0,79% (διάμεσος 0,34%) στους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, 0,13% (διάμεσος 0,11%) στους ελεύθερης επιφανειακής ροής και 0,023% (διάμεσος 0,018%) στους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής.



Σχήμα 2.16 Η συσχέτιση μεταξύ του εισερχόμενου φορτίου TN (TN_{in}) και της εκπομπής $\text{N}_2\text{O-N}$ σε FWS, HSSF και VSSF CWs

2.4.2.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Βιβλιογραφικής Έρευνας

Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων ακολουθείται από την αξιολόγησή τους, με έμφαση στην επισήμανση προφανών συσχετίσεων μεταξύ εισερχόμενων φορτίων – εκπομπών, και στην κατανόηση της επίδρασης των φυσικών, υδρολογικών και διαχειριστικών παραμέτρων στις αέριες εκπομπές και της σημασίας των υπολογισθέντων συντελεστών εκπομπής αναφορικά με το ανθρακικό αποτύπωμα των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Εκπομπές CO_2

Οι τιμές των εκπομπών CO_2 (έδαφος, ρίζες, αναπνοή ριζωμάτων και αποσύνθεση σκουπιδιών) κυμαίνονται από 0,88 έως 2,37 $\text{kg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ (Garcia, et al., 2007) σε αναερόβιους HSSF CWs, μέχρι και 3840 – 7360 $\text{kg CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ σε καλά

αεριζόμενο HSSF CW με υποβαθμισμένη υδατική επιφάνεια και ικανοποιητικά ανεπτυγμένη κάλυψη από μακρόφυτα (*Scirpus sylvaticus*, *Phragmites australis*) (Mander, et al., 2008). Μερικό από το εκπεμπόμενο CO₂ θα αφομοιωθεί από τα φυτά, και σε βέλτιστες συνθήκες η συγκράτηση άνθρακα στο υλικό φίλτρανσης του HSSF CW μπορεί να φτάσει τα 15500 – 20750 kg CO₂-C ha⁻¹ yr⁻¹ (Mander, et al., 2008). Ο άνθρακας αυτός, όμως, βρίσκεται σε ασταθή μορφή και μπορεί εύκολα να ανοργανοποιηθεί όταν η υδατική επιφάνεια υποβαθμίζεται ή όταν το υλικό φίλτρανσης, το οποίο κορέννυται με φώσφορο, αντικαθίσταται από ένα νεό υλικό.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η εκπομπή CO₂ από τεχνητούς υγροβιότοπους είναι αρνητικά συσχετισμένη με το TOC_{in} σε HSSF CWs (διάγραμμα 2.1). Άνω ενός συγκεκριμένου επιπέδου TOC_{in} (>100 mg C m⁻² h⁻¹), οι υγροβιότοποι επεξεργασίας λυμάτων εκπέμπουν όχι περισσότερα από 200 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹, στοιχείο που υποδηλώνει ότι πάνω από αυτή την τιμή του TOC_{in} η διαδικασία της επεξεργασίας δεν εντείνεται περισσότερο. Ομοίως, η εκπομπή CH₄ σταθεροποιείται για τιμή του TOC_{in} μεγαλύτερη από 100 mg C m⁻² h⁻¹ (διάγραμμα 2.2).

Ο συντελεστής εκπομπής CO₂ (CO₂-C/TOC_{in}) κυμαίνεται από 0,09 έως 37,8 kg CO₂-C/kg TOC_{in} και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερος του 1 kg CO₂-C/kg TOC_{in}. Ο μικρότερος συντελεστής υπολογίστηκε σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής αραιής βλάστησης. Γίνεται, προφανώς, αντιληπτός ο σημαντικός ρόλος των υδάτινων φυτών, που φέρουν μια μεγάλη ποσότητα ατμοσφαιρικού CO₂ στο σύστημα και για αυτό ορίζουν τη βάση για την κατακράτηση του άνθρακα.

Εκπομπές CH₄

Το μεθάνιο φαίνεται πως είναι το πιο σημαντικό αέριο του θερμοκηπίου που εκπέμπεται από τους τεχνητούς υγροβιότοπους. Στους τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής, κατά μέσο όρο το 16,9% του TOC_{in} μετατρέπεται σε CH₄-C. Αυτό οφείλεται στην έντονη συσσώρευση οργανικού φορτίου στους υγροβιότοπους. Μερικό από το σχηματιζόμενο μεθάνιο πιθανώς οξειδώνεται και εκπέμπεται ως CO₂, αφού φαίνεται να υπάρχει μια σημαντική συσχέτιση (διάγραμμα 2.1) μεταξύ των εκπομπών CO₂-C και του συντελεστή εκπομπής του μεθανίου. Ο μη γραμμικός χαρακτήρας της σχέσης των εκπομπών CH₄-C και του TOC_{in} σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, ενδεχομένως υποδεικνύει ένα οριακό επίπεδο εκπομπής CH₄, δηλαδή, βάσει ενός συγκεκριμένου φορτίου TOC_{in}, η μεθανογένεση μπορεί να καταστέλλεται από την αυξημένη συγκέντρωση της αμμωνίας, ή της συσσώρευσης πτητικών λιπαρών οξέων περιορίζοντας το οριακό βήμα του ρυθμού μεθανογένεσης, της υδρόλυσης του οργανικού υλικού. Ωστόσο, η περιορισμένη ποσότητα των διαθέσιμων δεδομένων απέτρεψε την εξαγωγή περισσότερο οριστικών συμπερασμάτων. Από την άλλη πλευρά, η εκτεταμένη φόρτιση οδηγεί στην έμφραξη του συστήματος, κάτι που απαιτεί τον ανάλογο διαχειριστικό έλεγχο. Βέβαια, η υψηλή φόρτιση σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, σπανίως λαμβάνει χώρα σε πραγματικές συνθήκες.

Εκπομπές N₂O

Ευρήματα από προγενέστερες έρευνες αναφορικά με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε HSSF και VSSF τεχνητούς υδροβιότοπους οι οποίες καταγράφουν υψηλή εκπομπή N₂ και χαμηλή εκπομπή N₂O – δείγμα της σχεδόν πλήρους απονιτροποίησης – καθιστούν ακόμα ισχυρότερη την υπόθεση ότι ο κύριος υπαίτιος μηχανισμός εκπομπής υποξειδίου του αζώτου είναι η απονιτροποίηση (Teiter & Mander, 2005). Η ετεροτροφική απονιτροποίηση βασίζεται στην απουσία O₂ για τη μετατροπή του N₂O σε N₂ – αν το οξυγόνο εισαχθεί κατά τη διάρκεια του τελευταίου αυτού βήματος, θα πραγματοποιηθεί ατελής απονιτροποίηση και το N₂O θα απελευθερωθεί ως το τελικό προϊόν αντί του N₂. Σε συστήματα υδροβιότοπων, στα οποία τόσο η αμμωνία όσο και τα νιτρικά είναι παρόντα, η διαλειπομένη φόρτιση σε VSSF CWs (Jia, et al., 2011) και η κυμαινόμενη υδατική επιφάνεια σε HSSF CWs (Mander, et al., 2011) οι οποίες φέρουν κατά διαστήματα οξυγόνο στο σύστημα μπορούν να προκαλέσουν αύξηση των εκπομπών λόγω της επίδρασης στη νιτροποίηση (μέσω της ενεργοποίησης των νιτροποιητών, συνεπώς εκκινώντας την απονιτροποίηση των νιτροποιητών) και την απονιτροποίηση (μέσω της παρεμπόδισης του τελευταίου βιοχημικού βήματος). Η εφαρμογή τεχνητού αερισμού σε εργαστηριακής κλίμακας HSSF τεχνητούς υδροβιότοπους (Maltais-Landry, et al., 2009) προκάλεσε αυξημένες εκπομπές – δεν είναι, ωστόσο, σαφές αν αυτό συνέβη λόγω της εντονότερης αέριας απομόνωσης του διαλυμένου αερίου ή ως αποτέλεσμα των αυξημένων ρυθμών νιτροποίησης. Σε εργαστηριακής κλίμακας VSSF CW, το δυναμικό οξειδοαναγωγής (redox) βρέθηκε να συσχετίζεται θετικά με την εκροή N₂O-N, υποδεικνύοντας ότι η νιτροποίηση υπήρξε η κυρίαρχη μικροβιακή διεργασία στην εκπομπή N₂O (Zhou, et al., 2008). Σε τεχνητούς υδροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, η σχέση μεταξύ των εκπομπών N₂O και TN_{in} είναι μη γραμμική (σε αντίθεση με τη γραμμική συσχέτιση σε FWS και VSSF CWs) και η επικράτηση απολύτως αναερόβιων συνθηκών μπορεί να εξασφαλίσει την πλήρη απονιτροποίηση. Τιμές της φόρτισης του TN_{in} που ξεπερνούν τα 50 mg N m⁻² hr⁻¹ μπορούν να ενισχύσουν τις αναερόβιες συνθήκες σε HSSF CWs, και σε περίπτωση που υπάρχει αρκετός άνθρακας στο σύστημα (που είναι σύνηθες σε HSSF CWs) η διεργασία της απονιτροποίησης δύναται να ολοκληρωθεί και το κύριο προϊόν να είναι το N₂. Ομοίως, μελέτες αναφορικά με τα προγράμματα πλήρωσης ενός σειριακού ασυνεχούς αντιδραστήρα (SBR) έδειξαν πως μια σημαντική εκπομπή N₂O έλαβε χώρα κατά την αερόβια φάση, ενώ η εκπομπή N₂O κατά την ανοξική φάση ήταν ασήμαντη (Park, et al., 2001).

Επίδραση Φυσικών, Υδρολογικών και Διαχειριστικών Παραμέτρων

Αυξημένες εισροές φορτίων TOC και TN, πάντα αυξάνουν τις αντίστοιχες ροές CH₄ και N₂O, εξού και η συσχέτιση των μεγεθών. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η υψηλότερη τιμή του συντελεστή πλήρωσης πόρων με νερό των εδαφών/ιζημάτων ή η περισσότερη υγρασία του υλικού-φίλτρου, αύξησε την εκπομπή μεθανίου και μείωσε την εκπομπή του υποξειδίου του αζώτου. Αντίθετα, όσο βαθύτερα βρέθηκε το επίπεδο της υδατικής επιφάνειας από την επιφάνεια στους τεχνητούς υδροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, τόσο λιγότερες ήταν οι εκπομπές CH₄, ενώ

αυξήθηκαν οι εκπομπές N_2O . Σε αρόσιμα εδάφη, ωστόσο, οι υψηλότερες τιμές εκπομπής N_2O βρέθηκαν για τιμές του συντελεστή πλήρωσης πόρων μεταξύ 50 και 80% (Vilain, et al., 2010). Με ελάχιστες εξαιρέσεις, όσο υψηλότερη ήταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος, τόσο αυξανόταν η εκπομπή CH_4 , ενώ για το N_2O η σχέση παραμένει ασαφής. Η ανάλυση όλων των τεχνητών υδροβιότοπων δεν υπέδειξε σημαντική σχέση μεταξύ των εκπομπών CH_4 και N_2O και της κλιματικής ζώνης, ωστόσο παρατηρήθηκε μια αυξανόμενη τάση στις εκπομπές CH_4 προς τους βόρειους τεχνητούς υδροβιότοπους.

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους ελεύθερης υδατικής επιφάνειας, η υψηλότερη εισερχόμενη συγκέντρωση COD προκαλεί μια σημαντική αύξηση στην εκπομπή N_2O (Wu, et al., 2009), παρά το γεγονός ότι η παρούσα έρευνα δεν μπόρεσε να εντοπίσει μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ TOC_{in} και εκπομπών N_2O .

Το σημείο δειγματοληψίας στην πορεία της ροής αποτελεί έναν επιπλέον σημαίνοντα παράγοντα για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι εκπομπές CH_4 στο τμήμα εισροής των τεχνητών υδροβιότοπων ελεύθερης υδατικής επιφάνειας και οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής υπήρξαν σημαντικά περισσότερες έναντι των αντιστοίχων του τμήματος εκροής.

Η αναλογία εδάφους/ιζήματος C/N αποτελεί μια σημαντική παράμετρο του οικοσυστήματος που καθορίζει πολλές διαδικασίες. Οι Yan et al. (2012) καθόρισαν ότι η βέλτιστη αναλογία C/N είναι 5:1, κατά την οποία στους τεχνητούς υδροβιότοπους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής μπορεί να επιτευχθεί σχετικά υψηλή βιολογική απομάκρυνση θρεπτικών και χαμηλά επίπεδα εκπομπών CO_2 και CH_4 . Μια χαμηλή, όμως, αναλογία C/N μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις εκπομπές N_2O . Αυτό αποδείχτηκε πως συμβαίνει σε δασικά οργανικά εδάφη (Klemmedtsson, et al., 2005) και συστήματα ενεργού ιλύος επεξεργασίας αστικών αποβλήτων, όπου το 20-30% του εισερχόμενου αζώτου μετετρέπη σε N_2O με την αναλογία C/N να ισούται με 3,5. Η μετατροπή προς τις αυξημένες εκπομπές N_2O σε μικρότερες τιμές της αναλογίας C/N μπορεί να οφείλεται σε εναλλαγές στη δομή της μικροβιακής κοινότητας που εμπλέκεται στη μετατροπή του αζώτου στους τεχνητούς υδροβιότοπους, και συγκεκριμένα στα είδη των απονιτροποιητικών μικροβίων. Μια μικρή αναλογία C/N μπορεί να ευνοεί μικροβιακά είδη με ημιτελείς οδούς απονιτροποίησης (έλλειψη νιτρώδους ρεδουκτάσης που κωδικοποιεί το γονίδιο *nosZ*), που οδηγεί σε μια αύξηση σε N_2O ως τελικό προϊόν της απονιτροποίησης.

Ο ρόλος του υδρολογικού καθεστώτος και των φυτών

Ο αντίκτυπος του υδρολογικού καθεστώτος (περιοδική υδρολογία) και των υδατικών μακροφύτων φαίνεται πως είναι περισσότερο προβληματικός, και διαφορετικές μελέτες σε πολλές περιπτώσεις καταλήγουν σε αντικρουόμενα συμπεράσματα.

Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, το περιοδικό υδρολογικό καθεστώς στους τεχνητούς υδροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής και μερικές φορές και στους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, καθώς και η διαλειπόμενη φόρτιση στους υδροβιότοπους

κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, σαφώς μειώνουν τις εκπομπές μεθανίου. Σχετικά με τις εκπομπές N₂O, ορισμένες μελέτες (Jia et al., 2011, Mander et al., 2011) εμφάνισαν αυξημένη απελευθέρωση N₂O από επιφανειακής ροής CWs εξαιτίας της περιοδικής υδρολογίας. Μια παρόμοια επίδραση παρουσιάστηκε και σε επανατροφοδοτημένους υγροβιότοπους τύρφης (Van de Riet, et al., 2013). Κάποιες άλλες μελέτες, βέβαια, σε τεχνητούς παρόχθιους υγροβιότοπους υπονοούν ότι η περιοδική υδρολογία μειώνει ελαφρώς την εκπομπή N₂O (Hernandez & Mitsch, 2006).

Βασιζόμενοι στην κλιμακωτή πολλαπλή παλινδρομική ανάλυση, εξάγεται μια σημαντική αρνητική συσχέτιση μεταξύ του υδραυλικού φορτίου και της εκπομπής μεθανίου στους τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, η οποία όμως υποδηλώνει ότι μια ενδεχόμενη αύξηση του υδραυλικού φορτίου θα σημαίνει τη μείωση της αποδοτικότητας της επεξεργασίας των λυμάτων του συστήματος, οπότε το πλεονέκτημα των μειωμένων εκπομπών CH₄ εξαφανίζεται.

Αρκετές μελέτες υποδεικνύουν ότι η εκτενής κάλυψη από υδατικά μακρόφυτα περιορίζει σημαντικά τις εκπομπές CH₄ στους τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής και στους παραποτάμιους τεχνητούς υγροβιότοπους, ενώ έχουν περιοριστικό αντίκτυπο και στις εκπομπές N₂O. Ωστόσο, αν ληφθούν υπόψη όλα τα μακρόφυτα μεμονωμένα, οι εκπομπές CH₄ και N₂O μπορεί να είναι είτε αυξημένες είτε ελαττωμένες. Μερικά μακρόφυτα με ιστό που χαρακτηρίζεται από κελιά λεπτών τοιχείων και μεγάλα διάκενα που επιτρέπουν την εσωτερική ανακυκλοφορία του αέρα, όπως είναι το κοινό καλάμι (*P.australis*), τα οποία διευκολύνουν τη μεταφορά αερίου από το υπόστρωμα (CH₄) και στο υπόστρωμα (O₂), μπορούν να αναχαιτίσουν την εκπομπή CH₄ από τους υγροβιότοπους (Brix 1990, 1997, Strom et al., 2007). Ομοίως, η παραγωγή οξυγόνου και το ανάλογο περιοριστικό της μεθανογένεσης φαινόμενο έχουν παρουσιαστεί σε ένα πειραματικό υγροβιότοπο ταφής υπολειμμάτων-στραγγιδίων με φυτά ιτιάς (Williams, et al., 2010). Από την άλλη πλευρά, αρκετά φυτά υγροβιότοπων μεγάλων εσωτερικών διακένων όπως *Eriophorum vaginatum* (Waddington et al., 1996, Ström et al., 2005), *Juncus effusus* (Smialeket al., 2006, Schafer et al., 2012), *Typha latifolia* και *Zizania latifolia* (Inamori et al., 2007, Wang et al., 2008a,b) αποτελούν σημαντικές πηγές εκπομπής μεθανίου. Ακόμα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες το καλάμι *P.australis* μπορεί να εκπέμψει CH₄ (Juutinen et al., 2003, Duan et al., 2006).

Διαφορετικά μακρόφυτα υγροβιότοπων παρουσιάζουν μια αξιοσημείωτη διακύμανση στα αποτελέσματα εκπομπών N₂O. Λόγω της πρόσληψης αζώτου, οι εκπομπές N₂O σε φυτοκαλυμμένους τεχνητούς υγροβιότοπους μπορούν να περιοριστούν. Αντίθετα, οι Ruckauf et al. (2004) απέδειξαν σε εργαστηριακά πειράματα ότι φυτά φραγμίτη (αγριοκάλαμο) ενίσχυσαν σημαντικά την εκπομπή N₂O, ενώ τα σιτηρά φαλαρίδα δεν επηρέασαν την εκπομπή N₂O, και καμία εκπομπή μέσω των βλαστών δεν παρατηρήθηκε. Κατά πάσα πιθανότητα, τα φυτά φραγμίτη παρείχαν περισσότερο οξυγόνο στο χώμα σε σχέση με τα σιτηρά φαλαρίδα.

Η συγκομιδή των φυτών φραγμίτη είχε μια βραχυπρόθεσμη περιοριστική επίπτωση στην εκπομπή CH_4 από τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής, ενώ η συγκομιδή στους οριζόντιους υποεπιφανειακής ροής δεν επέδρασε στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Zhu et al., 2007). Μολαταύτα, ακολουθώντας το πρότυπο των πολλαπλών υπηρεσιών οικοσυστήματος (Mitsch & Gosselink, 2007), οι τεχνητοί υγροβιότοποι ελεύθερης επιφανειακής ροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων, όσο και για την παραγωγή φυτικής βιομάζας δίχως την παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, περαιτέρω μακροπρόθεσμες μελέτες στον τομέα της επίδρασης των μακροφύτων και της πιθανής χρήσης τους για πολλαπλούς σκοπούς, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν (Meerburg et al., 2010).

Η σχέση μεταξύ της ανάπτυξης αλγών και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε υγροβιότοπους επεξεργασίας λυμάτων δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά. Η παρούσα μελέτη δείχνει ότι στους τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής επεξεργασίας αστικών λυμάτων, υποστρώματα με άλγη filamentous του είδους *Spirogyra* εκπέμπουν περισσότερο N_2O και λιγότερο CH_4 από υποστρώματα με υδατικά μακρόφυτα και μη φυτεμένα υποστρώματα. Οι Anderson και Mitsch (2006) έχουν ανακαλύψει ότι σε τεχνητούς παραποτάμιους υγροβιότοπους, σε ζώνες βαθύτερων υδάτων με έντονη ανάπτυξη αλγών σε ορισμένες περιπτώσεις, η μέση συσσώρευση ιζήματος είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή σε ζώνες αναπτυσσόμενης βλάστησης. Η εκτεταμένη συσσώρευση Ca και ανόργανου C στις ζώνες βαθέων υδάτων υγροβιότοπων υποδεικνύει ότι η απόθεση CaCO_3 έχει παραμείνει μια καταλυτική διαδικασία κατά την οποία η παραγωγή αλγών έχει υπάρξει η υψηλότερη (Anderson και Mitsch, 2006). Τα δεδομένα αυτά υποδηλώνουν ότι η ανάπτυξη αλγών μπορεί να αποτελεί έναν καταλύτη της απομάκρυνσης του C σε τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής, παρ'ότι σε νωρίτερα στάδια των τεχνητών υγροβιότοπων ελεύθερης επιφανειακής ροής αυτό μπορεί, ωστόσο, να οδηγήσει σε αύξηση της συγκέντρωσης του BOD στην εκροή (Diaz et al., 2012).

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι συσσωρεύουν οργανικό υλικό με την πάροδο του χρόνου (Mander et al., 2008, 2014, Van der Zaag et al., 2010), οπότε σχηματίζονται παχύτερες οργανικές στρώσεις στους τεχνητούς υγροβιότοπους ελεύθερης επιφανειακής ροής και προκαλείται έλλειψη οξυγόνου, γεγονός που καταλύει τη μεθανογένεση και έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη εκπομπή CH_4 . Προκειμένου να μετριαστεί ο αρνητικός ρόλος στο νωρίτερα στάδια μετά τη δημιουργία του υγροβιότοπου, είναι επιθυμητή η υποστήριξη μέσω της κάλυψης από υδατικά μακρόφυτα και της σωστής διαχείρισης αυτών κατά την ευρύτερη εφαρμογή των τεχνητών υγροβιότοπων ελεύθερης επιφανειακής και οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής.

Η σημασία των υπολογισθέντων τιμών εκπομπής

Οι παράγοντες εκπομπής που αναφέρονται εδώ, περιορίζονται στις εκπομπές βάσει διεργασιών και για το λόγο αυτό δεν περιλαμβάνουν την ποσότητα των αερίων του

θερμοκηπίου που παράγονται κατά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία είναι απαραίτητη, για παράδειγμα, για τη μεμονωμένη τροφοδότηση υδροβιότοπων μέσω της χρήσης αντλιών (κυρίως των κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής), για τον τεχνητό αερισμό στους αεριζόμενους υδροβιότοπους, ή για τη διεκπεραίωση διαδικασιών ενεργού ιλύος. Το ολικό λειτουργικό αποτύπωμα άνθρακα μια τεχνολογίας επεξεργασίας θα είναι ένας συνδυασμός των εκπομπών της διαδικασίας (δηλαδή, οι παράγοντες εκπομπής που αναφέρονται εδώ) και του λειτουργικού άνθρακα που σχετίζεται με την ενεργειακή χρήση, και εκτιμάται σε 0,544 kg CO₂ ανά χρησιμοποιούμενη kWh (UKWIR, 2008). Η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία μιας συγκεκριμένης εγκατάστασης επεξεργασίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του είδους της τεχνολογίας επεξεργασίας (π.χ. βιοφίλμ έναντι προσκολλημένης βιομάζας), της τοπογραφίας (π.χ. εκμετάλλευση βαρύτητας έναντι αντλούμενων παροχών), της αποδοτικότητας των εξαρτημάτων (π.χ. μέγεθος της αντλίας), των χρόνων λειτουργίας (π.χ. πόσοι είναι οι κύκλοι λειτουργίας ενός συστήματος SBR), μεταξύ άλλων. Συνεπώς, αναλόγως της σηματοδότησης της συμβατικής ενέργειας μεταξύ εγκαταστάσεων επεξεργασίας για τον καθορισμό της αποδοτικότητας της διαδικασίας σε όρους χρησιμοποιούμενης ενέργειας (και του συνακόλουθου αποτυπώματος άνθρακα) και της κατάστρωσης στρατηγικών βελτιστοποίησης, είναι επίσης δυνατό να συγκριθεί η αποδοτικότητα της επεξεργασίας σε όρους μάζας εκπεμπόμενων GHG ως εκπομπές των διεργασιών που παράγονται από την αφαίρεση των ρυπαντικών στοιχείων από τα υγρά απόβλητα (μέσω των συντελεστών εκπομπής).

Σε σύγκριση με συμβατικά συστήματα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, οι τεχνητοί υδροβιότοποι εκπέμπουν σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα N₂O. Τα συστήματα επεξεργασίας δημοτικών αποβλήτων στο Durham των ΗΠΑ δίνουν εκπομπές N₂O περίπου ίσες με 6,6 x 10⁷ g N₂O ανά έτος από την πρωτοβάθμια επεξεργασία και 1,2 x 10⁹ g N₂O ανά έτος από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία συστήματος ενεργού ιλύος. Οι ωριαίοι ρυθμοί της εκπομπής N₂O κυμάνθηκαν από 5 έως 75 mg N₂O-N m⁻² h⁻¹ για όλα τα σκέλη του συστήματος (Czepiel, et al., 1995), που είναι μια έως τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την εκπομπή από συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων. Ομοίως, έχουν μετρηθεί σημαντικά υψηλότερες τιμές εκπομπής N₂O σε ένα σύστημα επεξεργασίας δημοτικών αποβλήτων SBR από αυτές που έχουν μετρηθεί σε τεχνητούς υδροβιότοπους για την επεξεργασία λυμάτων (Park, et al., 2000).

Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία Σχεδιασμού Τεχνητών

Υγροβιότοπων και Υπολογισμού Αέριων Εκπομπών

3.1 Δεδομένα Εισόδου και Στόχος Επεξεργασίας Λυμάτων

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι μελετώνται ως φυσικά συστήματα επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων με σκοπό την «κατάλληλη» επεξεργασία των λυμάτων οικισμών μικρής κλίμακας.

Σύμφωνα με την οδηγία 91/271/ΕΕ και τις υπουργικές αποφάσεις που την ενσωμάτωσαν στο εθνικό δίκαιο, δηλαδή την ΚΥΑ 5673/400/1997 και την ΚΥΑ 19661/1982/1999, ως αστικά υγρά απόβλητα ορίζονται τα οικιακά λύματα, ή το μείγμα οικιακών με τα βιομηχανικά υγρά απόβλητα ή/και με τα όμβρια ύδατα. Οικιακά λύματα νοούνται τα λύματα από περιοχές κατοικίας και υπηρεσιών, που προέρχονται κυρίως από τις λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού και τις εμπορικές δραστηριότητες. Όμβρια ύδατα χαρακτηρίζονται τα νερά της βροχής μαζί με τα προϊόντα έκπλυσης των δρόμων. Τα βιομηχανικά υγρά απόβλητα είναι οποιαδήποτε υγρά απόβλητα απορρίπτονται από κτίρια και χώρους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε εμπορική ή βιομηχανική δραστηριότητα και δεν είναι οικιακά λύματα ή όμβρια ύδατα.

Η ποιοτική σύσταση των αστικών λυμάτων παρουσιάζει διακυμάνσεις, που εξαρτώνται κυρίως από: (α) την ποιότητα της ζωής και τις συνήθειες του πληθυσμού (βιοτικό επίπεδο), (β) την επάρκεια του νερού, (γ) τις εισροές ομβρίων στο δίκτυο αποχέτευσης (παντοροϊκό/χωριστικό), και (δ) την ενδεχόμενη διάθεση βιομηχανικών αποβλήτων στο δίκτυο αποχέτευσης. Σε γενικές γραμμές όμως οι διακυμάνσεις αυτές είναι μικρές, οπότε τα αστικά υγρά απόβλητα θεωρούνται σχεδόν σταθερής ποιότητας (Τσόγκας, 1998). Μια καλή προσέγγιση των περιεχόμενων ρυπαντικών φορτίων είναι:

Πίνακας 3.1 Ρυπαντικά Φορτία Εισερχόμενων Λυμάτων (Ανδρεαδάκης, et al., 2008)

Παράμετρος	Εισρέουσα μάζα
BOD ₅	60 - 65 g/κατ./d
TN	12 - 14 g/κατ./d
TSS	70 - 80 g/κατ./d
TP	2 - 4 g/κατ./d

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επειδή πραγματοποιείται και σχεδιασμός συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων που δέχονται πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα (εκτός των ανεπεξέργαστων), λαμβάνεται υπόψη και ένας βαθμός

απομάκρυνσης των ρύπων, ο οποίος ισούται με 30, 10, 60 και 10% για το BOD₅, TN, TSS και TP αντίστοιχα. Η μάζα των εισερχόμενων ρυπαντικών φορτίων των πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων, επομένως, διαμορφώνεται σε:

Πίνακας 3.2 Ρυπαντικά Φορτία Εισερχόμενων Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένων Λυμάτων

Παράμετρος	Εισρέουσα μάζα
BOD ₅	42 - 45,5 g/κατ./d
TN	10,8 – 12,6 g/κατ./d
TSS	28 - 32 g/κατ./d
TP	1,8 - 3,6 g/κατ./d

Ως οικισμοί ορίζονται οι περιοχές στις οποίες ο μόνιμος πληθυσμός και οι οικονομικές δραστηριότητες είναι επαρκώς συγκεντρωμένα ώστε τα αστικά λύματα να μπορούν να συλλέγονται και να διοχετεύονται στο σύστημα επεξεργασίας των λυμάτων. Οι οικισμοί «μικρής κλίμακας» αφορούν οικισμούς με πληθυσμό έως 2000 κατοίκους. Για τη διαστασιολόγηση των τεχνητών υγροβιότοπων και τον υπολογισμό των αέριων εκπομπών που παρουσιάζονται στη συνέχεια, υιοθετήθηκαν σενάρια για οικισμούς με ισοδύναμο πληθυσμό από 100 έως και 2000 κατοίκους.

Ο «ισοδύναμος πληθυσμός» περιλαμβάνει το μόνιμο, τον εποχιακό και το διερχόμενο πληθυσμό. Ο μόνιμος πληθυσμός εκτιμάται βάσει της χωρητικότητας των ενταγμένων ή υπό ένταξη περιοχών στο σχέδιο πόλης. Ο εποχιακός πληθυσμός εκτιμάται από στοιχεία του ΕΟΤ (αριθμός κλινών, ξενοδοχεία, ενοικιαζόμενα δωμάτια) λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα μεγάλο ποσοστό των κλινών δεν είναι καταγεγραμμένο, ενώ εκτός από τους διανυκτερεύοντες τουρίστες προσμετρώνται και οι διερχόμενοι τουρίστες (καταγραφή χώρων εστίασης, κέντρων συνάθροισης κ.α.). Για την αντιστοιχία τους σε ισοδύναμο εποχιακό πληθυσμό η παραδοχή είναι κατά εκτίμηση ότι 4 διερχόμενοι αντιστοιχούν σε ένα διανυκτερεύοντα κάτοικο.

Στην Ελλάδα η υδατική κατανάλωση κυμαίνεται από 150 έως 250 L/κατ./d για μικρούς οικισμούς και μεγάλες πόλεις αντίστοιχα – η συνήθως προτεινόμενη τιμή για λόγους σχεδιασμού και αυτή που τελικώς επιλέγεται και για το σχεδιασμό που ακολουθεί είναι τα 200 L/κατ./d. Στο δίκτυο ακαθάρτων εκτιμάται ότι καταλήγει το 60-80% της συνολικής υδατικής κατανάλωσης (οι απώλειες αφορούν σε νερά τα οποία δεν εισρέουν στο δίκτυο, ήτοι νερά που χρησιμοποιούνται για πότισμα, πλύσιμο αυτοκινήτων, δρόμων, αυλών, απώλειες εξάτμισης κ.α.). Το ποσοστό του νερού που καταλήγει στο αποχετευτικό δίκτυο, κατά τις Ελληνικές προδιαγραφές, συγκεκριμενοποιήθηκε με το ΠΔ 696/1979 σε:

$$Q_o = 80\% * Q_{υδ}$$

όπου

Q_o: μέση ημερήσια παροχή, [m³/d]

Q_{υδ}: μέση ημερήσια υδατική κατανάλωση, [m³/d]

Η μέση ημερήσια υδατική κατανάλωση προκύπτει ως:

$$Q_{υδ} = I.Π.* q_{υδ} * 0,001$$

όπου

$q_{υδ}$: μέση ημερήσια υδατική κατανάλωση ανηγμένη ανά κάτοικο (≈ 200 L/ι.κ./d), [L/ι.κ./d]

I.Π.: ισοδύναμος πληθυσμός, [ι.κ.]

Για την υλοποίηση του σχεδιασμού ενός συστήματος τεχνητού υγροβιότοπου, ακολούθως, απαιτείται ο υπολογισμός της μέγιστης ημερήσιας παροχής:

$$Q_H = \lambda_H * Q_o$$

όπου

Q_H : μέγιστη ημερήσια παροχή, [m^3/d]

λ_H : συντελεστής ημερήσιας αιχμής (1,1-2, με τυπική τιμή 1,50)

Q_o : μέση ημερήσια παροχή, [m^3/d]

Ορίζονται, τέλος, τα όρια εκροής τα οποία είναι απαιτητό να πληρούνται μετά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων για διάθεση σε αποδέκτη (Οδηγία 91/271/EE). Για τη διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων σε κανονικό αποδέκτη τίθενται τα εξής όρια εκροής:

- $BOD_{5,e}=20$ mg/L
- $TN_e=20$ mg/L
- $TSS_e=35$ mg/L

Για τη διάθεση των λυμάτων σε ευαίσθητο αποδέκτη τα όρια εκροής διαμορφώνονται ως εξής:

- $BOD_{5,e}=20$ mg/L
- $TN_e=10$ mg/L
- $TSS_e=35$ mg/L

Οι παραπάνω τιμές φροντίζεται να προκύπτουν από το μέσο όρο των τιμών που εμφανίζονται τόσο κατά τις καλοκαιρινές, όσο και κατά τις χειμερινές συνθήκες. Για το σχεδιασμό των τεχνητών υγροβιότοπων (που παρουσιάζεται στην ακόλουθη ενότητα) λαμβάνονται υπόψη τρεις τιμές θερμοκρασίας (15, 20 και 25 °C) βάσει των οποίων ελέγχεται και αν ικανοποιείται ο ζητούμενος μέσος όρος των τιμών εκροής.

3.2 Διαστασιολόγηση Τεχνητών Υγροβιότοπων

3.2.1 Διαστασιολόγηση Συστημάτων Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής

Τα συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (HSSF CWs), σχεδιάζονται με κριτήριο αφενός μεν την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, αφετέρου δε με κριτήριο την απομάκρυνση του φορτίου αζώτου για την επίτευξη τελικώς των απαραίτητων ορίων του βιοχημικώς απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) και του ολικού αζώτου (TN) εκροής.

3.2.1.1 Κριτήριο Απομάκρυνσης Οργανικού Φορτίου

Η εξίσωση στην οποία βασίζεται το μοντέλο προσδιορισμού της απαιτούμενης επιφάνειας του υγροβιότοπου με κριτήριο την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου είναι (Kickuth, 1984):

$$A_{BOD} = \frac{Q * (\ln C_o - \ln C_e)}{K_{BOD}^T}$$

όπου

A_{BOD} : επιφάνεια τεχνητού υγροβιότοπου για την απομάκρυνση οργανικού φορτίου, [m²]

Q: παροχή λυμάτων, [m³/d]

C_o : συγκέντρωση οργανικού φορτίου εισόδου, [mg/L]

C_e : συγκέντρωση οργανικού φορτίου εξόδου, [mg/L]

K_{BOD}^T : σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, [1/d]

Η σταθερά του ρυθμού απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου K_{BOD}^T είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενη (Cooper, 1990) και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$K_{BOD}^T = K_{BOD}^{20} * 1,1^{(T-20)}$$

όπου

K_{BOD}^{20} : σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης οργανικού φορτίου στους 20 °C (=0,067÷0,31≈0,15 d⁻¹), [1/d]

T: θερμοκρασία λυμάτων τη δεδομένη περίοδο, [°C]

Ο ρυθμός υποβάθμισης του BOD αυξάνεται περίπου κατά 10% ανά °C. Επομένως, ο ρυθμός αντίδρασης K_{BOD}^T αναμένεται να είναι υψηλότερος την θερινή περίοδο από ότι την χειμερινή. Έχει παρατηρηθεί επίσης ότι ο ρυθμός K_{BOD}^T αυξάνεται με την ηλικία του συστήματος (UN-HABITAT, 2008).

3.2.1.2 Ικανότητα Μεταφοράς Απαιτούμενης Ποσότητας Οξυγόνου

Στο προαναφερθέν κριτήριο, προστίθεται και η ανάγκη ελέγχου της ικανότητας μεταφοράς της απαιτούμενης ποσότητας οξυγόνου εντός του υγροβιότοπου, η οποία μαθηματικά εκφράζεται μέσω του συστήματος των εξής εξισώσεων και της απαίτησης ύπαρξης μοναδικής λύσης του:

$$\begin{cases} \text{Απαιτούμενο οξυγόνο} = N * L_o \\ \text{Διαθέσιμο οξυγόνο} = u * A_{O_2} \end{cases} \xrightarrow{N * L_o = u * A} A_{O_2} = \frac{N * L_o}{u}$$

όπου

N: εμπειρικός συντελεστής $BOD_{ultimate}/BOD_5 = 1,50$

L_o : οργανικό φορτίο σε όρους BOD, [kg/d]

u: συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου για τα αναφύομενα φυτά ($5 \div 45$ g/m²/d, με τυπική τιμή 20 g/m²/d), [g/m²/d]

A_{O_2} : επιφάνεια υγροβιότοπου για την επαρκή μεταφορά της απαιτούμενης ποσότητας οξυγόνου, [m²]

Ταυτόχρονα, λαμβάνεται υπόψη ότι επειδή η ζήτηση οξυγόνου είναι περισσότερη στο πρώτο μισό του υγροβιότοπου αλλά η παροχέτευσή του ομοιόμορφη, ο υγροβιότοπος θα πρέπει να διαστασιολογηθεί με το μισό της οργανικής φόρτισης που μπορεί να δεχτεί. Επακόλουθα αυτό συνεπάγεται ότι το παραπάνω εμβαδόν διπλασιάζεται, δηλαδή:

$$A'_{O_2} = 2 * A_{O_2} = 2 * \frac{N * L_o}{u}$$

3.2.1.3 Κριτήριο Απομάκρυνσης Ολικού Αζώτου

Παράλληλα, γίνεται και ο προσδιορισμός της απαιτούμενης επιφάνειας του υγροβιότοπου με κριτήριο την απομάκρυνση του ολικού αζώτου, με το μοντέλο που υιοθετείται να εκφράζεται από την εξίσωση:

$$A_{TN} = \frac{Q * (\ln N_o - \ln N_e)}{K_N^T * d * n}$$

όπου

A_{TN} : επιφάνεια τεχνητού υγροβιότοπου για την απομάκρυνση του ολικού αζώτου, [m²]

Q: παροχή λυμάτων, [m³/d]

N_o : συγκέντρωση ολικού αζώτου εισόδου, [mg/L]

N_e : συγκέντρωση ολικού αζώτου εξόδου, [mg/L]

K_N^T : σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης ολικού αζώτου, [m/d]

d: βάθος τεχνητού υγροβιότοπου, [m]

n: πορώδες του μέσου

Η σταθερά του ρυθμού απομάκρυνσης του ολικού αζώτου K_N^T είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενη και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$K_N^T = K_N^{20} * 1,15^{(T-20)}$$

όπου

K_N^{20} : σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης ολικού αζώτου (τυπική τιμή $0,107 \text{ d}^{-1}$), [1/d]

T: θερμοκρασία λυμάτων τη δεδομένη περίοδο, [$^{\circ}\text{C}$]

3.2.1.4 Επιλογή Επιφάνειας Τεχνητού Υγροβιότοπου

Το μοντέλο εκτελείται για χειμερινές συνθήκες (για τις οποίες γίνεται χρήση της χειμερινής θερμοκρασίας των λυμάτων) και, για διερευνητικούς λόγους, και για τις καλοκαιρινές (για τις οποίες γίνεται, αντίστοιχα, χρήση της θερινής θερμοκρασίας των λυμάτων). Εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα ότι, αναφορικά με την απομάκρυνση των ρυπαντικών φορτίων, οι δυσμενέστερες συνθήκες αφορούν την περίοδο του χειμώνα κατά τον οποίο οι ρυθμοί απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου και του ολικού αζώτου υπολείπονται των αντίστοιχων θερινών, με συνέπεια το εμβαδόν του τεχνητού υγροβιότοπου να επιλέγεται από τα αποτελέσματα του χειμώνα. Η μαθηματική συνθήκη που περιγράφει την εν λόγω επιλογή είναι:

$$A = \max[(A_{BOD}, A'_{O_2}, A_{TN})_{\text{χειμ}}, (A_{BOD}, A'_{O_2}, A_{TN})_{\text{καλ}}]$$

3.2.1.5 Ορισμός Γεωμετρίας Τεχνητού Υγροβιότοπου

Με δεδομένο το εμβαδόν του τεχνητού υγροβιότοπου, είναι δυνατός ο ορισμός της γεωμετρίας του. Το βάθος του υγροβιότοπου εξαρτάται από το είδος των φυτών (βάθος διεΐσδυσης). Στην παρούσα μελέτη, για τη φύτευση του υγροβιότοπου επιλέγονται τα φυτά *Phragmites australis* (καλάμια) και, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκές Οδηγίες Λειτουργίας και Σχεδιασμού Υγροβιότοπων, ο HSSF τεχνητός υγροβιότοπος σχεδιάζεται με βάθος $0,60 \text{ m}$ στην είσοδο και ελαφρώς μεγαλύτερο βάθος στην έξοδο προκειμένου να εφαρμοστεί και η επιθυμητή κλίση του, περί το 1% . Ο λόγος πίσω από την επιλογή του βάθους στα $0,60 \text{ m}$ είναι ότι αυτό είναι το μέγιστο βάθος στο οποίο το καλάμι μπορεί να αναπτυχθεί και, επομένως, το βάθος στο οποίο οποιαδήποτε επίδραση των ριζών και των ριζωμάτων μπορεί να παρατηρηθεί.

Το πλάτος ορίζεται από έναν υπολογισμό της κάθετης στη διεύθυνση της ροής επιφάνειας που οριοθετείται από το γεγονός ότι το βάθος εισροής έχει ήδη οριστεί στα $0,60 \text{ m}$. Η επιφάνεια κάθετα στη διεύθυνση της ροής υπολογίζεται από μια μορφή του νόμου του Darcy, κατά τον οποίο, χρησιμοποιώντας την προβλεπόμενη τιμή

υδραυλικής αγωγιμότητας, εξασφαλίζεται η υποεπιφανειακή ροή. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι (Cooper, 1990):

$$A_c = \frac{Q}{k_f * \frac{dH}{ds}} \xrightarrow{A_c=W*d} W = \frac{Q}{k_f * \frac{dH}{ds} * d}$$

όπου

A_c : επιφάνεια υδροβιότοπου κάθετα στη διεύθυνση της ροής, [m²]

W : πλάτος λεκάνης, [m]

d : βάθος λεκάνης, [m]

Q : παροχή λυμάτων, [m³/s]

k_f : υδραυλική αγωγιμότητα (τυπικές τιμές για διαβαθμισμένα εδάφη 1÷3 10⁻³ m/s), [m/s]

dH/ds : κλίση της βάσης της λεκάνης του υδροβιότοπου (≈1%)

Για χαλικώδεις πυθμένες, η προτεινόμενη τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες Λειτουργίας και Σχεδιασμού Υδροβιότοπων ισούται με 1 x 10⁻³ m/s (Cooper, 1990) και αυτή επιλέχτηκε για το σχεδιασμό των υδροβιότοπων της παρούσας εργασίας. Η κλίση της βάσης του πυθμένα δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη του 2% και στην παρούσα μελέτη επιλέχτηκε να ισούται με 1%.

Αφού υπολογιστεί και το πλάτος του υδροβιότοπου από το νόμο του Darcy, το μήκος τυπικά προκύπτει ως:

$$A = L * W \rightarrow L = \frac{A}{W}$$

όπου

A : εμβαδόν τεχνητού υδροβιότοπου, [m²]

W : πλάτος τεχνητού υδροβιότοπου, [m]

L : μήκος τεχνητού υδροβιότοπου, [m]

3.2.2 Διαστασιολόγηση Συστημάτων Επιφανειακής Ροής

Τα συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων επιφανειακής ροής (FWS CWs) σχεδιάζονται με γνώμονα την ικανοποίηση τριων κριτηρίων:

1. απομάκρυνσης οργανικού φορτίου
2. απομάκρυνσης ολικού αζώτου
3. απομάκρυνσης ολικά αιωρούμενων στερεών

3.2.2.1 Κριτήριο Απομάκρυνσης Οργανικού Φορτίου

Η εξίσωση στην οποία βασίζεται το μοντέλο προσδιορισμού της απαιτούμενης επιφάνειας του υγροβιοτόπου με κριτήριο την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου είναι (EPA, 1988):

$$\frac{C_e}{C_o} = L_o e^{-0,7 * K_T * A_V^{1,75} * \frac{L * W * d * n}{Q}}$$

όπου

C_e : συγκέντρωση οργανικού φορτίου εξόδου, [mg/L]

C_o : συγκέντρωση οργανικού φορτίου εισόδου, [mg/L]

L_o : ποσοστό του μη απομακρυνόμενου BOD_5 ως καθιζήσιμα στερεά κοντά στην είσοδο του συστήματος (τυπική τιμή 0,52)

K_T : σταθερά της κινητικής διάσπασης του οργανικού φορτίου για τη δεδομένη θερμοκρασία των λυμάτων, [1/d]

A_V : ειδική επιφάνεια απαραίτητη για τη μικροβιακή δραστηριότητα (τιμή για τυπική φυτική βλάστηση ίση με $15,7 \text{ m}^2/\text{m}^3$), [m^2/m^3]

L : μήκος συστήματος (παράλληλα στη διεύθυνση ροής), [m]

W : πλάτος συστήματος, [m]

d : βάθος συστήματος (συνήθεις τιμές $0,30 \div 0,40 \text{ m}$, εδώ $0,40 \text{ m}$), [m]

n : πορώδες συστήματος (τυπική τιμή 0,75)

Q : παροχή λυμάτων, [m^3/d]

Η σταθερά της κινητικής διάσπασης του οργανικού φορτίου K_T είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενη (Cooper, 1990) και περιγράφεται από την εξίσωση:

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

όπου

T : θερμοκρασία λυμάτων τη δεδομένη περίοδο, [$^{\circ}\text{C}$]

θ : σταθερά Arrhenius (τυπική τιμή 1,10)

K_{20} : σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης οργανικού φορτίου στους $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($=0,0057 \text{ d}^{-1}$), [1/d]

3.2.2.2 Κριτήριο Απομάκρυνσης Ολικά Αιωρούμενων Στερεών

Τα ολικά στερεά εισόδου συσχετίζονται με τα στερεά εξόδου μέσω του μεγέθους της υδραυλικής φόρτισης (L_W) του τεχνητού υγροβιοτόπου επιφανειακής ροής (EPA, 1988):

$$\frac{C_e}{C_o} = 0,1139 + 8,4 * 10^{-4} * L_W$$

όπου

C_e : συγκέντρωση ολικά αιωρούμενων στερεών εξόδου, [mg/L]

C_o : συγκέντρωση ολικά αιωρούμενων στερεών εισόδου, [mg/L]

L_w : υδραυλική φόρτιση τεχνητού υγροβιότοπου, [in/d]

Επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς την υδραυλική φόρτιση (L_w) και σχηματίζοντας το πηλικό της παροχής των λυμάτων (Q) προς τη φόρτιση, προκύπτει το εμβαδόν του συστήματος βάσει του κριτηρίου απομάκρυνσης των TSS:

$$A = \frac{Q}{L_w}$$

όπου

A : εμβαδόν τεχνητού υγροβιότοπου, [m^2]

Q : παροχή λυμάτων, [m^3/d]

L_w : υδραυλική φόρτιση τεχνητού υγροβιότοπου, [m/d]

3.2.2.3 Κριτήριο Απομάκρυνσης Ολικού Αζώτου

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι συχνά προσομοιώνονται ως αντιδραστήρες εμβολοειδούς ροής χρησιμοποιώντας πρωτοβάθμιες κινητικές αντιδράσεων για να περιγράψουν το σύστημα και τη μεταβολή των συγκεντρώσεων των ρυπαντικών στοιχείων. Για μερικούς ρυπαντές, επιπλέον, οι συγκεντρώσεις του υποβάθρου τους περιλαμβάνονται στην εξίσωση της πρωτοβάθμιας κινητικής. Η τυπική εξίσωση πρωτοβάθμιας κινητικής τροποποιείται ώστε να λαμβάνεται υπόψη η συγκέντρωση υποβάθρου του ρυπαντή και παίρνει τη μορφή (Higgins, et al., 1999):

$$\frac{TN - TN^*}{TN_{in} - TN^*} = e^{-k_V \tau}$$

όπου

TN : συγκέντρωση ολικού αζώτου εξόδου, [mg/L]

TN^* : συγκέντρωση ολικού αζώτου υποβάθρου, [mg/L]

TN_{in} : συγκέντρωση ολικού αζώτου εισόδου, [mg/L]

k_V : ογκομετρική σταθερά ρυθμού αντίδρασης, [d^{-1}]

τ : υδραυλικός χρόνος παραμονής, [d]

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (τ) ορίζεται από την εξίσωση:

$$\tau = \frac{n * A * d}{Q}$$

όπου

n: πορώδες τεχνητού υγροβιότοπου ($\approx 0,95$ για FWS CW)

A: εμβαδόν επιφάνειας τεχνητού υγροβιότοπου, [m²]

d: μέσο βάθος νερού, [m]

Q: παροχή λυμάτων, [m³/d]

Η σταθερά της κινητικής απομάκρυνσης του ολικού αζώτου k_T είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενη (Kadlec & Knight, 1996) και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$k_T = k_{20} \theta^{(T-20)}$$

όπου

T: θερμοκρασία λυμάτων τη δεδομένη περίοδο, [°C]

θ : σταθερά Arrhenius (τυπική τιμή 1,09 για το ολικό άζωτο)

k_{20} : σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης ολικού αζώτου στους 20 °C (τυπική τιμή 22 m/yr για το ολικό άζωτο), [m/yr]

Ακολούθως συσχετίζεται η κινητική με την ογκομετρική σταθερά της κινητικής που αφορά το ρυθμό απομάκρυνσης του ολικού αζώτου μέσω της σχέσης (Kadlec & Knight, 1996):

$$k_T = k_v * n * d \rightarrow k_v = \frac{k_T}{n * d}$$

όπου

k_T : σταθερά της κινητικής απομάκρυνσης του ολικού αζώτου

n: πορώδες τεχνητού υγροβιότοπου

d: μέσο βάθος νερού, [m]

3.2.2.4 Επιλογή Επιφάνειας Τεχνητού Υγροβιότοπου

Το μοντέλο εκτελείται για χειμερινές συνθήκες (για τις οποίες γίνεται χρήση της χειμερινής θερμοκρασίας των λυμάτων) και, για διερευνητικούς λόγους, και για τις καλοκαιρινές (για τις οποίες γίνεται, αντίστοιχα, χρήση της θερινής θερμοκρασίας των λυμάτων). Εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα ότι, αναφορικά με την απομάκρυνση των ρυπαντικών φορτίων, οι δυσμενέστερες συνθήκες αφορούν την περίοδο του χειμώνα κατά τον οποίο οι ρυθμοί απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου και του ολικού αζώτου υπολείπονται των αντίστοιχων θερινών (το κριτήριο απομάκρυνσης ολικά αιωρούμενων στερεών όντας μη θερμοκρασιακά εξαρτώμενο δεν παρουσιάζει διαφορετικό αποτέλεσμα ως προς το εμβαδόν μεταξύ των δυο εποχών), με συνέπεια το εμβαδόν του τεχνητού υγροβιότοπου να επιλέγεται από τα αποτελέσματα του χειμώνα. Η μαθηματική συνθήκη που περιγράφει την εν λόγω επιλογή είναι:

$$A = \max[(A_{BOD}, A_{TSS}, A_{TN})_{\chiειμ}, (A_{BOD}, A_{TSS}, A_{TN})_{καλ}]$$

3.2.2.5 Ορισμός Γεωμετρίας Τεχνητού Υδροβιότοπου

Η ροή σε σύστημα FWS τεχνητού υδροβιότοπου πραγματοποιείται με ελεύθερη επιφάνεια, συνεπώς σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται η ικανοποίηση του νόμου Darcy για την εξασφάλιση οριζόντιας ροής. Η γεωμετρία ενός FWS τεχνητού υδροβιότοπου αρκεί να ικανοποιεί την αναλογία:

$$L : W = 2 \div 10$$

Ο δυνατόν μεγαλύτερος λόγος μήκους προς πλάτος (10:1) προτείνεται από την αναγκαιότητα ελαχιστοποίησης βραχυκυκλωμάτων της ροής και μεγιστοποίησης της επαφής των λυμάτων με το βιοφίλμ του υποστρώματος για τη βιολογική απομάκρυνση των θρεπτικών. Ωστόσο, η μεγαλύτερη τιμή της αναλογίας μήκους-πλάτους επιβάλλει την κατασκευή εκτεταμένων παρόχθιων επιφανειών και, συνεπώς, αυξάνει το κόστος κατασκευής και δημιουργεί μια όχι απόλυτα εναρμονισμένη με το περιβάλλον εικόνα. Ο δυνατόν μικρότερος λόγος μήκους προς πλάτος (2:1) προτείνεται από οικονομικής απόψεως (καλύτερος συνδυασμός μεταξύ της κατανομής της ροής και του κόστους των παρόχθιων έργων) (Knight, 1987). Ορισμένες μελέτες υποδεικνύουν ότι για την απομάκρυνση των θρεπτικών, η βέλτιστη αναλογία μήκους-πλάτους είναι 10:1 (Hammer, 1989). Άλλες μέθοδοι με κριτήριο τη διατήρηση της αποτελεσματικότητας στην κατανομή της ροής, όπως είναι η εξασφάλιση επάρκειας στην εισροή, οι βαθιές ζώνες, οι νησίδες και αντίστοιχες διατάξεις, προτείνονται για να μειωθεί η ανάγκη υιοθέτησης μεγάλης αναλογίας μήκους-πλάτους. Το σχήμα του υδροβιότοπου, οι θέσεις εισροής/εκροής, οι διατάξεις εισροής/εκροής, οι νησίδες, επηρεάζουν την υδροδυναμική του συστήματος. Για τη ζώνη των μακροφύτων, ο λόγος μήκους προς το πλάτος πρέπει να κυμαίνεται από 4:1 έως 10:1 (DLWC, 1998).

3.3 Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου από Τεχνητούς Υδροβιότοπους

3.3.1 Μεθοδολογικά Ζητήματα Υπολογισμού Εκπομπών

Οι εκπομπές μεθανίου (CH_4) είναι συνάρτηση των οργανικών υλικών τα οποία διοχετεύονται στους τεχνητούς υδροβιότοπους και του συντελεστή εκπομπής. Γενικά, αναερόβιες συνθήκες επικρατούν σε αρκετές περιπτώσεις στους τεχνητούς υδροβιότοπους. Ωστόσο, το μεθάνιο που παράγεται από τους τεχνητούς υδροβιότοπους συνήθως δεν ανακτάται και δεν αναφλέγεται σε κάποια διάταξη καύσης ή ενεργειακή συσκευή, και για αυτό το λόγο η ανάκτηση CH_4 δε λογίζεται εδώ. Η ποσότητα της βλάστησης που συλλέγεται από τους τεχνητούς υδροβιότοπους είναι γενικά μικρή και ο αντίκτυπός της στις ολικές εκπομπές από CWs θεωρείται ασήμαντος. Επιπλέον, η συγκομιδή συνήθως δεν εκτελείται σε τακτική βάση και η

ποσότητα της συλλεγόμενης βιομάζας τυπικά δεν καταγράφεται, για αυτό δε λαμβάνεται υπόψη στην ακόλουθη μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών.

Οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου (N_2O) είναι άμεσες εκπομπές της διαδικασίας επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων σε τεχνητούς υγροβιότοπους λόγω νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Οι εκπομπές υπολογίζονται βάσει του ολικού αζώτου με το οποίο φορτίζονται οι τεχνητοί υγροβιότοποι και του συντελεστή εκπομπής. Η μεθοδολογία που προτείνεται θεωρεί τυπικές πρακτικές συγκομιδής της φυτικής βλάστησης. Ωστόσο, έως τώρα, η ποσότητα της βλάστησης που συλλέγεται από τεχνητούς υγροβιότοπους είναι γενικά μικρή και η συλλεχθείσα φυτική βιομάζα συνήθως δεν καταγράφεται. Για το λόγο αυτό, η πρακτική συγκομιδής δε λογίζεται ως ένας παράγοντας επίδρασης της διαδικασίας εκτίμησης των εκπομπών.

3.3.2 Επιλογή Μεθοδολογίας Υπολογισμού Εκπομπών

3.3.2.1 Εκτίμηση Εκπομπών Μεθανίου

Η γενική εξίσωση για την εκτίμηση των εκπομπών μεθανίου από τους τεχνητούς υγροβιότοπους στους οποίους γίνεται επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών λυμάτων είναι (IPCC, 2006):

$$CH_{4,εκπομπές} = \sum_j (TOW_j * EF_j) + \sum_{i,j} (TOW_{i,j} * EF_j)$$

όπου

$CH_{4,εκπομπές}$: εκπομπές μεθανίου στον καταγεγραμμένο χρόνο, [kg CH_4 /yr]

TOW_j : ολικά οργανικά λυμάτων που εισέρχονται στον τεχνητό υγροβιότοπο στον καταγεγραμμένο χρόνο, [kg BOD/yr ή kg COD/yr]

EF_j : συντελεστής εκπομπής, [kg CH_4 /kg BOD] για αστικά λύματα ή [kg CH_4 /kg COD] για αστικά και βιομηχανικά λύματα μαζί. Εάν γίνεται χρήση περισσότερων του ενός τύπου τεχνητών υγροβιότοπων σε ένα βιομηχανικό τομέα, τότε ο παράγοντας αυτός θα ήταν ένας σταθμισμένος μέσος των $TOW_{i,j}$.

i: βιομηχανικός τομέας

j: τύπος τεχνητού υγροβιότοπου

3.3.2.2 Εκτίμηση Εκπομπών Υποξειδίου του Αζώτου

Η γενική εξίσωση για την εκτίμηση των εκπομπών υποξειδίου του αζώτου από τους τεχνητούς υγροβιότοπους στους οποίους γίνεται επεξεργασία αστικών ή βιομηχανικών λυμάτων είναι (IPCC, 2006):

$$N_2O_{εκπομπές} = \sum_j (N_j * EF_j * \frac{44}{28}) + \sum_{i,j} (N_{i,j} * EF_j * \frac{44}{28})$$

όπου

$N_2O_{\text{εκπομπές}}$: εκπομπές υποξειδίου του αζώτου στον καταγεγραμμένο χρόνο, [kg N_2O /yr]

N_j : ολικό άζωτο σε αστικά λύματα που εισέρχεται στον τεχνητό υγροβιότοπο στον καταγεγραμμένο χρόνο, [kg N/yr]

$N_{i,j}$: ολικό άζωτο σε βιομηχανικά λύματα που εισέρχεται στον τεχνητό υγροβιότοπο στον καταγεγραμμένο χρόνο, [kg N/yr]

EF_j : συντελεστής εκπομπής, [kg N_2O -N/kg N]. Εάν γίνεται χρήση περισσότερων του ενός τύπου τεχνητών υγροβιότοπων σε ένα βιομηχανικό τομέα, τότε ο παράγοντας αυτός θα ήταν ένας σταθμισμένος μέσος του $N_{i,j}$.

i: βιομηχανικός τομέας

j: τύπος τεχνητού υγροβιότοπου

44/28: όρος μετατροπής των kg N_2O -N σε kg N_2O

3.3.2.3 Συντελεστές Εκπομπής

Συντελεστής Εκπομπής Μεθανίου

Ο συντελεστής εκπομπής (EF_j) για την επεξεργασία λυμάτων σε τεχνητούς υγροβιότοπους είναι μια συνάρτηση του μέγιστου δυναμικού παραγωγής CH_4 (B_o) και του συντελεστή διόρθωσης μεθανίου (MCF) (IPCC, 2006).

$$EF_j = B_o * MCF_j$$

όπου

EF_j : συντελεστής εκπομπής, [kg CH_4 /kg BOD ή kg CH_4 /kg COD]

j: τύπος τεχνητού υγροβιότοπου

B_o : μέγιστη παραγωγική ικανότητα μεθανίου, [kg CH_4 /kg BOD ή kg CH_4 /kg COD]

MCF_j: συντελεστής διόρθωσης εκπομπής μεθανίου (κλάσμα), πίνακας

Η καλύτερη πρακτική είναι να χρησιμοποιούνται δεδομένα που αφορούν συγκεκριμένα την περιοχή μελέτης σχετικά με τη μέγιστη παραγωγική ικανότητα μεθανίου (όπου είναι διαθέσιμα), εκφρασμένα σε όρους kg CH_4 /kg BOD που απομακρύνεται για τα αστικά λύματα ή kg CH_4 /kg COD που απομακρύνεται για βιομηχανικά λύματα ώστε να υπάρχει συμφωνία με τα δεδομένα δραστηριότητας. Αν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα δεδομένων για την προς μελέτη περιοχή, οι ακόλουθες προεπιλεγμένες τιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

Οι κατεθυντήριες γραμμές «2006 IPCC Guidelines» παρέχουν προεπιλεγμένες τιμές μέγιστης παραγωγικής ικανότητας μεθανίου (B_o), τόσο για τα αστικά όσο και για τα βιομηχανικά λύματα: 0,6 kg CH_4 /kg BOD και 0,25 kg CH_4 /kg COD, αντίστοιχα.

Ο συντελεστής διόρθωσης μεθανίου (MCF) υποδηλώνει το βαθμό στον οποίο η μέγιστη παραγωγική ικανότητα μεθανίου (B_o) υλοποιείται σε κάθε τύπο τεχνητού υγροβιότοπου. Είναι μια ένδειξη για το βαθμό στον οποίο το σύστημα είναι αναερόβιο. Οι προτεινόμενοι συντελεστές διόρθωσης μεθανίου (MCF) για τους

τεχνητούς υγροβιότοπους επιφανειακής (SF), οριζόντιας υποεπιφανειακής (HSSF) και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής (VSSF) αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα και προέρχονται από βιβλιογραφική ανάλυση των ρυθμών μετατροπής CH₄. Κάθε συντελεστής διόρθωσης μεθανίου (MCF) του πίνακα, υπολογίζεται από τη σχέση της αρχικής φόρτισης TOC προς την εκροή CH₄, όπως αυτή παρέχεται από τις υπάρχουσες πηγές.

Πίνακας 3.3 Συντελεστής Διόρθωσης CH₄ ανά Τύπο Τεχνητού Υγροβιότοπου (IPCC, 2006)

Τύπος Τ.Υ.	MCF	Εύρος
Επιφανειακής Ροής	0,4	0,08-0,7
Υποεπιφανειακής Οριζόντιας Ροής	0,1	0,07-0,13
Υποεπιφανειακής Κατακόρυφης Ροής	0,01	0,004-0,016

Οι τιμές του συντελεστή διόρθωσης για τις εκπομπές μεθανίου βασίστηκαν σε πραγματικές μετρήσεις δεδομένων που προέκυψαν κάτω από διαφορετικές λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες και, επομένως, παράγοντες όπως ο τύπος της βλάστησης και η επίδραση της θερμοκρασίας έχουν ληφθεί υπόψη.

Συντελεστής Εκπομπής Υποξειδίου του Αζώτου

Οι προεπιλεγμένοι συντελεστές εκπομπής για το N₂O που εκπέμπεται από αστικά και βιομηχανικά λύματα, η επεξεργασία των οποίων γίνεται σε τεχνητούς υγροβιότοπους, είναι (IPCC, 2006):

- 0,013 kg N₂O-N/kg N για τους επιφανειακής ροής
- 0,0079 kg N₂O-N/kg N για τους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής και
- 0,00023 kg N₂O-N/kg N για τους κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής

Οι παραπάνω τιμές βασίζονται σε δεδομένα που προέρχονται από τη βιβλιογραφική ανάλυση και επηρεάζονται από το εύρος των διεργασιών της νιτροποίησης και απονιτροποίησης οι οποίες λαμβάνουν χώρα στους τεχνητούς υγροβιότοπους, τη φυτοκάλυψη και τις κλιματικές συνθήκες. Υπήρξαν ανεπαρκή δεδομένα πραγματικών μετρήσεων για υβριδικά συστήματα ώστε να προκύψουν συντελεστές εκπομπής για αυτά. Αν είναι δυνατός ο ακριβής χωρικός διαχωρισμός των τεχνητών υγροβιότοπων επιφανειακής, οριζόντιας υποεπιφανειακής και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής, τότε οι συντελεστές εκπομπής των υβριδικών συστημάτων γίνεται να υπολογιστούν ως ο χωρικά σταθμισμένος μέσος των συντελεστών εκπομπής των αντίστοιχων υγροβιότοπων. Ορθή πρακτική είναι η χρήση δεδομένων που αφορούν συγκεκριμένα την περιοχή μελέτης σχετικά με το συντελεστή εκπομπής, όπου αυτά είναι διαθέσιμα, εκφρασμένα σε όρους kg N₂O-N/kg N που επιφορτίζεται για τα αστικά και τα βιομηχανικά λύματα, ώστε να υπάρχει συμφωνία με τα δεδομένα δραστηριότητας.

3.3.2.4 Δεδομένα Δραστηριότητας

Δεδομένα Δραστηριότητας για την Εκπομπή Μεθανίου

Τα δεδομένα δραστηριότητας για αυτή την κατηγορία δεδομένων είναι η ποσότητα των οργανικών υλικών (TOW) εντός των λυμάτων που εναποτίθενται προς επεξεργασία στους τεχνητούς υγροβιότοπους. Η παράμετρος αυτή είναι μια συνάρτηση του πληθυσμού που εξυπηρετείται από το σύστημα τεχνητών υγροβιότοπων, και της παραγωγής του βιοχημικώς απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) ανά άτομο και ημέρα. Αν υπάρχουν και βιομηχανικά λύματα που διοχετεύονται σε οικιακούς υπονόμους, τότε λογίζονται παράλληλα με τα αστικά λύματα (IPCC, 2006).

Η εξίσωση για τα ολικά οργανικά βιοδιασπάσιμα υλικά στα αστικά λύματα είναι:

$$TOW_j = P_j * BOD * I * 0,001 * 365$$

Η εξίσωση για τα ολικά οργανικά βιοδιασπάσιμα υλικά στα βιομηχανικά λύματα είναι:

$$TOW_{i,j} = COD_i * W_{i,j} * 365$$

όπου

TOW_j : ολικά οργανικά στα αστικά λύματα που τίθενται προς επεξεργασία στον τεχνητό υγροβιότοπο κατά τον καταγεγραμμένο χρόνο, [kg BOD/yr]

$TOW_{i,j}$: ολικά οργανικά λυμάτων από τη βιομηχανία I που τίθενται προς επεξεργασία στον τεχνητό υγροβιότοπο κατά τον καταγεγραμμένο χρόνο, [kg COD/yr]

i : βιομηχανικός τομέας

P_j : πληθυσμός του οποίου τα λύματα τίθενται προς επεξεργασία στον τεχνητό υγροβιότοπο.

BOD : κατά κεφαλήν παραγωγή BOD κατά τον καταγεγραμμένο χρόνο, [g BOD/άτομο/ημέρα]

I : διορθωτικός συντελεστής για επιπλέον εγχυόμενο στους υπονόμους βιομηχανικό BOD (για συλλεγόμενο η σταθερά είναι 1,25, για μη συλλεγόμενο η σταθερά ισούται με 1,00 σύμφωνα με τις 2006 IPCC Κατευθυντήριες Οδηγίες)

COD_i : συγκέντρωση COD στα λύματα της i βιομηχανίας που εισέρχονται στον τεχνητό υγροβιότοπο κατά τον καταγεγραμμένο χρόνο, [kg COD/m³]

$W_{i,j}$: ημερήσιος ρυθμός ροής βιομηχανικών λυμάτων, επεξεργασμένα από τον τεχνητό υγροβιότοπο, [m³/d]

Διευκρινίζεται ότι στα πλαίσια του σχεδιασμού των υγροβιοτόπων της παρούσας εργασίας, δεν εθεωρήθη πως υπήρξαν επιπλέον εγχυόμενα βιομηχανικά λύματα στο δίκτυο συλλογής, με συνέπεια να αρκεί η εφαρμογή της πρώτης εξίσωσης για τον υπολογισμό των ολικών οργανικών στα εισερχόμενα υγρά απόβλητα.

Δεδομένα Δραστηριότητας για την Εκπομπή Υποξειδίου του Αζώτου

Τα δεδομένα δραστηριότητας για αυτή την κατηγορία πηγής εκπομπών είναι η ποσότητα του εισερχόμενου στους τεχνητούς υδροβιότοπους ολικού αζώτου (TN). Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής, με δεδομένο ότι είναι γνωστή η συγκέντρωση ολικού αζώτου στα εισερχόμενα λύματα, η παράμετρος αυτή θεωρήθηκε συνάρτηση του πληθυσμού που εξυπηρετείται από το σύστημα τεχνητών υδροβιότοπων και της παραγωγής του ολικού αζώτου (TN) ανά άτομο και ημέρα (IPCC, 2006).

Η εξίσωση για το ολικό άζωτο στα αστικά λύματα είναι:

$$N_j = P_j * TN * 0,001 * 365$$

όπου

N_j : ολικό άζωτο στα αστικά λύματα που εισέρχεται στον τεχνητό υδροβιότοπο κατά τον καταγεγραμμένο χρόνο, [kg N/yr]

P_j : πληθυσμός του οποίου τα λύματα τίθενται προς επεξεργασία στον τεχνητό υδροβιότοπο

TN: κατά κεφαλήν παραγωγή TN κατά τον καταγεγραμμένο χρόνο, [g TN/άτομο/ημέρα]

3.3.2.5 Συνοχή Χρονοσειράς Δεδομένων Εκπομπής

Η ίδια μέθοδος και τα ίδια πακέτα δεδομένων πρέπει να χρησιμοποιούνται για να εκτιμώνται οι εκπομπές μεθανίου και υποξειδίου του αζώτου, από τεχνητούς υδροβιότοπους που επεξεργάζονται υγρά απόβλητα, για κάθε χρόνο. Ο συντελεστής διόρθωσης μεθανίου (MCF) για διαφορετικά συστήματα επεξεργασίας δεν πρέπει να μεταβάλλεται από χρόνο σε χρόνο, εκτός αν η αλλαγή αυτή είναι αιτιολογίσιμη και καταγεγραμμένη. Αν το ποσοστό των λυμάτων που τίθεται προς επεξεργασία σε διαφορετικά συστήματα επεξεργασίας μεταβάλλεται μέσα σε μια χρονική περίοδο, οι λόγοι της μεταβολής θα πρέπει να καταγράφονται.

Για τα δεδομένα δραστηριότητας που προκύπτουν από τα πληθυσμιακά στοιχεία, οι χώρες οφείλουν να καθορίζουν το τμήμα του πληθυσμού που εξυπηρετείται από τα συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων. Αν για μια ή περισσότερες χρονιές υπάρχει έλλειψη δεδομένων σχετικά με τα επεξεργαζόμενα λύματα, τότε για την εκτίμηση των εκπομπών γίνεται να εφαρμοστούν κατάλληλες «τεχνικές συναρμογής», όπως είναι η χρήση υποκατάστατων δεδομένων και η μέθοδος παρεμβολής. Οι εκπομπές από τα επεξεργαζόμενα υγρά απόβλητα σε τεχνητούς υδροβιότοπους τυπικά δεν παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις από χρόνο σε χρόνο.

3.3.2.6 Αβεβαιότητες

Αβεβαιότητες Σχετικά με την Εκπομπή Μεθανίου

Η ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων στην πράξη βασίζεται στην κρίση των ειδικών που σε συνδυασμό με εμπειρικά δεδομένα μπορεί να δώσει τις συνολικές εκτιμήσεις αβεβαιότητας. Οι ακόλουθες παράμετροι λογίζονται ως «αρκετά αβέβαιες»:

- Η ποσότητα των υγρών αποβλήτων που τίθεται προς επεξεργασία σε τεχνητούς υγροβιότοπους.
- Το κλάσμα των οργανικών που μετατρέπεται αναερόβια σε CH₄ κατά τη συλλογή των λυμάτων. Αυτό εξαρτάται από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής και τη θερμοκρασία στον αγωγό συλλογής λυμάτων, όπως επίσης και σε άλλους παράγοντες που αφορούν την ύπαρξη αναερόβιας συνθήκης στον αγωγό και πιθανώς στοιχεία που είναι τοξικά για τα αναερόβια βακτήρια σε μερικά βιομηχανικά λύματα.
- Η ποσότητα των βιομηχανικών ολικών οργανικών από μικρής ή μεσαίας κλίμακας βιομηχανίες και αγροτικά οικιακά λύματα που διοχετεύονται σε τεχνητούς υγροβιότοπους σε αναπτυσσόμενες χώρες.
- Διαφορετικά φυτικά είδη που εφαρμόζονται σε τεχνητούς υγροβιότοπους και συμμετέχουν στην ανταλλαγή αερίων.

Το εύρος της αβεβαιότητας ανά συμμετέχουσα (στον υπολογισμό των εκπομπών) παράμετρο φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3.4 Εύρος Αβεβαιότητας Παραμέτρων Υπολογισμού Εκπομπών CH₄ (IPCC, 2006)

Παράμετρος	Εύρος αβεβαιότητας
Συντελεστής εκπομπής	
Μέγιστη παραγωγική ικανότητα CH ₄ (B ₀)	± 30%
Συντελεστής διόρθωσης μεθανίου (MCF)	FWS: ± 79%
	HSSF: ± 31%
	VSSF: ± 31%
Δεδομένα δραστηριότητας	
Ανθρώπινος πληθυσμός	± 5%
BOD ανά άτομο	± 30%
Διορθωτικός συντελεστής για επιπλέον βιομηχανικό BOD που διοχετεύεται στους υπονόμους	Για μη συλλεγόμενο, η αβεβαιότητα είναι μηδέν %. Για συλλεγόμενο, ± 20%.
Φόρτιση COD από βιομηχανικά λύματα	από -55% έως +103%

Αβεβαιότητες Σχετικά με την Εκπομπή Υποξειδίου του Αζώτου

Εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού δεδομένων, οι προεπιλεγμένοι συντελεστές εκπομπής υποξειδίου του αζώτου συνοδεύονται από μεγάλα ποσοστά αβεβαιότητας.

Πίνακας 3.5 Εύρος Αβεβαιότητας Παραμέτρων Υπολογισμού Εκπομπών N₂O (IPCC, 2006)

Παράμετρος	Εύρος	Τυπική τιμή
Συντελεστής εκπομπής (kg N ₂ O-N / kg N)	FWS: ± 90%	FWS: 0,0013
	HSSF: ± 79%	HSSF: 0,0079
	VSSF: ± 70%	VSSF: 0,00023
Δεδομένα δραστηριότητας		
Ανθρώπινος πληθυσμός	± 5%	Βάσει περιοχής μελέτης
Φόρτιση TN από βιομηχανικά απόβλητα	από -55% έως +103%	Βάσει περιοχής μελέτης

3.4 Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα από Τεχνητούς Υγροβιότοπους

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) δεν εμπίπτουν στην κατηγορία των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων καθώς το CO₂ από τα λύματα θεωρείται βιογενές (IPCC, 2006). Για τον υπολογισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα ελήφθησαν υπόψη αφενός οι διεργασίες παραγωγής και αφετέρου οι διεργασίες κατανάλωσης του CO₂ (Mamais, et al., 2015).

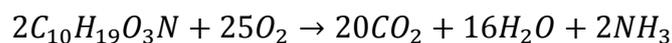
3.4.1 Παραγωγή CO₂

Οι διεργασίες που συντελούν στην παραγωγή του CO₂ είναι:

- η οξείδωση του οργανικού φορτίου και η ανάπτυξη της βιομάζας
- η απονιτροποίηση
- η φθορά της βιομάζας

3.4.1.1 Παραγωγή CO₂ λόγω Οξείδωσης της Οργανικής Ύλης

Η παραγωγή CO₂ από την απομάκρυνση BOD και την παραγωγή βιομάζας μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη χημική αντίδραση, στην οποία ο χημικός τύπος της βιομάζας λαμβάνεται ως C₁₀H₁₉O₃N:



Σύμφωνα με την παραπάνω χημική αντίδραση, ο λόγος της μάζας του O₂ που καταναλώνεται προς τη μάζα του CO₂ που παράγεται είναι 25x32:20x44 ή 1:1,1. Συνεπώς, για κάθε 1 kg καταναλισκόμενου O₂ παράγεται 1,1 kg CO₂. Η μάζα του παραγόμενου CO₂ από την απομάκρυνση του BOD και την ανάπτυξη της βιομάζας σε όρους kg/d υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$CO_{2,BOD\text{oxidation}} = R_{O_2} * 1,1$$

όπου

R_{O_2} : κατανάλωση οξυγόνου, [kg O₂/d]

Για τον υπολογισμό του καταναλισκόμενου O₂ απαιτείται πρώτα η γνώση του διαθέσιμου από τα φυτά O₂. Το οξυγόνο που είναι διαθέσιμο από τα φυτά, όπως αναφέρεται και στην ενότητα της διαστασιολόγησης HSSF τεχνητών υδροβιότοπων, ορίζεται ως το γινόμενο του συντελεστή μεταφοράς O₂ για τα αναφυόμενα φυτά (u) επί την απαιτούμενη επιφάνεια του υδροβιότοπου με κριτήριο την ικανότητα μεταφοράς της απαιτούμενης ποσότητας οξυγόνου (A_{O_2}). Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, γίνεται η παραδοχή ότι το σύνολο της ποσότητας του διαθέσιμου οξυγόνου είναι ταυτόχρονα και το οξυγόνο που καταναλώνεται για την οξείδωση των οργανικών. Συνεπώς:

$$R_{O_2,consumed} = percentage_{consumption} * u * A_{O_2}$$

όπου

u : συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου για τα αναφυόμενα φυτά (5÷45 g/m²/d, με τυπική τιμή 20 g/m²/d), [g/m²/d]

A_{O_2} : επιφάνεια υδροβιότοπου για την επαρκή μεταφορά της απαιτούμενης ποσότητας οξυγόνου, [m²]

$percentage_{consumption}$: ποσοστό του διαθέσιμου O₂ που καταναλώνεται (=100%)

3.4.1.2 Παραγωγή CO₂ λόγω Απονιτροποίησης

Η απονιτροποίηση επιτυγχάνεται βάσει του εισερχόμενου BOD. Για το λόγο αυτό, η παραγωγή CO₂ κατά την απονιτροποίηση ήδη συμπεριλαμβάνεται στην παραπάνω εξίσωση υπολογισμού της μάζας του παραγόμενου CO₂ από την απομάκρυνση του BOD και την ανάπτυξη της βιομάζας.

3.4.1.3 Παραγωγή CO₂ λόγω Φθοράς Βιομάζας

Η ημερήσια βιομάζα προς φθορά είναι συνάρτηση της αναπτυσσόμενης βιομάζας, του υδραυλικού χρόνου παραμονής και του ρυθμού της ενδογενούς αναπνοής. Η αναπτυσσόμενη βιομάζα (a) ορίζεται ως το γινόμενο του απομακρυνόμενου κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας των λυμάτων BOD επί το συντελεστή μετατροπής βιομάζας (Y), δηλαδή:

$$a = Y * BOD_{removed}$$

όπου

a : ημερήσια αναπτυσσόμενη βιομάζα, [kg/d]

Y : συντελεστής μετατροπής βιομάζας εξαρτώμενος από το είδος των μικροοργανισμών και του μεταβολισμού (κατά παραδοχή ίσος με 0,3, γνωρίζοντας ότι $Y_{αναερόβιο} \approx 0,1$ και $Y_{αερόβιο} \approx 0,6$)

$BOD_{removed}$: ημερήσια απομακρυνόμενο οργανικό φορτίο λόγω επεξεργασίας, [kg/d]

Λαμβάνοντας υπόψη τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT), το ρυθμό ενδογενούς αναπνοής (b_H) και την αναπτυσσόμενη βιομάζα (a), η βιομάζα προς φθορά είναι:

$$A = a * HRT * b_H$$

όπου

A: ημερήσια φθειρόμενη βιομάζα, [kg/d]

a: ημερήσια αναπτυσσόμενη βιομάζα, [kg/d]

HRT: υδραυλικός χρόνος παραμονής, [d]

b_H : ρυθμός ενδογενούς αναπνοής, [d⁻¹]

Ο χημικός τύπος της βιομάζας λαμβάνεται ως $C_5H_7O_2N$ και η φθορά της βιομάζας περιγράφεται από την ακόλουθη χημική αντίδραση:



Από την παραπάνω αντίδραση φθοράς εξάγεται ότι 1 kg $C_5H_7O_2N$ παράγει 1,947 kg CO_2 . Για το λόγο αυτό, η παραγωγή CO_2 λόγω της φθοράς της βιομάζας ισούται με:

$$CO_{2,biomassdecay} = 1,947 * A$$

όπου

A: ημερήσια φθειρόμενη βιομάζα, [kg/d]

$CO_{2,biomassdecay}$: ημερήσια παραγόμενο CO_2 λόγω φθοράς βιομάζας, [kg/d]

Προσθέτοντας, τελικώς, τις συνιστώσες παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα, προκύπτει το ημερήσια παραγόμενο CO_2 ως:

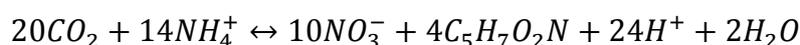
$$CO_{2,produced} = CO_{2,BODoxidation} + CO_{2,biomassdecay}$$

όπου

$CO_{2,produced}$: ημερήσια παραγόμενο CO_2 , [kg/d]

3.4.2 Κατανάλωση CO_2

Η κατανάλωση του CO_2 οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διεργασία της νιτροποίησης. Το νιτροποιούμενο άζωτο, δηλαδή, οδηγεί στην παραγωγή CO_2 , συνεπώς αρκεί η γνώση της μάζας αζώτου που νιτροποιείται και η συσχέτισή της με το καταναλισκόμενο CO_2 μέσω της κατάλληλης στοιχειομετρικής εξίσωσης.



Για τη σύνθεση της βιομάζας η αναλογία της μάζας CO_2 που καταναλώνεται ανά παραγόμενη βιομάζα είναι ($CO_2:N$) 20x44:14x14 ή 4,49:1. Επομένως, για κάθε 1 kg

νιτροποιούμενου N, καταναλώνονται 4,49 kg CO₂. Η κατανάλωση CO₂ μπορεί, λοιπόν, να εκφραστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$CO_{2,consumed} = 4,49 * TN_{nitro}$$

όπου

CO_{2,consumed}: ημερήσια καταναλισκόμενη μάζα CO₂, [kg/d]

TN_{nitro}: ημερήσια νιτροποιούμενη μάζα αζώτου, [kg/d]

Για τον υπολογισμό της απομακρυνόμενης ποσότητας ολικού αζώτου λόγω νιτροποίησης θα ληφθούν υπόψη όλες οι διεργασίες που συντελούν στην απομάκρυνση του ολικού αζώτου καθώς επίσης και το ισοζύγιο μεταξύ εισερχόμενου, εξερχόμενου και απομακρυνόμενου αζώτου. Η παραπάνω συνθήκη μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με το ακόλουθο σύστημα:

$$\begin{cases} TN_{in} - TN_e = TN_{removed} \\ TN_{removed} = TN_{synthesis} + TN_{photosynthesis} + TN_{volatilization} + TN_{nitro} \end{cases}$$

όπου

TN_{in}: ημερήσια εισερχόμενη μάζα αζώτου, [kg/d]

TN_e: ημερήσια εξερχόμενη μάζα αζώτου, [kg/d]

TN_{removed}: ημερήσια απομακρυνόμενη μάζα αζώτου, [kg/d]

TN_{synthesis}: ημερήσια χρησιμοποιούμενη μάζα αζώτου για τη σύνθεση νεοκυτταρικού υλικού κατά την ανάπτυξη βιομάζας, [kg/d]

TN_{photosynthesis}: ημερήσια απομακρυνόμενη μάζα αζώτου κατά τη διεργασία της φωτοσύνθεσης, [kg/d]

TN_{volatilization}: ημερήσια πτητικοποιούμενη μάζα αζώτου, [kg/d]

TN_{nitro}: ημερήσια νιτροποιούμενη μάζα αζώτου, [kg/d]

Το άζωτο που χρησιμοποιείται για τη σύνθεση νεοκυτταρικού υλικού είναι ποσοστό της αναπτυσσόμενης βιομάζας (α), δηλαδή:

$$TN_{synthesis} = \alpha * percentage_{synthesis}$$

όπου

α: ημερήσια αναπτυσσόμενη βιομάζα, [kg/d]

percentage_{synthesis}: ποσοστό της αναπτυσσόμενης βιομάζας που καταναλώνεται για τη σύνθεση νεοκυτταρικού υλικού (≈8%)

Το άζωτο που απομακρύνεται κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης λογίζεται ως ποσοστό του ολικά απομακρυνόμενου αζώτου, ήτοι:

$$TN_{photosynthesis} = TN_{removed} * percentage_{photosynthesis}$$

όπου

$TN_{removed}$: ημερήσια απομακρυνόμενη μάζα αζώτου, [kg/d]

$percentage_{photosynthesis}$: ποσοστό της ημερήσια απομακρυνόμενης μάζας αζώτου που οφείλεται στη φωτοσύνθεση (μικρότερο του 10%, εδώ επιλέγεται τιμή ίση με 5%)

Το άζωτο που απομακρύνεται λόγω πτητικοποίησης λογίζεται ως ποσοστό του ολικά απομακρυνόμενου αζώτου, δηλαδή:

$$TN_{volatilization} = TN_{removed} * percentage_{volatilization}$$

όπου

$TN_{removed}$: ημερήσια απομακρυνόμενη μάζα αζώτου, [kg/d]

$percentage_{volatilization}$: ποσοστό της ημερήσια απομακρυνόμενης μάζας αζώτου που οφείλεται στην πτητικοποίηση ($\approx 2\%$)

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων προκύπτει η ημερήσια νιτροποιούμενη μάζα αζώτου και κατά επέκταση η καταναλισκόμενη μάζα CO_2 ως:

$$CO_{2,consumed} = 4,49 * (TN_{removed} - TN_{synthesis} - TN_{photosynthesis} - TN_{volatilization})$$

3.4.3 Εκπομπή CO_2

Έχοντας υπολογίσει τόσο το παραγόμενο, όσο και το καταναλισκόμενο CO_2 , το εκπεμπόμενο CO_2 προκύπτει από την εκτέλεση του ισοζυγίου:

$$CO_{2,emission} = CO_{2,produced} - CO_{2,consumed}$$

όπου

$CO_{2,emission}$: ημερήσια εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα, [kg/d]

$CO_{2,produced}$: ημερήσια παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα, [kg/d]

$CO_{2,consumed}$: ημερήσια καταναλισκόμενο διοξείδιο του άνθρακα, [kg/d]

3.5 Αναγωγή Αέριων Εκπομπών σε Όρους Ισοδύναμου του Διοξειδίου του Άνθρακα ($CO_{2,eq}$)

3.5.1 Ανθρακικό Αποτύπωμα

Το ανθρακικό αποτύπωμα υπολογίζει το σύνολο των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου οι οποίες προκαλούνται άμεσα ή έμμεσα από ένα άτομο, οργανισμό, εκδήλωση ή προϊόν. Το αποτύπωμα λαμβάνει υπόψη τα έξι αέρια του θερμοκηπίου σύμφωνα με τα άρθρα 4 και 12 της Σύμβασης για την Κλιματική Αλλαγή (Climate Change Convention, CCC): διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μεθάνιο (CH_4), υποξείδιο

του αζώτου (N₂O), υδροφθοράνθρακες (HFC_s), υπερφθοράνθρακες (PFCs) και εξαφθοριούχο θείο (SF₆).

Ένα ανθρακικό αποτύπωμα μετρείται σε τόννους ή κιλά ισοδύναμου του διοξειδίου του άνθρακα (tCO_{2,eq} ή kgCO_{2,eq}). Το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα (CO_{2,eq}) επιτρέπει τα διαφορετικά αέρια του θερμοκηπίου να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους σε μια βάση υπολογισμού η οποία ως μονάδα μέτρησης έχει τη μια μονάδα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Το CO_{2,eq} (ισοδύναμο) υπολογίζεται αν πολλαπλασιάσουμε τις εκπομπές καθενός αερίου του θερμοκηπίου με το Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη εντός περιόδου 100 ετών (ΔΘΠ ή Global Warming Potential, «GWP»). Το δυναμικό θέρμανσης ορίζεται ως το πηλίκο της πλανητικής θέρμανσης που προκαλεί μια μονάδα μάζας του διοξειδίου του άνθρακα προς αυτή που προκαλεί μια μονάδα μάζας του αερίου κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Για παράδειγμα, το μεθάνιο διαθέτει ΔΘΠ ίσο με 34, δηλαδή σε μια χρονική περίοδο 100 ετών το CH₄ παγιδεύει 34 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα μάζας σε σύγκριση με το διοξείδιο του άνθρακα.

Πίνακας 3.6 Το Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη για Αέρια του Θερμοκηπίου (IPCC, 2013)

Αέριο	Χρόνος ζωής	GWP	
		Χρονικός ορίζοντας	
		20 years	100 years
	yr	kg CO _{2,eq} /kg αερίου	kg CO _{2,eq} /kg αερίου
Μεθάνιο	12,4	86	34
Υποξείδιο του αζώτου	121,0	268	298
Υδροφθοράνθρακες	13,4	3790	1550
Χλωροφθοράνθρακες	45,0	7020	5350
Τετραφθοριούχος άνθρακας	50000	4950	7350

3.5.2 Αναγωγή Αερίων Εκπομπών Τεχνητών Υγροβιότοπων

Στους τεχνητούς υγροβιότοπους που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, οι επιτελούμενες βιοχημικές διεργασίες συντελούν στην παραγωγή κυρίως των εξής αερίων: μεθάνιο (CH₄), υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), όπως παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο και υπολογίστηκαν με τη μεθοδολογία των προηγούμενων ενοτήτων. Για τον παρόντα σχεδιασμό, επομένως, η αναγωγή σε όρους ισοδύναμου CO₂ πραγματοποιείται στα παραπάνω τρία αέρια ως εξής:

$$\begin{cases} CH_{4,ανηγμ.εκπ.} = CH_{4,εκπομπές} * \Delta\theta\Pi_{CH_4} = CH_{4,εκπομπές} * 34 \\ N_2O_{ανηγ.εκπ.} = N_2O_{εκπομπές} * \Delta\theta\Pi_{N_2O} = N_2O_{εκπομπές} * 298^{(+)} \\ CO_{2,ανηγ.εκπ.} = CO_{2,εκπομπές} * \Delta\theta\Pi_{CO_2} = CO_{2,εκπομπές} * 1 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\text{Εκπομπές}_{\text{αλληγμένες}} = \text{CH}_{4,\text{αλληγμ.εκπ.}} + \text{N}_2\text{O}_{\text{αλληγ.εκπ.}} + \text{CO}_{2,\text{αλληγ.εκπ.}} \left[\frac{\text{kg CO}_{2,\text{eq}}}{\text{yr}} \right]$$

όπου

$\text{CO}_{2,\text{εκπομπές}}$: ετήσια εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα, [kg/yr]

$\text{CH}_{4,\text{εκπομπές}}$: ετήσια εκπεμπόμενο μεθάνιο, [kg/yr]

$\text{N}_2\text{O}_{\text{εκπομπές}}$: ετήσια εκπεμπόμενο υποξείδιο του αζώτου, [kg/yr]

$\Delta\Theta\text{Π}$: δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, [kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /kg αερίου]

Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

4.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διενεργήθη:

1. διαστασιολόγηση
2. υπολογισμός εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), ήτοι μεθανίου (CH_4) και υποξειδίου του αζώτου (N_2O)
3. υπολογισμός εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2)
4. αναγωγή αερίων εκπομπών σε όρους ισοδύναμου CO_2 και ποσοτικοποίησή τους

σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (HSSF) και ροής ελεύθερης επιφάνειας (FWS) κατά τα μεθοδολογικά πρότυπα που παρουσιάστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο.

Για κάθε τύπο τεχνητού υγροβιότοπου, ο σχεδιασμός έγινε για 6 πληθυσμιακά δεδομένα (100, 200, 500, 1000, 1500 και 2000 ισοδύναμων κατοίκων), για δυο διαφορετικές ποιότητες εκροής (για τη διάθεση των επεξεργασμένων πλέον αστικών υγρών αποβλήτων σε κανονικό αποδέκτη το όριο του ολικού αζώτου εξόδου ορίζεται στα 20 mg/L, ενώ για διάθεση σε ευαίσθητο αποδέκτη το όριο ορίζεται στα 10 mg/L κατά μέσο όρο, ο οποίος προκύπτει από τρεις τιμές εκροής, μια για κάθε τιμή της θερμοκρασίας των λυμάτων, ήτοι 15, 20 και 25 °C, εφόσον γίνεται αναφορά σε χειμερινές και θερινές συνθήκες) και για δυο τύπους εισερχόμενων λυμάτων (αστικά υγρά απόβλητα τα οποία δεν έχουν υποστεί πρωτοβάθμια επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα). Τα υπολογιστικά μοντέλα εφαρμόστηκαν για HSSF και FWS τεχνητούς υγροβιότοπους αντίστοιχα – η εφαρμογή δεν έγινε σε κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής (VSSF) τεχνητούς υγροβιότοπους καθώς οι έως τώρα σχετικές μελέτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η συσχέτιση της ροής των λυμάτων και του κορεσμού του μέσου χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας που καθιστά την κατασκευή μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της μεταβολής των ρύπων και της εκπομπής αερίων αμφιλεγόμενη.

Τα ποιοτικά στοιχεία των εισερχόμενων αστικών υγρών αποβλήτων που δεν έχουν υποστεί πρωτοβάθμια επεξεργασία συνοψίζονται σε:

Πίνακας 4.1 Ποιοτική Σύσταση Εισερχόμενων Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένων Αστικών Υγρών Αποβλήτων

BOD_{in}	60	gr/κατ./d	250,00	mg/L
TN_{in}	12	gr/κατ./d	50,00	mg/L
TSS_{in}	70	gr/κατ./d	291,67	mg/L
TP_{in}	2	gr/κατ./d	8,33	mg/L

Τα ρυπαντικά φορτία των εισερχόμενων αστικών υγρών αποβλήτων (με απομείωση της μάζας των BOD_{in}, TN_{in}, TSS_{in}, TP_{in} κατά 30, 10, 60 και 10% αντίστοιχα, όπως ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο), τα οποία έχουν υποστεί πρωτοβάθμια επεξεργασία, είναι:

Πίνακας 4.2 Ποιοτική Σύσταση Εισερχόμενων Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένων Αστικών Υγρών Αποβλήτων

BOD_{in}	42	gr/κατ./d	175,00	mg/L
TN_{in}	10,8	gr/κατ./d	45,00	mg/L
TSS_{in}	28	gr/κατ./d	116,67	mg/L
TP_{in}	1,8	gr/κατ./d	7,50	mg/L

Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της εκροής από την επεξεργασία των λυμάτων σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (HSSF CWs) και ροής ελεύθερης επιφάνειας (FWS CWs) διακρίνονται και παρουσιάζονται βάσει 4 σεναρίων:

- σενάριο 1: μη πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα προς διάθεση σε κανονικό αποδέκτη μετά από επεξεργασία
- σενάριο 2: μη πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα προς διάθεση σε ευαίσθητο αποδέκτη μετά από επεξεργασία
- σενάριο 3: πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα προς διάθεση σε κανονικό αποδέκτη μετά από επεξεργασία
- σενάριο 4: πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα προς διάθεση σε ευαίσθητο αποδέκτη μετά από επεξεργασία

4.2 Εκροή Τεχνητών Υγροβιότοπων Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής (HSSF CWs)

4.2.1 Σενάριο 1: Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Κανονικό Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία

4.2.1.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.3 Εμβαδόν HSSF CW για 100 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	651	251
A _{O₂}	900	900
A _{TN}	900	222
A	900	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.4 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 100 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	242,40	249,10	249,97	247,15
	kg/d	5,817	5,978	5,999	5,93
BOD _e	mg/L	7,605	0,902	0,029	2,85
	kg/d	0,183	0,022	0,001	0,07
Δ(TN)	mg/L	19,02	30,91	42,79	30,91
	kg/d	0,457	0,742	1,027	0,74
TN _e	mg/L	30,98	19,09	7,21	19,09
	kg/d	0,74	0,46	0,17	0,46

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.5 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 100 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	131,4	131,4	131,4
	kg CO _{2,eq} /yr	4468	4468	4468
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	5,44	5,44	5,44
	kg CO _{2,eq} /yr	1620	1620	1620
CO _{2,εκπ}	kg/yr	3705	3291	2860
	kg CO _{2,eq} /yr	3705	3291	2860
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	9793	9379	8948

4.2.1.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 200 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.6 Εμβαδόν HSSF CW για 200 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	1302	502
A _{O₂}	1800	1800
A _{TN}	1800	445
A	1800	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.7 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 200 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	242,40	249,10	249,97	247,15
	kg/d	11,635	11,957	11,999	11,86
BOD _e	mg/L	7,605	0,902	0,029	2,85
	kg/d	0,365	0,043	0,001	0,14
Δ(TN)	mg/L	19,02	30,91	42,79	30,91
	kg/d	0,913	1,484	2,054	1,48
TN _e	mg/L	30,98	19,09	7,21	19,09
	kg/d	1,49	0,92	0,35	0,92

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.8 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 200 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH₄ _{εκπ}	kg/yr	262,8	262,8	262,8
	kg CO _{2,eq} /yr	8935	8935	8935
N₂O _{εκπ}	kg/yr	10,87	10,87	10,87
	kg CO _{2,eq} /yr	3241	3241	3241
CO₂ _{εκπ}	kg/yr	7409	6583	5719
	kg CO _{2,eq} /yr	7409	6583	5719
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	19585	18759	17895

4.2.1.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.9 Εμβαδόν HSSF CW για 500 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	3254	1255
A_{O₂}	4500	4500
A_{TN}	4500	1112
A	4500	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.10 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 500 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	242,40	249,10	249,97	247,15
	kg/d	29,087	29,892	29,997	29,66
BOD_e	mg/L	7,605	0,902	0,029	2,85
	kg/d	0,913	0,108	0,003	0,34
Δ(TN)	mg/L	19,02	30,91	42,79	30,91
	kg/d	2,283	3,710	5,135	3,71
TN_e	mg/L	30,98	19,09	7,21	19,09
	kg/d	3,72	2,29	0,86	2,29

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.11 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 500 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH₄ _{εκπ}	kg/yr	657,0	657,0	657,0
	kg CO _{2,eq} /yr	22338	22338	22338
N₂O _{εκπ}	kg/yr	27,19	27,19	27,19
	kg CO _{2,eq} /yr	8102	8102	8102
CO₂ _{εκπ}	kg/yr	18523	16457	14299
	kg CO _{2,eq} /yr	18523	16457	14299
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	48963	46897	44738

4.2.1.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.12 Εμβαδόν HSSF CW για 1000 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	6508	2509
A_{O₂}	9000	9000
A_{TN}	9000	2224
A	9000	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.13 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1000 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	242,40	249,10	249,97	247,15
	kg/d	58,175	59,784	59,993	59,32
BOD_e	mg/L	7,605	0,902	0,029	2,85
	kg/d	1,825	0,216	0,007	0,68
Δ(TN)	mg/L	19,02	30,91	42,79	30,91
	kg/d	4,566	7,419	10,270	7,42
TN_e	mg/L	30,98	19,09	7,21	19,09
	kg/d	7,43	4,58	1,73	4,58

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.14 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1000 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH₄ _{εκπ}	kg/yr	1314,0	1314,0	1314,0
	kg CO _{2,eq} /yr	44676	44676	44676
N₂O _{εκπ}	kg/yr	54,37	54,37	54,37
	kg CO _{2,eq} /yr	16204	16204	16204
CO₂ _{εκπ}	kg/yr	37046	32914	28597
	kg CO _{2,eq} /yr	37046	32914	28597
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	97925	93794	89477

4.2.1.5 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.15 Εμβαδόν HSSF CW για 1500 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	9763	3764
A_{O₂}	13500	13500
A_{TN}	13500	3336
A	13500	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.16 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1500 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	242,40	249,10	249,97	247,15
	kg/d	87,262	89,675	89,990	88,98
BOD_e	mg/L	7,605	0,902	0,029	2,85
	kg/d	2,738	0,325	0,010	1,02
Δ(TN)	mg/L	19,02	30,91	42,79	30,91
	kg/d	6,848	11,129	15,405	11,13
TN_e	mg/L	30,98	19,09	7,21	19,09
	kg/d	11,15	6,87	2,59	6,87

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.17 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1500 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	1971,0	1971,0	1971,0
	kg CO _{2,eq} /yr	67014	67014	67014
N₂O_{εκπ}	kg/yr	81,56	81,56	81,56
	kg CO _{2,eq} /yr	24305	24305	24305
CO_{2,εκπ}	kg/yr	55569	49372	42896
	kg CO _{2,eq} /yr	55569	49372	42896
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	146888	140691	134215

4.2.1.6 Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 2000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.18 Εμβαδόν HSSF CW για 2000 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	13017	5018
A_{O₂}	18000	18000
A_{TN}	18000	4448
A	18000	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.19 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 2000 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	242,40	249,10	249,97	247,15
	kg/d	116,350	119,567	119,986	118,63
BOD_e	mg/L	7,605	0,902	0,029	2,85
	kg/d	3,650	0,433	0,014	1,37
Δ(TN)	mg/L	19,02	30,91	42,79	30,91
	kg/d	9,131	14,838	20,541	14,84
TN_e	mg/L	30,98	19,09	7,21	19,09
	kg/d	14,87	9,16	3,46	9,16

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.20 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 2000 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	2628,0	2628,0	2628,0
	kg CO _{2,eq} /yr	89352	89352	89352
N₂O_{εκπ}	kg/yr	108,75	108,75	108,75
	kg CO _{2,eq} /yr	32407	32407	32407
CO_{2,εκπ}	kg/yr	74092	65829	57194
	kg CO _{2,eq} /yr	74092	65829	57194
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	195851	187588	178953

4.2.2 Σενάριο 2: Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Ευαίσθητο Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία

4.2.2.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.21 Εμβαδόν HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	651	251
A_{O₂}	900	900
A_{TN}	1685	417
A	1685	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.22 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	249,64	249,99	250,00	249,88
	kg/d	5,991	6,000	6,000	6,00
BOD_e	mg/L	0,361	0,007	0,000	0,12
	kg/d	0,009	0,000	0,000	0,00
Δ(TN)	mg/L	29,60	41,76	48,67	40,01
	kg/d	0,710	1,002	1,168	0,96
TN_e	mg/L	20,40	8,24	1,33	9,99
	kg/d	0,49	0,20	0,03	0,24

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.23 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	131,4	131,4	131,4
	kg CO _{2,eq} /yr	4468	4468	4468
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	5,44	5,44	5,44
	kg CO _{2,eq} /yr	1620	1620	1620
CO _{2,εκπ}	kg/yr	3843	3400	3147
	kg CO _{2,eq} /yr	3843	3400	3147
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	9931	9488	9235

4.2.2.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 200 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.24 Εμβαδόν HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	1302	502
A _{O₂}	1800	1800
A _{TN}	3370	833
A	3370	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.25 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
$\Delta(\text{BOD})$	mg/L	249,64	249,99	250,00	249,88
	kg/d	11,983	12,000	12,000	11,99
BOD_e	mg/L	0,361	0,007	0,000	0,12
	kg/d	0,017	0,000	0,000	0,01
$\Delta(\text{TN})$	mg/L	29,60	41,76	48,67	40,01
	kg/d	1,421	2,005	2,336	1,92
TN_e	mg/L	20,40	8,24	1,33	9,99
	kg/d	0,98	0,40	0,06	0,48

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO_2 ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.26 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
$\text{CH}_{4,\text{εκπ}}$	kg/yr	262,8	262,8	262,8
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /yr	8935	8935	8935
$\text{N}_2\text{O}_{\text{εκπ}}$	kg/yr	10,87	10,87	10,87
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /yr	3241	3241	3241
$\text{CO}_{2,\text{εκπ}}$	kg/yr	7685	6799	6294
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /yr	7685	6799	6294
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /yr	19861	18975	18470

4.2.2.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.27 Εμβαδόν HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2)

m^2	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	3254	1255
A_{O_2}	4500	4500
A_{TN}	8426	2083
A	8426	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.28 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
$\Delta(\text{BOD})$	mg/L	249,64	249,99	250,00	249,88
	kg/d	29,957	29,999	30,000	29,99
BOD_e	mg/L	0,361	0,007	0,000	0,12
	kg/d	0,043	0,001	0,000	0,01
$\Delta(\text{TN})$	mg/L	29,60	41,76	48,67	40,01
	kg/d	3,552	5,011	5,840	4,80
TN_e	mg/L	20,40	8,24	1,33	9,99
	kg/d	2,45	0,99	0,16	1,20

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO_2 ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.29 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
$\text{CH}_{4,\text{εκπ}}$	kg/yr	657,0	657,0	657,0
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	22338	22338	22338
$\text{N}_2\text{O}_{\text{εκπ}}$	kg/yr	27,19	27,19	27,19
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	8102	8102	8102
$\text{CO}_{2,\text{εκπ}}$	kg/yr	19213	16999	15735
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	19213	16999	15735
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	49653	47438	46175

4.2.2.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.30 Εμβαδόν HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2)

m^2	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	6508	2509
A_{O_2}	9000	9000
A_{TN}	16852	4166
A	16852	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.31 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
$\Delta(\text{BOD})$	mg/L	249,64	249,99	250,00	249,88
	kg/d	59,913	59,998	60,000	59,97
BOD_e	mg/L	0,361	0,007	0,000	0,12
	kg/d	0,087	0,002	0,000	0,03
$\Delta(\text{TN})$	mg/L	29,60	41,76	48,67	40,01
	kg/d	7,104	10,023	11,681	9,60
TN_e	mg/L	20,40	8,24	1,33	9,99
	kg/d	4,90	1,98	0,32	2,40

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO_2 ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.32 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
$\text{CH}_{4,\text{εκπ}}$	kg/yr	1314,0	1314,0	1314,0
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	44676	44676	44676
$\text{N}_2\text{O}_{\text{εκπ}}$	kg/yr	54,37	54,37	54,37
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	16204	16204	16204
$\text{CO}_{2,\text{εκπ}}$	kg/yr	38427	33997	31470
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	38427	33997	31470
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	99306	94877	92350

4.2.2.5 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.33 Εμβαδόν HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2)

m^2	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	9763	3764
A_{O_2}	13500	13500
A_{TN}	25278	6248
A	25278	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.34 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
$\Delta(\text{BOD})$	mg/L	249,64	249,99	250,00	249,88
	kg/d	89,870	89,998	90,000	89,96
BOD_e	mg/L	0,361	0,007	0,000	0,12
	kg/d	0,130	0,002	0,000	0,04
$\Delta(\text{TN})$	mg/L	29,60	41,76	48,67	40,01
	kg/d	10,656	15,034	17,521	14,40
TN_e	mg/L	20,40	8,24	1,33	9,99
	kg/d	7,34	2,97	0,48	3,60

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO_2 ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.35 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
$\text{CH}_{4,\text{εκπ}}$	kg/yr	1971,0	1971,0	1971,0
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	67014	67014	67014
$\text{N}_2\text{O}_{\text{εκπ}}$	kg/yr	81,56	81,56	81,56
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	24305	24305	24305
$\text{CO}_{2,\text{εκπ}}$	kg/yr	57640	50996	47205
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	57640	50996	47205
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	148960	142315	138525

4.2.2.6 Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 2000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.36 Εμβαδόν HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2)

m^2	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	13017	5018
A_{O_2}	18000	18000
A_{TN}	33704	8331
A	33704	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.37 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
$\Delta(\text{BOD})$	mg/L	249,64	249,99	250,00	249,88
	kg/d	119,827	119,997	120,000	119,94
BOD_e	mg/L	0,361	0,007	0,000	0,12
	kg/d	0,173	0,003	0,000	0,06
$\Delta(\text{TN})$	mg/L	29,60	41,76	48,67	40,01
	kg/d	14,208	20,045	23,362	19,20
TN_e	mg/L	20,40	8,24	1,33	9,99
	kg/d	9,79	3,95	0,64	4,80

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO_2 ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.38 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
$\text{CH}_{4,\text{εκπ}}$	kg/yr	2628,0	2628,0	2628,0
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	89352	89352	89352
$\text{N}_2\text{O}_{\text{εκπ}}$	kg/yr	108,75	108,75	108,75
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	32407	32407	32407
$\text{CO}_{2,\text{εκπ}}$	kg/yr	76854	67994	62940
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	76854	67994	62940
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	198613	189753	184700

4.2.3 Σενάριο 3: Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Κανονικό Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία

4.2.3.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.39 Εμβαδόν HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3)

m^2	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	559	215
A_{O_2}	630	630
A_{TN}	739	183
A	739	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.40 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	165,04	173,27	174,90	171,07
	kg/d	3,961	4,158	4,198	4,11
BOD_e	mg/L	9,962	1,732	0,103	3,93
	kg/d	0,239	0,042	0,002	0,09
Δ(TN)	mg/L	14,62	24,58	35,82	25,01
	kg/d	0,351	0,590	0,860	0,60
TN_e	mg/L	30,38	20,42	9,18	19,99
	kg/d	0,73	0,49	0,22	0,48

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.41 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	92,0	92,0	92,0
	kg CO _{2,eq} /yr	3127	3127	3127
N₂O_{εκπ}	kg/yr	4,89	4,89	4,89
	kg CO _{2,eq} /yr	1458	1458	1458
CO_{2,εκπ}	kg/yr	2462	2121	1715
	kg CO _{2,eq} /yr	2462	2121	1715
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	7048	6707	6300

4.2.3.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 200 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.42 Εμβαδόν HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	1118	431
A_{O2}	1260	1260
A_{TN}	1477	365
A	1477	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.43 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	165,04	173,27	174,90	171,07
	kg/d	7,922	8,317	8,395	8,21
BOD_e	mg/L	9,962	1,732	0,103	3,93
	kg/d	0,478	0,083	0,005	0,19
Δ(TN)	mg/L	14,62	24,58	35,82	25,01
	kg/d	0,702	1,180	1,719	1,20
TN_e	mg/L	30,38	20,42	9,18	19,99
	kg/d	1,46	0,98	0,44	0,96

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.44 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	184,0	184,0	184,0
	kg CO _{2,eq} /yr	6255	6255	6255
N₂O_{εκπ}	kg/yr	9,79	9,79	9,79
	kg CO _{2,eq} /yr	2917	2917	2917
CO_{2,εκπ}	kg/yr	4925	4242	3430
	kg CO _{2,eq} /yr	4925	4242	3430
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	14096	13414	12601

4.2.3.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.45 Εμβαδόν HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	2795	1077
A _{O₂}	3150	3150
A _{TN}	3693	913
A	3693	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.46 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	165,04	173,27	174,90	171,07
	kg/d	19,805	20,792	20,988	20,53
BOD _e	mg/L	9,962	1,732	0,103	3,93
	kg/d	1,195	0,208	0,012	0,47
Δ(TN)	mg/L	14,62	24,58	35,82	25,01
	kg/d	1,754	2,950	4,298	3,00
TN _e	mg/L	30,38	20,42	9,18	19,99
	kg/d	3,65	2,45	1,10	2,40

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.47 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	459,9	459,9	459,9
	kg CO _{2,eq} /yr	15637	15637	15637
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	24,47	24,47	24,47
	kg CO _{2,eq} /yr	7292	7292	7292
CO _{2,εκπ}	kg/yr	12311	10606	8574
	kg CO _{2,eq} /yr	12311	10606	8574
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	35240	33534	31502

4.2.3.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.48 Εμβαδόν HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	5589	2155
A _{O₂}	6300	6300
A _{TN}	7385	1826
A	7385	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.49 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	165,04	173,27	174,90	171,07
	kg/d	39,609	41,584	41,975	41,06
BOD _e	mg/L	9,962	1,732	0,103	3,93
	kg/d	2,391	0,416	0,025	0,94
Δ(TN)	mg/L	14,62	24,58	35,82	25,01
	kg/d	3,509	5,900	8,596	6,00
TN _e	mg/L	30,38	20,42	9,18	19,99
	kg/d	7,29	4,90	2,20	4,80

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.50 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	919,8	919,8	919,8
	kg CO _{2,eq} /yr	31273	31273	31273
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	48,94	48,94	48,94
	kg CO _{2,eq} /yr	14583	14583	14583
CO _{2,εκπ}	kg/yr	24623	21212	17148
	kg CO _{2,eq} /yr	24623	21212	17148
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	70479	67069	63005

4.2.3.5 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.51 Εμβαδόν HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	8384	3232
A _{O₂}	9450	9450
A _{TN}	11078	2738
A	11078	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.52 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	165,04	173,27	174,90	171,07
	kg/d	59,414	62,377	62,963	61,58
BOD _e	mg/L	9,962	1,732	0,103	3,93
	kg/d	3,586	0,623	0,037	1,42
Δ(TN)	mg/L	14,62	24,58	35,82	25,01
	kg/d	5,263	8,849	12,894	9,00
TN _e	mg/L	30,38	20,42	9,18	19,99
	kg/d	10,94	7,35	3,31	7,20

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.53 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	1379,7	1379,7	1379,7
	kg CO _{2,eq} /yr	46910	46910	46910
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	73,41	73,41	73,41
	kg CO _{2,eq} /yr	21875	21875	21875
CO _{2,εκπ}	kg/yr	36934	31818	25722
	kg CO _{2,eq} /yr	36934	31818	25722
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	105719	100603	94507

4.2.3.6 Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 2000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.54 Εμβαδόν HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	11179	4310
A _{O₂}	12600	12600
A _{TN}	14770	3651
A	14770	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.55 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	165,04	173,27	174,90	171,07
	kg/d	79,218	83,169	83,950	82,11
BOD _e	mg/L	9,962	1,732	0,103	3,93
	kg/d	4,782	0,831	0,050	1,89
Δ(TN)	mg/L	14,62	24,58	35,82	25,01
	kg/d	7,018	11,799	17,193	12,00
TN _e	mg/L	30,38	20,42	9,18	19,99
	kg/d	14,58	9,80	4,41	9,60

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.56 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	1839,6	1839,6	1839,6
	kg CO _{2,eq} /yr	62546	62546	62546
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	97,87	97,87	97,87
	kg CO _{2,eq} /yr	29167	29167	29167
CO _{2,εκπ}	kg/yr	49246	42424	34296
	kg CO _{2,eq} /yr	49246	42424	34296
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	140958	134137	126009

4.2.4 Σενάριο 4: Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Ευαίσθητο Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία

4.2.4.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων

λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.57 Εμβαδόν HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	559	215
A _{O₂}	630	630
A _{TN}	1546	382
A	1546	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.58 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	174,57	174,99	175,00	174,85
	kg/d	4,190	4,200	4,200	4,20
BOD _e	mg/L	0,434	0,011	0,000	0,15
	kg/d	0,010	0,000	0,000	0,00
Δ(TN)	mg/L	25,23	36,40	43,39	35,00
	kg/d	0,606	0,873	1,041	0,84
TN _e	mg/L	19,77	8,60	1,61	10,00
	kg/d	0,47	0,21	0,04	0,24

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.59 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	92,0	92,0	92,0
	kg CO _{2,eq} /yr	3127	3127	3127
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	4,89	4,89	4,89
	kg CO _{2,eq} /yr	1458	1458	1458
CO _{2,εκπ}	kg/yr	2462	2056	1800
	kg CO _{2,eq} /yr	2462	2056	1800
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	7047	6641	6386

4.2.4.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3),

υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 200 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.60 Εμβαδόν HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	1118	431
A_{O₂}	1260	1260
A_{TN}	3092	764
A	3092	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.61 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	174,57	174,99	175,00	174,85
	kg/d	8,379	8,399	8,400	8,39
BOD_e	mg/L	0,434	0,011	0,000	0,15
	kg/d	0,021	0,001	0,000	0,01
Δ(TN)	mg/L	25,23	36,40	43,39	35,00
	kg/d	1,211	1,747	2,082	1,68
TN_e	mg/L	19,77	8,60	1,61	10,00
	kg/d	0,95	0,41	0,08	0,48

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.62 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	184,0	184,0	184,0
	kg CO _{2,eq} /yr	6255	6255	6255
N₂O_{εκπ}	kg/yr	9,79	9,79	9,79
	kg CO _{2,eq} /yr	2917	2917	2917
CO_{2,εκπ}	kg/yr	4924	4111	3600
	kg CO _{2,eq} /yr	4924	4111	3600
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	14095	13282	12771

4.2.4.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.63 Εμβαδόν HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	2795	1077
A_{O2}	3150	3150
A_{TN}	7731	1911
A	7731	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.64 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	174,57	174,99	175,00	174,85
	kg/d	20,948	20,999	21,000	20,98
BOD_e	mg/L	0,434	0,011	0,000	0,15
	kg/d	0,052	0,001	0,000	0,02
Δ(TN)	mg/L	25,23	36,40	43,39	35,00
	kg/d	3,028	4,367	5,206	4,20
TN_e	mg/L	19,77	8,60	1,61	10,00
	kg/d	2,37	1,03	0,19	1,20

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.65 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	459,9	459,9	459,9
	kg CO _{2,eq} /yr	15637	15637	15637
N₂O_{εκπ}	kg/yr	24,47	24,47	24,47
	kg CO _{2,eq} /yr	7292	7292	7292
CO_{2,εκπ}	kg/yr	12309	10278	8999
	kg CO _{2,eq} /yr	12309	10278	8999
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	35237	33206	31928

4.2.4.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.66 Εμβαδόν HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	5589	2155
A_{O2}	6300	6300
A_{TN}	15461	3822
A	15461	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.67 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	174,57	174,99	175,00	174,85
	kg/d	41,896	41,997	42,000	41,96
BOD_e	mg/L	0,434	0,011	0,000	0,15
	kg/d	0,104	0,003	0,000	0,04
Δ(TN)	mg/L	25,23	36,40	43,39	35,00
	kg/d	6,055	8,735	10,412	8,40
TN_e	mg/L	19,77	8,60	1,61	10,00
	kg/d	4,74	2,07	0,39	2,40

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.68 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	919,8	919,8	919,8
	kg CO _{2,eq} /yr	31273	31273	31273
N₂O_{εκπ}	kg/yr	48,94	48,94	48,94
	kg CO _{2,eq} /yr	14583	14583	14583
CO_{2,εκπ}	kg/yr	24618	20555	17999
	kg CO _{2,eq} /yr	24618	20555	17999
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	70475	66411	63855

4.2.4.5 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.69 Εμβαδόν HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	8384	3232
A_{O2}	9450	9450
A_{TN}	23192	5733
A	23192	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.70 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	174,57	174,99	175,00	174,85
	kg/d	62,844	62,996	63,000	62,95
BOD_e	mg/L	0,434	0,011	0,000	0,15
	kg/d	0,156	0,004	0,000	0,05
Δ(TN)	mg/L	25,23	36,40	43,39	35,00
	kg/d	9,083	13,102	15,619	12,60
TN_e	mg/L	19,77	8,60	1,61	10,00
	kg/d	7,12	3,10	0,58	3,60

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.71 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	1379,7	1379,7	1379,7
	kg CO _{2,eq} /yr	46910	46910	46910
N₂O_{εκπ}	kg/yr	73,41	73,41	73,41
	kg CO _{2,eq} /yr	21875	21875	21875
CO_{2,εκπ}	kg/yr	36928	30833	26998
	kg CO _{2,eq} /yr	36928	30833	26998
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	105712	99617	95783

4.2.4.6 Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του HSSF CW για ισοδύναμο πληθυσμό 2000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.72 Εμβαδόν HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	11179	4310
A_{O2}	12600	12600
A_{TN}	30922	7643
A	30922	

Η μάζα του άνθρακα και του αζώτου που απομακρύνεται καθώς και το οργανικό φορτίο και το ολικό άζωτο εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.73 Ποιότητα Εκροής HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	174,57	174,99	175,00	174,85
	kg/d	83,792	83,995	84,000	83,93
BOD_e	mg/L	0,434	0,011	0,000	0,15
	kg/d	0,208	0,005	0,000	0,07
Δ(TN)	mg/L	25,23	36,40	43,39	35,00
	kg/d	12,110	17,470	20,825	16,80
TN_e	mg/L	19,77	8,60	1,61	10,00
	kg/d	9,49	4,13	0,78	4,80

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.74 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4)

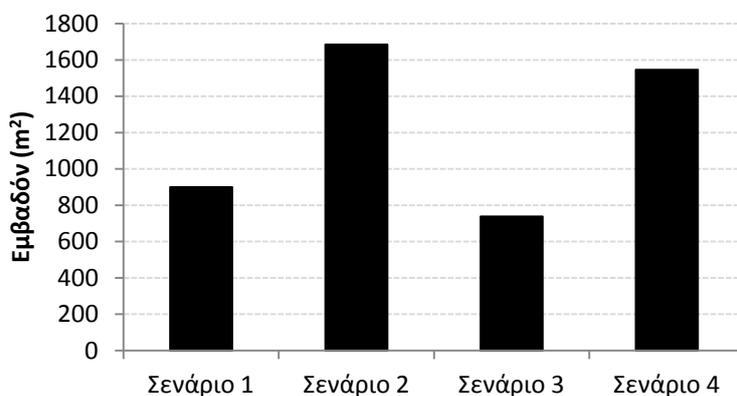
Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	1839,6	1839,6	1839,6
	kg CO _{2,eq} /yr	62546	62546	62546
N₂O_{εκπ}	kg/yr	97,87	97,87	97,87
	kg CO _{2,eq} /yr	29167	29167	29167
CO_{2,εκπ}	kg/yr	49237	41110	35997
	kg CO _{2,eq} /yr	49237	41110	35997
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	140950	132823	127710

4.2.5 Συναξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Για το πρώτο σενάριο, δηλαδή για τα μη πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα τα οποία διατίθενται σε κανονικό αποδέκτη μετά από επεξεργασία στον HSSF τεχνητό υδροβιότοπο, το κριτήριο ικανότητας μεταφοράς του οξυγόνου εντός του υδροβιότοπου ισοδυναμεί με το κριτήριο απομάκρυνσης του ολικού αζώτου (TN) σε ό,τι αφορά στην εξαγωγή του απαιτούμενου εμβαδού (A) του υδροβιότοπου για την επεξεργασία των λυμάτων, με όριο εκροής για το ολικό άζωτο τα 20 mg/L και συγκέντρωση εισόδου τα 50 mg/L, δηλαδή για απομείωση της τάξης του 60%. Για τα υπόλοιπα σενάρια, το κριτήριο απομάκρυνσης του ολικού αζώτου είναι το σαφώς δυσμενέστερο και, επομένως, αυτό που καθορίζει το τελικά επιλεγθέν εμβαδόν του HSSF CW, με τις μεγαλύτερες τιμές επιφάνειας να εξάγονται για τις περιπτώσεις με τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ της συγκέντρωσης εισόδου και εξόδου του ολικού αζώτου, δηλαδή για το σενάριο 2 κατά το οποίο η απομάκρυνση του TN αγγίζει το 80% (απομείωση από τα 50 στα 10 mg/L).

Πίνακας 4.75 Απαιτούμενη Επιφάνεια και Μέση Απομάκρυνση Οργανικών και Ολικού Αζώτου από HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

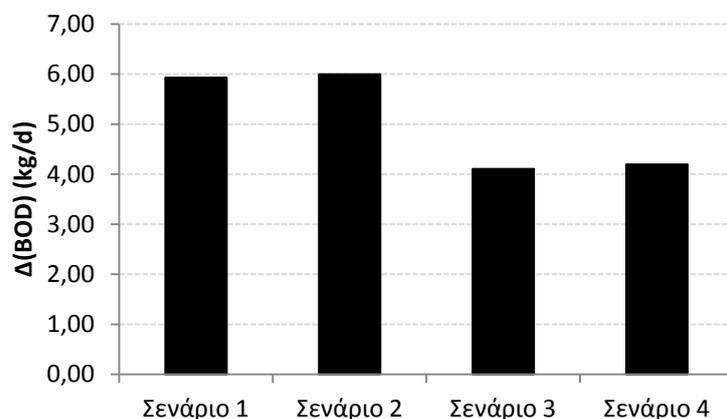
Ι.Π.=100	A	$\Delta(\text{BOD})_{\text{av}}$	$\Delta(\text{TN})_{\text{av}}$
	m ²	kg/d	kg/d
Σενάριο 1	900	5,93	0,74
Σενάριο 2	1685	6,00	0,96
Σενάριο 3	739	4,11	0,60
Σενάριο 4	1546	4,20	0,84



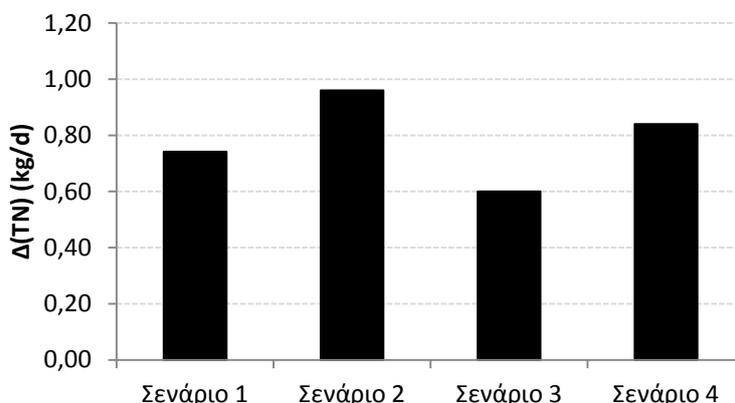
Σχήμα 4.1 Απαιτούμενη Επιφάνεια HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

Το όριο των 20 mg/L για τον οργανικό άνθρακα εξόδου σε όρους BOD₅ ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση από τη στιγμή που η επιφάνεια που προσφέρεται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων προκύπτει από το δυσμενέστερο κριτήριο απομάκρυνσης ολικού αζώτου και άρα υπερβαίνει το απαιτούμενο βάσει του κριτηρίου απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου εμβαδόν. Στις περιπτώσεις, μάλιστα, μεγάλων τιμών επιφάνειας (όπως στο σενάριο 2), η απομάκρυνση του

οργανικού φορτίου φαίνεται να ξεπερνά το 98% και να αγγίζει τα όρια της πλήρους απομάκρυνσης, ωστόσο, είναι γνωστό από συναφείς μελέτες σε υπαρκτά συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων ότι η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου κυμαίνεται σε ποσοστά από 80 έως 97%, με τις μεγαλύτερες τιμές να υφίστανται για περισσότερο ιδανικές συνθήκες, ήτοι συχνή συγκομιδή φυτικής και υπολειπόμενης βιομάζας και λογικές τιμές εισερχόμενης οργανικής και υδραυλικής φόρτισης.

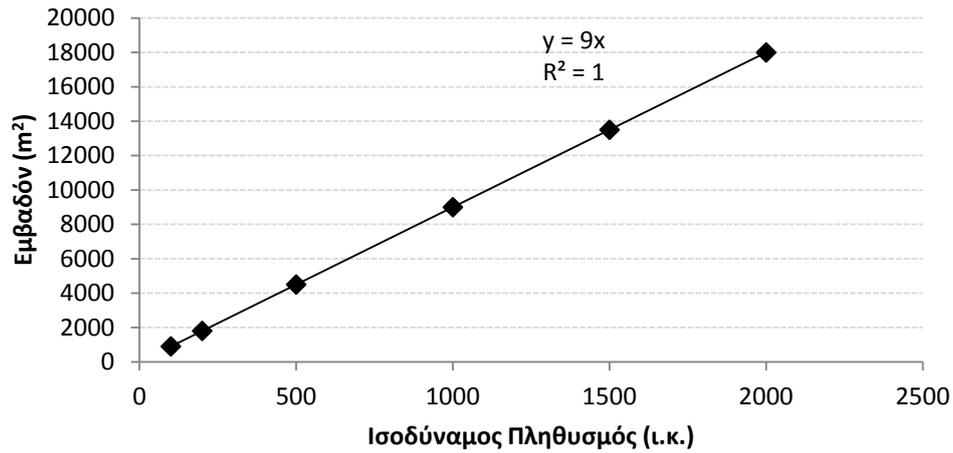


Σχήμα 4.2 Μέση Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου σε HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.



Σχήμα 4.3 Μέση Απομάκρυνση Φορτίου Ολικού Αζώτου σε HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

Ο γραμμικός χαρακτήρας των σχέσεων που απαρτίζουν τον πυρήνα του μαθηματικού μοντέλου αναπαράστασης της μεταβολής του οργανικού φορτίου και της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου (με τη θεώρηση κινητικών πρώτης τάξης για τη μεταβολή των συγκεντρώσεων με τους αντίστοιχους θερμοκρασιακά εξαρτώμενους συντελεστές τους) συντελούν στην εξαγωγή αποτελεσμάτων ευθέως αναλόγων των πληθυσμιακών δεδομένων και επακόλουθα της παροχής σχεδιασμού. Η εν λόγω γραμμικότητα αποτυπώνεται, για παράδειγμα, στη συσχέτιση μεταξύ του δεδομένου πληθυσμού και της απαιτούμενης επιφάνειας του υδροβιότοπου για το σενάριο 1:

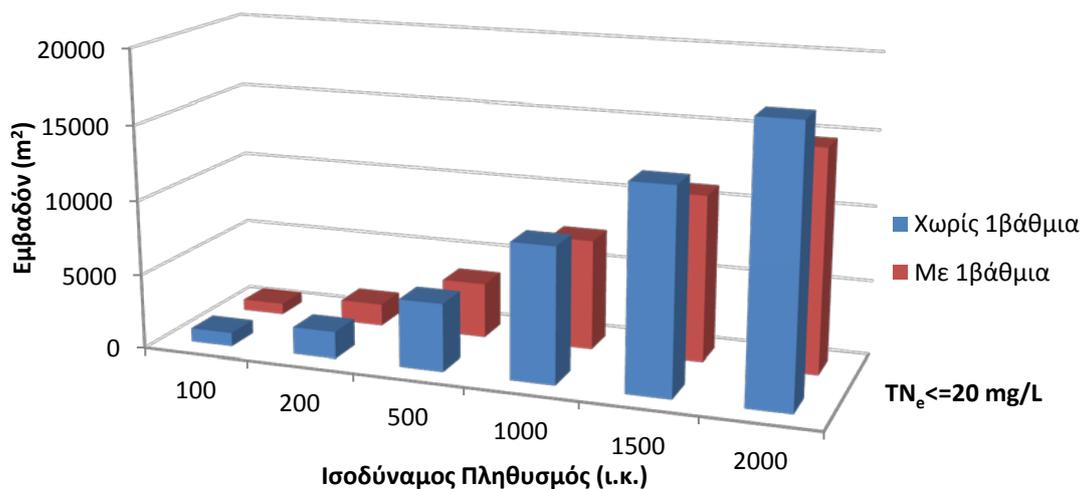


Σχήμα 4.4 Απαιτούμενη Επιφάνεια HSSF CW ανά δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό για το σενάριο 1

Οι απαιτούμενες επιφάνειες, με τη σταθερή μεταξύ τους απόκλιση για τα σενάρια διάθεσης σε κανονικό ή ευαίσθητο αποδέκτη, για κάθε ισοδύναμο πληθυσμό και μελετούμενο σενάριο είναι:

Πίνακας 4.76 Απαιτούμενες Επιφάνειες HSSF CW ανά Πληθυσμό και Σενάριο

Εμβαδόν ΤΥ (m ²)	Συγκέντρωση (mg/L)	Ισοδύναμος Πληθυσμός (ι.κ.)					
		100	200	500	1000	1500	2000
Χωρίς 1βάθμια	B _e =20, N _e =20	900	1800	4500	9000	13500	18000
	B _e =20, N _e =10	1685	3370	8426	16852	25278	33704
Με 1βάθμια	B _e =20, N _e =20	739	1477	3693	7385	11078	14770
	B _e =20, N _e =10	1546	3092	7731	15461	23192	30922
Απόκλιση για με ή χωρίς 1β	B _e =20, N _e =20	17,9%	17,9%	17,9%	17,9%	17,9%	17,9%
	B _e =20, N _e =10	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%

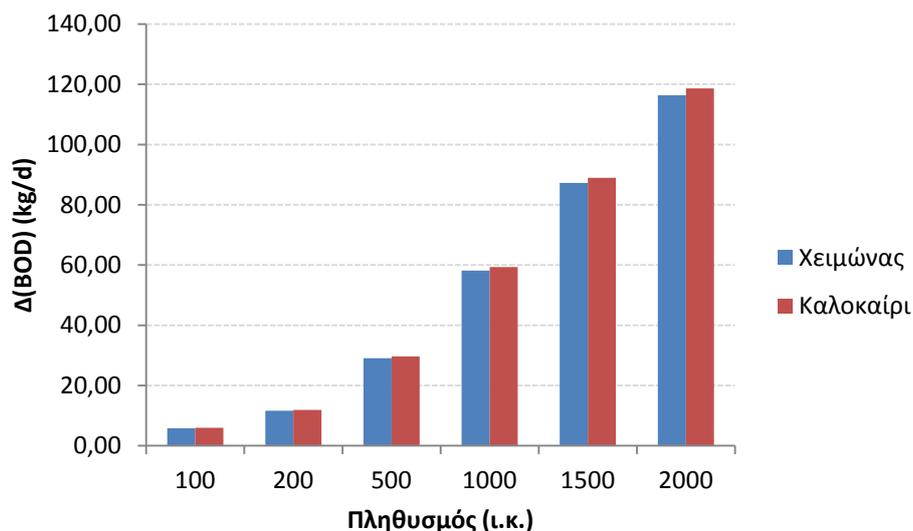


Σχήμα 4.5 Απαιτούμενη Επιφάνεια HSSF CW ανά δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό για διάθεση σε κανονικό αποδέκτη

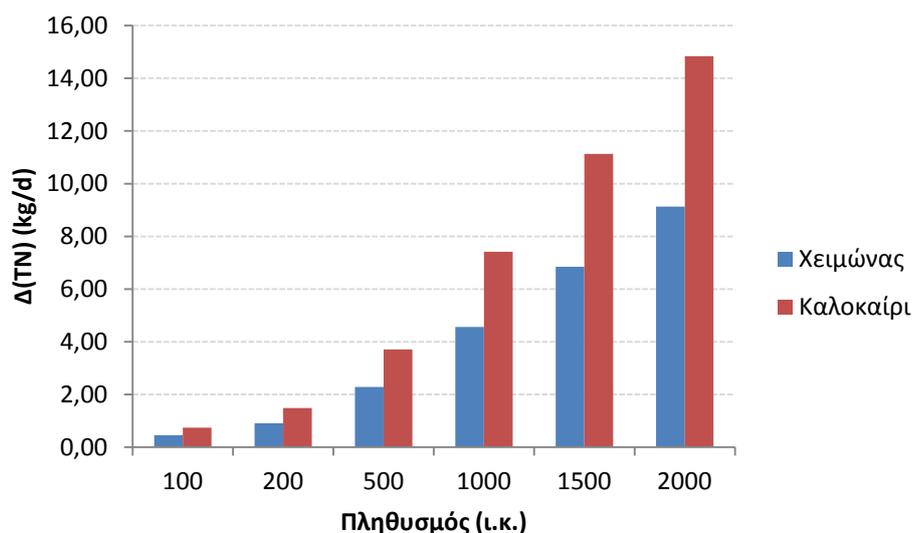
Το ίδιο γραμμικό μοτίβο αποτυπώνεται και για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και του ολικού αζώτου. Επιπλέον, όμως, μπορεί να γίνει αντιληπτή η υπεροχή των μηχανισμών απομάκρυνσης κατά τους θερμότερους μήνες του έτους και κυρίως όσον αφορά το ολικό άζωτο, καθώς το οργανικό φορτίο αγγίζει τα όρια της πλήρους απομάκρυνσης ήδη από το χειμώνα. Η υπεροχή αυτή οφείλεται, φυσικά, στη θερμοκρασιακή εξάρτηση του ρυθμού απομάκρυνσης των εν λόγω φορτίων και στη μεγαλύτερη τιμή που αυτός λαμβάνει για μεγαλύτερες θερμοκρασίες ($k_{BOD}^T=0,093$ και $0,242 \text{ d}^{-1}$ & $k_N^T=0,053$ και $0,215 \text{ d}^{-1}$ για θερμοκρασία λυμάτων 15 και 25 °C αντίστοιχα).

Πίνακας 4.77 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου και Ολικού Αζώτου σε HSSF CW για το σενάριο 1

Ι.Π.	ι.κ	100	200	500	1000	1500	2000
Περίοδος		Χειμώνας ($T_{\lambda\omega\mu}=15 \text{ }^\circ\text{C}$)					
$\Delta(\text{BOD})$	kg/d	5,82	11,63	29,09	58,17	87,26	116,35
$\Delta(\text{TN})$		0,46	0,91	2,28	4,57	6,85	9,13
Περίοδος		Καλοκαίρι ($T_{\lambda\omega\mu}=25 \text{ }^\circ\text{C}$)					
$\Delta(\text{BOD})$	kg/d	5,93	11,86	29,66	59,32	88,98	118,63
$\Delta(\text{TN})$		0,74	1,48	3,71	7,42	11,13	14,84



Σχήμα 4.6 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου ανά Ισοδύναμο Πληθυσμό σε Χειμερινές και Θερινές Συνθήκες σε HSSF CW για το σενάριο 1



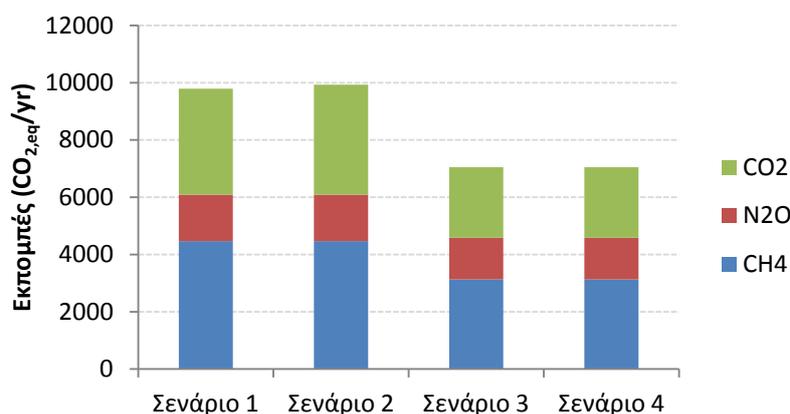
Σχήμα 4.7 Απομάκρυνση Φορτίου Ολικού Αζώτου ανά Ισοδύναμο Πληθυσμό σε Χειμερινές και Θερινές Συνθήκες σε HSSF CW για το σενάριο 1

Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (CH_4 , N_2O) σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία (ενότητα 3.3) προκύπτουν βάσει των φορτίων των εισερχόμενων υγρών αποβλήτων (φορτίο οργανικών και ολικού αζώτου), ενώ οι εκπομπές του CO_2 (ενότητα 3.4) λαμβάνουν υπόψη και τις απομακρυνόμενες μάζες BOD και TN. Οι τιμές των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, συνεπώς, παρουσιάζουν διαφορά μόνο με βάση το αν τα εισερχόμενα λύματα έχουν υποστεί νωρίτερα πρωτοβάθμια επεξεργασία ή όχι, με το CH_4 να υπολείπεται κατά 30% και το N_2O κατά 10% μετά την επεξεργασία πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων σε

αντιπαραβολή με τις εκπομπές από την επεξεργασία των πρωτοβάθμια ανεπεξεργαστων λυμάτων. Οι εκπομπές CO₂ αυξάνονται κατά 3,7% καθώς το όριο εκροής του TN γίνεται αυστηρότερο για την περίπτωση των πρωτοβάθμια ανεπεξεργαστων υγρών αποβλήτων, ενώ για τα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα οι διαφορές στις εκπομπές αναλόγως του κριτηρίου εκροής είναι μηδαμινές (της τάξης του 0,02%). Ενδεικτικά αν εξεταστούν οι εκπομπές για ένα δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό, ισχύει:

Πίνακας 4.78 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

I.Π.=100	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO _{2eq}
	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr
Σενάριο 1	4468	1620	3705	9793
Σενάριο 2	4468	1620	3843	9931
Σενάριο 3	3127	1458	2462	7048
Σενάριο 4	3127	1458	2462	7047

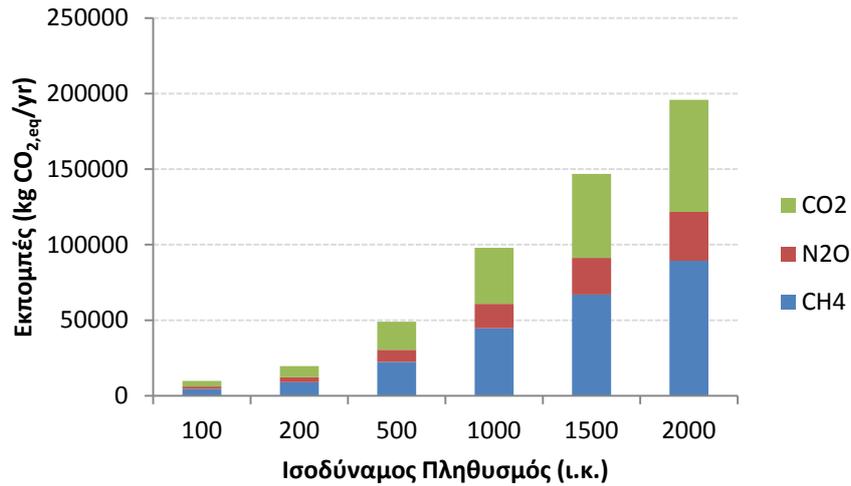


Σχήμα 4.8 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

Αναλυτικά αν εξεταστούν οι αέριες εκπομπές ανά ισοδύναμο πληθυσμό και σενάριο, ισχύει:

Πίνακας 4.79 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 1)

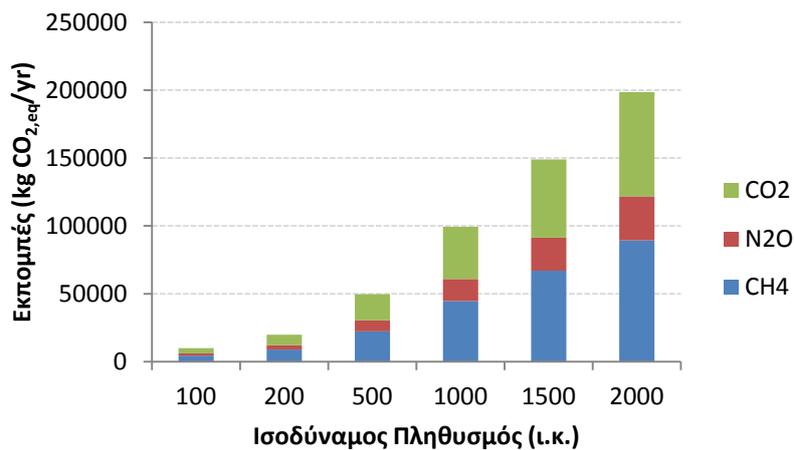
I.Π.	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO _{2eq}	CH ₄ / sumCO _{2eq}	N ₂ O / sumCO _{2eq}	CO ₂ / sumCO _{2eq}
ι.κ	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	%	%	%
100	4468	1620	3705	9793	45,6%	16,5%	37,8%
200	8935	3241	7409	19585	45,6%	16,5%	37,8%
500	22338	8102	18523	48963	45,6%	16,5%	37,8%
1000	44676	16204	37046	97925	45,6%	16,5%	37,8%
1500	67014	24305	55569	146888	45,6%	16,5%	37,8%
2000	89352	32407	74092	195851	45,6%	16,5%	37,8%



Σχήμα 4.9 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 1)

Πίνακας 4.80 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 2)

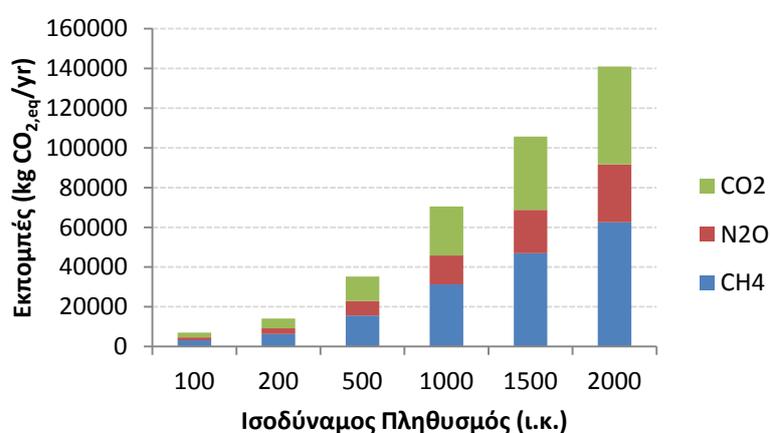
Ι.Π.	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO _{2eq}	CH ₄ / sumCO _{2eq}	N ₂ O / sumCO _{2eq}	CO ₂ / sumCO _{2eq}
ι.κ	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	%	%	%
100	4468	1620	3843	9931	45,0%	16,3%	38,7%
200	8935	3241	7685	19861	45,0%	16,3%	38,7%
500	22338	8102	19213	49653	45,0%	16,3%	38,7%
1000	44676	16204	38427	99306	45,0%	16,3%	38,7%
1500	67014	24305	57640	148960	45,0%	16,3%	38,7%
2000	89352	32407	76854	198613	45,0%	16,3%	38,7%



Σχήμα 4.10 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 2)

Πίνακας 4.81 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 3)

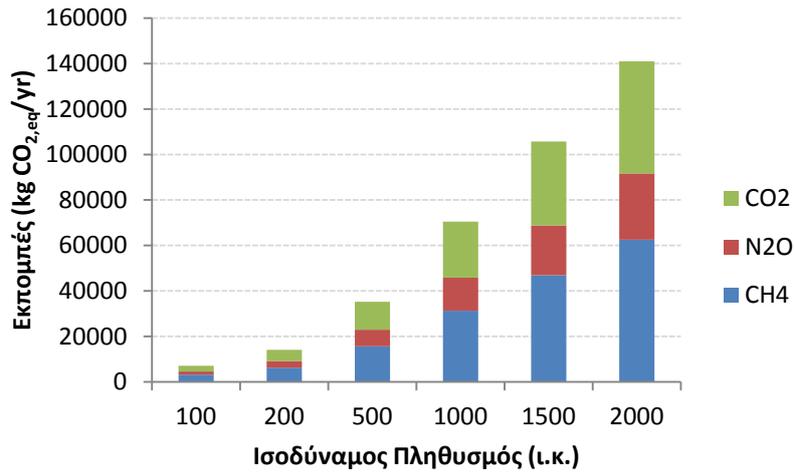
Ι.Π.	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO _{2eq}	CH ₄ / sumCO _{2eq}	N ₂ O / sumCO _{2eq}	CO ₂ / sumCO _{2eq}
ι.κ	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	%	%	%
100	3127	1458	2462	7048	44,4%	20,7%	34,9%
200	6255	2917	4925	14096	44,4%	20,7%	34,9%
500	15637	7292	12311	35240	44,4%	20,7%	34,9%
1000	31273	14583	24623	70479	44,4%	20,7%	34,9%
1500	46910	21875	36934	105719	44,4%	20,7%	34,9%
2000	62546	29167	49246	140958	44,4%	20,7%	34,9%



Σχήμα 4.11 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 3)

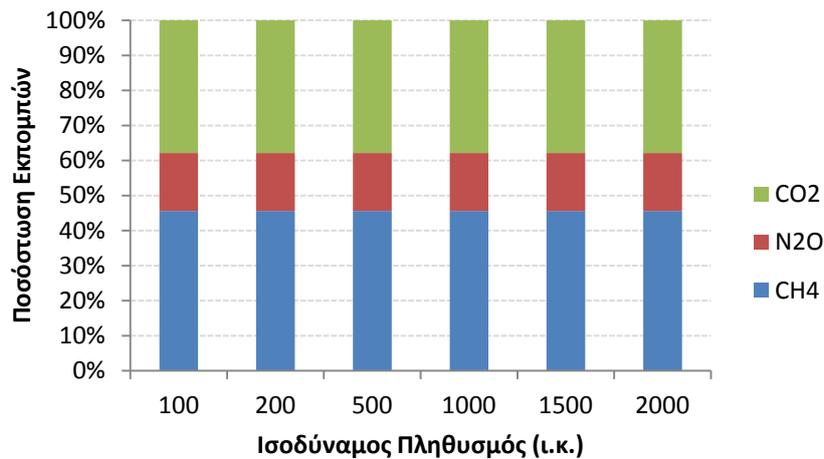
Πίνακας 4.82 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 4)

Ι.Π.	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO _{2eq}	CH ₄ / sumCO _{2eq}	N ₂ O / sumCO _{2eq}	CO ₂ / sumCO _{2eq}
ι.κ	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	%	%	%
100	3127	1458	2462	7047	44,4%	20,7%	34,9%
200	6255	2917	4924	14095	44,4%	20,7%	34,9%
500	15637	7292	12309	35237	44,4%	20,7%	34,9%
1000	31273	14583	24618	70475	44,4%	20,7%	34,9%
1500	46910	21875	36928	105712	44,4%	20,7%	34,9%
2000	62546	29167	49237	140950	44,4%	20,7%	34,9%

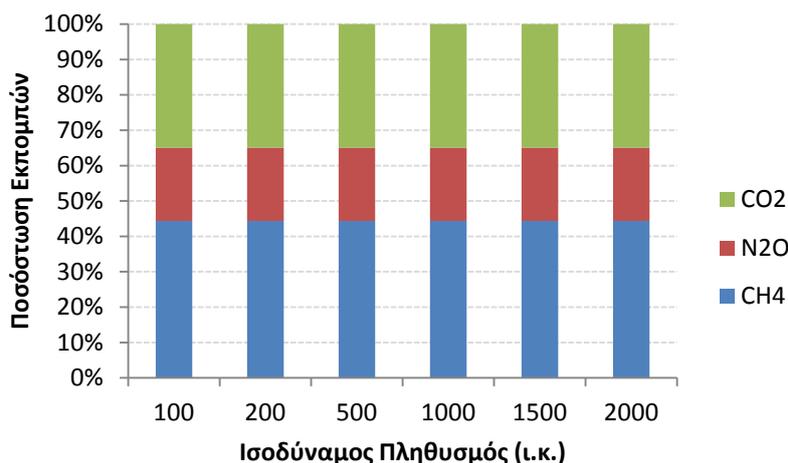


Σχήμα 4.12 Αέριες Εκπομπές από HSSF CW (σενάριο 4)

Γίνεται, επομένως, εμφανής αφενός η αναλογική σχέση των εκπομπών με τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό και αφετέρου η σχετικά όμοια ποσοστιαία κατανομή των επιμέρους αερίων στις συνολικές εκπομπές μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων.



Σχήμα 4.13 Ποσοστιαία Κατανομή Αέριων Εκπομπών HSSF CW (σενάριο 1)



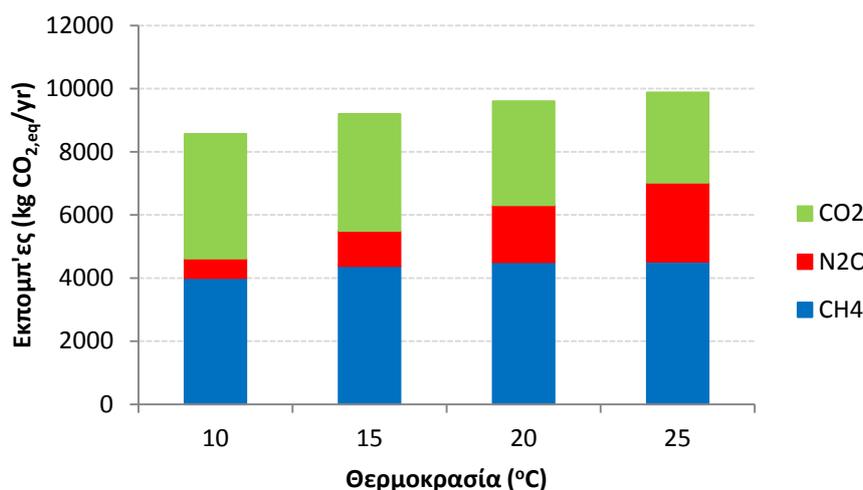
Σχήμα 4.14 Ποσοστιαία Κατανομή Αέριων Εκπομπών HSSF CW (σενάριο 3)

Τις εκπομπές από τα πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστα λύματα, δηλαδή, συνιστούν σε ποσοστό 45% το μεθάνιο, 17% το υποξείδιο του αζώτου και 38% το διοξείδιο του άνθρακα, ενώ η σύνθεση των εκπομπών από την επεξεργασία των πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων είναι 44% μεθάνιο, 21% υποξείδιο του αζώτου και 35% διοξείδιο του άνθρακα. Φαίνεται, επομένως, ότι η απομείωση του φορτίου του BOD κατά 30% και του TN κατά 10% στα εισερχόμενα απόβλητα κατά την προγενέστερη πρωτοβάθμια επεξεργασία συντελεί έμμεσα στην αύξηση της εκπομπής N₂O κατά 4% σε σχέση με τις εκπομπές των πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστων λυμάτων, αφού άμεσα περιορίζεται η παραγωγή του μεθανίου (που στηρίζεται στα λιγότερα εισερχόμενα οργανικά σε αυτή την περίπτωση) και η παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα (διότι τόσο η οξείδωση του οργανικού φορτίου, όσο και η φθορά της βιομάζας, που προκύπτει από την αναπτυσσόμενη βιομάζα που συναρτάται με την απομακρυνόμενη βιομάζα, έχουν μικρότερη τιμή). Γενικότερα, οι HSSF τεχνητοί υγροβιότοποι, ως προς το ανθρακικό τους αποτύπωμα, συνεισφέρουν περισσότερο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μέσω των εκπομπών CH₄, στοιχείο που επιβεβαιώνεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία (Mander, et al., 2014).

Εμπλουτίζοντας τη μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (CH₄, N₂O), είναι δυνατό να τροποποιήσουμε τους συντελεστές εκπομπής «EF» ώστε να πολλαπλασιάζονται με την απομακρυνόμενη μάζα BOD ή TN για την εξαγωγή της τιμής εκπομπής CH₄ και N₂O αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, δεδομένου ότι η μεταβολή του οργανικού φορτίου και του ολικού αζώτου είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενη, μπορεί να υπολογιστεί η απομακρυνόμενη μάζα των φορτίων για διάφορες θερμοκρασίες. Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης, επιλέχτηκαν τέσσερις πιθανές τιμές θερμοκρασίας λυμάτων (10, 15, 20 και 25 °C) για τις οποίες υπολογίστηκαν οι τιμές εκπομπής των αερίων CH₄, N₂O και CO₂, με το CO₂ βέβαια να μην απαιτεί χρήση συντελεστή εκπομπής «EF» καθώς στη μεθοδολογία υπολογισμού του λαμβάνει ήδη υπόψη τα απομακρυνόμενα φορτία BOD και TN, για το σενάριο 1 και ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων.

Πίνακας 4.83 Αέριες Εκπομπές για Πιθανά Θερμοκρασιακά Δεδομένα Λυμάτων από HSSF CW για 100 ι.κ.

T °C	CH _{4,εκπ}		N ₂ O _{εκπ}		CO _{2,εκπ}		sum	
	kg CO _{2,eq} /yr	%	kg CO _{2,eq} /yr	%	kg CO _{2,eq} /yr	%	kg CO _{2,eq} /yr	%
10	4003	46,7%	619	7,2%	3945	46,0%	8568	100%
15	4382	47,6%	1113	12,1%	3705	40,3%	9200	
20	4504	46,9%	1808	18,8%	3291	34,3%	9603	
25	4519	45,7%	2503	25,3%	2860	28,9%	9882	



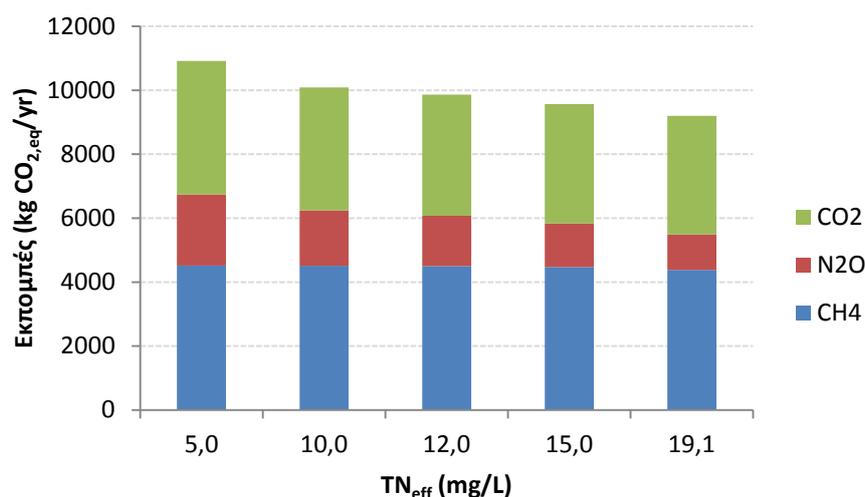
Σχήμα 4.15 Αέριες Εκπομπές για Πιθανά Θερμοκρασιακά Δεδομένα Λυμάτων από HSSF CW για 100 ι.κ.

Παρατηρείται ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας των λυμάτων, το ποσοστό συμμετοχής των εκπομπών N₂O στις συνολικές εκπομπές αυξάνεται σημαντικά, από 7,2% στους 10 °C σε 25,3% στους 25 °C, το ποσοστό συμμετοχής των εκπομπών CH₄ παραμένει σχετικά σταθερό, άνω του 45% και έως 47,6%, ενώ η συμμετοχή των εκπομπών CO₂ περιορίζεται από 46% σε 28,9%. Εναλλακτικά, για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 15 °C, οι συνολικές εκπομπές αυξάνονται κατά 15% (από 8568 σε 9882 kg CO_{2,eq}/yr), με την εκπομπή N₂O να τετραπλασιάζεται (από τα 609 στα 2503 kg CO_{2,eq}/yr), την εκπομπή CH₄ να αυξάνεται κατά 11% (από τα 4003 στα 4519 kg CO_{2,eq}/yr) και την εκπομπή CO₂ να ελαττώνεται κατά 38% (από τα 3945 στα 2860 kg CO_{2,eq}/yr). Η μεταβολή του ποσοστού συμμετοχής των εκπομπών N₂O στις συνολικές εκπομπές αιτιολογείται από το γεγονός ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, λόγω του υψηλότερου ρυθμού απομάκρυνσης αζώτου (αφού, όπως έχει προαναφερθεί, είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενος), μεγαλύτερη μάζα αζώτου είναι διαθέσιμη προς τις διεργασίες παραγωγής N₂O, και κυρίως της νιτροποίησης. Στις εκπομπές CO₂, αντίθετα, η ενίσχυση της παραμέτρου της νιτροποίησης συνεπάγεται την αύξηση του καταναλισκόμενου διοξειδίου του άνθρακα για τις ανάγκες της σύνθεσης νέας βιομάζας.

Σε αντίστοιχη κατεύθυνση διερεύνησης, γίνεται να εξεταστεί και η επίδραση της τιμής του ολικού αζώτου εκροής στις αέριες εκπομπές. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια εκείνα που δεν αναιρείται ο προϋπάρχων σχεδιασμός του τεχνητού υγροβιότοπου (εξαγωγή απαιτούμενης επιφάνειας βάσει του δυσμενέστερου κριτηρίου, δηλαδή του κριτηρίου εκροής TN), ήτοι για τιμές του ολικού αζώτου εκροής ίσες με 5, 10, 12, 15 και 19,1 mg/L, με τις δυο από αυτές (10 και 19,1 mg/L) να έχουν ήδη διερευνηθεί.

Πίνακας 4.84 Αέριες Εκπομπές για Διάφορες Τιμές Εκροής του Ολικού Αζώτου από HSSF CW για 100 ι.κ. στους 15 °C

TN _{eff} mg/L	CH ₄		N ₂ O		CO ₂		sum CO _{2eq} kg CO _{2eq} /yr
	kg CO _{2eq} /yr	%	kg CO _{2eq} /yr	%	kg CO _{2eq} /yr	%	
5,0	4520	41,4%	2223	20,4%	4175	38,2%	10917
10,0	4513	44,7%	1731	17,2%	3843	38,1%	10087
12,0	4503	45,7%	1570	15,9%	3789	38,4%	9863
15,0	4472	46,7%	1359	14,2%	3741	39,1%	9572
19,1	4382	47,6%	1113	12,1%	3705	40,3%	9200



Σχήμα 4.16 Αέριες Εκπομπές για Διάφορες Τιμές Εκροής του Ολικού Αζώτου από HSSF CW για 100 ι.κ. στους 15 °C

Παρατηρείται ότι καθώς το όριο εξόδου για το ολικό άζωτο αυστηροποιείται, οι αέριες εκπομπές αυξάνονται – η διαφορά ανάμεσα στις ολικές εκπομπές για άζωτο εξόδου στα 19,1 mg/L (9200 kg CO_{2,eq}/yr) και τα 5,0 mg/L (10917 kg CO_{2,eq}/yr) είναι της τάξεως του 19%. Η εξέλιξη αυτή είναι αναμενόμενη, αν ληφθεί υπόψη ότι στην περίπτωση του αυστηρότερου ορίου εκροής η μέγιστη δυνατή ποσότητα οργανικού φορτίου και TN θα πρέπει να απομακρυνθεί βάσει σχεδιασμού και επακόλουθα και οι εκπομπές CH₄, N₂O και CO₂ θα είναι οι μεγαλύτερες δυνατές. Οι εκπομπές του υποξειδίου του αζώτου διπλασιάζονται και αυξάνουν το ποσοστό συμμετοχής τους

στις συνολικές εκπομπές καθώς το όριο εκροής του ολικού αζώτου μειώνεται, με το ποσοστό τους να ανεβαίνει από το 12,1 στο 20,4% για εκροή στα 5 mg/L και η τιμή του εκπεμπόμενου N₂O αυξάνεται από τα 1113 στα 2223 kg CO_{2,eq}/yr. Οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζουν αύξηση 11% (από τα 3705 στα 4175 kg CO_{2,eq}/yr), και οι εκπομπές CH₄ αυξάνονται κατά 3% (από τα 4382 στα 4520 kg CO_{2,eq}/yr). Η αύξηση της συμμετοχής του N₂O μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι το μόνο φορτίο το οποίο παρουσιάζει αξιόλογο υπόλοιπο μετά την επεξεργασία των λυμάτων για συνήθεις τιμές TN_{eff} είναι το ολικό άζωτο, και επομένως είναι το μόνο το οποίο μπορεί να παρουσιάσει σημαντικότερο βαθμό απομάκρυνσης καθώς TN_{eff} βαίνει μειούμενο – το περισσότερο απομακρυνόμενο TN με τη σειρά του προσφέρει μεγαλύτερη μάζα αζώτου στις διεργασίες της παραγωγής N₂O και, έτσι, οι εκπομπές N₂O αυξάνουν τη συμμετοχή τους. Οι εκπομπές CH₄ μειώνουν τη συμμετοχή τους στις ολικές εκπομπές βαδίζοντας προς υποδεέστερο TN_{eff} καθώς ο ρυθμός αύξησης της απόλυτης τιμής της εκπομπής CH₄ υπολείπεται του ρυθμού αύξησης της τιμής εκπομπής N₂O, διότι βρισκόμαστε ήδη από την περίπτωση του TN_{eff}=19,1 mg/L κοντά στην πλήρη εξάντληση του οργανικού φορτίου.

4.3 Εκροή Τεχνητών Υγροβιότοπων Ροής Ελεύθερης Επιφάνειας (FWS CWs)

4.3.1 Σενάριο 1: Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Κανονικό Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία

4.3.1.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.85 Εμβαδόν FWS CW για 100 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	385	149
A _{TN}	385	163
A _{TSS}	130	
A	385	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.86 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 100 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
$\Delta(\text{BOD})$	mg/L	230,00	243,62	248,99	240,87
	kg/d	5,520	5,847	5,976	5,78
BOD_e	mg/L	20,000	6,379	1,013	9,13
	kg/d	0,480	0,153	0,024	0,22
$\Delta(\text{TN})$	mg/L	22,64	30,07	0,90	17,87
	kg/d	0,54	0,722	0,901	0,72
TN_e	mg/L	27,36	19,93	12,44	19,91
	kg/d	0,66	0,48	0,30	0,48
$\Delta(\text{TSS})$	mg/L	257,85			
	kg/d	6,19			
TSS_e	mg/L	33,82			
	kg/d	0,81			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO_2 ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.87 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 100 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
$\text{CH}_{4,\text{εκπ}}$	kg/yr	525,6	525,6	525,6
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	17870	17870	17870
$\text{N}_2\text{O}_{\text{εκπ}}$	kg/yr	8,95	8,95	8,95
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	2666	2666	2666
$\text{CO}_{2,\text{εκπ}}$	kg/yr	3986	3750	3490
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	3986	3750	3490
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	24523	24287	24027

4.3.1.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 200 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.88 Εμβαδόν FWS CW για 200 ι.κ.

m^2	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	771	297
A_{TN}	771	325
A_{TSS}	260	
A	771	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.89 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 200 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	230,00	243,62	248,99	240,87
	kg/d	11,040	11,694	11,951	11,56
BOD_e	mg/L	20,000	6,379	1,013	9,13
	kg/d	0,960	0,306	0,049	0,44
Δ(TN)	mg/L	22,64	30,07	1,80	18,17
	kg/d	1,09	1,444	1,803	1,44
TN_e	mg/L	27,36	19,93	12,44	19,91
	kg/d	1,31	0,96	0,60	0,96
Δ(TSS)	mg/L	257,85			
	kg/d	12,38			
TSS_e	mg/L	33,82			
	kg/d	1,62			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.90 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 200 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	1051,2	1051,2	1051,2
	kg CO _{2,eq} /yr	35741	35741	35741
N₂O_{εκπ}	kg/yr	17,90	17,90	17,90
	kg CO _{2,eq} /yr	5333	5333	5333
CO_{2,εκπ}	kg/yr	7973	7500	6980
	kg CO _{2,eq} /yr	7973	7500	6980
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	49046	48573	48053

4.3.1.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.91 Εμβαδόν FWS CW για 500 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	1927	743
A _{TN}	1927	813
A _{TSS}	651	
A	1927	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.92 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 500 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	230,00	243,62	248,99	240,87
	kg/d	27,600	29,235	29,878	28,90
BOD _e	mg/L	20,000	6,379	1,013	9,13
	kg/d	2,400	0,765	0,122	1,10
Δ(TN)	mg/L	22,64	30,07	4,51	19,07
	kg/d	2,72	3,609	4,507	3,61
TN _e	mg/L	27,36	19,93	12,44	19,91
	kg/d	3,28	2,39	1,49	2,39
Δ(TSS)	mg/L	257,85			
	kg/d	30,94			
TSS _e	mg/L	33,82			
	kg/d	4,06			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.93 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 500 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	2628,0	2628,0	2628,0
	kg CO _{2,eq} /yr	89352	89352	89352
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	44,74	44,74	44,74
	kg CO _{2,eq} /yr	13332	13332	13332
CO _{2,εκπ}	kg/yr	19932	18749	17449
	kg CO _{2,eq} /yr	19932	18749	17449
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	122616	121433	120133

4.3.1.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων

λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.94 Εμβαδόν FWS CW για 1000 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	3853	1486
A _{TN}	3853	1626
A _{TSS}	1301	
A	3853	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.95 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1000 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ (BOD)	mg/L	230,00	243,62	248,99	240,87
	kg/d	55,200	58,469	59,757	57,81
BOD _e	mg/L	20,000	6,379	1,013	9,13
	kg/d	4,800	1,531	0,243	2,19
Δ (TN)	mg/L	22,64	30,07	9,01	20,58
	kg/d	5,43	7,218	9,014	7,22
TN _e	mg/L	27,36	19,93	12,44	19,91
	kg/d	6,57	4,78	2,99	4,78
Δ (TSS)	mg/L	257,85			
	kg/d	61,88			
TSS _e	mg/L	33,82			
	kg/d	8,12			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.96 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1000 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	5256,0	5256,0	5256,0
	kg CO _{2,eq} /yr	178704	178704	178704
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	89,48	89,48	89,48
	kg CO _{2,eq} /yr	26664	26664	26664
CO _{2,εκπ}	kg/yr	39863	37498	34898
	kg CO _{2,eq} /yr	39863	37498	34898
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	245232	242866	240267

4.3.1.5 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.97 Εμβαδόν FWS CW για 1500 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	5780	2229
A_{TN}	5780	2440
A_{TSS}	1952	
A	5780	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.98 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1500 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	230,00	243,62	248,99	240,87
	kg/d	82,800	87,704	89,635	86,71
BOD_e	mg/L	20,000	6,379	1,013	9,13
	kg/d	7,200	2,296	0,365	3,29
Δ(TN)	mg/L	22,64	30,07	13,52	22,08
	kg/d	8,15	10,826	13,521	10,83
TN_e	mg/L	27,36	19,93	12,44	19,91
	kg/d	9,85	7,17	4,48	7,17
Δ(TSS)	mg/L	257,85			
	kg/d	92,82			
TSS_e	mg/L	33,82			
	kg/d	12,18			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.99 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1500 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH₄ _{εκπ}	kg/yr	7884,0	7884,0	7884,0
	kg CO _{2,eq} /yr	268056	268056	268056
N₂O _{εκπ}	kg/yr	134,22	134,22	134,22
	kg CO _{2,eq} /yr	39996	39996	39996
CO₂ _{εκπ}	kg/yr	59795	56247	52348
	kg CO _{2,eq} /yr	59795	56247	52348
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	367847	364299	360400

4.3.1.6 Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 2000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.100 Εμβαδόν FWS CW για 2000 ι.κ.

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	7707	2971
A_{TN}	7707	3253
A_{TSS}	2602	
A	7707	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.101 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 2000 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	230,00	243,62	248,99	240,87
	kg/d	110,400	116,938	119,514	115,62
BOD_e	mg/L	20,000	6,379	1,013	9,13
	kg/d	9,600	3,062	0,486	4,38
Δ(TN)	mg/L	22,64	30,07	18,03	23,58
	kg/d	10,87	14,435	18,028	14,44
TN_e	mg/L	27,36	19,93	12,44	19,91
	kg/d	13,13	9,56	5,97	9,56
Δ(TSS)	mg/L	257,85			
	kg/d	123,77			
TSS_e	mg/L	33,82			
	kg/d	16,23			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.102 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 2000 ι.κ.

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	10512,0	10512,0	10512,0
	kg CO _{2,eq} /yr	357408	357408	357408
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	178,95	178,95	178,95
	kg CO _{2,eq} /yr	53328	53328	53328
CO _{2,εκπ}	kg/yr	79727	74995	69797
	kg CO _{2,eq} /yr	79727	74995	69797
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	490463	485732	480533

4.3.2 Σενάριο 2: Μη Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Ευαίσθητο Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία

4.3.2.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.103 Εμβαδόν FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	385	149
A _{TN}	728	307
A _{TSS}	130	
A	728	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.104 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
$\Delta(\text{BOD})$	mg/L	246,21	249,56	249,99	248,58
	kg/d	5,909	5,989	6,000	5,97
BOD_e	mg/L	3,794	0,439	0,014	1,42
	kg/d	0,091	0,011	0,000	0,03
$\Delta(\text{TN})$	mg/L	33,71	40,70	1,09	25,17
	kg/d	0,81	0,977	1,094	0,96
TN_e	mg/L	16,29	9,30	4,42	10,00
	kg/d	0,39	0,22	0,11	0,24
$\Delta(\text{TSS})$	mg/L	258,13			
	kg/d	6,20			
TSS_e	mg/L	33,54			
	kg/d	0,80			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO_2 ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.105 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
$\text{CH}_{4,\text{εκπ}}$	kg/yr	525,6	525,6	525,6
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	17870	17870	17870
$\text{N}_2\text{O}_{\text{εκπ}}$	kg/yr	8,95	8,95	8,95
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	2666	2666	2666
$\text{CO}_{2,\text{εκπ}}$	kg/yr	3983	3741	3564
	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	3983	3741	3564
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{yr}$	24520	24277	24100

4.3.2.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 200 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.106 Εμβαδόν FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2)

m^2	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	771	297
A_{TN}	1455	615
A_{TSS}	260	
A	1455	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.107 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	246,21	249,56	249,99	248,58
	kg/d	11,818	11,979	11,999	11,93
BOD_e	mg/L	3,794	0,439	0,014	1,42
	kg/d	0,182	0,021	0,001	0,07
Δ(TN)	mg/L	33,71	40,70	2,19	25,53
	kg/d	1,62	1,954	2,188	1,92
TN_e	mg/L	16,29	9,30	4,42	10,00
	kg/d	0,78	0,45	0,21	0,48
Δ(TSS)	mg/L	258,13			
	kg/d	12,39			
TSS_e	mg/L	33,54			
	kg/d	1,61			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.108 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	1051,2	1051,2	1051,2
	kg CO _{2,eq} /yr	35741	35741	35741
N₂O_{εκπ}	kg/yr	17,90	17,90	17,90
	kg CO _{2,eq} /yr	5333	5333	5333
CO_{2,εκπ}	kg/yr	7965	7481	7127
	kg CO _{2,eq} /yr	7965	7481	7127
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	49039	48555	48201

4.3.2.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.109 Εμβαδόν FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	1927	743
A _{TN}	3638	1537
A _{TSS}	651	
A	3638	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.110 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	246,21	249,56	249,99	248,58
	kg/d	29,545	29,947	29,998	29,83
BOD _e	mg/L	3,794	0,439	0,014	1,42
	kg/d	0,455	0,053	0,002	0,17
Δ(TN)	mg/L	33,71	40,70	5,47	26,63
	kg/d	4,05	4,884	5,470	4,80
TN _e	mg/L	16,29	9,30	4,42	10,00
	kg/d	1,95	1,12	0,53	1,20
Δ(TSS)	mg/L	258,13			
	kg/d	30,98			
TSS _e	mg/L	33,54			
	kg/d	4,02			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.111 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	2628,0	2628,0	2628,0
	kg CO _{2,eq} /yr	89352	89352	89352
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	44,74	44,74	44,74
	kg CO _{2,eq} /yr	13332	13332	13332
CO _{2,εκπ}	kg/yr	19914	18703	17818
	kg CO _{2,eq} /yr	19914	18703	17818
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	122598	121387	120502

4.3.2.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων

λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.112 Εμβαδόν FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	3853	1486
A _{TN}	7276	3073
A _{TSS}	1301	
A	7276	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.113 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ (BOD)	mg/L	246,21	249,56	249,99	248,58
	kg/d	59,090	59,895	59,997	59,66
BOD _e	mg/L	3,794	0,439	0,014	1,42
	kg/d	0,910	0,105	0,003	0,34
Δ (TN)	mg/L	33,71	40,70	10,94	28,45
	kg/d	8,09	9,768	10,940	9,60
TN _e	mg/L	16,29	9,30	4,42	10,00
	kg/d	3,91	2,23	1,06	2,40
Δ (TSS)	mg/L	258,13			
	kg/d	61,95			
TSS _e	mg/L	33,54			
	kg/d	8,05			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.114 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	5256,0	5256,0	5256,0
	kg CO _{2,eq} /yr	178704	178704	178704
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	89,48	89,48	89,48
	kg CO _{2,eq} /yr	26664	26664	26664
CO _{2,εκπ}	kg/yr	39827	37407	35637
	kg CO _{2,eq} /yr	39827	37407	35637
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	245195	242775	241005

4.3.2.5 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.115 Εμβαδόν FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	5780	2229
A _{TN}	10914	4610
A _{TSS}	1952	
A	10914	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.116 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	246,21	249,56	249,99	248,58
	kg/d	88,634	89,842	89,995	89,49
BOD _e	mg/L	3,794	0,439	0,014	1,42
	kg/d	1,366	0,158	0,005	0,51
Δ(TN)	mg/L	33,71	40,70	16,41	30,27
	kg/d	12,14	14,652	16,410	14,40
TN _e	mg/L	16,29	9,30	4,42	10,00
	kg/d	5,86	3,35	1,59	3,60
Δ(TSS)	mg/L	258,13			
	kg/d	92,93			
TSS _e	mg/L	33,54			
	kg/d	12,07			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.117 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH₄ _{εκπ}	kg/yr	7884,0	7884,0	7884,0
	kg CO _{2,eq} /yr	268056	268056	268056
N₂O _{εκπ}	kg/yr	134,22	134,22	134,22
	kg CO _{2,eq} /yr	39996	39996	39996
CO₂ _{εκπ}	kg/yr	59741	56110	53455
	kg CO _{2,eq} /yr	59741	56110	53455
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	367793	364162	361507

4.3.2.6 Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 2000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.118 Εμβαδόν FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	7707	2971
A_{TN}	14552	6147
A_{TSS}	2602	
A	14552	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.119 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	246,21	249,56	249,99	248,58
	kg/d	118,179	119,790	119,993	119,32
BOD_e	mg/L	3,794	0,439	0,014	1,42
	kg/d	1,821	0,210	0,007	0,68
Δ(TN)	mg/L	33,71	40,70	21,88	32,10
	kg/d	16,18	19,535	21,881	19,20
TN_e	mg/L	16,29	9,30	4,42	10,00
	kg/d	7,82	4,46	2,12	4,80
Δ(TSS)	mg/L	258,13			
	kg/d	123,90			
TSS_e	mg/L	33,54			
	kg/d	16,10			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.120 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 2)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	10512,0	10512,0	10512,0
	kg CO _{2,eq} /yr	357408	357408	357408
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	178,95	178,95	178,95
	kg CO _{2,eq} /yr	53328	53328	53328
CO _{2,εκπ}	kg/yr	79655	74813	71273
	kg CO _{2,eq} /yr	79655	74813	71273
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	490391	485550	482010

4.3.3 Σενάριο 3: Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Κανονικό Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία

4.3.3.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υδροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.121 Εμβαδόν FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	312	120
A _{TN}	338	143
A _{TSS}	130	
A	338	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.122 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	157,35	168,51	173,71	166,52
	kg/d	3,776	4,044	4,169	4,00
BOD_e	mg/L	17,652	6,486	1,293	8,48
	kg/d	0,424	0,156	0,031	0,20
Δ(TN)	mg/L	18,43	24,87	0,76	14,69
	kg/d	0,44	0,597	0,761	0,60
TN_e	mg/L	26,57	20,13	13,30	20,00
	kg/d	0,64	0,48	0,32	0,48
Δ(TSS)	mg/L	103,10			
	kg/d	2,47			
TSS_e	mg/L	13,56			
	kg/d	0,33			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.123 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	367,9	367,9	367,9
	kg CO _{2,eq} /yr	12509	12509	12509
N₂O_{εκπ}	kg/yr	8,05	8,05	8,05
	kg CO _{2,eq} /yr	2400	2400	2400
CO_{2,εκπ}	kg/yr	3116	2908	2670
	kg CO _{2,eq} /yr	3116	2908	2670
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	18025	17817	17579

4.3.3.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 200 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.124 Εμβαδόν FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	624	241
A_{TN}	675	285
A_{TSS}	260	
A	675	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.125 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	157,35	168,51	173,71	166,52
	kg/d	7,553	8,089	8,338	7,99
BOD_e	mg/L	17,652	6,486	1,293	8,48
	kg/d	0,847	0,311	0,062	0,41
Δ(TN)	mg/L	18,43	24,87	1,52	14,94
	kg/d	0,88	1,194	1,522	1,20
TN_e	mg/L	26,57	20,13	13,30	20,00
	kg/d	1,28	0,97	0,64	0,96
Δ(TSS)	mg/L	103,10			
	kg/d	4,95			
TSS_e	mg/L	13,56			
	kg/d	0,65			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.126 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	735,8	735,8	735,8
	kg CO _{2,eq} /yr	25019	25019	25019
N₂O_{εκπ}	kg/yr	16,11	16,11	16,11
	kg CO _{2,eq} /yr	4800	4800	4800
CO_{2,εκπ}	kg/yr	6233	5815	5340
	kg CO _{2,eq} /yr	6233	5815	5340
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	36051	35633	35158

4.3.3.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.127 Εμβαδόν FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	1560	601
A _{TN}	1688	713
A _{TSS}	651	
A	1688	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.128 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	157,35	168,51	173,71	166,52
	kg/d	18,882	20,222	20,845	19,98
BOD _e	mg/L	17,652	6,486	1,293	8,48
	kg/d	2,118	0,778	0,155	1,02
Δ(TN)	mg/L	18,43	24,87	3,80	15,70
	kg/d	2,21	2,984	3,804	3,00
TN _e	mg/L	26,57	20,13	13,30	20,00
	kg/d	3,19	2,42	1,60	2,40
Δ(TSS)	mg/L	103,10			
	kg/d	12,37			
TSS _e	mg/L	13,56			
	kg/d	1,63			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.129 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	1839,6	1839,6	1839,6
	kg CO _{2,eq} /yr	62546	62546	62546
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	40,26	40,26	40,26
	kg CO _{2,eq} /yr	11999	11999	11999
CO _{2,εκπ}	kg/yr	15582	14538	13350
	kg CO _{2,eq} /yr	15582	14538	13350
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	90127	89083	87895

4.3.3.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων

λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.130 Εμβαδόν FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	3119	1203
A _{TN}	3376	1426
A _{TSS}	1301	
A	3376	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.131 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ (BOD)	mg/L	157,35	168,51	173,71	166,52
	kg/d	37,763	40,443	41,690	39,97
BOD _e	mg/L	17,652	6,486	1,293	8,48
	kg/d	4,237	1,557	0,310	2,03
Δ (TN)	mg/L	18,43	24,87	7,61	16,97
	kg/d	4,42	5,968	7,608	6,00
TN _e	mg/L	26,57	20,13	13,30	20,00
	kg/d	6,38	4,83	3,19	4,80
Δ (TSS)	mg/L	103,10			
	kg/d	24,74			
TSS _e	mg/L	13,56			
	kg/d	3,26			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.132 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	3679,2	3679,2	3679,2
	kg CO _{2,eq} /yr	125093	125093	125093
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	80,53	80,53	80,53
	kg CO _{2,eq} /yr	23998	23998	23998
CO _{2,εκπ}	kg/yr	31164	29075	26700
	kg CO _{2,eq} /yr	31164	29075	26700
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	180255	178166	175791

4.3.3.5 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.133 Εμβαδόν FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	4679	1804
A_{TN}	5064	2139
A_{TSS}	1952	
A	5064	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.134 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	157,35	168,51	173,71	166,52
	kg/d	56,645	60,665	62,534	59,95
BOD_e	mg/L	17,652	6,486	1,293	8,48
	kg/d	6,355	2,335	0,466	3,05
Δ(TN)	mg/L	18,43	24,87	11,41	18,24
	kg/d	6,63	8,953	11,412	9,00
TN_e	mg/L	26,57	20,13	13,30	20,00
	kg/d	9,57	7,25	4,79	7,20
Δ(TSS)	mg/L	103,10			
	kg/d	37,12			
TSS_e	mg/L	13,56			
	kg/d	4,88			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.135 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH₄ _{εκπ}	kg/yr	5518,8	5518,8	5518,8
	kg CO _{2,eq} /yr	187639	187639	187639
N₂O _{εκπ}	kg/yr	120,79	120,79	120,79
	kg CO _{2,eq} /yr	35997	35997	35997
CO₂ _{εκπ}	kg/yr	46746	43613	40050
	kg CO _{2,eq} /yr	46746	43613	40050
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	270382	267249	263686

4.3.3.6 Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 2000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.136 Εμβαδόν FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	6238	2405
A_{TN}	6753	2852
A_{TSS}	2602	
A	6753	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.137 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	157,35	168,51	173,71	166,52
	kg/d	75,527	80,887	83,379	79,93
BOD_e	mg/L	17,652	6,486	1,293	8,48
	kg/d	8,473	3,113	0,621	4,07
Δ(TN)	mg/L	18,43	24,87	15,22	19,50
	kg/d	8,85	11,937	15,216	12,00
TN_e	mg/L	26,57	20,13	13,30	20,00
	kg/d	12,75	9,66	6,38	9,60
Δ(TSS)	mg/L	103,10			
	kg/d	49,49			
TSS_e	mg/L	13,56			
	kg/d	6,51			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.138 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 3)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	7358,4	7358,4	7358,4
	kg CO _{2,eq} /yr	250186	250186	250186
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	161,06	161,06	161,06
	kg CO _{2,eq} /yr	47996	47996	47996
CO _{2,εκπ}	kg/yr	62328	58150	53400
	kg CO _{2,eq} /yr	62328	58150	53400
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	360510	356331	351582

4.3.4 Σενάριο 4: Πρωτοβάθμια Επεξεργασμένα Αστικά Υγρά Απόβλητα προς Διάθεση σε Ευαίσθητο Αποδέκτη μετά από Επεξεργασία

4.3.4.1 Ισοδύναμος Πληθυσμός 100 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υδροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.139 Εμβαδόν FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	312	120
A _{TN}	677	286
A _{TSS}	130	
A	677	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.140 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	171,61	174,55	174,98	173,71
	kg/d	4,119	4,189	4,200	4,17
BOD_e	mg/L	3,390	0,455	0,018	1,29
	kg/d	0,081	0,011	0,000	0,03
Δ(TN)	mg/L	29,10	35,56	0,97	21,88
	kg/d	0,70	0,853	0,968	0,84
TN_e	mg/L	15,90	9,44	4,68	10,00
	kg/d	0,38	0,23	0,11	0,24
Δ(TSS)	mg/L	103,24			
	kg/d	2,48			
TSS_e	mg/L	13,43			
	kg/d	0,32			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.141 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 100 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	367,9	367,9	367,9
	kg CO _{2,eq} /yr	12509	12509	12509
N₂O_{εκπ}	kg/yr	8,05	8,05	8,05
	kg CO _{2,eq} /yr	2400	2400	2400
CO_{2,εκπ}	kg/yr	3009	2784	2611
	kg CO _{2,eq} /yr	3009	2784	2611
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	17918	17693	17520

4.3.4.2 Ισοδύναμος Πληθυσμός 200 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 200 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.142 Εμβαδόν FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	624	241
A_{TN}	1355	572
A_{TSS}	260	
A	1355	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.143 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	171,61	174,55	174,98	173,71
	kg/d	8,237	8,378	8,399	8,34
BOD_e	mg/L	3,390	0,455	0,018	1,29
	kg/d	0,163	0,022	0,001	0,06
Δ(TN)	mg/L	29,10	35,56	1,94	22,20
	kg/d	1,40	1,707	1,936	1,68
TN_e	mg/L	15,90	9,44	4,68	10,00
	kg/d	0,76	0,45	0,22	0,48
Δ(TSS)	mg/L	103,24			
	kg/d	4,96			
TSS_e	mg/L	13,43			
	kg/d	0,64			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.144 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 200 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH_{4,εκπ}	kg/yr	735,8	735,8	735,8
	kg CO _{2,eq} /yr	25019	25019	25019
N₂O_{εκπ}	kg/yr	16,11	16,11	16,11
	kg CO _{2,eq} /yr	4800	4800	4800
CO_{2,εκπ}	kg/yr	6017	5567	5222
	kg CO _{2,eq} /yr	6017	5567	5222
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	35835	35385	35040

4.3.4.3 Ισοδύναμος Πληθυσμός 500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 500 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.145 Εμβαδόν FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	1560	601
A _{TN}	3387	1431
A _{TSS}	651	
A	3387	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.146 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	171,61	174,55	174,98	173,71
	kg/d	20,593	20,945	20,998	20,85
BOD _e	mg/L	3,390	0,455	0,018	1,29
	kg/d	0,407	0,055	0,002	0,15
Δ(TN)	mg/L	29,10	35,56	4,84	23,17
	kg/d	3,49	4,267	4,839	4,20
TN _e	mg/L	15,90	9,44	4,68	10,00
	kg/d	1,91	1,13	0,56	1,20
Δ(TSS)	mg/L	103,24			
	kg/d	12,39			
TSS _e	mg/L	13,43			
	kg/d	1,61			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.147 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 500 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	1839,6	1839,6	1839,6
	kg CO _{2,eq} /yr	62546	62546	62546
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	40,26	40,26	40,26
	kg CO _{2,eq} /yr	11999	11999	11999
CO _{2,εκπ}	kg/yr	15043	13918	13055
	kg CO _{2,eq} /yr	15043	13918	13055
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	89589	88463	87600

4.3.4.4 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων

λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.148 Εμβαδόν FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A _{BOD}	3119	1203
A _{TN}	6773	2861
A _{TSS}	1301	
A	6773	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.149 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ (BOD)	mg/L	171,61	174,55	174,98	173,71
	kg/d	41,186	41,891	41,996	41,69
BOD _e	mg/L	3,390	0,455	0,018	1,29
	kg/d	0,814	0,109	0,004	0,31
Δ (TN)	mg/L	29,10	35,56	9,68	24,78
	kg/d	6,98	8,535	9,678	8,40
TN _e	mg/L	15,90	9,44	4,68	10,00
	kg/d	3,82	2,27	1,12	2,40
Δ (TSS)	mg/L	103,24			
	kg/d	24,78			
TSS _e	mg/L	13,43			
	kg/d	3,22			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.150 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1000 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	3679,2	3679,2	3679,2
	kg CO _{2,eq} /yr	125093	125093	125093
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	80,53	80,53	80,53
	kg CO _{2,eq} /yr	23998	23998	23998
CO _{2,εκπ}	kg/yr	30087	27836	26110
	kg CO _{2,eq} /yr	30087	27836	26110
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	179177	176926	175201

4.3.4.5 Ισοδύναμος Πληθυσμός 1500 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 1000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.151 Εμβαδόν FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	4679	1804
A_{TN}	10160	4292
A_{TSS}	1952	
A	10160	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.152 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	171,61	174,55	174,98	173,71
	kg/d	61,780	62,836	62,994	62,54
BOD_e	mg/L	3,390	0,455	0,018	1,29
	kg/d	1,220	0,164	0,006	0,46
Δ(TN)	mg/L	29,10	35,56	14,52	26,39
	kg/d	10,48	12,802	14,517	12,60
TN_e	mg/L	15,90	9,44	4,68	10,00
	kg/d	5,72	3,40	1,68	3,60
Δ(TSS)	mg/L	103,24			
	kg/d	37,17			
TSS_e	mg/L	13,43			
	kg/d	4,83			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.153 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 1500 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH₄ _{εκπ}	kg/yr	5518,8	5518,8	5518,8
	kg CO _{2,eq} /yr	187639	187639	187639
N₂O _{εκπ}	kg/yr	120,79	120,79	120,79
	kg CO _{2,eq} /yr	35997	35997	35997
CO₂ _{εκπ}	kg/yr	45130	41754	39165
	kg CO _{2,eq} /yr	45130	41754	39165
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	268766	265389	262801

4.3.4.6 Ισοδύναμος Πληθυσμός 2000 Κατοίκων

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης και υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των εκπεμπόμενων αερίων (κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια, τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων και οι αέριες εκπομπές του FWS CW για ισοδύναμο πληθυσμό 2000 κατοίκων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Το απαιτούμενο εμβαδόν για τον τεχνητό υγροβιότοπο είναι:

Πίνακας 4.154 Εμβαδόν FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4)

m ²	T=15 °C	T=25 °C
A_{BOD}	6238	2405
A_{TN}	13546	5722
A_{TSS}	2602	
A	13546	

Το οργανικό φορτίο, το ολικό άζωτο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά εξόδου ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.155 Ποιότητα Εκροής FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4)

Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	M.O.
Δ(BOD)	mg/L	171,61	174,55	174,98	173,71
	kg/d	82,373	83,782	83,991	83,38
BOD_e	mg/L	3,390	0,455	0,018	1,29
	kg/d	1,627	0,218	0,009	0,62
Δ(TN)	mg/L	29,10	35,56	19,36	28,01
	kg/d	13,97	17,069	19,356	16,80
TN_e	mg/L	15,90	9,44	4,68	10,00
	kg/d	7,63	4,53	2,24	4,80
Δ(TSS)	mg/L	103,24			
	kg/d	49,56			
TSS_e	mg/L	13,43			
	kg/d	6,44			

Οι αέριες εκπομπές και η αναγωγή τους σε όρους ισοδύναμου CO₂ ανά εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι:

Πίνακας 4.156 Αέριες Εκπομπές από FWS CW για 2000 ι.κ. (σενάριο 4)

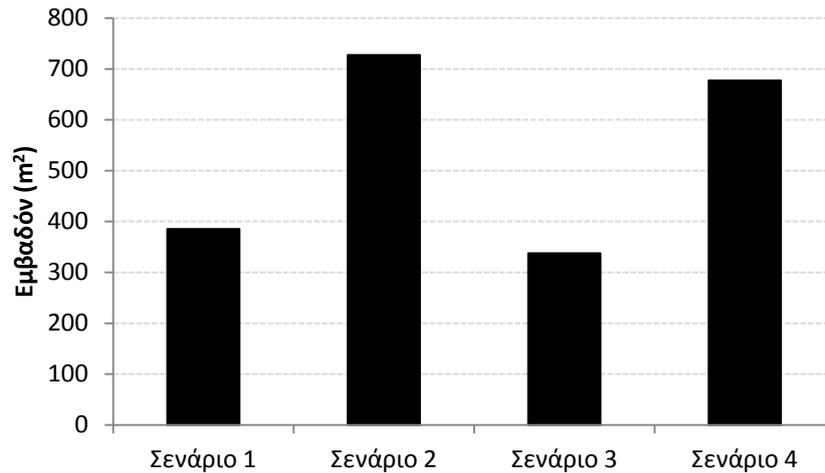
Παράμετρος	Μονάδες	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C
CH _{4,εκπ}	kg/yr	7358,4	7358,4	7358,4
	kg CO _{2,eq} /yr	250186	250186	250186
N ₂ O _{εκπ}	kg/yr	161,06	161,06	161,06
	kg CO _{2,eq} /yr	47996	47996	47996
CO _{2,εκπ}	kg/yr	60173	55671	52220
	kg CO _{2,eq} /yr	60173	55671	52220
Εκπομπές_{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /yr	358355	353853	350402

4.3.5 Συναξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Για το πρώτο σενάριο, δηλαδή για τα μη πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα τα οποία διατίθενται σε κανονικό αποδέκτη μετά από επεξεργασία στον FWS τεχνητό υγροβιότοπο, το κριτήριο απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου ισοδυναμεί με το κριτήριο απομάκρυνσης του ολικού αζώτου (TN) σε ό,τι αφορά στην εξαγωγή του απαιτούμενου εμβαδού (A) του υγροβιότοπου για την επεξεργασία των λυμάτων, με όριο εκροής για το ολικό άζωτο τα 20 mg/L και συγκέντρωση εισόδου τα 50 mg/L, δηλαδή για απομείωση της τάξης του 60%. Για τα υπόλοιπα σενάρια, το κριτήριο απομάκρυνσης του ολικού αζώτου είναι το σαφώς δυσμενέστερο και, επομένως, αυτό που καθορίζει το τελικά επιλεγθέν εμβαδόν του FWS CW, με τις μεγαλύτερες τιμές επιφάνειας να εξάγονται για τις περιπτώσεις με τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ της συγκέντρωσης εισόδου και εξόδου του ολικού αζώτου, δηλαδή για το σενάριο 2 κατά το οποίο η απομάκρυνση του TN αγγίζει το 80% (απομείωση από τα 50 στα 10 mg/L). Το κριτήριο απομάκρυνσης ολικά αιωρούμενων στερεών είναι ευμενέστερο των άλλων δυο και, συνεπώς, ικανοποιείται πάντα.

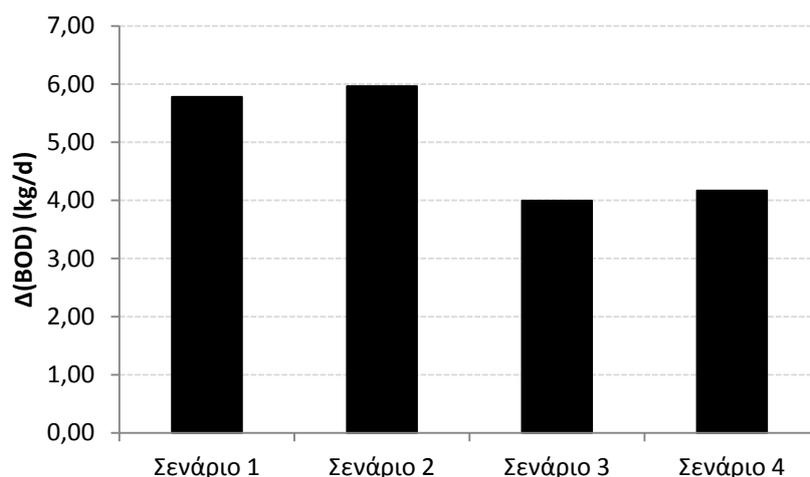
Πίνακας 4.157 Απαιτούμενη Επιφάνεια και Μέση Απομάκρυνση Οργανικών, Ολικού Αζώτου και Ολικά Αιωρούμενων Στερεών από FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

I.Π.=100	A	Δ(BOD) _{av}	Δ(TN) _{av}	Δ(TSS)
	m ²	kg/d	kg/d	kg/d
Σενάριο 1	385	5,78	0,72	6,19
Σενάριο 2	728	5,97	0,96	6,20
Σενάριο 3	338	4,00	0,60	2,47
Σενάριο 4	677	4,17	0,84	2,48

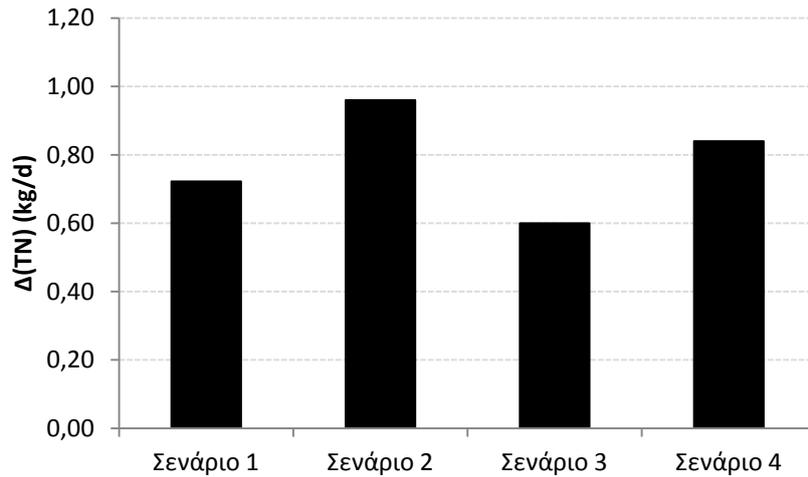


Σχήμα 4.17 Απαιτούμενη Επιφάνεια FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

Το όριο των 20 mg/L για το BOD εξόδου ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση από τη στιγμή που η επιφάνεια που προσφέρεται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων προκύπτει από το δυσμενέστερο κριτήριο απομάκρυνσης ολικού αζώτου και άρα υπερβαίνει το απαιτούμενο βάσει του κριτηρίου απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου εμβαδόν. Στις περιπτώσεις, μάλιστα, μεγάλων τιμών επιφάνειας (όπως στου σεναρίου 2), η απομάκρυνση του BOD φαίνεται να ξεπερνά το 99% και να αγγίζει τα όρια της πλήρους απομάκρυνσης, ωστόσο, είναι γνωστό από συναφείς μελέτες σε υπαρκτά συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων ότι η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου κυμαίνεται σε ποσοστά από 80 έως 97%, με τις μεγαλύτερες τιμές να υφίστανται για περισσότερο ιδανικές συνθήκες, ήτοι συχνή συγκομιδή φυτικής και υπολειπόμενης βιομάζας και λογικές τιμές εισερχόμενης οργανικής και υδραυλικής φόρτισης.

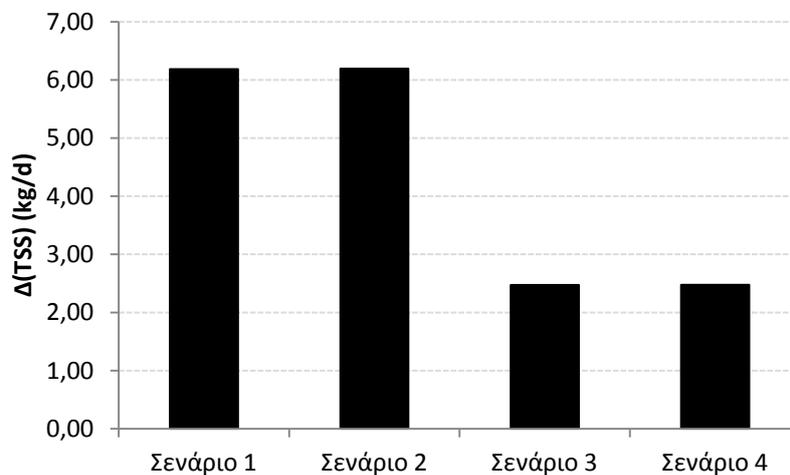


Σχήμα 4.18 Μέση Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου σε FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.



Σχήμα 4.19 Μέση Απομάκρυνση Φορτίου Ολικού Αζώτου σε FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

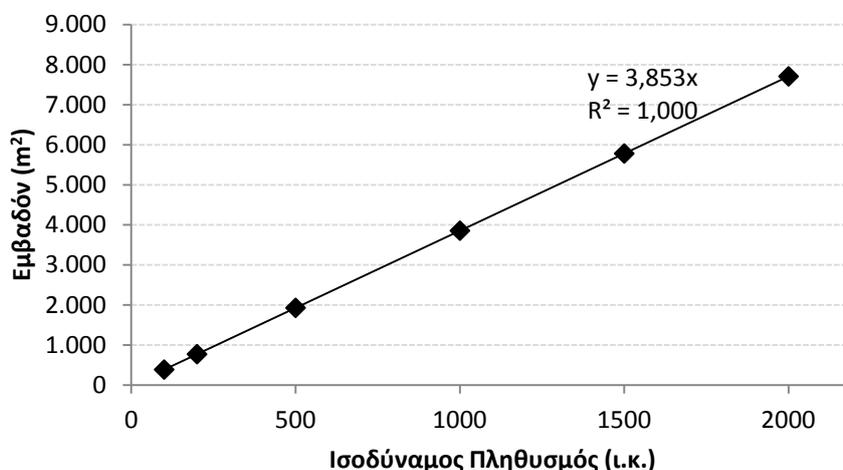
Η απομάκρυνση των ολικά αιωρούμενων στερεών, η οποία βάσει της μεθοδολογίας εξαρτάται μόνο από την υδραυλική φόρτιση (άρα από το πηλίκο της παροχής των λυμάτων προς τη διατιθέμενη επιφάνεια) και το φορτίο εισόδου, ανέρχεται σε 88,5% επί της αρχικής φόρτισης στερεών, με αποτέλεσμα η τιμή εκροής για τα ολικά αιωρούμενα στερεά να είναι περί τα 33,5 mg/L και 13,5 mg/L για τα σενάρια επεξεργασίας ανεπεξέργαστων και πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων αντίστοιχα.



Σχήμα 4.20 Απομάκρυνση Ολικών Αιωρούμενων Στερεών σε FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

Ο γραμμικός χαρακτήρας των σχέσεων που απαρτίζουν τον πυρήνα του μαθηματικού μοντέλου αναπαράστασης της μεταβολής του οργανικού φορτίου και της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου (με τη θεώρηση κινητικών πρώτης τάξης για τη μεταβολή των συγκεντρώσεων με τους αντίστοιχους θερμοκρασιακά εξαρτώμενους

συντελεστές τους) συντελούν στην εξαγωγή αποτελεσμάτων ευθέως αναλόγων των πληθυσμιακών δεδομένων και επακόλουθα της παροχής σχεδιασμού. Η εν λόγω γραμμικότητα αποτυπώνεται, για παράδειγμα, στη συσχέτιση μεταξύ του δεδομένου πληθυσμού και της απαιτούμενης επιφάνειας του υγροβιότοπου για το σενάριο 1:

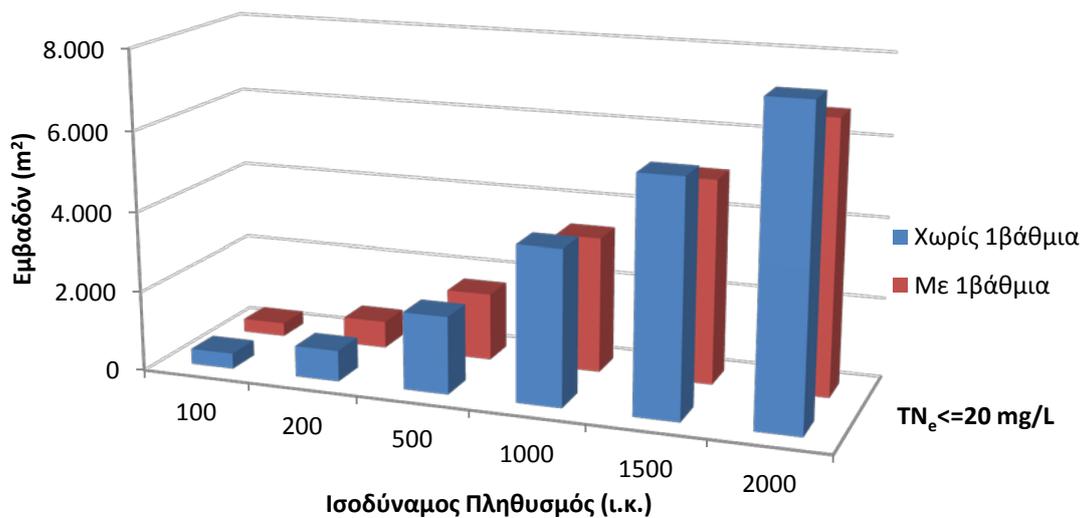


Σχήμα 4.21 Απαιτούμενη Επιφάνεια FWS CW ανά δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό για το σενάριο 1

Οι απαιτούμενες επιφάνειες, με τη σταθερή μεταξύ τους απόκλιση για τα σενάρια διάθεσης σε κανονικό ή ευαίσθητο αποδέκτη, για κάθε ισοδύναμο πληθυσμό και μελετούμενο σενάριο είναι:

Πίνακας 4.158 Απαιτούμενες Επιφάνειες FWS CW ανά Πληθυσμό και Σενάριο

Εμβαδόν ΤΥ (m ²)	Συγκέντρωση (mg/L)	Ισοδύναμος Πληθυσμός (ι.κ.)					
		100	200	500	1000	1500	2000
Χωρίς 1βάθμια	B _e =20, N _e =20	385	771	1927	3853	5780	7707
	B _e =20, N _e =10	728	1455	3638	7276	10914	14552
Με 1βάθμια	B _e =20, N _e =20	338	675	1688	3376	5064	6753
	B _e =20, N _e =10	677	1355	3387	6773	10160	13546
Απόκλιση για με ή χωρίς 1β	B _e =20, N _e =20	12,4%	12,4%	12,4%	12,4%	12,4%	12,4%
	B _e =20, N _e =10	6,9%	6,9%	6,9%	6,9%	6,9%	6,9%

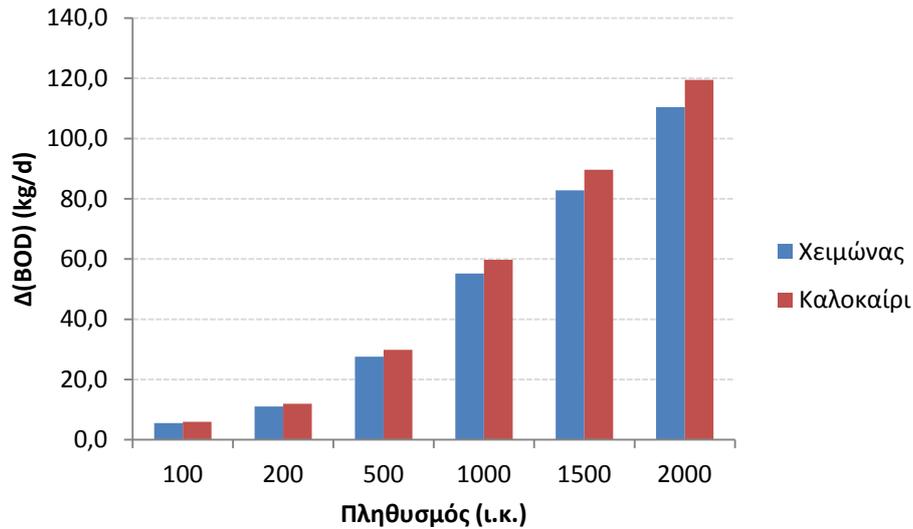


Σχήμα 4.22 Απαιτούμενη Επιφάνεια FWS CW ανά δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό για διάθεση σε κανονικό αποδέκτη

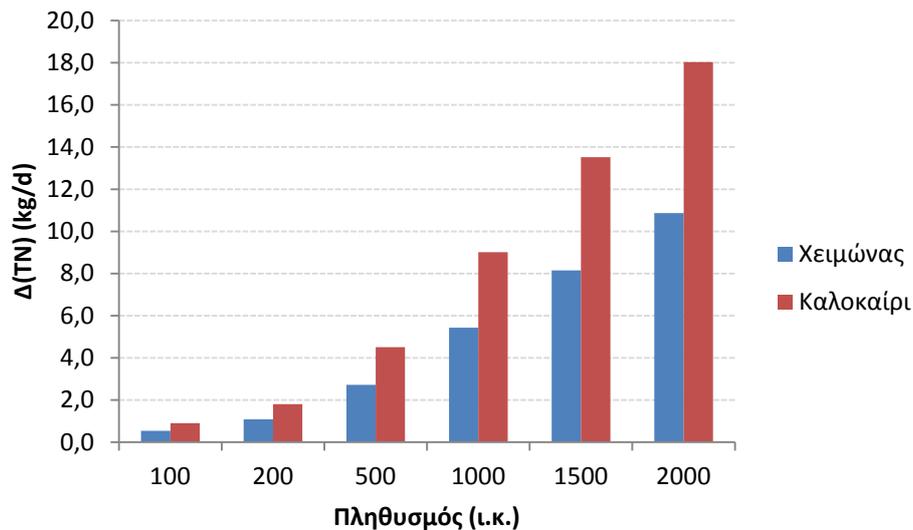
Το ίδιο γραμμικό μοτίβο αποτυπώνεται και για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και του ολικού αζώτου. Επιπλέον, όμως, μπορεί να γίνει αντιληπτή η υπεροχή των μηχανισμών απομάκρυνσης κατά τους θερμότερους μήνες του έτους και κυρίως όσον αφορά το ολικό άζωτο, καθώς το οργανικό φορτίο αγγίζει τα όρια της πλήρους απομάκρυνσης ήδη από το χειμώνα. Η υπεροχή αυτή οφείλεται, φυσικά, στη θερμοκρασιακή εξάρτηση του ρυθμού απομάκρυνσης των εν λόγω φορτίων και στη μεγαλύτερη τιμή που αυτός λαμβάνει για μεγαλύτερες θερμοκρασίες ($k_{BOD}^T=0,004$ και $0,009 d^{-1}$ & $k_{V,N}^T=0,103$ και $0,244 d^{-1}$ για θερμοκρασία λυμάτων 15 και 25 °C αντίστοιχα).

Πίνακας 4.159 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου και Ολικού Αζώτου σε FWS CW για το σενάριο 1

Ι.Π.	i.κ	100	200	500	1000	1500	2000
Περίοδος		Χειμώνας ($T_{λυμ}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$)					
$\Delta(BOD)$	kg/d	5,5	11,0	27,6	55,2	82,8	110,4
$\Delta(TN)$		0,5	1,1	2,7	5,4	8,2	10,9
Περίοδος		Καλοκαίρι ($T_{λυμ}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)					
$\Delta(BOD)$	kg/d	6,0	12,0	29,9	59,8	89,6	119,5
$\Delta(TN)$		0,9	1,8	4,5	9,0	13,5	18,0



Σχήμα 4.23 Απομάκρυνση Οργανικού Φορτίου ανά Ισοδύναμο Πληθυσμό σε Χειμερινές και Θερινές Συνθήκες σε FWS CW για το σενάριο 1



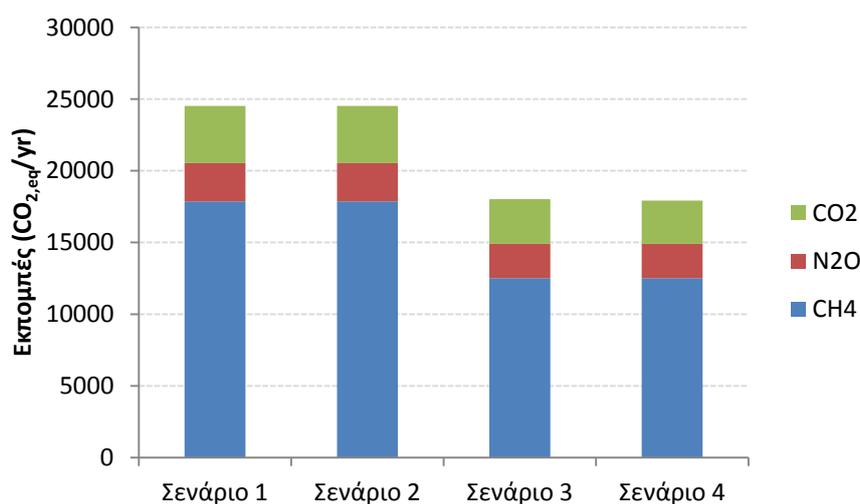
Σχήμα 4.24 Απομάκρυνση Φορτίου Ολικού Αζώτου ανά Ισοδύναμο Πληθυσμό σε Χειμερινές και Θερινές Συνθήκες σε FWS CW για το σενάριο 1

Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (CH_4 , N_2O) σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία (ενότητα 3.3) προκύπτουν βάσει των φορτίων των εισερχόμενων υγρών αποβλήτων (φορτίο οργανικών και ολικού αζώτου), ενώ οι εκπομπές του CO_2 (ενότητα 3.4) λαμβάνουν υπόψη και τις απομακρυνόμενες μάζες BOD και TN. Οι τιμές των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, συνεπώς, παρουσιάζουν διαφορά μόνο με βάση το αν τα εισερχόμενα λύματα έχουν υποστεί νωρίτερα πρωτοβάθμια επεξεργασία ή όχι, με το CH_4 να υπολείπεται κατά 30% και το N_2O κατά 10% μετά την επεξεργασία πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων σε

αντιπαραβολή με τις εκπομπές από την επεξεργασία των πρωτοβάθμια ανεπεξεργαστων λυμάτων. Οι εκπομπές CO₂ παραμένουν πρακτικά σταθερές καθώς το όριο εκροής του TN γίνεται αυστηρότερο για την περίπτωση των πρωτοβάθμια ανεπεξεργαστων υγρών αποβλήτων (απόκλιση 0,1%), ενώ για τα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα οι εκπομπές μειώνονται ελαφρώς (3,5%) όταν το όριο για το άζωτο εξόδου υποβαθμίζεται στα 10 mg/L. Ενδεικτικά αν εξεταστούν οι εκπομπές για ένα δεδομένο ισοδύναμο πληθυσμό, ισχύει:

Πίνακας 4.160 Αέριες Εκπομπές από FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

I.Π.=100	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO _{2eq}
	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr
Σενάριο 1	17870	2666	3986	24523
Σενάριο 2	17870	2666	3983	24520
Σενάριο 3	12509	2400	3116	18025
Σενάριο 4	12509	2400	3009	17918

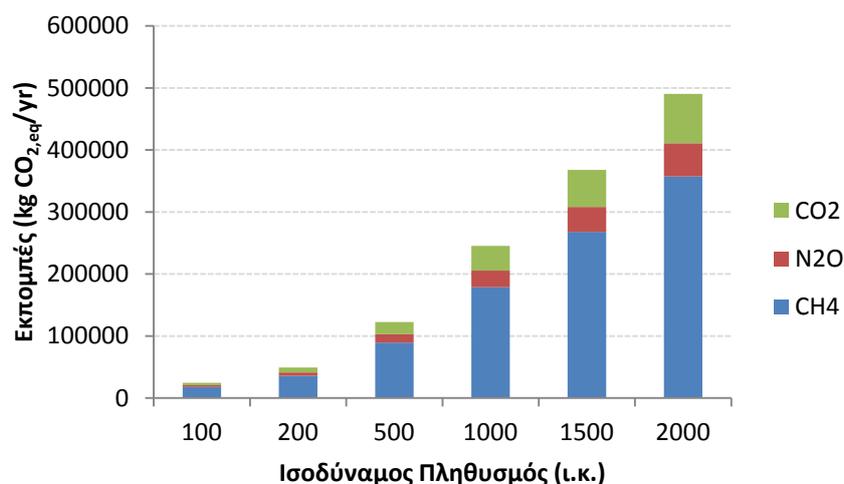


Σχήμα 4.25 Αέριες Εκπομπές από FWS CW ανά σενάριο για 100 ι.κ.

Αναλυτικά αν εξεταστούν οι αέριες εκπομπές ανά ισοδύναμο πληθυσμό και σενάριο, ισχύει:

Πίνακας 4.161 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 1)

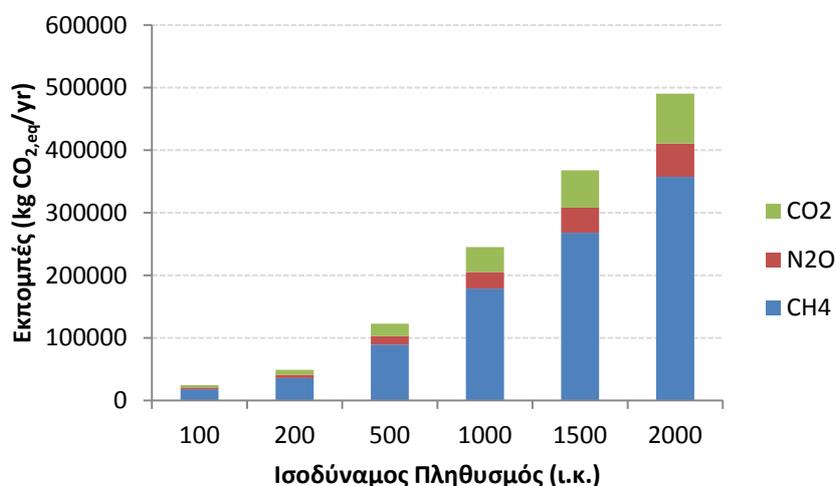
I.Π.	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO _{2eq}	CH ₄ / sumCO _{2eq}	N ₂ O / sumCO _{2eq}	CO ₂ / sumCO _{2eq}
ι.κ.	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	%	%	%
100	17870	2666	3986	24523	72,9%	10,9%	16,3%
200	35741	5333	7973	49046	72,9%	10,9%	16,3%
500	89352	13332	19932	122616	72,9%	10,9%	16,3%
1000	178704	26664	39863	245232	72,9%	10,9%	16,3%
1500	268056	39996	59795	367847	72,9%	10,9%	16,3%
2000	357408	53328	79727	490463	72,9%	10,9%	16,3%



Σχήμα 4.26 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 1)

Πίνακας 4.162 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 2)

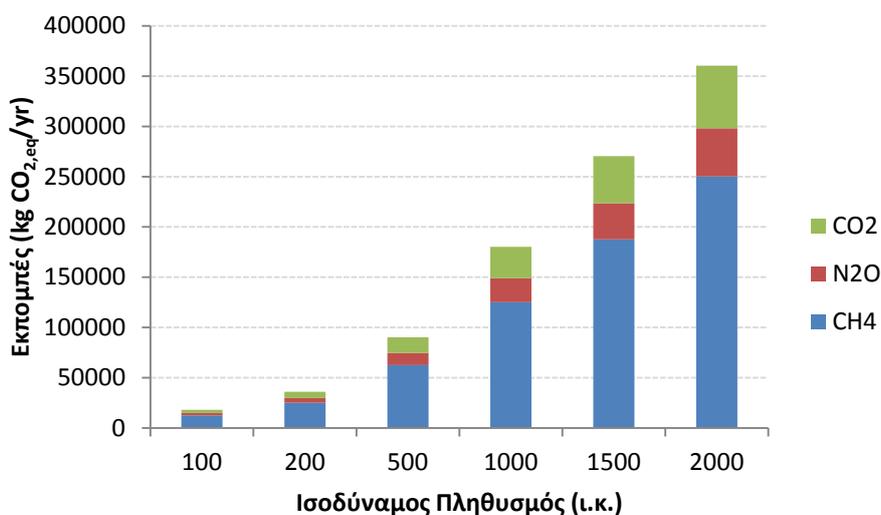
Ι.Π.	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO ₂ eq	CH ₄ / sumCO ₂ eq	N ₂ O / sumCO ₂ eq	CO ₂ / sumCO ₂ eq
ι.κ.	kg CO ₂ eq/yr	kg CO ₂ eq/yr	kg CO ₂ eq/yr	kg CO ₂ eq/yr	%	%	%
100	17870	2666	3983	24520	72,9%	10,9%	16,2%
200	35741	5333	7965	49039	72,9%	10,9%	16,2%
500	89352	13332	19914	122598	72,9%	10,9%	16,2%
1000	178704	26664	39827	245195	72,9%	10,9%	16,2%
1500	268056	39996	59741	367793	72,9%	10,9%	16,2%
2000	357408	53328	79655	490391	72,9%	10,9%	16,2%



Σχήμα 4.27 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 2)

Πίνακας 4.163 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 3)

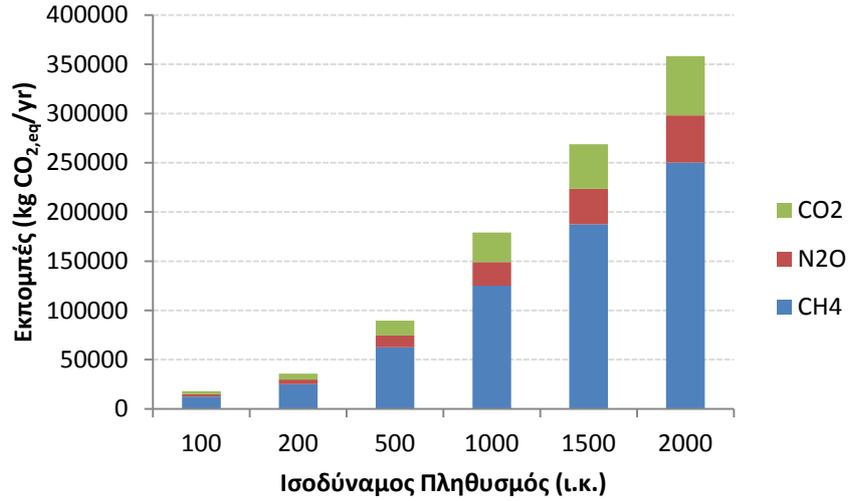
Ι.Π.	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO _{2eq}	CH ₄ / sumCO _{2eq}	N ₂ O / sumCO _{2eq}	CO ₂ / sumCO _{2eq}
ι.κ.	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	%	%	%
100	12509	2400	3116	18025	69,4%	13,3%	17,3%
200	25019	4800	6233	36051	69,4%	13,3%	17,3%
500	62546	11999	15582	90127	69,4%	13,3%	17,3%
1000	125093	23998	31164	180255	69,4%	13,3%	17,3%
1500	187639	35997	46746	270382	69,4%	13,3%	17,3%
2000	250186	47996	62328	360510	69,4%	13,3%	17,3%



Σχήμα 4.28 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 3)

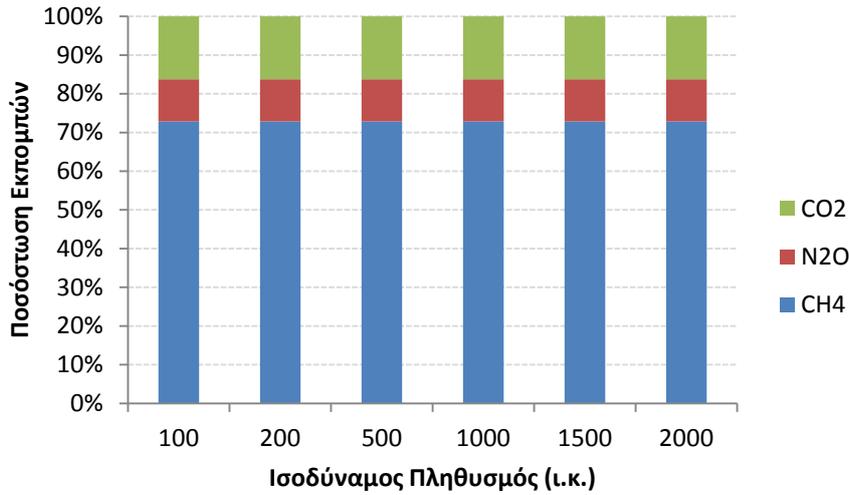
Πίνακας 4.164 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 4)

Ι.Π.	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	sum CO _{2eq}	CH ₄ / sumCO _{2eq}	N ₂ O / sumCO _{2eq}	CO ₂ / sumCO _{2eq}
ι.κ.	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	kg CO _{2eq} /yr	%	%	%
100	12509	2400	3009	17918	69,8%	13,4%	16,8%
200	25019	4800	6017	35835	69,8%	13,4%	16,8%
500	62546	11999	15043	89589	69,8%	13,4%	16,8%
1000	125093	23998	30087	179177	69,8%	13,4%	16,8%
1500	187639	35997	45130	268766	69,8%	13,4%	16,8%
2000	250186	47996	60173	358355	69,8%	13,4%	16,8%

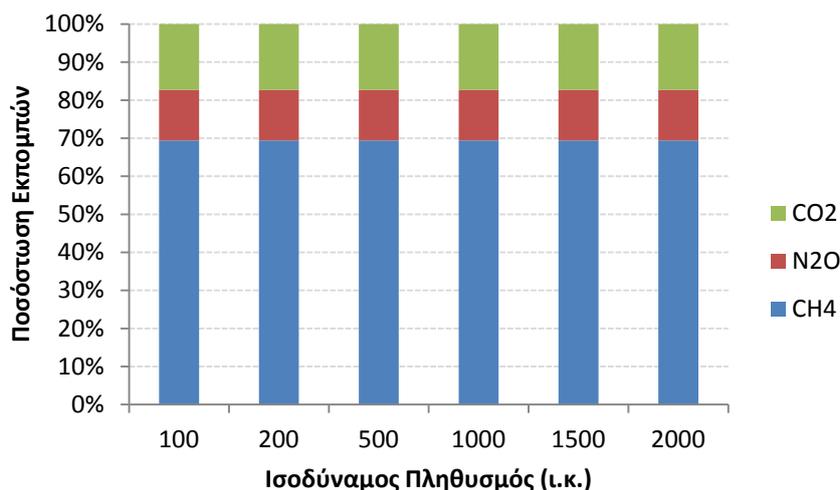


Σχήμα 4.29 Αέριες Εκπομπές από FWS CW (σενάριο 4)

Γίνεται, επομένως, εμφανής αφενός η αναλογική σχέση των εκπομπών με τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό και αφετέρου η σχετικά όμοια ποσοστιαία κατανομή των επιμέρους αερίων στις συνολικές εκπομπές μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων.



Σχήμα 4.30 Ποσοστιαία Κατανομή Αερίων Εκπομπών FWS CW (σενάριο 1)



Σχήμα 4.31 Ποσοστιαία Κατανομή Αέριων Εκπομπών FWS CW (σενάριο 3)

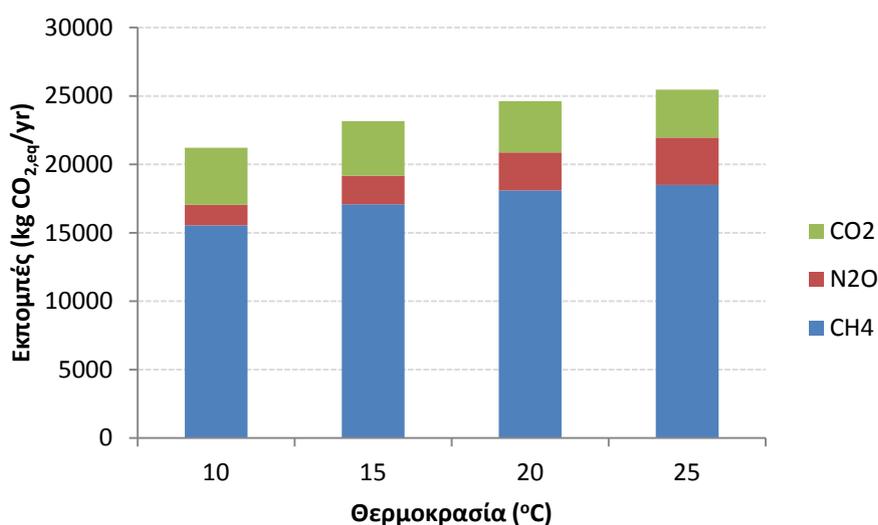
Τις εκπομπές από τα πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστα λύματα, δηλαδή, συνιστούν σε ποσοστό 73% το μεθάνιο, 11% το υποξείδιο του αζώτου και 16% το διοξείδιο του άνθρακα, ενώ η σύνθεση των εκπομπών από την επεξεργασία των πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων είναι 70% μεθάνιο, 13% υποξείδιο του αζώτου και 17% διοξείδιο του άνθρακα. Φαίνεται, επομένως, ότι η απομείωση του φορτίου του BOD κατά 30% και του TN κατά 10% στα εισερχόμενα απόβλητα κατά την προγενέστερη πρωτοβάθμια επεξεργασία συντελεί έμμεσα σε μικρή αύξηση της εκπομπής N₂O κατά 2% σε σχέση με τις εκπομπές των πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστων λυμάτων, αφού άμεσα περιορίζεται κατά 3% η παραγωγή του μεθανίου (που στηρίζεται στα λιγότερα εισερχόμενα οργανικά σε αυτή την περίπτωση), ενώ η παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα αυξάνεται κατά 1% - διότι ναι μεν τόσο η οξείδωση του οργανικού φορτίου, όσο και η φθορά της βιομάζας, που προκύπτει από την αναπτυσσόμενη βιομάζα που συναρτάται με την απομακρυνόμενη βιομάζα, έχουν μικρότερη τιμή, το άζωτο νιτροποίησης όμως διατηρεί αντίστοιχη τιμή με αυτή που έχει και στο σενάριο 1 και επομένως σύμφωνα με το ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενου και καταναλισκόμενου CO₂, η ψαλίδα κλίνει κατά μια επιπλέον ποσοστιαία μονάδα υπέρ της παραγωγής. Γενικότερα, οι FWS τεχνητοί υγροβιότοποι, ως προς το ανθρακικό τους αποτύπωμα, συνεισφέρουν περισσότερο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μέσω των εκπομπών CH₄, στοιχείο που επιβεβαιώνεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία (Mander, et al., 2014), και ταυτόχρονα παράγουν τουλάχιστον τέσσερις φορές περισσότερο μεθάνιο από τους HSSF CWs.

Εμπλουτίζοντας τη μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (CH₄, N₂O), είναι δυνατό να τροποποιήσουμε τους συντελεστές εκπομπής «EF» ώστε να πολλαπλασιάζονται με την απομακρυνόμενη μάζα BOD ή TN για την εξαγωγή της τιμής εκπομπής CH₄ και N₂O αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, δεδομένου ότι η μεταβολή των BOD και TN είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενη, μπορεί να υπολογιστεί η απομακρυνόμενη μάζα των φορτίων για διάφορες

θερμοκρασίες. Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης, επιλέχθηκαν τέσσερις πιθανές τιμές θερμοκρασίας λυμάτων (10, 15, 20 και 25 °C) για τις οποίες υπολογίστηκαν οι τιμές εκπομπής των αερίων CH₄, N₂O και CO₂, με το CO₂ βέβαια να μην απαιτεί χρήση συντελεστή εκπομπής «EF» καθώς στη μεθοδολογία υπολογισμού του λαμβάνει ήδη υπόψη τα απομακρυνόμενα φορτία BOD και TN, για το σενάριο 1 και ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων.

Πίνακας 4.165 Αέριες Εκπομπές για Πιθανά Θερμοκρασιακά Δεδομένα Λυμάτων από FWS CW για 100 ι.κ.

T °C	CH ₄ ,εκπ		N ₂ O,εκπ		CO ₂ ,εκπ		sum
	kg CO _{2,eq} /yr	% CH ₄	kg CO _{2,eq} /yr	% N ₂ O	kg CO _{2,eq} /yr	% CO ₂	kg CO _{2,eq} /yr
10	15548	73,3%	1505	7,1%	4166	19,6%	21219
15	17083	73,8%	2094	9,0%	3986	17,2%	23163
20	18095	73,5%	2781	11,3%	3750	15,2%	24626
25	18493	72,6%	3473	13,6%	3490	13,7%	25456



Σχήμα 4.32 Αέριες Εκπομπές για Πιθανά Θερμοκρασιακά Δεδομένα Λυμάτων από FWS CW για 100 ι.κ.

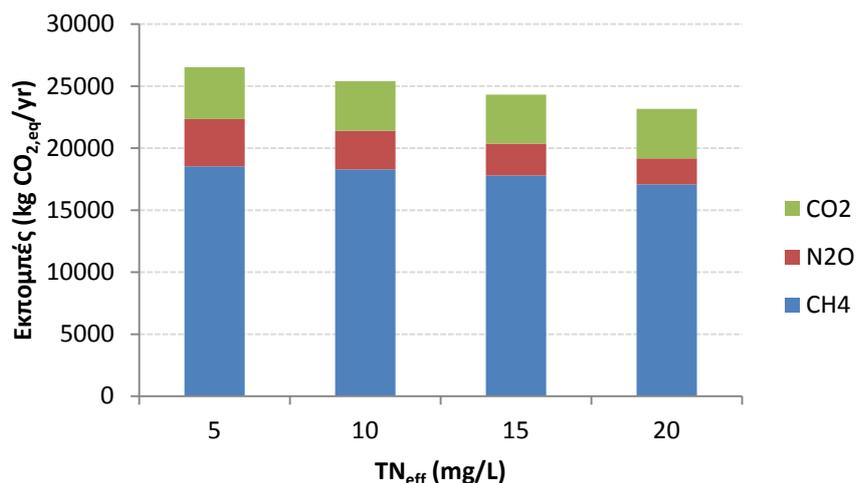
Παρατηρείται ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας των λυμάτων, το ποσοστό συμμετοχής των εκπομπών N₂O στις συνολικές εκπομπές αυξάνεται, από 7,1% στους 10 °C σε 13,6% στους 25 °C, το ποσοστό συμμετοχής των εκπομπών CH₄ παραμένει σχετικά σταθερό, άνω του 72,6% και έως 73,3%, ενώ η συμμετοχή των εκπομπών CO₂ περιορίζεται από 19,6% σε 13,7%, όπως σημειώθηκε και στους HSSF CWs. Εναλλακτικά, για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 15 °C, οι συνολικές εκπομπές αυξάνονται κατά 17% (από 21219 σε 25456 kg CO_{2,eq}/yr), με την εκπομπή N₂O να υπερδιπλασιάζεται (αύξηση 131%, από τα 1505 στα 3473 kg CO_{2,eq}/yr), την εκπομπή CH₄ να αυξάνεται κατά 16% (από τα 15548 στα 18493 kg CO_{2,eq}/yr) και την

εκπομπή CO₂ να ελαττώνεται κατά 19% (από τα 4166 στα 3490 kg CO_{2,eq}/yr). Η μεταβολή του ποσοστού συμμετοχής των εκπομπών N₂O στις συνολικές εκπομπές αιτιολογείται από το γεγονός ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, λόγω του υψηλότερου ρυθμού απομάκρυνσης αζώτου (αφού, όπως έχει προαναφερθεί, είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενος), μεγαλύτερη μάζα αζώτου είναι διαθέσιμη προς τις διεργασίες παραγωγής N₂O, και κυρίως της νιτροποίησης. Στις εκπομπές CO₂, αντίθετα, η ενίσχυση της παραμέτρου της νιτροποίησης συνεπάγεται την αύξηση του καταναλισκόμενου διοξειδίου του άνθρακα για τις ανάγκες της σύνθεσης νέας βιομάζας. Κατά τις διεθνείς αναφορές, το στοιχείο που μπορεί να επιβεβαιωθεί είναι πως αυξανόμενη της θερμοκρασίας οι εκπομπές CH₄ αυξάνονται κατά απόλυτη τιμή, ενώ η συσχέτιση μεταξύ θερμοκρασίας και εκπομπών N₂O δεν είναι αποσαφηνισμένη (Mander, et al., 2014).

Σε αντίστοιχη κατεύθυνση διερεύνησης, γίνεται να εξεταστεί και η επίδραση της τιμής του ολικού αζώτου εκροής στις αέριες εκπομπές. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια εκείνα που δεν αναιρείται ο προϋπάρχων σχεδιασμός του τεχνητού υδροβιότοπου (εξαγωγή απαιτούμενης επιφάνειας βάσει του δυσμενέστερου κριτηρίου, δηλαδή του κριτηρίου εκροής TN), ήτοι για τιμές του ολικού αζώτου εκροής ίσες με 5, 10, 15 και 20 mg/L, με τις δυο από αυτές (10 και 20 mg/L) να έχουν ήδη διερευνηθεί.

Πίνακας 4.166 Αέριες Εκπομπές για Διάφορες Τιμές Εκροής του Ολικού Αζώτου από FWS CW για 100 ι.κ. στους 15 °C

TN _{eff} mg/L	CH ₄		N ₂ O		CO ₂		sum CO _{2eq} kg CO _{2eq} /yr
	kg CO _{2eq} /yr	%	kg CO _{2eq} /yr	%	kg CO _{2eq} /yr	%	
5	18534	69,9%	3809	14,4%	4182	15,8%	26525
10	18287	72,0%	3117	12,3%	3983	15,7%	25387
15	17792	73,2%	2562	10,5%	3962	16,3%	24317
20	17083	73,8%	2094	9,0%	3986	17,2%	23163



Σχήμα 4.33 Αέριες Εκπομπές για Διάφορες Τιμές Εκροής του Ολικού Αζώτου από FWS CW για 100 ι.κ. στους 15 °C

Παρατηρείται ότι καθώς το όριο εξόδου για το ολικό άζωτο αυστηροποιείται, οι αέριες εκπομπές αυξάνονται – η διαφορά ανάμεσα στις ολικές εκπομπές για άζωτο εξόδου στα 20 mg/L (23163 kg CO_{2,eq}/yr) και τα 5 mg/L (26525 kg CO_{2,eq}/yr) είναι της τάξεως του 13%. Η εξέλιξη αυτή είναι αναμενόμενη, αν ληφθεί υπόψη ότι στην περίπτωση του αυστηρότερου ορίου εκροής η μέγιστη δυνατή ποσότητα οργανικού φορτίου και TN θα πρέπει να απομακρυνθεί βάσει σχεδιασμού και επακόλουθα και οι εκπομπές CH₄, N₂O και CO₂ θα είναι οι μεγαλύτερες δυνατές. Οι εκπομπές του υποξειδίου του αζώτου αυξάνουν το ποσοστό συμμετοχής τους στις συνολικές εκπομπές καθώς το όριο εκροής του ολικού αζώτου μειώνεται, με το ποσοστό τους να ανεβαίνει από το 9,0 στο 14,4% για εκροή στα 5 mg/L και την τιμή του εκπεμπόμενου N₂O να αυξάνεται κατά 82% (από τα 2094 στα 3809 kg CO_{2,eq}/yr). Οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση της τάξης του 5% (από τα 3986 στα 4182 kg CO_{2,eq}/yr), και οι εκπομπές CH₄ αυξάνονται κατά 8,5% (από τα 17083 στα 18534 kg CO_{2,eq}/yr). Η αύξηση της συμμετοχής του N₂O μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι το μόνο φορτίο το οποίο παρουσιάζει αξιόλογο υπόλοιπο μετά την επεξεργασία των λυμάτων για συνήθεις τιμές TN_{eff} είναι το ολικό άζωτο, και επομένως είναι το μόνο το οποίο μπορεί να παρουσιάσει σημαντικότερο βαθμό απομάκρυνσης καθώς TN_{eff} βαίνει μειούμενο – το περισσότερο απομακρυνόμενο TN με τη σειρά του προσφέρει μεγαλύτερη μάζα αζώτου στις διεργασίες της παραγωγής N₂O και, έτσι, οι εκπομπές N₂O αυξάνουν τη συμμετοχή τους. Οι εκπομπές CH₄ μειώνουν τη συμμετοχή τους στις ολικές εκπομπές βαδίζοντας προς υποδεέστερο TN_{eff} καθώς ο ρυθμός αύξησης της απόλυτης τιμής της εκπομπής CH₄ υπολείπεται του ρυθμού αύξησης της τιμής εκπομπής N₂O, διότι βρισκόμαστε ήδη από την περίπτωση του TN_{eff}=20 mg/L κοντά στην πλήρη εξάντληση του BOD. Για ακόμη μια περίπτωση διερεύνησης, βέβαια, επιβεβαιώνεται ότι η συνεισφορά των FWS CWs στα αέρια του θερμοκηπίου γίνεται κατά βάση μέσω του μεθανίου.

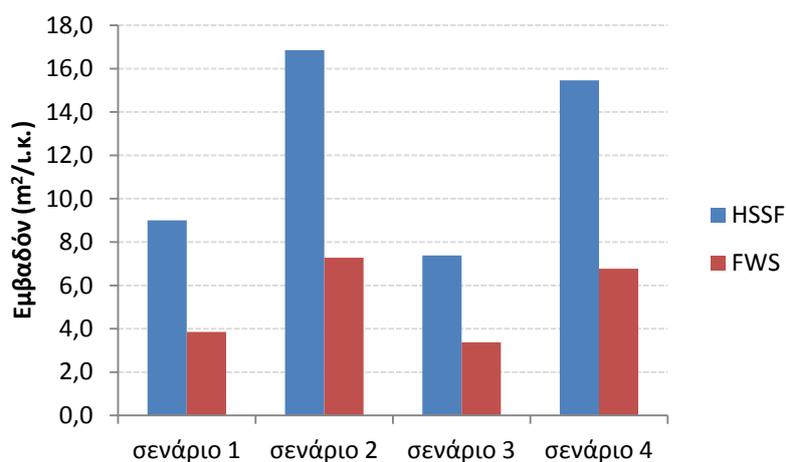
4.4 Συγκριτική Αξιολόγηση Τεχνητών Υγροβιότοπων

4.4.1 Απαιτούμενη Επιφάνεια

Με βάση τη μεθοδολογία υπολογισμού της απαιτούμενης επιφάνειας ενός τεχνητού υγροβιότοπου για την επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων (ενότητα 3.2), οι επιφάνειες που προέκυψαν για τους δυο τύπους υγροβιοτόπων είναι:

Πίνακας 4.167 Απαιτούμενη Επιφάνεια CW Ανηγμένη ανά Ισοδύναμο Κάτοικο

Ανηγμένη Επιφάνεια	Α			
	m ² /ι.κ.			
	Κριτήριο TN		Κριτήριο BOD ₅	
	HSSF	FWS	HSSF	FWS
σενάριο 1	9,0	3,9	6,5	3,9
σενάριο 2	16,9	7,3		
σενάριο 3	7,4	3,4	5,6	3,1
σενάριο 4	15,5	6,8		

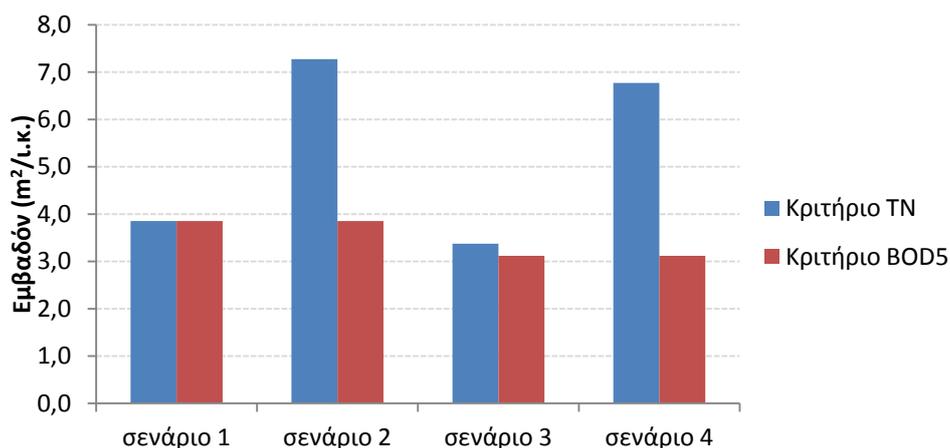


Σχήμα 4.34 Απαιτούμενη Επιφάνεια CW βάσει κριτηρίου απομάκρυνσης TN Ανηγμένη ανά Ισοδύναμο Κάτοικο

Με δεδομένο ότι η επιφάνεια σχεδιασμού του τεχνητού υγροβιότοπου επιλέγεται βάσει του κρίσιμου κριτηρίου απομάκρυνσης του TN, η επιφάνεια η οποία απαιτείται για την επεξεργασία των λυμάτων είναι σε κάθε σενάριο μεγαλύτερη για έναν HSSF CW κατά 54 με 57% από την αντίστοιχη απαιτούμενη για έναν FWS CW. Η απαιτούμενη επιφάνεια για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων σύμφωνα με τις διεθνείς αναφορές για έναν HSSF CW εκτιμάται σε 5 με 6 m²/ι.κ. (Mander, et al., 2014), συνεπώς η διαστασιολόγηση που εκτελέστηκε στην παρούσα εργασία κινείται συντηρητικά, με τα προκύπτοντα εμβαδά να κυμαίνονται από 7 έως 17 m²/ι.κ., πιθανότατα επειδή κατά τη διεθνή πρακτική και με γνώμονα την κλίμακα για την

οποία κατασκευάζονται ανάλογα συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων το κύριο και συχνά μόνο κριτήριο του οποίου η ικανοποίηση ενδιαφέρει είναι αυτό της απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου.

Στην περίπτωση που ο σχεδιασμός των υδροβιότοπων πραγματοποιείται μόνο με βάση την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου, τότε θα απαιτούντο μικρότερες επιφάνειες κατά απόλυτη τιμή (για τους HSSF από 28 έως 64% και για τους FWS από 0 έως 54% απομειωμένη επιφάνεια) και στην περίπτωση των HSSF CWs θα παρουσιαζόταν ταύτιση των υπολογισθέντων τιμών επιφάνειας (5,6 έως 6,5 m²/ι.κ.) με τις τιμές που κατά μέσο όρο προκύπτουν διεθνώς (5 με 6 m²/ι.κ.), όπως αυτές αναφέρθηκαν προηγουμένως. Σημαντικό στοιχείο, σε αυτό το υποθετικό σενάριο επιλογής εμβαδού βάσει μόνο του κριτηρίου της απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου σε όρους BOD₅, είναι ότι στην περίπτωση που το όριο εκροής του ολικού αζώτου παραμένει στο ανώτερο επίπεδο των 20 mg/L για την επεξεργασία πρωτοβάθμια ανεπεξεργαστων λυμάτων (σενάριο 1), τότε η ικανοποίηση του κριτηρίου απομάκρυνσης BOD συνιστά ταυτόχρονα την ικανή και αναγκαία συνθήκη για την επίτευξη και του ορίου εκροής του TN δίχως την απαίτηση επιπλέον επιφάνειας.



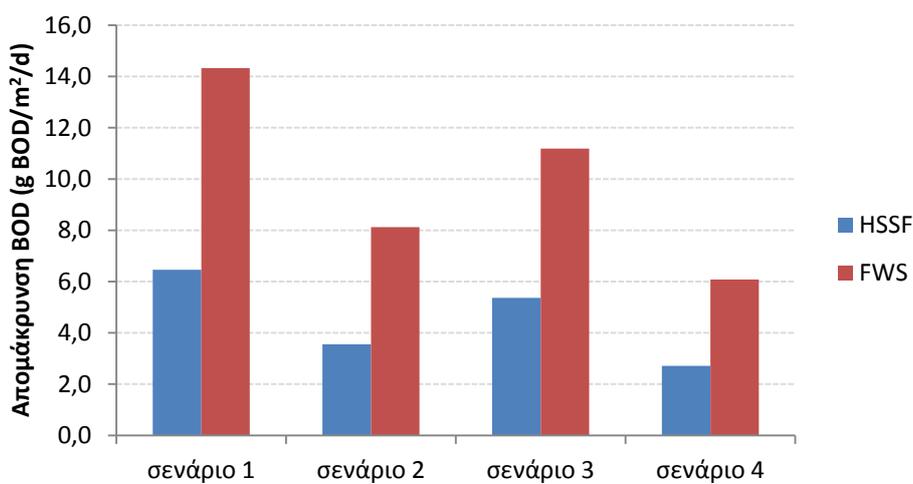
Σχήμα 4.35 Απαιτούμενη Επιφάνεια FWS CW βάσει κριτηρίου απομάκρυνσης TN και BOD₅ Ανηγμένη ανά Ισοδύναμο Κάτοικο

4.4.2 Απομάκρυνση Ρυπαντικών Φορτίων

Ο γραμμικός χαρακτήρας των σχέσεων που απαρτίζουν τον πυρήνα του μαθηματικού μοντέλου αναπαράστασης της μεταβολής της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου και της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου (με τη θεώρηση κινητικών πρώτης τάξης για τη μεταβολή των συγκεντρώσεων με τους αντίστοιχους θερμοκρασιακά εξαρτώμενους συντελεστές τους) έχει ήδη επισημανθεί στις ενότητες 4.2 και 4.3. Έχοντας ως δεδομένα εισόδου τις προαναφερθείσες τιμές των απαιτούμενων επιφανειών, μπορεί να εξαχθεί η τιμή του απομακρυνόμενου φορτίου οργανικών και ολικού αζώτου ανηγμένο σε φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας.

Πίνακας 4.168 Απομάκρυνση Φορτίου BOD και TN ανά Μονάδα Επιφάνειας σε HSSF και FWS CWs

Ρυπαντικά Φορτία	$\Delta(\text{BOD}_5)$		$\Delta(\text{TN})$	
	g BOD/m ² /d		g TN/m ² /d	
	HSSF	FWS	HSSF	FWS
σενάριο 1	6,5	14,3	0,51	1,41
σενάριο 2	3,6	8,1	0,42	1,11
σενάριο 3	5,4	11,2	0,48	1,31
σενάριο 4	2,7	6,1	0,39	1,03



Σχήμα 4.36 Απομάκρυνση Φορτίου BOD ανά Μονάδα Επιφάνειας σε HSSF και FWS CWs

Αποδεικνύεται ότι για την επίτευξη του ίδιου αποτελέσματος, δηλαδή την ικανοποίηση του ορίου εκροής του ολικού αζώτου στα 10 ή 20 mg/L, οι HSSF τεχνητοί υδροβιότοποι στη μονάδα της επιφάνειας επιτυγχάνουν την απομάκρυνση μικρότερης ποσότητας τόσο οργανικού φορτίου όσο και ολικού αζώτου σε σχέση με τους FWS CWs. Με άλλα λόγια, η απόδοση των συστημάτων FWS CWs υπερτερεί της απόδοσης των HSSF CWs κατά 55% για την απομάκρυνση του BOD και κατά 68% σχετικά με την απομάκρυνση του TN.

4.4.3 Αέριες Εκπομπές

Οι αέριες εκπομπές από την επεξεργασία λυμάτων σε συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων μπορούν να αναχθούν σε εκπομπές ανά μονάδα εισερχόμενου φορτίου, ισοδύναμο πληθυσμού, επιφάνειας ή παροχής λυμάτων ώστε να γίνει δυνατή η μεταξύ τους - αλλά και με τις εκπομπές άλλων συστημάτων - σύγκριση.

4.4.3.1 Αναγωγή Αέριων Εκπομπών

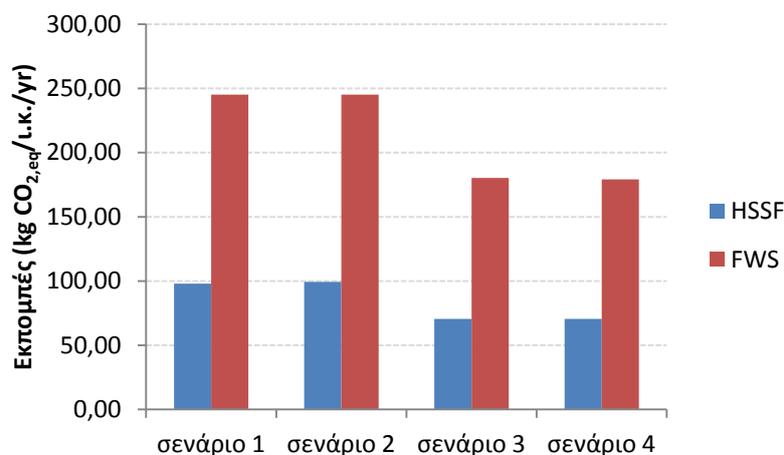
Οι αέριες εκπομπές CH₄, N₂O και CO₂ σε HSSF και FWS τεχνητούς υδροβιότοπους ανηγμένες ανά ισοδύναμο κάτοικο, τετραγωνικό μέτρο και κυβικό μέτρο

εισερχόμενων λυμάτων ανά σενάριο και για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων είναι:

Πίνακας 4.169 Ανηγγμένες Εκπομπές Αερίων από HSSF και FWS CWs για ισοδύναμο πληθυσμό 100 κατοίκων

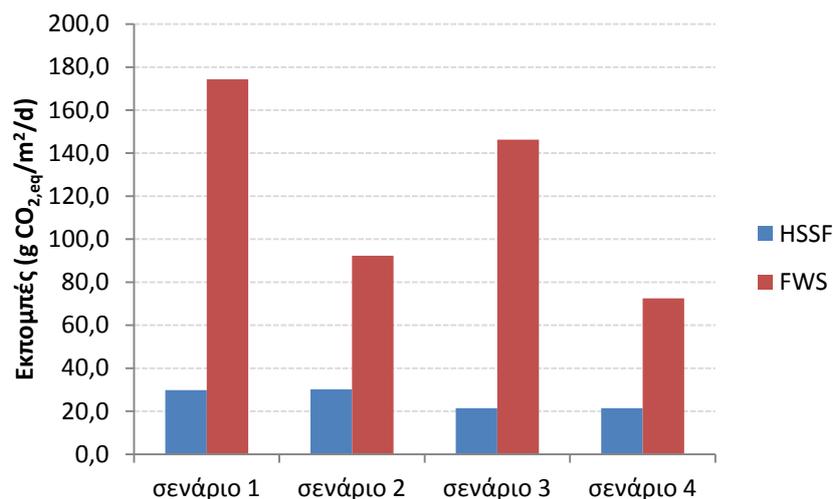
Εκπομπές	Ανηγγμένες Εκπομπές ₁		Ανηγγμένες Εκπομπές ₂		Ανηγγμένες Εκπομπές ₃	
	kg CO _{2,eq} /ι.κ./yr		g CO _{2,eq} /m ² /d		g CO _{2,eq} /m ³	
	HSSF	FWS	HSSF	FWS	HSSF	FWS
σενάριο 1	97,93	245,23	29,8	174,4	1118	2799
σενάριο 2	99,31	245,20	30,2	92,3	1134	2799
σενάριο 3	70,48	180,25	21,5	146,3	805	2058
σενάριο 4	70,47	179,18	21,5	72,5	805	2045

Είναι διαπιστωμένο ήδη από τις ενότητες 4.2 και 4.3 ότι οι τιμές των αερίων εκπομπών από FWS CWs είναι μεγαλύτερες των αντίστοιχων τιμών εκπομπών από HSSF CWs. Πραγματοποιώντας την αναγωγή των εκπομπών σε εκπομπές ανά μονάδα ισοδύναμου πληθυσμού ή ανά μονάδα παροχής εισερχόμενων λυμάτων, εύκολα διαπιστώνεται πως οι εκπομπές των FWS είναι περισσότερες από τις αντίστοιχες των HSSF CWs περίπου κατά 60% για κάθε σενάριο.



Σχήμα 4.37 Ανηγγμένες Εκπομπές Αερίων ανά Μονάδα Ισοδύναμου Πληθυσμου για HSSF και FWS CWs

Εκτελώντας την αναγωγή των εκπομπών σε εκπομπές ανά μονάδα επιφάνειας, γνωρίζοντας από την προηγούμενη ενότητα πως κατά μέσο όρο η απαιτούμενη επιφάνεια ενός HSSF CW είναι μεγαλύτερη κατά 56% από την αντίστοιχη ενός FWS CW, ελέγχεται η απόκλιση που σημειώνεται για τις εκπομπές μεταξύ των δυο τύπων υγροβιότοπων.



Σχήμα 4.38 Ανηγμένες Εκπομπές Αερίων ανά Μονάδα Επιφάνειας για HSSF και FWS CWs

Συνεπώς, οι εκπομπές αερίων από FWS CWs υπερτερούν των αντίστοιχων εκπομπών από HSSF CWs κατά 67-85% για όλα τα σενάρια. Πράγματι, οι εκπομπές αερίων από FWS CWs κατά την αναγωγή τους ανά μονάδα επιφάνειας διαιρούνται με τις κατά κανόνα μικρότερες κατά απόλυτη τιμή απαιτούμενες επιφάνειες για την επεξεργασία των λυμάτων και, επομένως, λογικά διερύνουν ακόμα περισσότερο τη διαφορά τους από τις εκπομπές των HSSF CWs σε όρους g CO_{2,eq}/m²/d. Ως προς το ανθρακικό αποτύπωμα της διαδικασίας επεξεργασίας των λυμάτων, είναι προφανές ότι η επεξεργασία σε FWS CWs συντελεί στην περαιτέρω επιβάρυνση των μαζών των αερίων του θερμοκηπίου – περισσότερο από ότι η επεξεργασία λυμάτων σε HSSF CWs – και όπως παρατηρήθηκε στην ενότητα 4.3, κυρίως μέσω του μεθανίου.

4.4.3.2 Συντελεστής Εκπομπής Αερίων

Εκπομπή CH₄

Για HSSF CWs με βλάστηση αποτελούμενη από κοινά καλάμια (*P.australis*) είναι γνωστό από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (ενότητα 2.4) ότι ο συντελεστής εκπομπής μεθανίου (που ισούται με CH₄/BOD_{in}) κυμαίνεται από 0,9 έως 2,7% (Teiter & Mander, 2005, Sovik et al., 2006, Liu, et al., 2009), με τη μεγαλύτερη τιμή να προέρχεται από την επεξεργασία πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας ορίζεται ουσιαστικά από τη μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών μεθανίου (IPCC, 2006) σε 6%. Φαίνεται ότι σε πραγματικές συνθήκες το ποσοστό του εισερχόμενου οργανικού φορτίου που μετατρέπεται σε αέριο μεθάνιο υπολείπεται του θεωρητικού πιθανώς λόγω καταστολής της μεθανογένεσης από την αυξημένη συγκέντρωση αμμωνίας, ή της συσσώρευσης πτητικών λιπαρών οξέων που περιορίζει το οριακό βήμα του ρυθμού μεθανογένεσης και της υδρόλυσης του οργανικού υλικού ή (σπανιότερα) της υπέρμετρης φόρτισης που προκαλεί έμφραξη του μέσου του υγροβιότοπου (Mander, et al., 2014). Για FWS CWs με βλάστηση αποτελούμενη από κοινά καλάμια, ο συντελεστής εκπομπής μεθανίου κυμαίνεται από 11 έως 17,3%

(Sovik et al., 2006, Gui, et al., 2007, Liu, et al., 2009), ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής για τα μελετούμενα συστήματα της παρούσας εργασίας ορίζεται επίσης από τη μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών μεθανίου (IPCC, 2006) σε 24%. Οι FWS CWs (όπως και οι υπόλοιποι τεχνητοί υδροβιότοποι) συσσωρεύουν οργανικό υλικό με την πάροδο του χρόνου (Mander et al., 2008, 2014, Van der Zaag et al., 2010), οπότε σχηματίζονται παχύτερες οργανικές στρώσεις στην επιφάνεια και προκαλείται έλλειψη οξυγόνου, γεγονός που καταλύει τη μεθανογένεση και έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη εκπομπή CH₄. Σε κάθε περίπτωση, οι FWS CWs παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα μετατροπής των εισερχόμενων οργανικών σε μεθάνιο από τους HSSF CWs (είτε σε πραγματικές είτε σε θεωρητικές συνθήκες) και για το λόγο αυτό αποτελούν μια δυσμενέστερη εναλλακτική επεξεργασίας υγρών αποβλήτων σε όρους επιδείνωσης του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Εκπομπή N₂O

Για τους HSSF CWs ο συντελεστής εκπομπής του υποξειδίου του αζώτου (που ισούται με N₂O/TN_{in}) κυμαίνεται από 0,1 έως 0,4% (Teiter & Mander, 2005, Sovik et al., 2006, Liu, et al., 2009), με τη μεγαλύτερη τιμή να προέρχεται από την επεξεργασία πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής μετά την εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού των εκπομπών N₂O (κατά IPCC) εκτιμάται σε 1,2%. Σε τεχνητούς υδροβιότοπους οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, η σχέση μεταξύ των εκπομπών N₂O και TN_{in} είναι μη γραμμική (σε αντίθεση με τη γραμμική συσχέτιση σε FWS και VSSF CWs) και η επικράτηση απολύτως αναερόβιων συνθηκών μπορεί να εξασφαλίσει την πλήρη απονιτροποίηση. Τιμές της φόρτισης του TN_{in} που ξεπερνούν τα 50 mg N m⁻² hr⁻¹ μπορούν να ενισχύσουν τις αναερόβιες συνθήκες σε HSSF CWs, και σε περίπτωση που υπάρχει αρκετός άνθρακας στο σύστημα (που είναι σύνηθες σε HSSF CWs) η διεργασία της απονιτροποίησης δύναται να ολοκληρωθεί και το κύριο προϊόν να είναι το N₂ – σε αυτή την περίπτωση επομένως οι εκπομπές του N₂O θα βαίνουν ελαττούμενες. Για τους FWS CWs ο συντελεστής εκπομπής του υποξειδίου του αζώτου κυμαίνεται από 0,01 έως 0,2% (Sovik et al., 2006, Gui, et al., 2007, Liu, et al., 2009), με τη μεγαλύτερη τιμή να προέρχεται από την επεξεργασία πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστων αστικών λυμάτων, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής μετά την εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού των εκπομπών N₂O (κατά IPCC) εκτιμάται σε 2%. Διαπιστώνεται ότι οι εκπομπές N₂O από FWS CWs υπολείπονται ως προς το ποσοστό συμμετοχής τους στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα των συγκεκριμένων υδροβιότοπων, όμως σε όρους απόλυτων τιμών είναι περισσότερες των αντίστοιχων εκπομπών N₂O από HSSF CWs.

Εκπομπή CO₂

Για τους HSSF CWs με βλάστηση αποτελούμενη από καλάμια (*P.australis*) ο συντελεστής εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα (που ισούται με CO₂/BOD_{in}) εκτιμάται περί το 35,6% (Teiter & Mander, 2005, Sovik et al., 2006), ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής μετά την εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού των εκπομπών CO₂ (ενότητα 3.4) κυμαίνεται από 160 έως 169%. Στους FWS CWs ο

συντελεστής εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα εκτιμάται περί το 729% (Sovik, et al., 2006), ενώ από την εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού των εκπομπών CO₂ (ενότητα 3.4) ο συντελεστής κυμαίνεται από 182 έως 196%. Από τη βιβλιογραφική ανάλυση αποτελεσμάτων διάφορων υγροβιότοπων με διαφορετική βλάστηση ή/και τύπο εισερχόμενων λυμάτων (ενότητα 2.4) έχει καταγραφεί ότι ο συντελεστής εκπομπής CO₂ κυμαίνεται από 16,5% έως 6930% και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερος του 100% (Mander, et al., 2014), συνεπώς ένα ποσοστό της τάξεως του 160% ή 190% (με το μεγαλύτερο να αντιστοιχεί σε FWS CW) είναι αποδεκτό. Ο μικρότερος συντελεστής υπολογίστηκε σε τεχνητούς υγροβιότοπους οριζόντιας και κατακόρυφης υποεπιφανειακής ροής αραιής βλάστησης. Πρέπει, επομένως, να εκτιμάται ο σημαντικός ρόλος των υδροχαρών φυτών (τύπος φυτού και συντελεστής κάλυψης επιφάνειας υγροβιότοπου), που φέρουν μια μεγάλη ποσότητα ατμοσφαιρικού CO₂ στο σύστημα και για αυτό ορίζουν τη βάση για την κατακράτηση του άνθρακα, και να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του υγροβιότοπου ως παράγοντας επίδρασης.

Συνοπτικά, οι συντελεστές εκπομπής, για τις αέριες εκπομπές των αερίων που υπολογίστηκαν βάσει της ανεπτυγμένης στο κεφάλαιο 3 μεθοδολογίας σε αντιπαραβολή με αντίστοιχες από τη βιβλιογραφία εκπομπές, στην παρούσα εργασία είναι:

Πίνακας 4.170 Συντελεστές Εκπομπής Αερίων από HSSF και FWS CWs

Συντελεστής Εκπομπής	(ΣΕ) _{CH₄}		(ΣΕ) _{N₂O}		(ΣΕ) _{CO₂}	
	(kg CH ₄ /kg BOD _{in})		(kg N ₂ O/kg TN _{in})		(kg CO ₂ /kg BOD _{in})	
	HSSF	FWS	HSSF	FWS	HSSF	FWS
σενάριο 1	0,06	0,24	0,012	0,020	1,692	1,820
σενάριο 2					1,755	1,819
σενάριο 3					1,606	1,963
σενάριο 4					1,606	1,963
βιβλιογραφία	0,009-0,027	0,11	0,001-0,004	0,0001-0,002	0,356	7,292

Το μοντέλο υπολογισμού των αερίων εκπομπών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επομένως, φαίνεται να υπερεκτιμά το παραγόμενο αέριο ανά μονάδα εισερχόμενου φορτίου και συγκεκριμένα το CH₄ κατά 2 φορές, το N₂O κατά 3 έως 10 φορές, ενώ για το CO₂ παρατηρείται μια υποτίμηση των εκπομπών στους FWS CWs κατά 4 φορές και υπερεκτίμηση των εκπομπών στους HSSF CWs κατά 5 φορές.

4.4.3.3 Ανθρακικό Αποτύπωμα Συμβατικών και Εναλλακτικών Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων

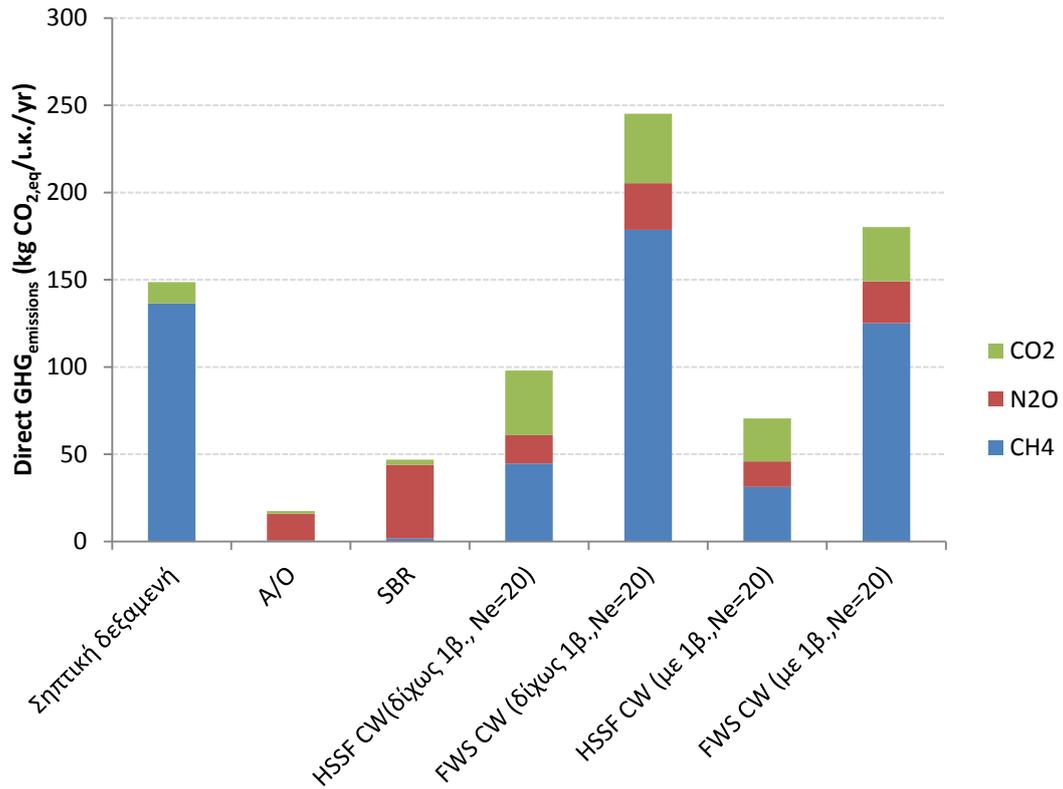
Το ανθρακικό αποτύπωμα, όπως ορίστηκε στην ενότητα 3.5, υπολογίζει το σύνολο των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου οι οποίες προκαλούνται άμεσα ή έμμεσα από τη διαδικασία επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Χρησιμοποιώντας ως

μονάδα μέτρησης το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα ($\text{CO}_{2,\text{eq}}$) επιτρέπεται η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών αερίων του θερμοκηπίου σε μια βάση υπολογισμού η οποία ως μονάδα μέτρησης έχει τη μια μονάδα διοξειδίου του άνθρακα. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το ανθρακικό αποτύπωμα αναφέρεται στις άμεσες (επί τόπου) εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στις άμεσες εκπομπές CO_2 , ενώ οι έμμεσες - εκπομπές ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή εκπομπές που παράγονται εκτός των ορίων του συστήματος και συνδέονται κυρίως με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, και άλλες έμμεσες εκπομπές που συνδέονται με συνοδευτικές δραστηριότητες της κύριας δραστηριότητας επεξεργασίας των λυμάτων, όπως είναι η διαχείριση της παραγόμενης ιλύος - αέριες εκπομπές δεν υπολογίστηκαν και επομένως δεν ελήφθησαν υπόψη.

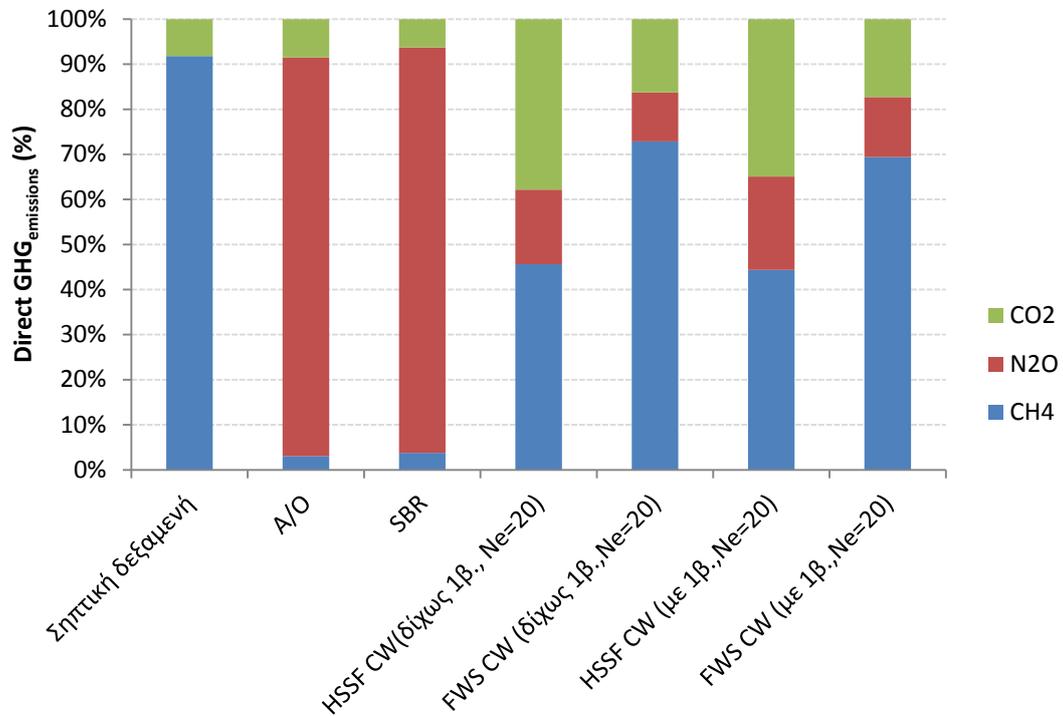
Για την αξιολόγηση ενός συστήματος τεχνητού υγροβιότοπου είναι κρίσιμο να ελεγχθεί, εκτός των απομακρυνόμενων ποσοτήτων ρυπαντικών φορτίων, και η συμβολή του σε όρους αερίων του θερμοκηπίου σε αντιπαραβολή με ανάλογα συμβατικά ή εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων. Οι Dubber και Gill αξιολογώντας διατάξεις και μεθόδους διάθεσης και επεξεργασίας υγρών αποβλήτων τοπικής κλίμακας στην Ιρλανδία, υπολόγισαν το ανθρακικό αποτύπωμα ενός συστήματος σηπτικής δεξαμενής (ως πρωτοβάθμιου σταδίου επεξεργασίας), με τις ανηγμένες εκπομπές ανά ισοδύναμο κάτοικο να φθάνουν τα 149 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /i.k./yr. Οι Bao και Sun υπολόγισαν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου σε δυο συχνά συναντούμενες διατάξεις επεξεργασίας λυμάτων στην Κίνα, τον ανοξικό/οξικό αντιδραστήρα (A/O) και το σειριακό ασυνεχή αντιδραστήρα (SBR) για μια περίοδο 12 μηνών, με τις τιμές τους να ανέρχονται σε 199,12 g $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /m³ και 534,93 g $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /m³ λυμάτων αντίστοιχα. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση της ενότητας 2.4 είναι γνωστό, ακόμα, ότι οι εκπομπές ενός VSSF CW είναι 3,18 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /kg $\text{BOD}_{\text{removed}}$ (Mander, et al., 2014). Οι συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ) για μικρούς πληθυσμούς (πληθυσμός < 10000 i.k.), οι οποίες είναι συστήματα παρατεταμένου αερισμού δίχως πρωτοβάθμια επεξεργασία, εκπέμπουν 200 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /i.k./yr εκ των οποίων μόλις το 52% αφορά τις άμεσες εκπομπές, το 21% τις εκπομπές ηλεκτρικής ενέργειας και το 27% τις υπόλοιπες έμμεσες εκπομπές (Mamais, et al., 2015). Ανάγοντας τα παραπάνω δεδομένα σε όρους kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /i.k./yr και παραθέτοντας και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού αέριων εκπομπών για HSSF και FWS τεχνητούς υγροβιότοπους προκύπτουν τα δεδομένα των άμεσων αέριων εκπομπών που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.171 Άμεσες Αέριες Εκπομπές Συμβατικών και Εναλλακτικών Συστημάτων Επεξεργασίας Λυμάτων

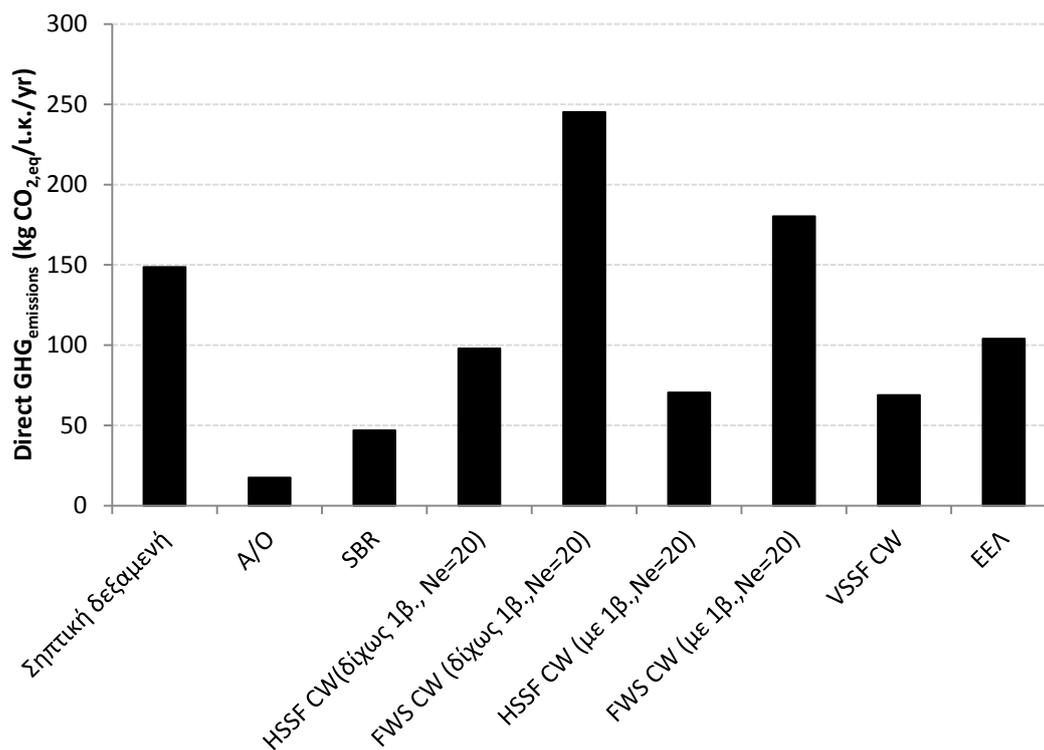
Παράμετρος	Μονάδες	Σηπτική δεξαμενή	A/O	SBR	HSSF CW (δίχως πρωτοβάθμια, Ne=20)	FWS CW (δίχως πρωτοβάθμια, Ne=20)	HSSF CW (με πρωτοβάθμια, Ne=20)	FWS CW (με πρωτοβάθμια, Ne=20)	VSSF CW	ΕΕΛ
CH₄ _{εκπ}	kg/τ.κ./yr	4,02	0,02	0,05	1,31	5,26	0,92	3,68		
	kg CO _{2,eq} /τ.κ./yr	137	0,53	1,78	45	179	31	125		
	kg CO _{2,eq} /yr	13651	53	178	4468	17870	3127	12509		
N₂O _{εκπ}	kg/τ.κ./yr	0	0,05	0,141	0,054	0,089	0,049	0,081		
	kg CO _{2,eq} /τ.κ./yr	0	15,4	42,1	16	27	15	24		
	kg CO _{2,eq} /yr	0	1543	4215	1620	2666	1458	2400		
CO₂ _{εκπ}	kg/τ.κ./yr	12	1,5	3	37	40	25	31		
	kg CO _{2,eq} /τ.κ./yr	12	1,5	3	37	40	25	31		
	kg CO _{2,eq} /yr	1215	148	293	3705	3986	2462	3116		
Εκπομπές _{ανηγμ.}	kg CO _{2,eq} /τ.κ./yr	149	17	47	98	245	70	180	69	104
	kg CO _{2,eq} /yr	14866	1744	4686	9793	24523	7048	18025	6885	10400



Σχήμα 4.39 Άμεσες Εκπομπές GHG και CO₂ σε Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων



Σχήμα 4.40 Κατανομή CH₄,N₂O,CO₂ στις Άμεσες Αέριες Εκπομπές Συστημάτων Επεξεργασίας Λυμάτων



Σχήμα 4.41 Άμεσες Αέριες Εκπομπές σε Εναλλακτικά και Συμβατικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων

Οι FWS CWs φαίνεται πως είναι η δυσμενέστερη επιλογή σε όρους άμεσων αέριων εκπομπών από κάθε άλλο εναλλακτικό ή συμβατικό σύστημα επεξεργασίας λυμάτων καθώς είτε δέχονται τα αστικά υγρά απόβλητα αφού αυτά έχουν υποστεί πρώτα πρωτοβάθμια επεξεργασία είτε όχι, διατηρούν τις δυο υψηλότερες τιμές άμεσων εκπομπών (245 και 180 kg CO_{2,eq}/t.k./yr). Πρέπει να σημειωθεί επιπλέον, ότι στην περίπτωση που διευρύνουμε τα όρια του προς μελέτη συστήματος και, εκτός του τεχνητού υδροβιότοπου, συμπεριλάβουμε και τη διάταξη πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (η οποία για κοινότητες μικρής κλίμακας συνήθως αποτελείται από μια σηπτική δεξαμενή), τότε θα πρέπει να εκτελεστεί μια προσαύξηση στις εκπομπές των υδροβιότοπων ώστε να συνυπολογιστούν και οι εκπομπές του σταδίου της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, με το τελικό αποτέλεσμα να είναι ακόμα δυσμενέστερο. Σε όρους ολικών εκπομπών, ωστόσο, η αποδοτικότητα των FWS CWs μπορεί να αποδειχθεί μεγαλύτερη της αποδοτικότητας των VSSF CWs εξαιτίας των μικρότερων απαιτήσεων σε κατασκευαστικά υλικά και κατανάλωση ενέργειας (Vymazal, 2007).

Τα συστήματα HSSF CWs είναι ευμενέστερα των FWS CWs, με τις άμεσες εκπομπές τους να υπολείπονται κατά 60% των αντίστοιχων εκπομπών των FWS CWs για το ίδιο σενάριο. Η συνεισφορά τους στα αέρια του θερμοκηπίου γίνεται και σε αυτό τον τύπο υδροβιότοπων πρωτίστως με το μεθάνιο (το CH₄ είναι το 45% των άμεσων εκπομπών, με τιμή 31 έως 45 kg CO_{2,eq}/t.k./yr), ωστόσο υπάρχει μεγαλύτερη συμμετοχή σε σχέση με τους FWS CWs από το N₂O (το N₂O είναι το 16 με 20% των άμεσων εκπομπών), με την τιμή του να ανέρχεται στα 15 με 16 kg CO_{2,eq}/t.k./yr, σε

σχέση με τα 24 με 27 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr των FWS CWs, που συνιστά το 10 με 13% των άμεσων εκπομπών από τους FWS CWs. Ένα σύστημα HSSF CW με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα συγκαταλέγεται μεταξύ των ηπιότερων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων (μαζί με τα συστήματα VSSF CW και μετά τον ανοξικό/οξικό αντιδραστήρα και το SBR) σε όρους άμεσης εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (άμεσες εκπομπές από 70 έως 98 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr) και αποτελεί, επομένως, μια αποδοτική εναλλακτική των συμβατικών ΕΕΛ, τουλάχιστον σε όρους απομάκρυνσης ρυπαντικών φορτίων και μειωμένων αερίων εκπομπών για την επεξεργασία λυμάτων μικρών κοινοτήτων.

Στο ίδιο μοτίβο, οι VSSF CWs αποτελούν την καλύτερη εναλλακτική επεξεργασίας λυμάτων μικρών κοινοτήτων σε όρους άμεσης εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, με τις άμεσες εκπομπές τους να ανέρχονται σε 69 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr και με επιπλέον πλεονέκτημα την ακόμα μικρότερη απαίτηση επιφάνειας επεξεργασίας σε σχέση με τους HSSF CWs. Θα πρέπει, βέβαια, να τονιστεί ότι για τους τεχνητούς υδροβιότοπους εν γένει, οι ποσότητες των έμμεσων εκπομπών είναι μικρής τιμής διότι οι λειτουργικές απαιτήσεις ενός υδροβιότοπου δεν περιλαμβάνουν σημαντική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ή καυσίμων, πέρα από μια ενδεχόμενη άντληση για την προσαγωγή των αποβλήτων και την κατανάλωση ενέργειας για την κατασκευή του υδροβιότοπου - σε αντίθεση, για παράδειγμα, με συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων οι οποίες καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για τις ανάγκες του αερισμού των λυμάτων και της λειτουργίας του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού παράλληλα με τις ανάγκες προσαγωγής των λυμάτων και κατασκευής των εγκαταστάσεων – με αποτέλεσμα οι ολικές εκπομπές να παρουσιάζουν παραπλήσια τιμή με τις άμεσες εκπομπές αερίων, σε αντιπαράβολη με συμβατικές εγκαταστάσεις στις οποίες οι άμεσες εκπομπές συνιστούν μόλις το 52% των ολικών εκπομπών (Mamais, et al., 2015).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί σε συστήματα τύπου SBR στα οποία η εκπομπή N₂O είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης εκπομπής από CWs κατά 37 έως 62%. Το εν γένει ανθρακικό τους αποτύπωμα, βέβαια, συγκαταλέγεται μεταξύ των ηπιότερων σε όρους άμεσων εκπομπών (47 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr), μόλις πίσω από το αποτύπωμα του ανοξικού/οξικού αντιδραστήρα. Θα πρέπει, ωστόσο, να ληφθούν υπόψη οι σημαντικές έμμεσες εκπομπές λόγω της λειτουργίας του (αντλήσεις, αερισμός) προτού αξιολογηθεί ως μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση, καθώς συνιστούν το 38% (περί τα 29 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr) των ολικών εκπομπών (Bao, et al., 2016).

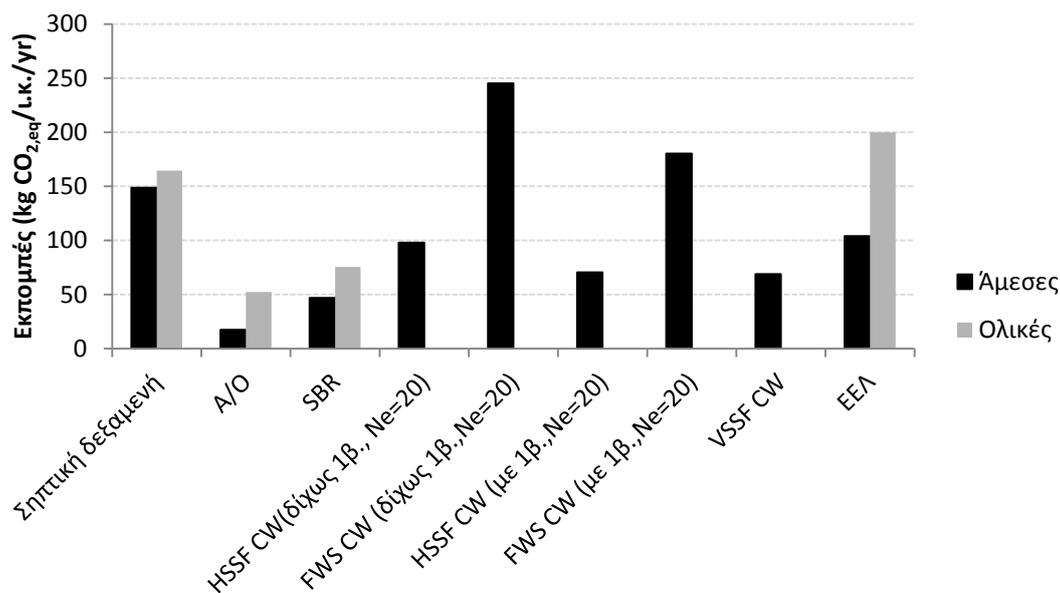
Ο ανοξικός/οξικός ανιδραστήρας έχει τη μικρότερη επίπτωση σε όρους άμεσων αερίων εκπομπών (17 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr), ωστόσο οι εκπομπές N₂O (15,4 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr) διαθέτουν όμοια τιμή με τις εκπομπές N₂O από HSSF CWs (16 και 15 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr για εισερχόμενα λύματα δίχως και με πρωτοβάθμια επεξεργασία αντίστοιχα) και θα πρέπει και σε αυτή την περίπτωση να ληφθούν υπόψη οι έμμεσες εκπομπές λόγω της λειτουργίας του (αντλήσεις, αερισμός) προτού αξιολογηθεί ως μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση, καθώς συνιστούν το 50% των ολικών εκπομπών (Bao, et al., 2016). Φαίνεται, πάντως, ότι και σε όρους ολικών εκπομπών ο

ανοξικός/οξικός αντιδραστήρας αποτελεί την καλύτερη εναλλακτική επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Οι σηπτικές δεξαμενές εκπέμπουν την τρίτη μεγαλύτερη ποσότητα αερίων κατά την επεξεργασία λυμάτων, δεν εκπέμπουν N₂O και συντελούν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου κυρίως (σε ποσοστό άνω του 90%) μέσω των υψηλών εκπομπών μεθανίου (137 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr), οι οποίες είναι συγκρίσιμες με τις δυσμενείς εκπομπές των FWS CWs (179 και 125 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr). Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια μελετώνται διατάξεις συλλογής του μεθανίου τοποθετημένες επικεφαλής των επίγειων, κατά κανόνα, σηπτικών δεξαμενών. Είναι απαραίτητο, βέβαια, να τονιστεί ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων κατασκευής και εφαρμογής σηπτικών δεξαμενών, επιδιώκεται συνδυασμός με επιπλέον σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (στο ρόλο του σταδίου δευτεροβάθμιας επεξεργασίας), με τα συνηθέστερα να είναι τα συστήματα εδαφικής εφαρμογής ή τα συστήματα υγροβιοτόπων, με αποτέλεσμα η σύσταση των εκπομπών να μεταβάλλεται (με την προσθήκη κυρίως της εκπομπής N₂O) και η ποσότητά τους να αυξάνεται. Πρέπει να σημειωθεί, βέβαια, ότι οι άμεσες εκπομπές της σηπτικής δεξαμενής συνιστούν το 90% των ολικών της εκπομπών, με τις ολικές της εκπομπές να ισούνται με 164,5 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr.

Οι συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων για μικρούς εξυπηρετούμενους πληθυσμούς τείνουν να έχουν κατά 27% εντονότερη συμβολή στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από το αντίστοιχο αποτύπωμα συμβατικών εγκαταστάσεων για πληθυσμούς μεγαλύτερους των 100000 κατοίκων (Mamais, et al., 2015). Σε σύγκριση με τους τεχνητούς υγροβιοτόπους, οι συμβατικές ΕΕΛ μικρής κλίμακας βρίσκονται μεταξύ των FWS και HSSF CWs σε ό,τι αφορά το ανθρακικό τους αποτύπωμα, με την τιμή των άμεσων εκπομπών να κυμαίνεται περί τα 104 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr. Οι άμεσες αέριες εκπομπές συνιστούν μόλις το 52% των ολικών εκπομπών (Mamais, et al., 2015), οι οποίες κυμαίνονται περί τα 200 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr.

Αν, επομένως, στη μελέτη συμπεριλαμβανόντουσαν και τα παραπάνω δεδομένα ολικών εκπομπών, οι κατανομές θα είχαν ως εξής:



Σχήμα 4.42 Ολικές και Άμεσες Αέριες Εκπομπές σε Εναλλακτικά και Συμβατικά Συστήματα Επεξεργασίας Λυμάτων

Σύμφωνα και με τις ολικές αέριες εκπομπές, επομένως, και δεχόμενοι ότι οι έμμεσες εκπομπές από τεχνητούς υδροβιότοπους δε θα μεταβάλλουν σημαντικά τις παραπάνω κατανομές η σειρά επιλογής συστήματος επεξεργασίας λυμάτων από το δυσμενέστερο προς το ευμενέστερο σε όρους ανθρακικού αποτυπώματος είναι:

$$FWS CW_{\text{δίχως } 1\beta.} > EEA > FWS CW_{\text{με } 1\beta.} > \text{Σηπτική Δεξαμενή} > \\ > HSSF CW_{\text{δίχως } 1\beta.} > SBR > HSSF CW_{\text{με } 1\beta.} > VSSF CW > A/O$$

Για τη βελτίωση του αποτελεσμάτος της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, τέλος, σε όρους αέριων εκπομπών, απομάκρυνσης ρυπαντικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών, τα τελευταία χρόνια προτείνεται ο συνδυασμός διατάξεων VSSF και HSSF CWs. Πρώτα κατασκευάζεται ένας VSSF CW για να εξασφαλίζεται η υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, το οποίο εγκλωβίζεται ευκολότερα στο δίκτυο των αγωγών κατά την κατακόρυφη διοχέτευση των λυμάτων σε σχέση με την παροχέτευση των λυμάτων σε υδροβιότοπο οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής, με την παρουσία του οποίου συντελείται αποδοτικά η διεργασία της νιτροποίησης και η πρώτη ελάττωση του φορτίου αζώτου. Ακολουθεί η κατασκευή ενός HSSF CW στον οποίο η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου περιορίζεται και πλέον ενεργοποιείται η διεργασία της απονιτροποίησης, με δεδομένο εισόδου τα μειωμένα πλέον νιτρικά και το οργανικό φορτίο που προέρχονται από τον VSSF CW, κατά την οποία παράγονται οι επακόλουθα μειωμένες αέριες μορφές του αζώτου (N₂O ή N₂). Για ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα, δεχόμενοι ότι η τιμή των άμεσων εκπομπών στους HSSF CWs κυμαίνεται περί τα 98 kg CO_{2,eq}/l.k./yr και η τιμή των VSSF CWs περί τα 69 kg CO_{2,eq}/l.k./yr, εκτιμάται ότι η τιμή των άμεσων αέριων εκπομπών θα κυμαίνεται περί τα 80 kg CO_{2,eq}/l.k./yr.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας υπήρξε η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του αποτυπώματος άνθρακα σε τεχνητούς υδροβιότοπους κατά την επεξεργασία αστικών υγρών αποβλήτων. Στα πλαίσια αυτής διενεργήθη διαστασιολόγηση, κατάρτιση μαθηματικού μοντέλου για τον υπολογισμό των στοιχείων εκροής και των αέριων εκπομπών και αξιολόγηση των τεχνητών υδροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (HSSF CWs) και ελεύθερης επιφανειακής ροής (FWS CWs). Ο σχεδιασμός έγινε για 6 πληθυσμιακά δεδομένα (100, 200, 500, 1000, 1500 και 2000 ισοδύναμων κατοίκων), για δυο διαφορετικές ποιότητες εκροής, δηλαδή για τη διάθεση των επεξεργασμένων πλέον αστικών υγρών αποβλήτων σε κανονικό και ευαίσθητο αποδέκτη και για δυο τύπους εισερχόμενων λυμάτων - αστικά υγρά απόβλητα τα οποία δεν έχουν υποστεί πρωτοβάθμια επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για κάθε τύπο υδροβιότοπου, για σύγκριση μεταξύ των αλλά και για σύγκριση με αντίστοιχα συμβατικά ή εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της ανάλυσης των αποτελεσμάτων του σχεδιασμού, της εφαρμογής του μοντέλου υπολογισμού των απομακρυνόμενων ρυπαντικών φορτίων και των αέριων εκπομπών και της αξιολόγησης των τεχνητών υδροβιότοπων.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της επιμέρους αξιολόγησης των τεχνητών υδροβιότοπων οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής (HSSF CWs) και των τεχνητών υδροβιότοπων ελεύθερης επιφανειακής ροής (FWS CWs) οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Το κριτήριο απομάκρυνσης του ολικού αζώτου είναι το δυσμενέστερο για κάθε τύπο εισερχόμενων λυμάτων, εξυπηρετούμενο πληθυσμό, όριο τελικής εκροής και θερμοκρασία και, επομένως, αυτό που καθορίζει το τελικά επιλεχθέν εμβαδόν του τεχνητού υδροβιότοπου, με τις μεγαλύτερες τιμές επιφάνειας να εξάγονται για τις περιπτώσεις με τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ της συγκέντρωσης εισόδου και εξόδου του ολικού αζώτου, δηλαδή για το σενάριο διάθεσης πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστων λυμάτων σε ευαίσθητο αποδέκτη (σενάριο 2), κατά το οποίο η απομάκρυνση του TN αγγίζει το 80% (απομείωση από τα 50 στα 10 mg/L). Οι τιμές της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου σε όρους BOD₅ διασφαλίζεται ότι είναι μικρότερες των 20 mg/L σε κάθε περίπτωση από τη στιγμή που η επιφάνεια που προσφέρεται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων προκύπτει από το δυσμενέστερο κριτήριο απομάκρυνσης ολικού αζώτου και άρα υπερβαίνει το απαιτούμενο βάσει του κριτηρίου απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου εμβαδόν.
2. Ο γραμμικός χαρακτήρας των σχέσεων που απαρτίζουν τον πυρήνα του μαθηματικού μοντέλου αναπαράστασης της μεταβολής του οργανικού

φορτίου και της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου - με τη θεώρηση κινητικών πρώτης τάξης για τη μεταβολή των συγκεντρώσεων με τους αντίστοιχους θερμοκρασιακά εξαρτώμενους συντελεστές τους - συντελούν στην εξαγωγή αποτελεσμάτων ευθέως αναλόγων των πληθυσμιακών δεδομένων και επακόλουθα της παροχής σχεδιασμού. Η απαιτούμενη επιφάνεια για τους HSSF CWs και FWS CWs κυμαίνεται από 7,4 έως 16,9 και 3,4 έως 7,3 m²/ι.κ. αντιστοίχως. Το ίδιο γραμμικό μοτίβο αποτυπώνεται και για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και του ολικού αζώτου, με τις τιμές για το οργανικό φορτίο σε όρους BOD₅ για τους HSSF και FWS CWs να είναι από 2,7 έως 6,5 g/m²/d και από 6,1 έως 14,3 g/m²/d αντίστοιχα. Οι τιμές του απομακρυνόμενου φορτίου ολικού αζώτου για HSSF και FWS CWs κυμαίνονται από 0,39 έως 0,51 g/m²/d και από 1,03 έως 1,41 g/m²/d αντίστοιχα.

3. Οι τιμές των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου παρουσιάζουν διαφορά μόνο με βάση το αν τα εισερχόμενα λύματα έχουν υποστεί νωρίτερα πρωτοβάθμια επεξεργασία ή όχι, με το CH₄ να υπολείπεται κατά 30% και το N₂O κατά 10% μετά την επεξεργασία πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων σε αντιπαραβολή με τις εκπομπές από την επεξεργασία των πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστων λυμάτων. Για τους HSSF CWs, οι εκπομπές CO₂ αυξάνονται κατά 3,7% καθώς το όριο εκροής του TN γίνεται αυστηρότερο για την περίπτωση των πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστων υγρών αποβλήτων, ενώ για τα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα οι διαφορές στις εκπομπές αναλόγως του κριτηρίου εκροής είναι μηδενικές. Για τους FWS CWs, οι εκπομπές CO₂ παραμένουν πρακτικά σταθερές καθώς το όριο εκροής του TN γίνεται αυστηρότερο για την περίπτωση των πρωτοβάθμια ανεπεξέργαστων υγρών αποβλήτων (απόκλιση 0,1%), ενώ για τα πρωτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα οι εκπομπές μειώνονται ελαφρώς (3,5%) όταν το όριο για το άζωτο εξόδου υποβαθμίζεται στα 10 mg/L.
4. Η σύσταση των αερίων εκπομπών για τους HSSF CWs και FWS CWs κατά μέσο όρο είναι 45% μεθάνιο, 19% υποξείδιο του αζώτου και 36% διοξείδιο του άνθρακα και 71% μεθάνιο, 12% υποξείδιο του αζώτου και 17% διοξείδιο του άνθρακα αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, τόσο οι HSSF όσο και οι FWS τεχνητοί υγροβιότοποι, ως προς το ανθρακικό τους αποτύπωμα, συνεισφέρουν περισσότερο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μέσω των εκπομπών CH₄, στοιχείο που επιβεβαιώνεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία (Mander, et al., 2014). Ταυτόχρονα, οι FWS τεχνητοί υγροβιότοποι παράγουν τουλάχιστον τέσσερις φορές περισσότερο μεθάνιο από τους HSSF CWs.
5. Η επίδραση της θερμοκρασίας στις αέριες εκπομπές είναι σημαντική. Για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 15 °C, οι ολικές εκπομπές αυξάνονται κατά 15% και 16%, οι εκπομπές N₂O τετραπλασιάζονται και υπερδιπλασιάζονται, οι εκπομπές CH₄ αυξάνονται κατά 11% και 16% και οι εκπομπές CO₂ ελαττώνονται κατά 38% και 19% στους HSSF και FWS CWs αντιστοίχως. Η μεταβολή του ποσοστού συμμετοχής των εκπομπών N₂O στις συνολικές εκπομπές αιτιολογείται από το γεγονός ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες,

λόγω του υψηλότερου ρυθμού απομάκρυνσης αζώτου, μεγαλύτερη μάζα αζώτου είναι διαθέσιμη προς τις διεργασίες παραγωγής N₂O, και κυρίως της νιτροποίησης. Στις εκπομπές CO₂, αντίθετα, η ενίσχυση της παραμέτρου της νιτροποίησης συνεπάγεται την αύξηση του καταναλισκόμενου διοξειδίου του άνθρακα για τις ανάγκες της σύνθεσης νέας βιομάζας.

6. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι απαιτήσεις εκροής, κυρίως ως προς το άζωτο. Καθώς το όριο εξόδου για το ολικό άζωτο αυστηροποιείται, οι αέριες εκπομπές αυξάνονται – η διαφορά ανάμεσα στις ολικές εκπομπές για άζωτο εξόδου κοντά στα 20 mg/L και τα 5,0 mg/L είναι της τάξεως του 19% και 13% για τους HSSF και FWS CWs αντίστοιχως. Η εξέλιξη αυτή είναι αναμενόμενη, αν ληφθεί υπόψη ότι στην περίπτωση του αυστηρότερου ορίου εκροής η μέγιστη δυνατή ποσότητα BOD και TN θα πρέπει να απομακρυνθεί βάσει σχεδιασμού και επακόλουθα και οι εκπομπές CH₄, N₂O και CO₂ θα είναι οι μεγαλύτερες δυνατές. Οι εκπομπές του υποξειδίου του αζώτου διπλασιάζονται και αυξάνονται κατά 82%, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζουν μια αύξηση 11% και 5%, και οι εκπομπές CH₄ αυξάνονται κατά 3% και 8%, για HSSF και FWS CWs αντίστοιχα.

Η συγκριτική αξιολόγηση των HSSF και FWS CWs καταλήγει στα εξής:

1. Με δεδομένο ότι η απαιτούμενη επιφάνεια του τεχνητού υγροβιότοπου επιλέγεται βάσει του κρίσιμου κριτηρίου απομάκρυνσης του TN, η επιφάνεια η οποία απαιτείται για την επεξεργασία των λυμάτων είναι σε κάθε σενάριο μεγαλύτερη για έναν HSSF CW (7 έως 17 m²/ι.κ.) κατά 54 με 57% από την αντίστοιχη για έναν FWS CW (3 έως 7 m²/ι.κ.). Στην περίπτωση που το κριτήριο απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου ήταν το μόνο που λαμβάνετο υπόψη για το σχεδιασμό, τότε θα απαιτούντο μικρότερες επιφάνειες για τους HSSF CWs (5,5 έως 6,5 m²/ι.κ.) και τους FWS CWs (3 έως 4 m²/ι.κ.), με τις τιμές αυτές να είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες της διεθνούς βιβλιογραφίας.
2. Πραγματοποιώντας την αναγωγή των εκπομπών σε εκπομπές ανά μονάδα ισοδύναμου πληθυσμού ή ανά μονάδα παροχής εισερχόμενων λυμάτων, εύκολα διαπιστώνεται πως οι άμεσες εκπομπές των FWS είναι περισσότερες από τις αντίστοιχες των HSSF CWs κατά 60%.

Η σύγκριση των τεχνητών υγροβιότοπων με ανάλογης κλίμακας συμβατικά ή εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων συνοψίζεται στις εξής προτάσεις:

1. Οι FWS CWs φαίνεται πως είναι η δυσμενέστερη επιλογή σε όρους άμεσων αέριων εκπομπών από κάθε άλλο εναλλακτικό ή συμβατικό σύστημα επεξεργασίας λυμάτων καθώς είτε δέχονται τα αστικά υγρά απόβλητα αφού αυτά έχουν υποστεί πρώτα πρωτοβάθμια επεξεργασία είτε όχι, διατηρούν τις δυο υψηλότερες τιμές άμεσων εκπομπών (245 και 180 kg CO_{2,eq}/ι.κ./yr). Πρέπει να σημειωθεί επιπλέον, ότι στην περίπτωση που διευρύνουμε τα όρια του προς μελέτη συστήματος και, εκτός του τεχνητού υγροβιότοπου,

συμπεριλάβουμε και τη διάταξη πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (η οποία για κοινότητες μικρής κλίμακας συνήθως αποτελείται από μια σηπτική δεξαμενή), τότε εκτιμάται ότι οι εκπομπές αυξάνονται σημαντικά. Σε όρους ολικών εκπομπών, ωστόσο, η αποδοτικότητα των FWS CWs μπορεί να αποδειχθεί μεγαλύτερη της αποδοτικότητας των VSSF CWs εξαιτίας των μικρότερων απαιτήσεων σε κατασκευαστικά υλικά και κατανάλωση ενέργειας (Vymazal, 2007).

2. Τα συστήματα HSSF CWs είναι ευμενέστερα των FWS CWs, με τις άμεσες εκπομπές τους να υπολείπονται κατά 60% των αντίστοιχων εκπομπών των FWS CWs. Η συνεισφορά τους στα αέρια του θερμοκηπίου γίνεται και σε αυτό τον τύπο υδροβιότοπων πρωτίστως με το μεθάνιο (το CH₄ είναι το 45% των άμεσων εκπομπών, με τιμή 31 έως 45 kg CO_{2,eq}/l.k./yr), ωστόσο υπάρχει μεγαλύτερη συμμετοχή σε σχέση με τους FWS CWs από το N₂O (το N₂O είναι το 16 με 20% των άμεσων εκπομπών), με την τιμή του να ανέρχεται στα 15 με 16 kg CO_{2,eq}/l.k./yr, σε σχέση με τα 24 με 27 kg CO_{2,eq}/l.k./yr των FWS CWs, που συνιστά το 10 με 13% των άμεσων εκπομπών από τους FWS CWs. Ένα σύστημα HSSF CW με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα συγκατατάγεται μεταξύ των ηπιότερων συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων (μαζί με τα συστήματα VSSF CW και μετά τον ανοξικό/οξικό αντιδραστήρα και το SBR) σε όρους άμεσης εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (άμεσες εκπομπές από 70 έως 98 kg CO_{2,eq}/l.k./yr) και αποτελεί, επομένως, μια αποδοτική εναλλακτική των συμβατικών ΕΕΛ, τουλάχιστον σε όρους απομάκρυνσης ρυπαντικών φορτίων και μειωμένων αερίων εκπομπών για την επεξεργασία λυμάτων μικρών κοινοτήτων.
3. Για τη βελτίωση του αποτελεσμάτος της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων σε όρους αερίων εκπομπών, απομάκρυνσης ρυπαντικών φορτίων και αιωρούμενων στερεών, προτείνεται ο συνδυασμός διατάξεων VSSF και HSSF CWs. Πρώτα κατασκευάζεται ένας VSSF CW για να εξασφαλίζεται η υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου με την παρουσία του οποίου συντελείται αποδοτικά η διεργασία της νιτροποίησης και η πρώτη ελάττωση του φορτίου αζώτου. Ακολουθεί η κατασκευή ενός HSSF CW στον οποίο ενεργοποιείται η διεργασία της απονιτροποίησης, με δεδομένο εισόδο τα μειωμένα πλέον νιτρικά και το οργανικό φορτίο που προέρχονται από τον VSSF CW, κατά την οποία παράγονται οι επακόλουθα μειωμένες αέριες μορφές του αζώτου (N₂O ή N₂). Για ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα, δεχόμενοι ότι η τιμή των άμεσων εκπομπών στους HSSF CWs κυμαίνεται περί τα 98 kg CO_{2,eq}/l.k./yr και η τιμή των VSSF CWs περί τα 69 kg CO_{2,eq}/l.k./yr, εκτιμάται ότι η τιμή των άμεσων αερίων εκπομπών θα κυμαίνεται περί τα 80 kg CO_{2,eq}/l.k./yr.
4. Με βάση τη συγκριτική αξιολόγηση μιας σειράς συστημάτων μικρής κλίμακας για την επεξεργασία λυμάτων και δεχόμενοι ότι οι έμμεσες εκπομπές από τεχνητούς υδροβιότοπους δε θα μεταβάλλουν σημαντικά τις κατανομές των ολικών εκπομπών, η σειρά επιλογής συστήματος επεξεργασίας λυμάτων από το δυσμενέστερο προς το ευμενέστερο σε όρους ανθρακικού αποτυπώματος είναι:

$FWS CW_{\delta\chi\omega\varsigma 1\beta.} > EEA > FWS CW_{\mu\epsilon 1\beta.} > \text{Σηπτική Δεξαμενή} >$
 $> HSSF CW_{\delta\chi\omega\varsigma 1\beta.} > SBR > HSSF CW_{\mu\epsilon 1\beta.} > VSSF CW > A/O$

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Al-Omari, A. & Fayyad, M., 2003. Treatment of domestic wastewater by subsurface flow constructed wetlands in Jordan. In: *Desalination*, pp. 27-39.

Altor, A. & Mitsch, W., 2008. Pulsing hydrology, methane emissions, and carbon dioxide fluxes in created marshes: a 2- year ecosystem study. Στο: *Wetlands*, pp. 423-438.

Bao, Z., Sun, S. & Sun, D., 2016. Assessment of greenhouse gas emission from A/O and SBR wastewater treatment plants in Beijing, China. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 28 December, Issue 108, pp. 108-114.

Bavor, H., Roser, D., McKersie, S. & Breen, P., 1988. *Treatment of secondary effluent*, Richmind, NSW, Australia: s.n.

Bock, E., Koops, H. & Harms, A., 1986. Cell biology of nitrifying bacteria. Στο: J.J.Prosser, επιμ. *Nitrification (Society for General Microbiology publication)*. Oxford: IRL Press, pp. 17-38.

Brix, H., 1993. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. Στο: A. Moshiri, επιμ. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Boca Raton(Florida): CRC Press, pp. 9-22.

Brix, H., 1994. Constructed wetlands for municipal wastewater treatment in Europe. Στο: W.J.Mitsch, επιμ. *Global wetlands: Old world and new*. Amsterdam: Elsevier, pp. 325-333.

Brix, H., 1994. Functions of macrophytes in constructed wetlands. Στο: *Water Science Technology*, pp. 71-78.

Brix, H., 1994. Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status and future perspectives. Στο: *Water Science Technology*, pp. 209-223.

Chiemchaisri, C. και συν., 2008. Leachate treatment and greenhouse gas emission in subsurface horizontal horizontalflow constructed wetland. *Bioresour. Technol*, Issue 100 (16), pp. 3808-3814.

Cooper, P. (., 1990. *European design and operations guidelines for reed bed treatment systems*

Cooper, P., Job, G., Green, M. & Shutes, R., 1996. *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. Marlow: WRc Publications.

Crites, R. & Tchobanoglous, G., 1998. *Small and decentralized wastewater management systems*. s.l.:The McGraw-Hill Companies.

Czepiel, P., Crill, P. & Harriss, R., 1995. Nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.*, Issue 29, pp. 2352-2366.

DLWC, 1998. *The constructed wetland manual, Vol.2*, New South Wales, Australia

Dubber, D. & Gill, L., 2014. Application of On-Site Wastewater Treatment in Ireland and Perspectives on Its Sustainability. *Sustainability*, 24 March, Issue 6, pp. 1623-1642.

EPA, 1988. *Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment*, Cincinnati, OH 45268

Fey, A., Benckiser, G. & Ottow, J., 1999. Emissions of nitrous oxide from a constructed wetland using a groundfilter and macrophytes in waste-water waterpurification of a dairy farm. *Biol. Fertil. Soils*, Issue 29 (4), pp. 354-359.

Garcia, J. και συν., 2007. Anaerobic biodegradation tests and gas emissions from subsurface flow constructed wetlands. *Bioresources Technology*, Issue 98 (16), pp. 3044-3052.

Giraldo, E. & Zarate, E., 2001. Development of a conceptual model for vertical flow wetland metabolism. Στο: *Water Science Technology*. s.l.:s.n., pp. 11-12, 273-280.

Grant, W. & Long, P., 1981. *Environmental microbiology*. Glasgow: Blackie & Son.

Greenway, M. & Woolley, A., 1999. Constructed wetlands in Queensland: Performance efficiency and nutrient bioaccumulation. In: *Ecological Engineering.*, pp. 39-55.

Gui, P., Inamori, R., Matsumura, M. & Inamori, Y., 2007. Evaluation of constructed wetlands by waste water purification ability and greenhouse gas emissions. *Water Sci. Technol.*, Issue 56 (3), pp. 49-55.

Hammer, D., 1989. *Constructed wetlands for wastewater treatment*. Chelsea: Lewis Publishers.

Hauk, R., 1984. Atmospheric nitrogen chemistry: nitrification, denitrification and their relationships. Στο: O.Hatzinger, επιμ. *The handbook of environmental chemistry*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 105-127.

Hernandez, M. & Mitsch, W., 2006. Influence of hydrologic pulses, flooding frequency, and vegetation on nitrous oxide emissions from created riparian marshes. *Wetlands*, Issue 26, pp. 862-877.

Herskowitz, J., 1986. *Listowel artificial marsh project report*, Toronto, Ontario, Canada

Higgins, J., Hurd, S. & Weil, C., 1999. *The Use of Engineered Wetlands to Treat Recalcitrant Wastewaters*. s.l., 4th International Conference on Ecological Engineering.

IPCC, 2013. Methodological Guidance on Lands with Wet and Drained Soils, and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Στο: T. Hiraishi, και συν. επιμ. *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*.:IPCC, Switzerland.

IPCC, G., 2006. Constructed wetlands for wastewater treatment. Στο: C. Gordon & D. Petrova, επιμ., pp. 7-21.

Jia, W. και συν., 2011. Nitrous oxide emissions from surface flow and subsurface flow constructed wetland microcosms: effect of feeding strategies. *Ecol. Eng.*, Issue 37 (11), pp. 1815-1821.

Johansson, A., Gustavsson, A., Oquist, M. & Svensson, B., 2004. Methane emissions from a constructed wetland treating wastewater – seasonal and spatial distribution and dependence on edaphic factors. *Water Res.*, Issue 38 (18), pp. 3960-3970.

Johansson, A., Klemedtsson, A., Klemedtsson, L. & Svensson, B., 2003. Nitrous oxide exchanges with the atmosphere of a constructed wetland treating wastewater – parameters and implications for emission factors. *Tellus B*, Issue 55 (3), pp. 737-750.

Kadlec, R., 1994. *Surface flow constructed wetlands*, Proc. 4th Internat. Conf. Wetland Systems for Water Pollution Control, 1-12, ICWS Secretariat, Guangzhou, P.R.China

Kadlec, R. & Knight, R., 1996. *Treatment Wetlands*. s.l.:CRC Press.

Kadlec, R. et al., 2000. *Constructed Wetlands for Pollution Control. Scientific and Technical Report*. London: IWA Publishing.

Kickuth, R., 1984. *The Root Zone Method*, Hessen

Klemedtsson, L., Von Arnold, K., Weslien, P. & Gundersen, P., 2005. Soil C/N ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions. *Global Change Biol.*, Issue 11, pp. 1142-1147.

Knight, R., 1987. Effluent distribution and basin design for enhanced pollutant assimilation by freshwater wetlands. Στο: K. Reddy & W. Smiths, επιμ. *Freshwater Wetlands: Ecological Processes and Management Potential*. New York: Academic Press, pp. 913-921.

Laanbroek, H., 1990. *Bacterial cycling of minerals that affect plant growth in waterlogged soils: a review*.

- Le Mer, J. & Roger, P., 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *Eur. J. Soil Biol.*, Issue 37 (1), pp. 25-50.
- Liikanen, A. και συν., 2006. Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters. *Ecol. Eng.*, Issue 26 (3), pp. 241-251.
- Liu, C. και συν., 2009. Pilot-scale studies of domestic wastewater treatment by typical constructed wetlands and their greenhouse gas emissions. *Front. Environ. Sci. Eng.*, Issue 3 (4), pp. 477-482.
- Machum, T., Jenssen, P. & Warner, W., 1995. Cold-climate constructed wetlands. *Water Science technology*, Issue 32(2), pp. 95-102.
- Maltais-Landry, G., Maranger, R. & Brisson, J., 2009. Effect of artificial aeration and macrophyte species on nitrogen cycling and gas flux in constructed wetlands. *Ecol. Eng.*, Issue 35 (2), pp. 221-229.
- Mamais, D. και συν., 2015. Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions. *Water Science and Technology*, Issue 71.2, pp. 303-308.
- Mander, U. και συν., 2014. Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 14 January, Issue 66, pp. 19-35.
- Mander, U. και συν., 2003. Nitrous oxide, dinitrogen and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Water Science Technology*, Issue 48(5), pp. 135-142.
- Mander, U. και συν., 2008. Gaseous fluxes in the nitrogen and carbon budgets of subsurface flow constructed wetlands. *Sci. Total Environ.*, Issue 404, pp. 343-353.
- Mander, U. και συν., 2005. Gaseous fluxes from subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. *J. Environ. Sci.*, Issue 40 (6/7), pp. 1215-1226.
- Mander, U., Maddison, M., Soosar, K. & Karabelnik, K., 2011. The impact of intermittent hydrology and fluctuating water table on greenhouse gas emissions from subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. Στο: *Wetlands*, pp. 1023-1032.
- Mander, U., Teiter, S. & J., A., 2005. Emission of greenhouse gases from constructed wetlands for wastewater treatment and from riparian buffer zones. *Water Science Technology*, Issue 52 (11/12), pp. 167-176.
- Park, K., Inamori, Y., Mizuochi, M. & Ahn, K., 2000. Emission and control of nitrous oxide from a biological wastewater treatment system with intermittent aeration. *J. Biosci. Bioeng.*, Issue 90, pp. 247-252.

- Park, K. και συν., 2001. Effects of fill modes on N₂O emission from the SBR treating domestic wastewater. *Water Sci. Technol.*, Issue 43, pp. 147-150.
- Patrick, W. & Wyatt, R., 1964. Soil nitrogen loss as a result of alternate submergence and drying. *Soil Science Society*, Issue 28, pp. 647-652.
- Picek, T., Cizkova, H. & Dusek, J., 2007. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland – plants as important sources of carbon. *Ecol. Eng.*, Issue 31 (2), pp. 98-106.
- Platzer, C., 1996. *Enhanced nitrogen elimination in subsurface flow artificial wetlands - a multi-stage concept*, Βιέννη: 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control.
- Reddy, K. & DeBusk, W., 1987. Nutrient storage capabilities of aquatic and wetland plants. Στο: K. & W.H.Smith, επιμ. *Aquatic plants for water treatment and resource recovery*. Orlando(Florida): Magnolia Publishing Inc., pp. 337-357.
- Reddy, K., Khaleel, R., Overcash, M. & Westerman, P., 1979. A non point source model for land areas receiving animal wastes. Στο: *Mineralization of organic nitrogen*, pp. 863-876.
- Reddy, K. & Patrick, W., 1984. Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments. Στο: *Environmental Control*. s.l.:CRC Crit. Rev., pp. 273-309.
- Reed, S., Middlebrooks, E. & Crites, R., 1995. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. s.l.:McGraw Hill.
- Salm, J. και συν., 2012. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia. *Hydrobiologia*, Issue 692, pp. 41-55.
- Schmidt, E., 1982. Nitrification in soils. Στο: F. Stevenson, επιμ. *Nitrogen in agricultural soil*. Wisconsin
- Soosar, K. και συν., 2011. Dynamics of gaseous nitrogen and carbon fluxes in riparian alder forests. *Ecological Engineering*, Issue 37, pp. 40-53.
- Sovik, A. και συν., 2006. Emission of the greenhouse gases nitrous oxide and methane from constructed wetlands in Europe. *Environmental Quality*, Issue 35, pp. 2360-2373.
- Sovik, A. & Klove, B., 2007. Emission of N₂O and CH₄ from a constructed wetland in southeastern Norway. *Sci. Total Environ.*, Issue 380, pp. 28-37.
- Stadmark, J. & Leonardson, L., 2005. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal. *Ecol. Eng.*, Issue 25 (5), pp. 542-551.
- Stauffer, B., 2012. *Constructed Wetlands (CWs)*, Ελβετία

- Steer, D., Fraser, L., Boddy, J. & Seibert, B., 2002. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent. Στο: *Ecological*. s.l.:s.n., pp. 429-440.
- Strom, L., Lamppa, A. & Christensen, T., 2006. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland in southern Sweden. *Wetlands Ecol. Manage.*, Issue 15 (1), pp. 43-50.
- Tai, P. και συν., 2002. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland for municipal Greenhouse gas emissions from a constructed wetland for municipalsewage treatment. *J. Environ. Sci.*, Issue 14 (1), pp. 27-33.
- Tanner, C., Adams, D. & Downes, M., 1997. Methane emissions from constructed wetlands treating agricultural wastewaters. *J. Environ. Quality*, Issue 26(4), pp. 1056-1062.
- Teiter, S. & Mander, U., 2005. Emission of N₂O, N₂, CH₄ and CO₂ from constructed wetlands for wastewater treatment and from riparian buffer zones. *Ecol. Eng.*, Issue 25 (5), pp. 528-541.
- Tilley, E. και συν., 2014. *Compendium of Sanitation Systems and Technologies, 2nd Revised Edition*, Dübendorf, Switzerland: s.n.
- UKWIR, 2008. *Carbon Accounting in the UK Water Industry: Operational Emissions*, London: UK Water Industry Research Limited.
- UN-HABITAT, 2008. *Constructed Wetlands Manual*. s.l.:United Nations Human Settlements Programme.
- USEPA, 2000. *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters: Manual*, Cincinnati, Ohio, USA
- Van de Riet, B., Hefting, M. & Verhoeven, J., 2013. Rewetting drained peat meadows: risks and benefits in terms of nutrient release and greenhouse gas exchange. *Water Air Soil Pollut.*, Issue 224, pp. 1440-1452.
- Van der Zaag, A. και συν., 2010. Greenhouse gas emissions from surface flow and subsurface flow constructed wetlands treating dairy wastewater. *Environmental Quality*, Issue 39, pp. 460-471.
- Vilain, G., Garnier, J., Tallec, G. & Cellier, P., 2010. Effect of slope position and land use on nitrous oxide (N₂O) emissions. *Agric. Forest Meteorol.*, Issue 150, pp. 1192-1202.
- Vymazal, J., 1995. *Algae and element cycling in wetlands*. Boca Raton(Florida): CRC Press/Lewis Publisher.

- Vymazal, J., 2002. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. In: *Ecological Engineering*. s.l.:s.n., pp. 633-646.
- Vymazal, J., 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Sci. Total Environ.*, Issue 380, pp. 48-65.
- Vymazal, J. & Kropfelova, L., 2008. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. *Environmental Pollution*, Issue 14.
- Watson, J. et al., 1989. Performance expectations and loading rates for constructed wetlands. In: D.A.Hammer, ed. *Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural*. Chelsea(Miami): Lewis Publishers, pp. 319-351.
- WHO, 2006. *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater*. Geneva, Switzerland
- Wild, U. και συν., 2001. Cultivation of *Typha* spp. in constructed wetlands for peatland restoration. *Ecol. Eng.*, Issue 17 (1), pp. 49-54.
- Williams, H., Bialowiec, A., Slater, F. & Randerson, P., 2010. Spatial variation of dissolved gas concentrations in a willow vegetation filter treating landfill leachate. *Ecol. Eng.*, Issue 36 (12), pp. 1774-1778.
- Willison, T., Baker, J. & Murphy, D., 1998. Methane fluxes and nitrogen dynamics from a drained fenland peat. *Biol. Fertil. Soils*, Issue 27 (3), pp. 279-283.
- Wu, J. και συν., 2009. Impact of COD/Nratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater. *Bioresour. Technol.*, Issue 100 (12), pp. 2910-2917.
- Xue, Y. και συν., 1999. In situ measurements of denitrification in constructed wetlands. *J. Environ. Quality*, Issue 28 (1), pp. 263-269.
- Yan, C. και συν., 2012. Effects of influent C/Nratios on CO₂ and CH₄ emissions from vertical subsurface flow constructed wetlands treating synthetic municipal wastewater. *J. Hazard. Mater.*, Issue 203/204, pp. 188-194.
- Yu, X. και συν., 2011. Response of soil constituents to freeze-thaw cycles in wetland soil solution. Στο: *Soil Biol. Biochem.* s.l.:s.n., pp. 1308-1320.
- Zhou, S., Hou, H. & Hosomi, M., 2008. Nitrogen removal, N₂O emission, and NH₃ volatilization under different water levels in a vertical flow treatment system. *Water Air Soil Pollut.*, Issue 191 (1-4), pp. 171-182.

Αγγελάκης, Α. & Τσομπάνογλου, Γ., 1995. *Υγρά Απόβλητα: Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επεξεργασία και Διάθεση Εκροών*. Κρήτη: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

Ακρατος, Χ., 2006. *Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Σχεδιασμού Τεχνητών Υγροβιότοπων Υπόγειας Ροής με Χρήση Πιλοτικών Μονάδων*, Ξάνθη

Ανδρεαδάκης, Α. Δ., 1986. *Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας και Διάθεσης Αστικών Αποβλήτων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ανδρεαδάκης, Α., Πανταζίδου, Μ. & Σταθόπουλος, Α., 2008. *Περιβαλλοντική Τεχνολογία*. Α' Έκδοση επιμ. Αθήνα: Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.

Τσόγκας, Χ., 1998. *Δίκτυα αποχέτευσης και επεξεργασία λυμάτων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΙΩΝ.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012. *Κείμενο κατευθυντήριων γραμμών για τη διαχείριση λυμάτων μικρών οικισμών*