

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Π.Μ.Σ. Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ
ΑΝΘΡΑΚΑ ΚΑΙ ΑΖΩΤΟΥ ΑΠΟ ΑΣΤΙΚΑ ΛΥΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ**

Αθανάσιος Κονσολάκης

Χανιά, 2011

Επιβλέπων Καθηγητής:

Νικόλαος Παρανυχιανάκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες η προσπάθεια για την αντιμετώπιση της υποβάθμισης του περιβάλλοντος εξαιτίας της διάθεσης αστικών λυμάτων έχει εστιαστεί στη διαχείριση και επεξεργασία αυτών από ολοκληρωμένα συστήματα βιολογικού καθαρισμού και στη συνέχεια την απόρριψη του κατεργασμένου νερού. Οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών σε επίπεδο πόλης, ενώ η χρήση τους σε μικρότερη κλίμακα για την κάλυψη των αναγκών μικρών οικισμών δε φαίνεται να είναι συμφέρουσα, για λόγους που άπτονται δυσκολιών ως προς την εγκατάσταση, συντήρηση και λειτουργία. Το κενό αυτό μπορεί να καλυφθεί από την κατασκευή και χρήση τεχνητών υγροβιότοπων. Οι υγροβιότοποι σχεδιάζονται έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται τους μηχανισμούς που λειτουργούν στη Φύση, εστιάζοντας στις διεργασίες εκείνες που μεγιστοποιούν το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, στα πρότυπα των συμβατικών συστημάτων επεξεργασίας, αν και σε μικρότερη κλίμακα και σε σαφώς μικρότερες ταχύτητες, όσον αφορά στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα. Έτσι, η λύση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αυτοτελώς για την επεξεργασία λυμάτων σε μικρή κλίμακα, είτε συμπληρωματικά σε απορροές βιομηχανικού επιπέδου βιολογικών καθαρισμών για την περαιτέρω αναβάθμιση της επεξεργασμένης εκροής. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στη βελτίωση των μοντέλων που περιγράφουν τις διεργασίες απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου από τα λύματα και του περιεχομένου σε αυτά αζώτου με τη χρήση πρωτογενών στοιχείων από μετρήσεις που έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια λειτουργίας τεχνητών υγροβιότοπων. Υπό αυτό το πρίσμα, εξετάζονται συγκριτικά η επίδραση του σχεδιασμού, των κλιματικών συνθηκών, της φόρτισης, του χρόνου παραμονής, καθώς και οι τεχνικές που εισάγονται με στόχο τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των υγροβιότοπων, ειδικά στον τομέα της απομάκρυνσης του αζώτου, όπως η ανακύκλωση των εκροών, η ομοιογενής τροφοδότηση των λυμάτων, η εκμετάλλευση του φαινομένου της αναερόβιας αμμωνιακής οξείδωσης, κλπ.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

I.	Εισαγωγή.....	1
II.	Γνωστικό Υπόβαθρο.....	3
	A. Εξέλιξη των Τεχνητών Υδροβιοτόπων.....	6
	1. Ιστορικό Υπόβαθρο.....	6
	2. Τύποι CW.....	6
	3. Συγκριτική Αξιολόγηση CW Τύπου SF και HSSF.....	8
	4. CW: Υδραυλική Απόδοση.....	10
	B. Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Οργανικού Άνθρακα.....	10
	1. Επεξεργασία Οργανικής Ύλης και Φυτικών Οργανισμών.....	15
	2. Εποχιακές και Κλιματικές Επιδράσεις στην Απόδοση των CW (Ρυθμοί Απομάκρυνσης Οργανικού Άνθρακα).....	16
	Γ. Μηχανισμοί Απομάκρυνσης του Αζώτου.....	17
	1. Απονιτροποίηση.....	17
	2. Νιτροποίηση.....	19
	3. ANAMMOX.....	19
	4. Θερμοκρασία και Επεξεργασία / Απομάκρυνση του N.....	22
	5. Φυτική Ανάπτυξη και Επεξεργασία / Απομάκρυνση του N.....	22
III.	Ανάπτυξη Μοντέλου.....	24
	A. Συλλογή και Χαρακτηρισμός Δεδομένων.....	28
	1. Χαρακτηριστικά της Τοποθεσίας.....	28
	2. Κύρια Χαρακτηριστικά Επεξεργασίας.....	28
	B. Περιγραφή του Μοντέλου.....	32
	1. Επιφάνεια, Σχήμα και Αριθμός HSSF.....	32
	2. Επίστρωση και Βάθος HSSF.....	33
	3. Αερισμός HSSF.....	35
	4. Βλάστηση και Μικροβιακοί Παράγοντες των HSSF.....	36
	Γ. Ανάπτυξη και Εφαρμογή Αλγορίθμου.....	39
	1. Υδραυλικός Όγκος των HSSF.....	39
	2. Υδραυλική Φόρτιση.....	40
	3. Υδραυλική Απόδοση.....	40
	4. Μέσος Χρόνος Παραμονής.....	41

5.	Κατακρημνίσεις, Εξατμισοδιαπνοή και Υγρασία.....	41
6.	Χαρακτηριστικά Ρυθμού Ροής.....	42
7.	Χαρακτηριστικά Θερμοκρασίας.....	43
8.	Απομάκρυνση του Οργανικού Άνθρακα.....	44
9.	Απομάκρυνση BOD.....	45
10.	Απομάκρυνση COD.....	45
11.	Απομάκρυνση Αζώτου.....	45
12.	Απομάκρυνση Φωσφόρου.....	46
13.	Απομάκρυνση TSS.....	47
IV.	Ανάλυση.....	48
A.	Ανάλυση Διεργασιών.....	49
1.	Χαρακτηριστικά Απομάκρυνσης Άνθρακα.....	49
2.	Ανάλυση Απομάκρυνσης Αζώτου.....	52
3.	Απομάκρυνση COD, P & TSS.....	52
4.	Μικροοργανισμοί «Δείκτες» και Παθογόνα.....	54
B.	Καινοτόμα Στοιχεία.....	54
V.	Συμπεράσματα.....	59
	Βιβλιογραφία.....	62

I. Εισαγωγή

Στην αναφορά του ΟΗΕ για τις παγκόσμιες προοπτικές αστικοποίησης (2003), παρουσιάζεται η εκτίμηση ότι μέχρι το έτος 2030 πάνω από τα τρία τέταρτα όλων των χωρών και των περιοχών της υφελίου θα έχουν πάνω από το μισό τους πληθυσμό να κατοικεί σε αστικές περιοχές. Ο διεθνής οργανισμός αναγνωρίζει ότι η διεργασία της αστικοποίησης ποικίλλει περισσότερο στη βάση των διαφοροποιήσεων ανά χώρα, παρά ανά περιοχή. Είναι ενδιαφέρον να επισημανθεί ότι ενώ οι περισσότερες αναπτυγμένες χώρες, κυρίως της Δύσης, έχουν μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού τους να κατοικεί σε αστικές περιοχές σε σχέση με τις λιγότερο αναπτυγμένες χώρες, συμπεριλαμβανομένων πυκνοκατοικημένων χωρών, όπως η Ινδία και η Κίνα, με τις τελευταίες να παρουσιάζουν μεγαλύτερους αστικοποιημένους πληθυσμούς (United Nations, 2003). Αυτά τα στατιστικά στοιχεία προέρχονται από το έτος 2000 όταν, σύμφωνα με το έγγραφο του ΟΗΕ, σχεδόν το 75% όλων των χωρών και των περιοχών είχαν συνολικό αστικό πληθυσμό λιγότερο από 7 εκατομμύρια άτομα ενώ το 25% αυτών των χωρών και περιοχών, συμπεριλαμβανομένων της Ινδίας και της Κίνας, αναλογούσαν στο 75% του συνολικού αστικού πληθυσμού. Επίσης, το έγγραφο αναφέρει ότι το 1950 οι ΗΠΑ είχαν περισσότερους αστούς από την Ινδία και την Κίνα, αλλά το 2000, η Κίνα είχε σχεδόν 50% περισσότερους αστούς και η Ινδία 25% περισσότερους από τις ΗΠΑ. Οι περισσότερες αναπτυγμένες χώρες με κυρίως αστικούς πληθυσμούς παρουσίασαν χαμηλό δείκτη ανάπτυξης αστικών πληθυσμών (2%) κατά την περίοδο 1950-2000 ενώ οι λιγότερο αναπτυγμένες χώρες παρουσίασαν σχετικά υψηλούς ρυθμούς αστικοποίησης. Για παράδειγμα, η Αργεντινή παρουσίασε αύξηση αστικού πληθυσμού περίπου 2.2%, ενώ από την άλλη πλευρά, το Μπανγκλαντές παρουσίασε το πιο θεαματικό ποσοστό ανάπτυξης του 5.8% (United Nations, 2003). Ως γνωστόν, όπου ζουν και εργάζονται άνθρωποι, παράγουν απόβλητα, όπως και κάθε άλλος ζωντανός οργανισμός.

Ο 20^{ος} αιώνας παρουσίασε μία τεράστια αύξηση στις τεχνικές δυνατότητες του ανθρώπινου γένους. Μαζί με αυτήν την αύξηση των δυνατοτήτων, ήρθε και η γνώση του πώς οι ζωντανοί οργανισμοί και κατά κύριο λόγο οι άνθρωποι μπορούν να ενυπάρχουν στη Φύση σχετικά υγιώς. Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που εξασφαλίζει την υγεία των ανθρώπων και των άλλων ζωντανών οργανισμών είναι το καθαρό περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα ο ανθρώπινος πληθυσμός συγκεντρώθηκε σταδιακά σε γιγαντιαία αστικά συγκροτήματα τα οποία παράγουν ασύλληπτες ποσότητες αποβλήτων. Μαζί με τα αστικά λύματα

αποβάλλονται βιομηχανικά και αγροτικά απόβλητα, όπου οι άνθρωποι μπορεί να μην κατοικούν αλλά εργάζονται. Η αστικοποίηση είναι ένα φαινόμενο που έφερε στο προσκήνιο τα προβλήματα που σχετίζονται με την μετατροπή των τεραστίων ποσοτήτων ανθρωπογενών αποβλήτων σε καθαρό και ασφαλές υλικό που δεν επηρεάζει αρνητικά το περιβάλλον στο οποίο άνθρωποι και άλλοι οργανισμοί ζουν και εργάζονται. Νωρίτερα, πριν από αυτό το υψηλό επίπεδο αστικοποίησης, στις περισσότερες χώρες οι μικρές κοινότητες ζούσαν μακριά από τα αστικά κέντρα. Πιθανόν, αυτές οι απομακρυσμένες κοινότητες ήταν πολύ μικρές και πολύ διάσπαρτες μεταξύ τους ώστε να παράγουν σημαντικές ποσότητες αποβλήτων, ικανών να βλάψουν το περιβάλλον με το οποίο γειτόνευαν.

Η αστικοποίηση έχει αλλάξει το πλεονέκτημα της διάχυσης. Στην εποχή μας, ακόμα και στις αγροτικές περιοχές, οι κοινότητες είναι αρκετά ευμεγέθεις ώστε να παράγουν σημαντικά τοξικά επίπεδα λυμάτων. Η τεχνολογία δεν είναι μόνο προηγμένη, αλλά και διαβρωτική για το περιβάλλον. Επιπλέον, ακόμη και οι αγροτικές κοινότητες, παρόλο που είναι μικρές σε μέγεθος, χρησιμοποιούν καθημερινά προηγμένες τεχνολογίες με περίπλοκα υλικά και ως εκ τούτου χρειάζονται την επεξεργασία λυμάτων η οποία κατοχυρώνει την ασφαλή και υγιεινή διαβίωση στο μέλλον. Εφόσον τα περισσότερα λύματα που παράγονται από τους ανθρώπους μεταφέρονται μέσω υδάτινων σωμάτων, το κύριο συστατικό του περιβάλλοντος που απαιτεί καθαρισμό είναι το νερό. Αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί στην ανάγκη να εξετασθεί ο μηχανισμός των συστημάτων κατεργασίας λυμάτων που μπορεί να διατηρήσει την αναγέννηση καθαρού νερού με έναν όσο το δυνατό πιο φυσικό τρόπο και με ελαχιστοποιημένο κόστος, τόσο από την άποψη της επένδυσης όσο και της αναλυσκόμενης ενέργειας.

II. Γνωστικό Υπόβαθρο

Από την εμπειρία που έχει συγκεντρωθεί στις ΗΠΑ, η ομοσπονδιακή χρηματοδότηση για την κατασκευή εγκαταστάσεων βιολογικού καθαρισμού σε μεγάλα αστικά κέντρα αλλά και σε μικρότερους οικισμούς διακόπηκε μετά το 1990 και οι χρηματοδοτικές ανάγκες μετακυλίστηκαν στην τοπική αυτοδιοίκηση. Σύντομα κατέστη εμφανής η ανάγκη εξεύρεσης μεγάλων ποσών για την κατασκευή και τη συντήρηση τέτοιων έργων. Μικρές κοινότητες με πληθυσμό κάτω των 10.000 ατόμων, με λιγαστές οικονομικές δυνατότητες, αντιμετώπιζαν πλέον με δυσκολία το θέμα της διαχείρισης των λυμάτων τους (Hammer, 1989). Ακόμη και μεγαλύτεροι αστικοί σχηματισμοί, ικανοί να υποστηρίζουν τέτοια προγράμματα αυτοτελώς, απετράπησαν λόγω του τεράστιου κόστους που τέτοια προγράμματα εμπεριέχουν σε μακροπρόθεσμη βάση λόγω των εξόδων συντήρησης.

Από τη μία πλευρά, η ανάγκη για την προστασία της δημόσιας υγείας του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα των επιφανειακών πηγών νερού, καθώς και η ανάπτυξη εναλλακτικών πηγών νερού, ενώ από την άλλη το διαρκώς αυξανόμενο κόστος για την εγκατάσταση και συντήρηση συμβατικών μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, έχει οδηγήσει σε ένα δίλημμα που επέβαλλε την έρευνα για εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων τα οποία θα είναι προσαρμοσμένα στις οικονομικές δυνατότητες μικρών οικισμών.

Τεχνολογία με τη μορφή εγκαταστάσεων από χάλυβα και σκυρόδεμα και δυνατότητες που καλύπτονται από μηχανολογικό εξοπλισμό εξαρτάται υπερβολικά από κεφαλαιακές επενδύσεις και κατανάλωση ενέργειας και στη φάση της κατασκευής αλλά και κατά τη λειτουργία και συντήρηση (Hammer, 1989). Οι Kadlec και Wallace (2008) υποστηρίζουν ότι οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιφανειακής ή υποεπιφανειακής ροής έχουν απεριόριστες ικανότητες υδραυλικής φόρτισης και χαρακτηριστικά πολύ χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (0.1 kW-h/m^3) συγκρινόμενοι με άλλα αντίστοιχα συστήματα επεξεργασίας. Επιπλέον, όπως προτείνει ο Hammer (1989), η κατασκευή εγκαταστάσεων βιολογικού καθαρισμού σε μικρούς οικισμούς (< 10,000 κατοίκων) στις ΗΠΑ, επιφέρει δαπάνες από 10 έως 15 δισεκατομμύρια δολάρια (εκτιμήσεις του 1989) στο σύνολο της χώρας και πάνω από 1,3 δισεκατομμύρια δολάρια στην Περιοχή IV (Ν.Α. Πολιτείες) της EPA (Environmental Protection Agency-Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας) μόνο.

Απεναντίας, οι υγροβιότοποι αποτελούν φυσικά συστήματα τα οποία με τον σωστό σχεδιασμό και λειτουργία μπορούν να διασφαλίσουν τα απαιτούμενα ποιοτικά κριτήρια των εκροών για διάθεση σε επιφανειακούς αποδέκτες ή επαναχρησιμοποίησης τους για διάφορες ωφέλιμες χρήσεις και κυρίως για άρδευση με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρό κόστος αρχικής επένδυσης. Αποτελούν οικοσυστήματα στα οποία δίδεται μεγάλη έμφαση τις τελευταίες δεκαετίες για την κατανόηση της λειτουργίας τους και την αποσαφήνιση και ποσοτικοποίηση των βιογεωχημικών διεργασιών που εμπλέκονται στους κύκλους των θρεπτικών στοιχείων και άνθρακα. τα οποία έχουν μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια και ως καταφύγια βιοποικιλότητας, αλλά και ως δυνητικά συστήματα βιολογικού καθαρισμού που παρέχουν αξιοπιστία και οικονομία. Οι φυσικοί υγροβιότοποι αποτελούν μερικά από τα πιο αποδοτικά οικοσυστήματα στην υδρόγειο συνδυάζοντας φως, νερό, θρεπτικά στοιχεία και είδη φυτών, όπως το *Eichhornia crassipes*, τα οποία έχουν εξελιχθεί ακριβώς για να εκμεταλλεύονται στο μέγιστο τον πλούσιο και ποικιλόμορφο περίγυρό τους (Moshiri, 1993). Αυτά τα έντονα παραγωγικά είδη φυτών ευνοούν το υψηλό επίπεδο μικροβιακής δραστηριότητας, που με τη σειρά της επιτρέπει σε τέτοιους υγροβιότοπους να αποσυνθέτουν οργανική ύλη και άλλες ουσίες. Ουσιαστικά, οι υγροβιότοποι είναι οικοσυστήματα όπου ένα υδατικό περίβλημα εμποδίζει την ανταλλαγή αερίων μεταξύ του ιζηματικού βυθού και της ατμόσφαιρας (Moshiri, 1993). Αντιθέτως, τα ιζήματα είναι ως επί το πλείστον ανοξικά ή αναεροβικά περιβάλλοντα όπου μεγάλες ποσότητες οργανικής ύλης από πρωτογενείς πηγές τείνουν να συσσωρεύονται επειδή οι ρυθμοί αποσύνθεσης και ανοργανοποίησης μειώνονται δραματικά σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Ως αποτέλεσμα αυτής της συσσώρευσης, τα ιζήματα είναι οργανικά με χαμηλή περιεκτικότητα σε ξηρές ύλες, υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού, πολύ υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και μεγάλη ενεργή επιφάνεια που επεκτείνεται και από τη διαστρωματωμένη οργανική ύλη. Τα δύο τελευταία αποτελούν τις ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη και δραστηριοποίηση μικροβίων (Moshiri, 1993). Ωστόσο, αυτά είναι μόνον ενδεικτικές παρατηρήσεις και χρειάζεται να γίνουν περισσότερα ώστε να καταστεί ένας τεχνητός υγροβιότοπος ικανός για λειτουργία ως σύστημα βιολογικού καθαρισμού μεγάλου ή μικρού οικισμού, αστικού ή υπαίθριου χαρακτήρα, ανάλογα με την περίπτωση. Οι φυσικοί υγροβιότοποι αποτελούν εξόχως διαφοροποιημένα οικοσυστήματα και είναι πολύ δύσκολο να αναγνωριστούν όλοι οι επιμέρους λειτουργικοί παράγοντες μέσα σε αυτά τα συστήματα, καθώς και να

ταυτοποιηθούν τα αποτελέσματα από μία γεωγραφική περιοχή σε άλλη (Moshiri, 1993). Παλαιότερες μελέτες έχουν καταδείξει σημαντική βελτίωση στην ποιότητα του νερού που διέρχεται μέσα από τέτοια συστήματα, αλλά οι δυνατότητες επεξεργασίας κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων, ακόμη και μεσοπρόθεσμα, παραμένουν απρόβλεπτες (Moshiri, 1993). Για παράδειγμα, η λειτουργική προβλεψιμότητα αλλοιώνεται από την εισαγωγή νέων ρύπων στο σύστημα επεξεργασίας, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγή των φυτικών ειδών και συνεπώς να υποβαθμίσουν τα οικοσυστήματα αυτά. Επιπρόσθετα, τα παθητικά συστήματα υδροβιότοπων που πρόσκεινται στα φυσικά δεν ανταποκρίνονται στις επίσημες απαιτήσεις για την ποιότητα του νερού. Για παράδειγμα, τέτοια παθητικά συστήματα δε δύναται να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις για την απομάκρυνση αζώτου (που τηρούνται απαρέγκλιτα στις ΗΠΑ) των $1,0 \text{ mg/L NH}_4\text{-N}$ για αποβολή σε επιφανειακά ύδατα και 10 mg/L TN (ολικού αζώτου) στο έδαφος (Austin & Nivala, 2009) κατά τη λειτουργία τους σε συνήθη φόρτιση. Από μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι η εισαγωγή ενός ποσού ενέργειας είναι απαραίτητη ώστε το σύστημα να μπορέσει να ανταποκριθεί τουλάχιστο στις απαιτήσεις για την απομάκρυνση N. Αλλιώς, για τα παθητικά συστήματα, συνίσταται μία μάλλον μη ρεαλιστικά χαμηλή φόρτιση (Austin & Nivala, 2009). Ωστόσο, ακόμη και αν ένα τέτοιο ιδανικό σύστημα όπως ο υδροβιότοπος χωρίς μηχανική υποβοήθηση παραμένει απρόσιτο για την επεξεργασία νερού, συνεχίζεται η προσπάθεια για την κατασκευή ενός σχεδόν φυσικού συστήματος που χρειάζεται χαμηλή αρχική επένδυση και μικρές ποσότητες ενέργειας για την κατασκευή, λειτουργία και συντήρησή του.

Ζούμε σε έναν κόσμο που στηρίζεται στην τεχνολογία, όπου μεγάλος αριθμός νέων και περίπλοκων υλικών τίθενται σε χρήση καθημερινά, καθιστώντας την επεξεργασία των αποβλήτων ένα ζήτημα περίπλοκο και μονίμως μεταβαλλόμενο. Ό,τι λειτουργούσε χτες, δε λειτουργεί σήμερα. Οι ανάγκες έχουν αλλάξει. Η τεχνολογία του χτες έχει απορριφθεί για μία ακόμη πιο περίπλοκη με παραγωγή πιο περίπλοκων υλικών που με τη σειρά τους απαιτούν πιο περίπλοκη μεθοδολογία για την επεξεργασία των αποβλήτων. Επομένως, αποτελεί τρέχουσα ανάγκη ένα σύστημα επεξεργασίας αποβλήτων που συμβαδίζει με το ρυθμό της τεχνολογίας και την αυξανόμενη περίπλοκη παραγωγή υλικών και συνεπώς την αυξανόμενη περίπλοκη παραγωγή αποβλήτων. Φαίνεται, όπως έχουν καταδείξει παλαιότερες αλλά και πιο πρόσφατες εργασίες, ότι οι υδροβιότοποι είναι φυσικοί μηχανισμοί, αξιόπιστοι αλλά

και αρκετά εκλεπτυσμένοι, ώστε να μετατρέπουν σύγχρονα απόβλητα σε ασφαλή ύλη και να παράγουν ποιότητα νερού αποδεκτή για τη διάθεση σε περιβάλλον όπου κατοικούν άνθρωποι.

A. Εξέλιξη των Τεχνητών Υγροβιοτόπων

1. Ιστορικό Υπόβαθρο

Οι Seidel & Kickruth στη Γερμανία, το 1952, υπήρξαν οι πρωτοπόροι στη διερεύνηση του ιστορικού υποβάθρου σχετικά με τους Τεχνητούς Υγροβιότοπους (Constructed Wetlands-CW). Φαίνεται πως διαφορετικές χώρες άρχισαν να εκμεταλλεύονται την τεχνολογία αυτή σε διαφορετικές περιόδους και με διαφορετική ένταση (Okurut, 2000). Στην Ολλανδία άρχισαν να χρησιμοποιούν τους CW σε πολύ μικρή κλίμακα, ξεκινώντας πειραματικά το 1967 με *Scirpus lacustris* σε μία κατασκήνωση στο Flevoland. Στις ΗΠΑ ξεκίνησαν την ίδια εποχή όπως και στην Ολλανδία, ενώ στη Μεγάλη Βρετανία ξεκίνησαν στα τέλη του 1985 (Okurut, 2000). Ωστόσο, ενώ οι CW αποτελούν μία σχετικά πρόσφατη τεχνολογία, όπως προαναφέρθηκε, οι φυσικοί υγροβιότοποι χρησιμοποιούνται ως τοποθεσίες επεξεργασίας λυμάτων για πάνω από 100 χρόνια. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ, ο υγροβιότοπος Great Meadows κοντά στον ποταμό Concord, στο Λέξινγκτον της Μασσαχουσέτης, δέχεται αστικά λύματα από το 1912 (Kadlec & Wallace, 2008).

Οι περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής και έρευνας των CW συγκεντρώνονται στην εύκρατη ζώνη, ενώ στους Τροπικούς, όπου βρίσκονται οι περισσότερες φτωχές χώρες, δεν έχει αναληφθεί ακόμα δραστηριότητα για την εκμετάλλευση αυτής της λύσης για την επεξεργασία των λυμάτων, που χαρακτηρίζεται όπως προαναφέρθηκε από σχετικά χαμηλή τεχνολογία και χαμηλό κόστος (Okurut, 2000). Υπάρχουν όμως ενδείξεις για την ανάπτυξη CW στη Ν. Αφρική και την Κένυα, ενώ το Ασιατικό Τεχνολογικό Ινστιτούτο διεξάγει έρευνες για την εφαρμογή και διάδοση αυτής της τεχνολογίας στη συγκεκριμένη ήπειρο (Okurut, 2000). Η χρήση ιθαγενών φυτικών ειδών συστήνεται πλέον ευρέως ως μέσο για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των υγροβιοτόπων.

2. Τύποι CW

Εν συντομία οι ακόλουθοι τύποι CW μελετώνται στην παρούσα περίοδο για χρήση ως συστήματα επεξεργασίας λυμάτων με χαμηλό κόστος και ενεργειακές απαιτήσεις.

2.1 Υγροβιότοποι Επιπλεόντων Υδροχαρών Φυτών – Η ιδανική επιλογή φυτών για αυτά τα συστήματα περιλαμβάνει είδη όπως τα *Pistia stratiotes*, *Salvinia* sp., *Lemna* sp., *Azolla* sp., *Eichhornia crassipers* και το *Cyperus papyrus*. Αυτά τα είδη φυτών χαρακτηρίζονται από υψηλούς ρυθμούς παραγωγικότητας και πρόσληψης και αφομοίωσης θρεπτικών στοιχείων στη βιομάζα τους. Ακόμη, το πυκνό ριζικό τους σύστημα και η ικανότητά τους να μεταφέρουν οξυγόνο από το βλαστό στο ρίζωμα όπου βρίσκονται προσκολλημένοι με τη μορφή βιοϋμενίου μεγάλοι πληθυσμοί ετερότροφων μικροοργανισμών διασφαλίζει την επικράτηση υψηλών ρυθμών αποδόμησης του οργανικού φορτίου. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά επιτρέπουν στα βακτήρια να αποσυνθέτουν την εγκλωβισμένη ύλη και να αποδεσμεύουν απαραίτητα στοιχεία, όπως οξυγόνο και άζωτο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το είδος *E. crassipers*, όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζει μεγάλους ρυθμούς απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών, οργανικών ουσιών που μετρώνται ως Βιοχημική Απαίτηση Οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand-BOD) και θρεπτικά συστατικά. Συστήνεται η τακτική συγκομιδή αυτών των φυτών, ώστε τα θρεπτικά συστατικά να απομακρύνονται από το σύστημα και να μεταφέρονται σε περιοχές όπου μπορεί να επαναχρησιμοποιηθούν ως χλωρή λίπανση ή μετά από κομποστοποίηση (Okurut, 2000). Από μία αφρικανική προοπτική, ο *Cyperus papyrus*, με το πυκνό του ρίζωμα που διαθέτει μεγάλη επιφάνεια, λειτουργεί παρόμοια με το *Eichhornia crassipers* που απαντάται κυρίως στις ΗΠΑ και ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες (Πορτογαλία).

2.2 Υγροβιότοποι Επιφανειακής Ροής— Αυτά τα συστήματα διακρίνονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο ροής (Okurut, 2000). Οι Υγροβιότοποι Οριζόντιας Επιφανειακής Ροής (Surface Flow-SF) αποτελούν συστήματα σε ρηχές λεκάνες όπου τα λύματα ρέουν επιφανειακά και διαμέσου των στελεχών των φυτών (Okurut, 2000). Ο ρυθμός ροής μειώνεται λόγω της τριβής που αναπτύσσεται με τα στελέχη των φυτών και αποτελεί ιδανικό σύστημα για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου (διαλελυμένου ή με τη μορφή αιωρούμενων στερεών). Οι βακτηριακές αποικίες απαντώνται ως υμένια στα στελέχη των φυτών και τις ρίζες και αποσυνθέτουν την οργανική ύλη ενώ καθορίζουν και βιοχημικές αντιδράσεις που εμπλέκονται στο μετασχηματισμό και απομάκρυνση του N (Okurut, 2000). Αυτοί είναι οι πρώτοι τύποι υγροβιότοπων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της επεξεργασίας λυμάτων. Σε αυτόν τον τύπο υγροβιότοπων παρατηρείται μεγάλη διαφοροποίηση ως προς την απόδοση.

2.3 Υγροβιότοποι Υποεπιφανειακής Ροής— Ο δεύτερος τύπος αναδυόμενου υγροβιότοπου είναι τα Συστήματα Υποεπιφανειακής Ροής (Subsurface Flow-SSF) όπου η ροή διαμέσου του συστήματος πραγματοποιείται χωρίς την έκθεση του νερού στην επιφάνεια. Τα λύματα εισρέουν στο σύστημα από την εισαγωγή και αφήνονται να διαχυθούν οριζόντια κάτω από το υπόστρωμα ώστε να συλλεχθούν στην έξοδο. Υπάρχει επίσης και ένα κάθετο σύστημα στο οποίο τα λύματα εισρέουν από την κορυφή και διαχέονται διαμέσου διαφόρων πορωδών διαστρωματώσεων και το έκπλυμα συλλέγεται στην έξοδο (Okurut, 2000). Και στα δύο συστήματα η επεξεργασία των λυμάτων πραγματοποιείται στο ριζοσφαιρικό μέσο όπου η βακτηριακή δραστηριότητα και άλλες φυσικές και χημικές διεργασίες συνεισφέρουν στην απομάκρυνση / αποσύνθεση των ρύπων. Η αποδοτικότητα επεξεργασίας είναι υψηλότερη στους κάθετους SSF, συγκρινόμενη με αυτή των οριζοντίων που αποδίδεται κυρίως στην υψηλότερη διαθεσιμότητα O_2 . Η EPA (2000) συστήνει ως μέγιστο ρυθμό φόρτισης τα 25 g BOD ανά m^2 και ανά ημέρα για τα συστήματα κάθετης ροής, ενώ για αυτά της οριζόντιας συστήνεται χαμηλότερος ρυθμός φόρτισης της τάξης των 6 g BOD ανά m^2 και ανά ημέρα (Osorio et al., 2007).

3. Συγκριτική Αξιολόγηση CW Τύπου SF και HSSF

Από τις παραπάνω περιγραφές των δύο κύριων τύπων επιφανειακών υγροβιότοπων, είναι προφανές ότι υπάρχουν κάποιες φυσικές, βιολογικές και δυναμικές διαφορές μεταξύ τους. Αυτές οι διαφορές, με τη σειρά τους, έχουν σαν αποτέλεσμα άλλες ποσοτικές και ποιοτικές διαφορές όσον αφορά στην αποδοτικότητα των δύο τύπων. Όταν εξετάζουμε τα χαρακτηριστικά της απόδοσης των SF-CW και HSSF-CW, αυτές οι διαφορές γίνονται εμφανείς. Γίνεται αντιληπτό ότι η διαφορά στην απόδοση δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάλογα με τις ανάγκες. Αρκετοί παράγοντες λαμβάνονται υπόψη όταν πρέπει να γίνει μια τέτοια επιλογή ώστε να κατασκευαστεί ο κατάλληλος τύπος CW, ο οποίος να ταιριάζει στα χαρακτηριστικά επεξεργασίας των λυμάτων. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν το μέγεθος, το κόστος, τα θέματα δημόσιας υγείας και όχλησης, καθώς και τα οφέλη που θα αποκομίσει ο φορέας εκμετάλλευσης του έργου (Kadlec, 2009). Για τους δύο προαναφερόμενους τύπους, διαφέρει κατ' αρχήν η δυνατότητα διήθησης. Οι επιφανειακού τύπου υγροβιότοποι είναι πιο κατάλληλοι για την επεξεργασία λυμάτων μέτριας έως αυξημένης βιοχημικής απαίτησης οξυγόνου (BOD), συνολικών αιωρούμενων στερεών (TSS-Total Suspended Solids), αμμωνίας,

συνολικού αζώτου και φωσφόρου. Οι HSSF-CW είναι πιο κατάλληλοι για την πρόσθετη επεξεργασία λυμάτων που έχουν δεχθεί δευτεροβάθμια ή και τριτοβάθμια επεξεργασία σε συμβατικά συστήματα επεξεργασίας (Kadlec, 2009). Αυτό ωστόσο αποτελεί μια γενική θεώρηση και απαιτούνται πιο εξειδικευμένες λεπτομέρειες για την επιλογή του πλέον κατάλληλου συστήματος.

Σε μία μελέτη που αφορά στην κατανομή μεγέθους των υδροβιοτόπων των δύο τύπων, μελετήθηκαν 330 SF-CW και 710 HSSF-CW, όπου βρέθηκε ότι ενώ το 90% των HSSF είχε συγκρίσιμο μέγεθος με τους SF, με μόνο 10% εξ αυτών να είναι μικρότεροι από όλους τους SF, οι SF συνέπιπταν με τους HSSF μόνο κατά 60% ενώ το 40% ήταν μεγαλύτεροι από οποιοδήποτε HSSF (Kadlec, 2009). Αυτό αποδεικνύει ότι οι HSSF, όσον αφορά στην έκτασή τους, έχουν πολύ μικρό πλεονέκτημα σε σχέση με τους SF, παρόλο που η μέση έκτασή τους ήταν 140 m² και 1,6 εκτάρια, αντίστοιχα (Kadlec, 2009). Φαίνεται ότι το 40% των SF που ήταν μεγαλύτεροι απ' όλους τους HSSF επιφέρουν αυτή τη διαφοροποίηση στο μέσο μέγεθος παρόλο που σχεδόν το 60% των SF είχαν συγκρίσιμο μέγεθος με το 90% των HSSF. Άλλες παραμετρικές διαφορές ως προς την υδραυλική φόρτιση και τη συγκέντρωση εισόδου αναλύονται στους ακόλουθους δύο πίνακες.

Πίνακας 1: Υδραυλικά Χαρακτηριστικά CW Τύπου SF και HSSF

Τύπος Υδροβιοτόπου	Μέση Υδραυλική Φόρτιση (cm/ημέρα)	Λειτουργικό Βάθος (cm)	Αναλογία Νερού (%)	Χρόνος Παραμονής (Ημέρες)
SF	3	30	95	9.3
HSSF	7	50	40	2.9

Η διαφορά στις μέσες υδραυλικές φορτίσεις των δύο τύπων είναι επίσης παραπλανητική, καθώς υπάρχει πολύ μικρή διαφορά στις υψηλές φορτίσεις, ενώ στις χαμηλές φορτίσεις αυτή η διαφορά γίνεται σημαντικά αισθητή. Το συμπέρασμα είναι ότι οι περισσότεροι HSSF λειτουργούν σε υψηλές φορτίσεις (Kadlec, 2009). Επίσης, ενώ τα λειτουργικά βάθη των δύο τύπων φαίνεται να διαφέρουν σημαντικά, η αναλογία νερού για τους SF είναι πολύ υψηλότερη, υποδεικνύοντας ότι η μέση περιεκτικότητα σε νερό ανά μονάδα επιφανείας στους δύο τύπους έχει πολύ μικρότερο εύρος.

Πίνακας 2: Συγκεντρώσεις Εισόδου BOD και NH₄-N για CW Τύπου SF και HSSF

Τύπος Υδροβιότοπου	BOD (mg/L)	Αμμωνία (mg/L)
SF	26	7
HSSF	69	22

Από τον Πίνακα 2 γίνεται προφανές ότι σε σχεδόν διπλάσια υδραυλική φόρτιση σε σχέση με τους SF, οι HSSF παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις εισόδου για τους δύο τύπους ρύπων, αλλά είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι σε πολλές ειδικές εφαρμογές των SF, όπως σε μετα-τριτοβάθμια επεξεργασία, εισέρχεται πολύ χαμηλή συγκέντρωση BOD και υψηλή συγκέντρωση NH₄-N (Kadlec, 2009).

4. CW: Υδραυλική Απόδοση

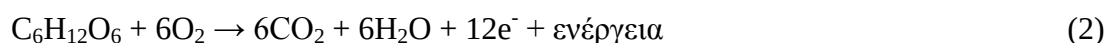
Η υδραυλική απόδοση των CW βασίζεται σε μη-ιδανικά μοντέλα αφού οι περισσότεροι CW εμφανίζουν ακανόνιστη ροή που δεν μπορεί να τυποποιηθεί. Μία μέθοδος που συχνά χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του πραγματικού χρόνου παραμονής είναι η ανάλυση με χρήση χρωματικών δεικτών. Αυτή η εκτίμηση δίνει την ογκομετρική απόδοση (e_v) του CW με τον ακόλουθο τρόπο:

$$e_v = \tau / \tau_n \quad (1)$$

όπου τ είναι ο πραγματικός χρόνος παραμονής του δείκτη σε ημέρες και τ_n είναι ο θεωρητικός χρόνος παραμονής, επίσης σε ημέρες.

B. Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Οργανικού Άνθρακα

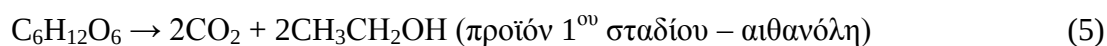
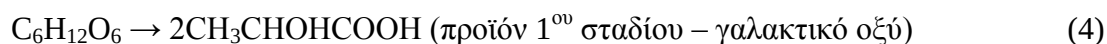
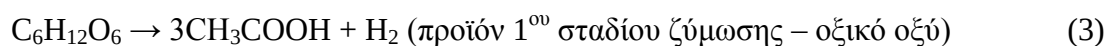
Μελετώντας πρώτα την αερόβια αποδόμηση της οργανικής ύλης που εισέρχεται στον CW από τα ετερότροφα βακτήρια, εφαρμόζουμε τον ακόλουθο τύπο:



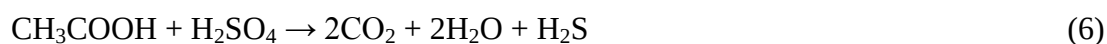
Ενώσεις, όπως οι υδατάνθρακες, οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια, μπορούν εύκολα να διασπαστούν σε μονοσακχαρίτες, αμινοξέα και λιπαρά οξέα και ακολούθως σε CO₂. Αυτές ονομάζονται ευμετάβλητες, ενώ άλλες, όπως η ημικυτταρίνη και η λιγνίνη, οι οποίες είναι δύσκολο να διασπαστούν, ονομάζονται ανθεκτικές (Vymazal &

Kropfelova, 2008). Η διαθεσιμότητα O₂ αποτελεί συνήθως τον περιοριστικό παράγοντα για την αποδόμηση της οργανικής ύλης.

Σε αναερόβιες συνθήκες, όπως στον πυθμένα των υποεπιφανειακών αλλά και επιφανειακών συστημάτων, λαμβάνει χώρα αναερόβια αποδόμηση (ζύμωση) που περιγράφεται με τις χημικές εξισώσεις που ακολουθούν:



Αυτά τα προϊόντα του 1^o σταδίου ζύμωσης είτε ανοργανοποιούνται σε αέρια CO₂ ή CH₄ ή υπεισέρχονται σε 2^o στάδιο ζύμωσης. Αυτό πραγματοποιείται από θειοαναγωγικά και μεθανιογόνα βακτήρια (Vymazal & Kropfelova, 2008) – διασπούν τα προϊόντα του 1^o σταδίου. Αυτά τα βακτήρια εξαρτώνται από τη δημιουργία εύθραυστων αποικιών από ζυμωτικά βακτήρια πάνω στις οποίες βασίζουν τις δικές τους μεταβολικές δραστηριότητες (Vymazal & Kropfelova, 2008). Αυτές οι δύο κύριες κατηγορίες βακτηρίων αποτελούν τη βάση των αναερόβιων διεργασιών που συναποτελούν τους αναερόβιους μηχανισμούς επεξεργασίας των λυμάτων στα συστήματα των CW. Οι ακόλουθοι τύποι περιγράφουν τις χημικές δραστηριότητες των θειοαναγωγικών και μεθανιογόνων βακτηρίων:



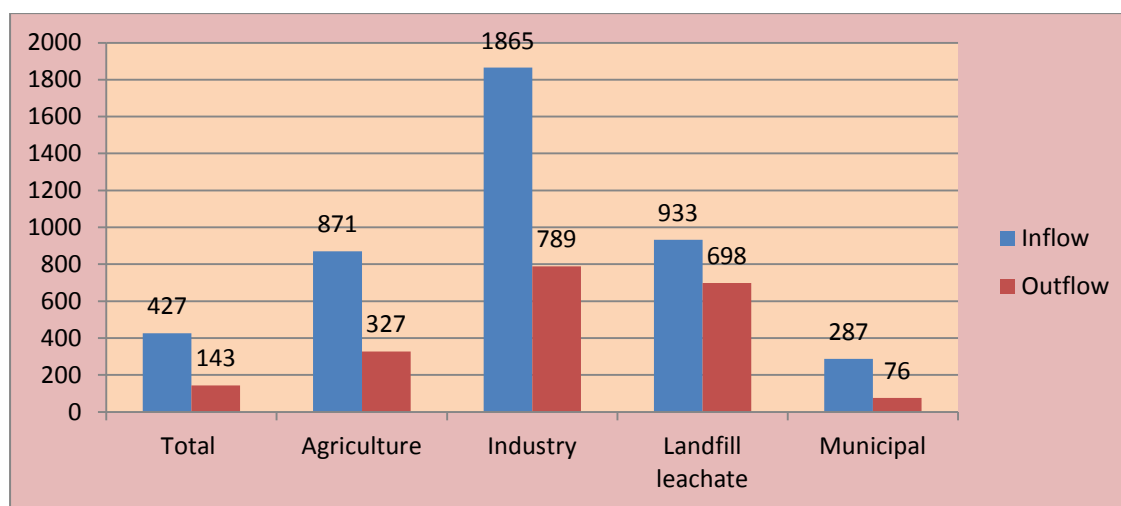
Ο τελευταίος τύπος περιγράφει ένα ενδιαφέρον φαινόμενο – τον υδρογονοτροφισμό – ο οποίος αποτελεί ένα κοινό βιοχημικό μονοπάτι μεθανιότροφων βακτηρίων (Vymazal & Kropfelova, 2008). Ο επόμενος τύπος περιγράφει ένα λιγότερο προτιμητέο μηχανισμό διατροφής, τον ακετοτροφισμό ή ακετονική ζύμωση ή ακετοκλαστική μεθανογένεση, μεταξύ των μεθανότροφων. Μόνο 2 γένη – τα *Methanosarcina* και τα *Methanosaeta* – που αποτελούν το 10% όλων των μεθανιότροφων την εφαρμόζουν (Vymazal & Kropfelova, 2008).



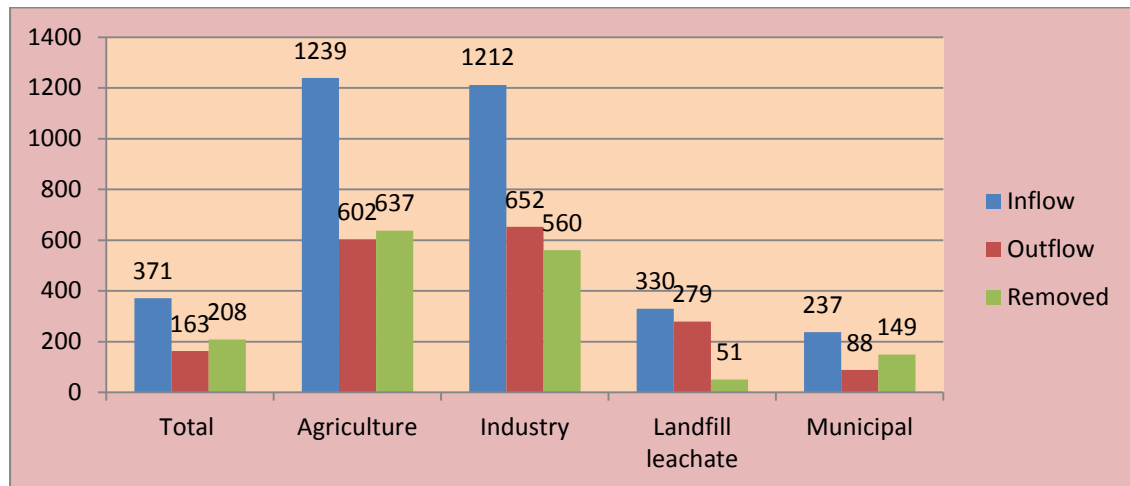
Στους CW λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα αερόβια και αναερόβια αποδόμηση της οργανικής ύλης. Όπως όλα τα βιολογικά συστήματα, αυτοί οι μηχανισμοί είναι μονοσήμαντοι στη Φύση, αλλά οι ερευνητές συνεχώς προσπαθούν να αναπτύξουν πιο περίπλοκα μοντέλα, τα οποία, δυστυχώς, απαιτούν περίπλοκες και πολυάριθμες παραμέτρους. Τα κενά σε αυτά τα περίπλοκα μοντέλα είναι η εξαιρετική δυσκολία του ακριβούς εντοπισμού και ποσοτικοποίησης όλων των πιθανών παραμέτρων, ενώ αρκετές υποθέσεις που θεωρούνται χαρακτηρίζονται ως αμφιλεγόμενες (Vymazal & Kropfelova, 2008).

Δύο ομάδες διαγραμμάτων και ένας πίνακας έχουν ληφθεί από τους Vymazal & Kropfelova (2008). Αυτά μπορούν να μελετηθούν ώστε να γίνουν καλύτερα κατανοητές οι έννοιες της μέσης συγκέντρωσης και φόρτισης εισόδου (inflow) και εξόδου (outflow) καθώς και η απομάκρυνση μάζας για το COD για διάφορους τύπους λυμάτων (αστικά-municipal, δευτερογενή-secondary, τριτογενή-tertiary, αποδιασταλάγματα ΧΥΤΑ-landfill leachate, βιομηχανία-industry, γεωργία-agriculture και συνολικά-total) (Σχήμα 1α και 1β) και το ίδιο για το BOD (Σχήμα 2α και 2β).

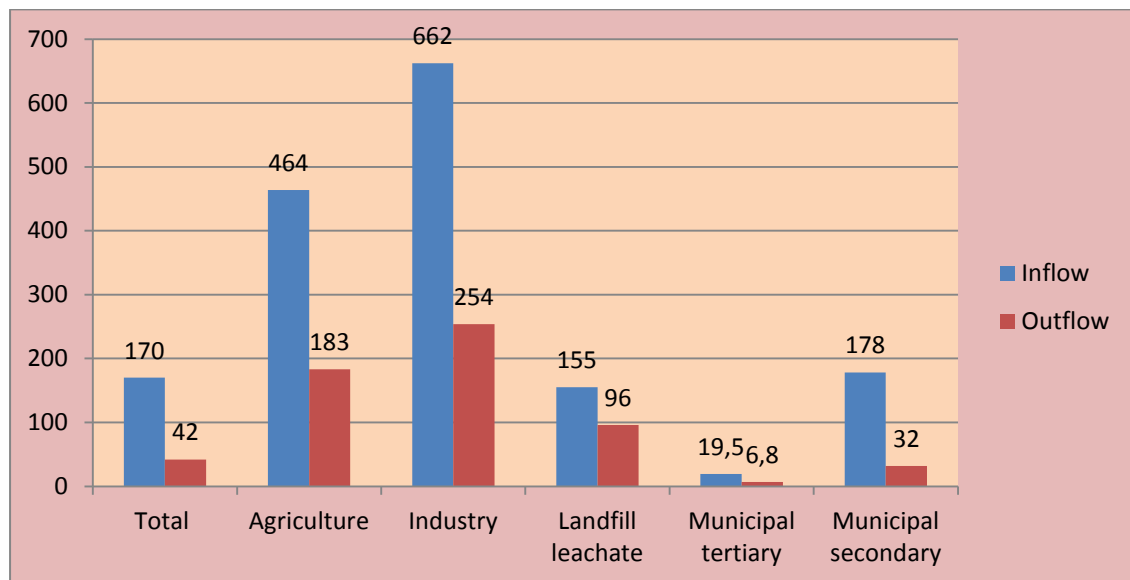
Σχ. 1α: Μέσες Συγκεντρώσεις Εισόδου-Εξόδου COD (mg/l) για Διάφορους Τύπους Λυμάτων



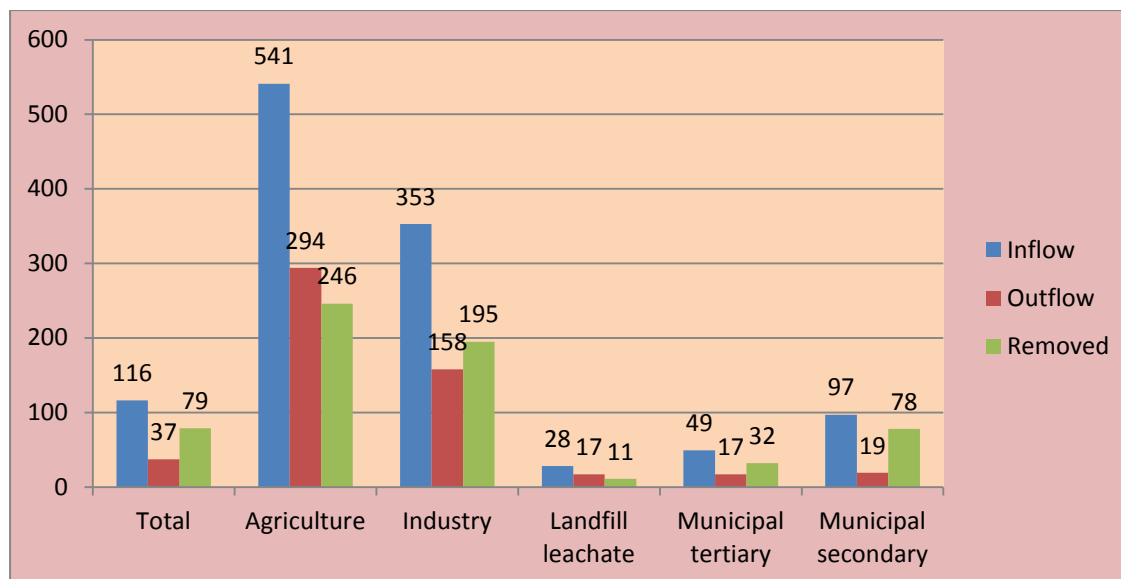
Σχ. 1β: Μέσες Φορτίσεις Εισόδου-Εξόδου COD (kgCOD/ha.d) για Διάφορους Τύπους Λυμάτων



Σχ. 2α: Μέσες Συγκεντρώσεις Εισόδου-Εξόδου BOD₅ (mg/l) για Διάφορους Τύπους Λυμάτων



Σχ. 2β: Μέσες Φορτίσεις Εισόδου-Εξόδου BOD₅ (kgCOD/ha.d) για Διάφορους Τύπους Λυμάτων



Ο Πίνακας 3, από την ίδια πηγή, περιέχει δεδομένα σχετικά με την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης ρύπων για διάφορους τύπους λυμάτων.

Πίνακας 3: Μέσες Αποδόσεις Απομάκρυνσης (%) για τους Τύπους Λυμάτων

Τύποι Λυμάτων	BOD ₅	COD
Γεωργία	68.2	63.0
Βιομηχανία	60.1	63.1
Εκπλύσεις ΧΥΤΑ	32.8	24.9
Τριτογενή Αστικά	60.7	-
Δευτερογενή Αστικά	80.7	63.2
Σύνολο	73.4	62.7

Μερικά στατιστικά στοιχεία για μέγιστες και ελάχιστες παραμετρικές τιμές σε CW, που έχουν εξαχθεί από τους Vymazal & Kropfelova (2008), συμπεριλαμβάνονται ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητό το τί μπορεί να επιτευχθεί μέσω της παρούσας εργασίας.

Τα βιομηχανικά λύματα παρουσιάζουν κατά μέσο όρο την υψηλότερη συγκέντρωση BOD₅ εισόδου (652 mg/L) και COD εισόδου (1865 mg/L), ενώ τα αγροτικά εκπλύματα παρουσιάζουν κατά μέσο όρο BOD₅ 464 mg/L και οι απορροές

XYTA παρουσιάζουν COD 933 mg/L. Οι υψηλότερες υδραυλικές φορτίσεις παρουσιάζονται σε αγροτικά εκπλύματα και τριτογενείς αστικές εκροές (24,3 cm/d), ενώ οι απορροές XYTA φτάνουν κατά μέσο όρο τα 2.7 cm/d. Τα αγροτικά απόβλητα παρουσιάζουν κατά μέσο όρο τις υψηλότερες φορτίσεις για BOD₅ και COD με 541 και 1239 kg/ha.d αντίστοιχα, ακολουθούμενα από τα βιομηχανικά λύματα με 365 και 1212 kg/ha.d αντίστοιχα.

1. Επεξεργασία Οργανικής Ύλης και Φυτικών Οργανισμών

Οι Vymazal & Kropfelova (2008) αναφέρουν αντικρουόμενες ενδείξεις υπέρ και κατά της χρησιμότητας της βλάστησης στις διεργασίες απομάκρυνσης των ρύπων σε HSSF-CW. Τα *P. australis* και τα *T. latifolia*, καλλιεργημένα σε υδροβιότοπο αναερόβιας χώνευσης με σκοπό τον καθαρισμό λυμάτων ιχθυοτροφείου, παρείχαν σημαντική μείωση στα BOD₅ και COD σε σχέση με αντίστοιχη εγκατάσταση χωρίς βλάστηση. Στη Β. Αφρική, HSSF-CW καλλιεργημένοι με *A. donax* απομάκρυνε 21-25% περισσότερο COD σε σχέση με αντίστοιχο CW που δεν έφερε βλάστηση. Ομοίως, σε HSSF-CW καταγράφηκαν συγκριτικά υψηλοί ρυθμοί απομάκρυνσης για BOD₅ και για COD όταν είχαν φυτευτεί με το είδος *P. karka* (Vymazal & Kropfelova, 2008). Οι HSSF-CW σε περιοχές της Κ. Αμερικής καλλιεργημένοι με το είδος *Croix lacryma-jobi* παρουσίασαν υψηλότερους ρυθμούς απομάκρυνσης ρύπων σε σχέση με αντίστοιχους χωρίς βλάστηση.

Αντιθέτως, αρκετοί ερευνητές έχουν αποδείξει ότι CW με κοινά είδη φυτών για υδροβιότοπους, όπως τα *T. latifolia*, *Sagittaria latifolia*, *Scirpus pungens* και *P. australis* απέτυχαν να παρουσιάσουν υψηλότερους ρυθμούς απομάκρυνσης συγκρινόμενοι με αντίστοιχα συστήματα που δεν έφεραν βλάστηση (Vymazal & Kropfelova, 2008).

Έχουν επίσης αναφερθεί και περιπτώσεις που παρατηρήθηκε μείωση του ρυθμού απομάκρυνσης ρύπων παρουσία βλάστησης. Υπάρχουν επίσης αναφορές ότι κάποια φυτά μειώνουν (*T. latifolia*) ή εξαλείφουν (*Carex rostrata* και *Scirpus acutus*) τη μεταβολή στους ρυθμούς επεξεργασίας οργανικού-C που προκύπτει από τις εποχιακές θερμοκρασιακές μεταβολές (Vymazal & Kropfelova, 2008).

Οι Baptista et al. (2008) αναφέρουν μικρές διαφορές στη βιοποικιλότητα και την κοινοτική δομή των μικροβιακών παραγόντων σε HSSF-CW με ή χωρίς βλάστηση. Οι μικροβιακές λειτουργικές ομάδες που ερευνήθηκαν ήταν αρχαία (όπως μεθανογόνα), ετερότροφα (υδρολυτικά και οξεογόνα), καθώς και θειοαναγωγικά

βακτήρια. Το κριτήριο για την απόδοση απομάκρυνσης ήταν ο διαλυτός οργανικός-C και οι μελέτες εστιάζονταν στη δραστηριότητα, τους ρυθμούς ανάπτυξης, την κοινοτική δομή και την παρουσία των μικροβιακών παραγόντων σε σχέση με την απόδοση της επεξεργασίας (Baptista et al., 2008). Οι Baptista et al. (2008), συνεπώς, αναφέρουν ότι δεν παρατηρήθηκε ότι τα φυτά έπαιζαν κάποιο σημαντικό ρόλο ως προς την παροχή υποστήριξης στους μικροβιακούς παράγοντες που εμπλέκονται στην απομάκρυνση του άνθρακα από τους CW και ειδικά του τύπου HSSF.

Παρόλα αυτά, οι Baptista et al. (2008) συμφωνούν ότι υφίστανται μελέτες που αναφέρουν ότι τα φυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στην αυξημένη απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών και βαρέων μετάλλων. Υπάρχουν επίσης θετικές αναφορές για τις βακτηριοκτόνες ιδιότητες κάποιων φυτών που βοηθούν στην απομάκρυνση παθογόνων από το περιβάλλον των CW (Baptista et al., 2008). Οι Baptista et al. (2008) επισημαίνουν επίσης ότι τα φυτά παίζουν σημαντικό ρόλο στις εκπομπές μεθανίου από τους CW και ιδιαίτερα τα συστήματα του τύπου HSSF. Το αναερόβια παραγόμενο CH_4 μεταφέρεται μέσω των φυτικών αγγειακών δικτύων προς τα φύλλα και από εκεί εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα.

2. Εποχιακές και Κλιματικές Επιδράσεις στην Απόδοση των CW (Ρυθμοί Απομάκρυνσης Οργανικού Άνθρακα)

Όπως και με την επίδραση της φυτικής ζωής και την επίδρασή της στην αποτελεσματικότητα επεξεργασίας των CW, υπάρχουν αντικρουόμενες αναφορές σχετικά με τις εποχιακές και κλιματικές μεταβολές στη θερμοκρασία και την αποτελεσματικότητα επεξεργασίας των CW (Vymazal & Kropfelova, 2008). Οι μελέτες αναφέρονται ειδικά σε CW οριζόντιας ροής. Υπάρχει μία αναφορά για δύο γειτονικά συστήματα οριζόντιας ροής στη Μινнесότα των ΗΠΑ με μέση θερμοκρασία αέρα και νερού στους 5° και 9° C αντίστοιχα, με τη θερμοκρασία του αέρα να φθάνει την ελάχιστη τιμή των -40° C. Η απομάκρυνση του BOD_5 ήταν η μέγιστη κατά το φθινόπωρο και το καλοκαίρι με σημαντική μείωση στην αποδοτικότητα απομάκρυνσης κατά το χειμώνα και την άνοιξη (Vymazal & Kropfelova, 2008). Από την άλλη μεριά, υπάρχει μία αναφορά για CW κατασκευασμένους σε υψόμετρο 730 m με μέση ετήσια θερμοκρασία 8.4° C στην Ελβετία. Πολύ μικρή διαφορά στην εποχιακή αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης διαπιστώθηκε με τους CW να λειτουργούν αποτελεσματικά στους 0.5° C. Παρόμοιες αναφορές είναι επίσης διαθέσιμες από τη Γερμανία και τη Νεμπράσκα των ΗΠΑ για

CW χωρίς σημαντικές διαφορές στους ρυθμούς απομάκρυνσης BOD₅ και COD για το χειμώνα και το καλοκαίρι (Vymazal & Kropfelova, 2008).

Γ. Μηχανισμοί Απομάκρυνσης του Αζώτου

Η απομάκρυνση και η κατακράτηση N από τους CW είναι περίπλοκη διαδικασία. Η νιτροποίηση/απονιτροποίηση, η πρόσληψη από τη βλάστηση, η εξάχνωση και η ιζηματική απόθεση αποτελούν τις κυριότερες διεργασίες. Οι παράμετροι που σχετίζονται με το N και μπορούν να μετρηθούν στο πλαίσιο των διεργασιών απομάκρυνσης και κατακράτησης είναι το συνολικό άζωτο (Total Nitrogen-TN), οι μονάδες αμμωνίου (NH₄⁺) και τα αζωτούχα οξείδια (NO_y) (Maltias-Landry et al., 2009). Η κυριότερη διεργασία της νιτροποίησης / απονιτροποίησης παρουσιάζει αντικρουόμενες απαιτήσεις σε οξυγόνο. Η απονιτροποίηση είναι αναερόβια διεργασία, ενώ η νιτροποίηση είναι αερόβια. Οι τρεις τύποι περιβάλλοντος οξυγόνου που σχετίζονται με την απομάκρυνση του αζώτου είναι οι εξής: 1) αερόβιο (>200 MV), ανοξικό (200 έως -200 MV) και αναερόβιο (<-200 MV) (Dong & Sun, 2007).

1. Απονιτροποίηση

Η απονιτροποίηση είναι μία αναερόβια διεργασία κατά την οποία οι νιτρικές ρίζες χρησιμοποιούνται ως αποδέκτες ηλεκτρονίων για την αναερόβια αναπνοή η οποία παράγει ενέργεια. Πρώτα, οι νιτρικές ρίζες (NO₃⁻) ανάγονται σε νιτρώδεις (NO₂⁻). Οι νιτρώδεις ρίζες μπορούν στη συνέχεια να αναχθούν σε αμμώνιο ή διαδοχικά σε νιτρικό οξύ (NO), νιτρώδες οξύ (N₂O) και αέριο άζωτο (Sirivedhin & Gray, 2006).



Τα ένζυμα που πραγματοποιούν αυτήν την τμηματική διεργασία αναστέλλουν τη δραστηριότητά τους παρουσία O₂ και ως εκ τούτου η διεργασία αυτή είναι αυστηρά αναερόβια. Στο τέλος κάθε βήματος, το προϊόν, εάν είναι αέριο, μπορεί να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα ή να αναχθεί περαιτέρω, αλλά συνήθως η διεργασία αναγωγής ολοκληρώνεται (Sirivedhin & Gray, 2006). Η παραπάνω τμηματική διεργασία ελέγχεται από μικροοργανισμούς και ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των διαφόρων υδροβιοτόπων, καθιστώντας απαραίτητη την υποτύπωση του είδους του N που κατά βάση παράγεται, καθώς τα N_xO συνεισφέρουν σημαντικά στο «φαινόμενο του θερμοκηπίου» (Maltias-Landry et al., 2009). Αυτή η

διεργασία, σύμφωνα με τον ορισμό των Sirivedhin & Gray (2006), είναι διαλυτική κατά την οποία το N αποσυνδέεται από το περιβάλλον των υδροβιοτόπων και απομακρύνεται από αυτό.

Οι νιτρώδεις ρίζες για την απονιτροποίηση δεν εισάγονται στον υδροβιότοπο μόνο από τις συγκεντρώσεις των εισροών αλλά επίσης ως προϊόν της διεργασίας νιτροποίησης.

Μέσω μίας άλλης εναλλακτικής οδού, η οποία είναι συνθετική και στην οποία το N δεσμεύεται στο περιβάλλον του υδροβιοτόπου, οι νιτρώδεις ρίζες ανάγονται σε αμμώνιο για χρήση από τα φυτά, τους μύκητες και τα βακτήρια ως πηγή N. Αυτή η διεργασία, όμως, δεν είναι πολύ σημαντική καθώς επεξεργάζεται λίγο άζωτο στους υδροβιότοπους (Sirivedhin & Gray, 2006).

Αφού η απονιτροποίηση είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην παρουσία του οξυγόνου, περιορίζεται μόνο σε ανοξικές ζώνες στο περιβάλλον του υδροβιότοπου. Μπορεί να λάβει χώρα σε ανοξικά τμήματα του βακτηριακού υμενίου κάτω από επιφανειακά ύδατα με παρουσία διαλυμένου οξυγόνου. Επίσης, μπορεί να λάβει χώρα σε αναερόβιο έδαφος ακριβώς κάτω από την αερόβια ριζόσφαιρα, όπου αποδεικνύεται ότι από το μίγμα O_2 / N_2 , το O_2 μπορεί να διεισδύσει μέχρι 1 mm μέσα στο ίζημα περιορίζοντας την απονιτροποίηση στην ανοξική ζώνη ακριβώς από κάτω (Sirivedhin & Gray, 2006).

Μεγάλες συγκεντρώσεις νιτρικών ριζών μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τους ρυθμούς απονιτροποίησης. Επίσης, η παρουσία εύπεπτων πηγών άνθρακα, όπως γλυκόζη, ακετυλικό νάτριο, μεθανόλη, άμυλο, κυτταρίνη, φυτικές ύλες, κλπ., εξασφαλίζουν σταθερούς ρυθμούς απονιτροποίησης (Sirivedhin & Gray, 2006).

Επίσης, μελέτες έχουν δείξει ότι ανόργανα εδάφη με ισορροπία νιτρικών και άνθρακα ενισχύουν περισσότερο τους ρυθμούς απονιτροποίησης σε σχέση με μόνο οργανικά εδάφη. Τα τυρφώδη εδάφη, έτσι, έχουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους αμμώδεις αργίλους. Επιπλέον, εδάφη τα οποία δεν στραγγίζονται επαρκώς και τα οποία αναπτύχθηκαν σε προγενέστερα εδάφη πλούσια σε θρεπτικά συστατικά παρουσίαζαν καλύτερες ιδιότητες ως προς την απονιτροποίηση σε σχέση με καλά στραγγιζόμενα εδάφη τα οποία είχαν αναπτυχθεί πάνω σε λιγότερο εύφορα εδάφη (Sirivedhin & Gray, 2006).

2. Νιτροποίηση

Η νιτροποίηση είναι μία αερόβια χημική-αυτότροφη μικροβιακή διεργασία και περιορίζεται στους CW HSSF από τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου (Maltias-Landry et al., 2009). Η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης N μέσω νιτροποίησης στους CW μπορεί να ενισχυθεί μέσω της μακροφυτικής ανάπτυξης, του τεχνητού αερισμού και άλλων μηχανισμών, όπως η διάχυση. Τα φυτά εμπλουτίζουν τη ριζόσφαιρά τους με περίσσεια οξυγόνου είτε με ενεργητική είτε με παθητική μεταφορά από την ατμόσφαιρα μέσω των αγγειακών τους δικτύων και αυτό με τη σειρά του ενισχύει τη νιτροποίηση. Ο τεχνητός αερισμός είναι αποτελεσματικότερη μέθοδος παροχής οξυγόνου σε σχέση με τα φυτά (Maltias-Landry et al., 2009). Η διαδρομή της νιτροποίησης απεικονίζεται ως εξής:



Όπως γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω τμηματική διαδικασία, το τελικό προϊόν της νιτροποίησης είναι οι νιτρικές ρίζες. Ο μηχανισμός απομάκρυνσης των νιτρικών στο πλαίσιο του υδροβιότοπου είναι είτε η κατακράτηση μέσω της απορρόφησης από τα φυτά και η ιζηματική απόθεση, είτε η απομάκρυνση κυρίως μέσω της απονιτροποίησης. Εννοείται ότι για την απομάκρυνση του N από τους CW μέσω νιτροποίησης, θα πρέπει να υφίσταται διεργασία απονιτροποίησης. Οι CW που μπορούν να υποστηρίξουν την αερόβια διεργασία της νιτροποίησης με περίσσεια οξυγόνου, πρέπει επίσης να μπορούν να υποστηρίξουν την αναερόβια διεργασία της απονιτροποίησης με ανοξικές περιοχές στην ίδια τοποθεσία.

Συμπερασματικά, η νιτροποίηση είναι μία διεργασία που υπόκειται στον περιορισμό ανάγκης ύπαρξης της απονιτροποίησης ώστε να απομακρυνθεί πλήρως το N από το περιβάλλον του υδροβιότοπου. Από την άλλη μεριά, η απονιτροποίηση δεν υπόκειται σε τόσο μεγάλους περιορισμούς παρά μόνο από την περιστασιακή απομείωση της παροχής νιτρικών, την περίσσεια οξυγόνου ή άλλους παράγοντες όπως ασυμμετρία στην παροχή νιτρικών και τη διαθεσιμότητα εύπεπτου άνθρακα (Maltias-Landry et al., 2009).

3. ANAMMOX

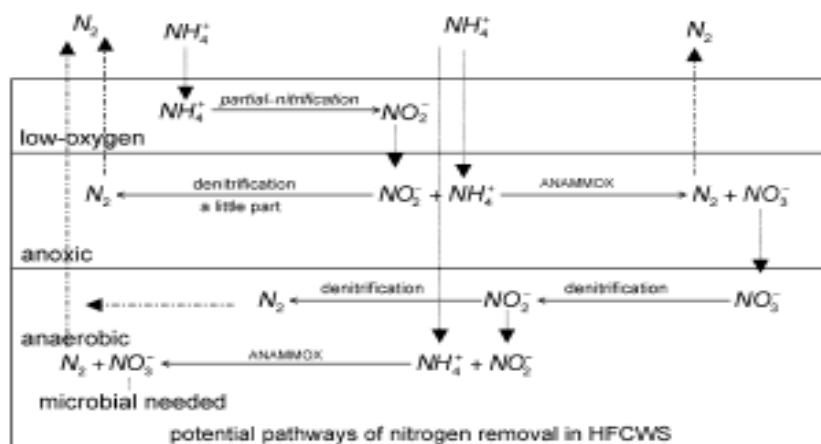
Οι Dong & Sun (2007) και οι Erler et al. (2008), μεταξύ άλλων, αναφέρουν μία νέα διεργασία απομάκρυνσης του N που ονομάζεται ANAMMOX (Anaerobic

AMMonium OXidation - Αναερόβια Αμμωνιακή Οξείδωση). Πιστεύεται ότι πρόκειται για μία φυσική διεργασία που απαντάται πιθανώς σε περιβάλλοντα με έλλειψη οξυγόνου, όπως θαλάσσια. ιζήματα, μαγκρόβια και ιζήματα ποτάμιων εκβολών, καθώς και ανοξικές υδάτινες στήλες (Dong & Sun, 2007 και Erler et al., 2008). Οι ελαφρά ανοξικές συνθήκες μπορούν μονάχα να επιτρέψουν τη μερική νιτροποίηση κατά την οποία το αμμώνιο νιτροποιείται μερικώς σε νιτρώδη. Τα νιτρώδη και επιπλέον αμμώνιο, σε αναερόβιες συνθήκες, οι οποίες μπορεί να επικρατούν σε κάποιο άλλο σημείο του περιβάλλοντος του υδροβιοτόπου, οξειδώνεται σε αέριο N (Erler et al., 2008).



Η παραπάνω εξίσωση παρουσιάζει την αντίδραση σε απλοποιημένη μορφή. Οι Dong & Sun (2007) παρουσιάζουν σχηματικά τη δράση ANAMMOX, όπως στο Σχήμα 3.

Σχήμα 3: Δυνατές Διαδρομές σε CW HSSF που Περιλαμβάνουν ANAMMOX.



Η διεργασία ANNAMOX, όπως αναφέρεται από τους Dong & Sun (2007), συνήθως συνυπάρχει με τη μερική νιτροποίηση. Παρόλο που τα κάθετα συστήματα CW συνήθως δεν υποστηρίζουν αερόβιες διεργασίες, όπως η νιτροποίηση, εκτός από την επιφάνειά τους, ένα συνδυασμένο σύστημα βάθους 80 cm στο οποίο τα ανώτερα 25 cm είναι μη κορεσμένα ενώ το υπόλοιπο είναι κορεσμένο (Dong & Sun, 2007), υποστήριξε με επιτυχία το συνδυασμό διεργασιών μερικής νιτροποίησης και ANAMMOX. Τα νιτρώδη από τη μερική νιτροποίηση στο ανώτερο μη κορεσμένο

στρώμα διείσδυσε στο κατώτερο κορεσμένο στρώμα όπου η ANAMMOX οξειδωσε και τα νιτρώδη και περισσότερο αμμώνιο σε αέριο άζωτο (Dong & Sun, 2007).

Αναερόβια και αυτότροφα βακτήρια της τάξεως των Πλανκτομυκήτων (Erler et al., 2008) διεξάγουν την εν λόγω διεργασία. Οι Dong & Sun (2007) εικάζουν ότι δύο είδη βακτηρίων, οι αερόβιοι νιτροποιητές και τα βακτήρια ANAMMOX μπορεί να αποτελούν φυσικούς συνεργάτες, οι οποίοι συνυπάρχουν σε περιβάλλοντα με έλλειψη οξυγόνου και μεταβολίζουν άζωτο για τις ενεργειακές τους ανάγκες.

Ουσιαστικά, όπως αναφέρουν και οι Tao & Wang (2009), τα βραδέως αναπτυσσόμενα βακτήρια ANAMMOX παρουσιάζουν μεγάλη δυσκολία στην ανάπτυξη και διατήρησή τους. Μία πλειάδα παραγόντων επηρεάζουν τη συντήρηση και την ανάπτυξή τους στους CW, όπως το διαλυμένο οξυγόνο, το pH, η αλκαλικότητα, η αναλογία μεταξύ του αμμωνίου και των νιτρωδών στα εισρέοντα λύματα, η επιφανειακή αναλογία των φορέων της βιομάζας, τυχόν προσμείξεις, ο χρόνος υδραυλικής παραμονής, κλπ. (Tao & Wang, 2009). Εφόσον και η αύξηση των νιτρωδών μέσω της μερικής νιτροποίησης εξαρτάται από παράγοντες όπως το pH, η θερμοκρασία και το διαλυμένο οξυγόνο, μία κατάλληλη διασύνδεση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τη νιτροποίηση και την ANAMMOX απαιτείται ώστε η τελευταία να επιτύχει την απομάκρυνση του N. Προς το παρόν δίδεται βαρύτητα στην επίτευξη της αποτελεσματικής εφαρμογής της συνδυασμένης διεργασίας νιτροποίησης / ANAMMOX καθώς αυτή παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα σε σχέση με τη συμβατική διαδικασία νιτροποίησης / απονιτροποίησης:

- i. Απαιτεί μικρή ποσότητα ενέργειας για τις ανάγκες αερισμού ώστε να επιτύχει πλήρη νιτροποίηση,
- ii. Εξαλείφει την απαίτηση για ύπαρξη εξωτερικού οργανικού υποστρώματος,
- iii. Μειώνει την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (Tao & Wang, 2009).

Συνίσταται, ωστόσο, η συνύπαρξη του συνδυασμού μερικής νιτροποίησης / ANAMMOX με τη συμβατική διεργασία νιτροποίησης / απονιτροποίησης. Η συνδυασμένη διεργασία απαντάται σε υγροβιότοπους όπου είναι έντονη η διαβάθμιση οξυγόνωσης. Στο μεγαλύτερο όγκο του νερού και στο ανώτερο τμήμα του υποστρώματος του βιοϋμενίου, όπου η παροχή του οξυγόνου είναι μέτρια έως χαμηλή, μπορεί να λάβει χώρα η μερική νιτροποίηση, ενώ στις κατώτερες περιοχές

του βιοϋμενίου και το υπόστρωμα του ριζώματος πραγματοποιείται η ANAMMOX. Συνεπώς, η διάχυση αέρα, η ύπαρξη επιφανειακής βλάστησης και ο τεχνητός αερισμός μπορούν να παρέξουν το μεγαλύτερο μέρος από τη διαβάθμιση της οξυγόνωσης του υδροβιότοπου, η οποία απαιτείται για τη συνύπαρξη των δύο συνδυασμένων διεργασιών (Tao & Wang, 2009). Ο ασβεστόλιθος είναι ένα φθινό υπόστρωμα που συνεισφέρει στην απαιτούμενη αλκαλικότητα που χρειάζονται τα βακτήρια ANAMMOX και λειτουργεί επίσης ως ρυθμιστής του pH για τη μερική νιτροποίηση (Tao & Wang, 2009).

4. Θερμοκρασία και Επεξεργασία / Απομάκρυνση του N

Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας επηρεάζουν την επεξεργασία του N και αυτό μπορεί να ποσοτικοποιηθεί όπως παρακάτω:

$$k = k_{20} \theta^{(T-20)} \text{ (Kadlec, 2008)} \quad (13)$$

όπου k είναι η επιφανειακή σταθερά πρώτου βαθμού (σε m/d), k_{20} είναι η επιφανειακή σταθερά πρώτου βαθμού στους 20° C (σε m/d), T είναι η θερμοκρασία (σε °C) και θ είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας.

5. Φυτική Ανάπτυξη και Επεξεργασία / Απομάκρυνση του N

Ενώ οι ερευνητικές μελέτες που εξετάζουν τις διεργασίες επεξεργασίας και απομάκρυνσης του οργανικού άνθρακα από τους CW αποδίδουν αντικρουόμενα συμπεράσματα σχετικά με τη χρησιμότητα της βλάστησης για την επίτευξη αυτού του σκοπού, υπάρχουν κυρίως θετικές αναφορές σχετικά με την αποτελεσματικότητα της βλάστησης κατά την επεξεργασία και απομάκρυνση του N από τους CW.

Οι Ruiz-Rueda et al. (2009) αναφέρουν ότι η επίδραση των *T. latifolia* και *P. Australis*, στη δραστηριότητα και των νιτροποιητικών και των απονιτροποιητικών βακτηρίων, αποδεικνύεται θετικά σημαντική. Οι νιτροποιητικές δραστηριότητες ήταν υψηλότερες στη ριζόσφαιρα σε σχέση με το χωρίς βλάστηση ίζημα με την μεγαλύτερη επίδραση να παρατηρείται εκ μέρους του *P. australis*. Επίσης, παρατηρήθηκε ευρύτερη γονοτυπική (μέσω του γονιδίου *nosZ* της ρεντουκτάσης νιτρώδους οξειδίου) διαφοροποίηση των βακτηριακών ειδών απονιτροποίησης στη ριζόσφαιρα παρά στο ίζημα. Έχει προταθεί η επίδραση των φυτικών ειδών σε αυτή τη διαφοροποίηση. Η διαφοροποίηση των αμμωνιοαναγωγικών βακτηρίων ήταν

λιγότερο ευρεία (μέσω του γονιδίου 16S rRNA) και σχετίζεται μόνο με τα *Nitrosomonas marina* και *Nitrosomonas ureae* χωρίς σημαντική επίδραση από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (Ruiz-Rueda et al., 2009).

Μία αερόβια διεργασία, όπως η νιτροποίηση, προφανώς υποβοηθείται αρκετά από την παρουσία επιφανειακών φυτών τα οποία μπορούν να μεταφέρουν O_2 από την ατμόσφαιρα μέσω αερεγχύματος προς το καλυμμένο με νερό ίζημα. Αντίστοιχα, για την απομάκρυνση του TN είναι ουσιώδης η εδραίωση μιας διεργασίας νιτροποίησης (Ruiz-Rueda et al., 2009).

Στην περίπτωση της απονιτροποίησης, τα αναερόβια ετερότροφα τα οποία μπορούν να εκμεταλλευτούν τις αζωτούχες ενώσεις σε απουσία οξυγόνου, αποκτούν ένα πλεονέκτημα σε σχέση με άλλους απονιτροποιητές που χρειάζονται ένζυμα βασισμένα στο οξυγόνο. Τέτοιοι αναερόβιοι απονιτροποιητές συνήθως αποικίζουν τις περιοχές των ριζών. Σε αυτό το πλαίσιο οι Ruiz-Rueda et al. (2009) έχουν την άποψη ότι για τους υψηλότερους ρυθμούς μείωσης των νιτρικών στη ριζόσφαιρα των *Phragmites sp.* σε σχέση με αυτήν των *Typha sp.* προκύπτει ότι οι *Phragmites sp.* παρείχαν καλύτερες δυνατότητες για τους νιτροποιητές. Συμπερασματικά, η μεγαλύτερη παραγωγή νιτρικών αύξησε το συνολικό ρυθμό μείωσης του N σε αυτές τις τοποθεσίες των παρατηρούμενων CW (Ruiz-Rueda et al., 2009). Είναι αξιοσημείωτο ότι στο πλαίσιο μελέτης των απονιτροποιητών από τους Ruiz-Rueda et al. (2009) προκύπτει ότι μεταλλαγμένα είδη που δεν μπορούν να συνθέσουν αναερόβια αζωτοαναγωγικά ένζυμα, όπως τη νιτρική ρεντουκτάση που προσκολλάται στην κυτταρική μεμβράνη, τη νιτρώδη ρεντουκτάση cd_i ή τη ρεντουκτάση νιτρώδους χαλκού, μπορούν να αναπληρώσουν αυτήν την ιδιότητα από άλλα στελέχη με παρόμοιο αποτέλεσμα.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι παρόλο που υπάρχει πιθανότητα εποχιακές μεταβολές που επηρεάζουν τη φυτική φυσιολογία να επηρεάζουν αντίστοιχα τους ρυθμούς επεξεργασίας και απομάκρυνσης του N, κατά το σκεπτικό των Ruiz-Rueda et al. (2009), οι μεταβολές της μείωσης του N οφείλονται πιθανόν στις εποχιακές μεταβολές του οργανικού φορτίου και του χρόνου κατακράτησης. Ωστόσο, είναι άξιο προσοχής το γεγονός ότι οι απονιτροποιητές επέδειξαν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα ως προς τη δομή των αποικιών τους σε τοποθεσίες που περιείχαν διαφορετικά φυτικά είδη. Αυτή η διαφορά στη σύσταση των κοινοτήτων απονιτροποιητών σε τοποθεσίες με δύο φυτικά είδη ενισχύθηκε από τις εποχιακές διαφοροποιήσεις των οργανικών φορτίων (Ruiz-Rueda et al., 2009).

III. Ανάπτυξη Μοντέλου

Η τοποθεσία που χρησιμοποιείται από την παρούσα εργασία ως οδηγός είναι η Κομητεία Ίνιο (Inyo County) της πολιτείας Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Η Κομητεία συνορεύει με την πολιτεία της Νεβάδα και περιλαμβάνει μερικά από τα πλέον εντυπωσιακά φυσικά θαύματα στις ΗΠΑ, όπως την «Κοιλάδα του Θανάτου» και τους Πευκώνες Bristlecone, που περιλαμβάνουν μερικά από τα γηραιότερα ζώντα δένδρα του πλανήτη. Η επιλογή αυτή έγινε αφενός λόγω της ύπαρξης ευρείας βάσης δεδομένων για την περιοχή αυτή και αφετέρου λόγω των ομοιοτήτων που παρουσιάζει με την περιοχή στην οποία βρίσκεται η Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα η νήσος Κρήτη, λαμβανόμενης υπόψη και της εξέλιξης που διαφαίνεται ότι ακολουθούν οι κλιματολογικές συνθήκες.

Σύμφωνα με τα στοιχεία του 2007 από το «Σύστημα Πληροφοριών Υδροβιοτόπων της Καλιφόρνια» (California Wetlands Information System), δεν υπάρχουν καθόλου υδροβιότοποι υπό δημόσια διαχείριση στην Κομητεία Ίνιο. Η προέλευση του νερού στην Καλιφόρνια έχει τη μορφή βροχοπτώσεων, εισαγωγών από γειτονικές πολιτείες και φυσικές επιφανειακές εισροές. Ανάλογα με το επίπεδο βροχοπτώσεων ανά έτος, περίπου το 28-45% αυτής της παροχής διανέμεται σε αστικές, αγροτικές και περιβαλλοντικές χρήσεις (LAO Primer, 2008). Το κόστος για τον οικιακό καταναλωτή, το οποίο διασυνδέεται με τη διαθεσιμότητα του νερού, ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή. Για παράδειγμα, ενώ ο μέσος ετήσιος λογαριασμός νερού για το μέσο νοικοκυριό στην περιοχή της «Κεντρικής Ακτής» και στην Κοιλάδα του San Joaquin είναι 1,14% και 0,74% αντίστοιχα, στην περιοχή του Κόλπου του Σαν Φρανσίσκο είναι μόλις 0,58%, το οποίο είναι και το χαμηλότερο στην πολιτεία. Αντιθέτως, είναι 1,06% σε άλλες περιοχές, περιλαμβανόμενης της Κομητείας Ίνιο (Hanak, 2008). Υπ' αυτό το πρίσμα, είναι προφανές ότι η Κομητεία Ίνιο δε διαθέτει φθινό επιφανειακό απόθεμα νερού (LAO Primer, 2008) και πιθανόν το νερό πρέπει να εισάγεται από κάποιο άλλο μέρος.

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ότι τα λύματα από το αστικό δίκτυο πρέπει να διέλθουν από επεξεργασία πριν διατεθούν στο περιβάλλον. Με δεδομένη την πίεση που ασκείται για την προστασία του περιβάλλοντος και την αυτονόητη ανάγκη για την απαίτηση ενός ελάχιστου επιπέδου ποιότητας νερού ακόμη και αν η απαιτούμενη επεξεργασία είναι ακριβή, οι τοπικές αρχές δεν έχουν άλλη επιλογή παρά να αναλάβουν τέτοιες δράσεις που χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος. Σύμφωνα με τον Hanak (2008), οι κάτοικοι των

πόλεων στις προαναφερόμενες περιοχές της «Κεντρικής Ακτής» και στην Κοιλάδα του San Joaquin καταβάλλουν το 0,54% και το 0,52% του εισοδήματος του μέσου νοικοκυριού, αντίστοιχα, ώστε τα αστικά τους λύματα να υποβάλλονται σε επεξεργασία σε βιολογικό καθαρισμό. Απεναντίας, στην περιοχή του Κόλπου του Σαν Φρανσίσκο, οι κάτοικοι πληρώνουν το 0,49% και οι κάτοικοι στην υπόλοιπη πολιτεία, συμπεριλαμβανόμενης της Κομητείας Ίνιο, πληρώνουν το 0,72% του εισοδήματος του μέσου νοικοκυριού για το βιολογικό καθαρισμό των αστικών τους λυμάτων (Hanak, 2008). Γίνεται αντιληπτό ότι οι κάτοικοι του υπολοίπου της πολιτείας, συμπεριλαμβανόμενης της Κομητείας Ίνιο, σε σύγκριση με τις πιο πυκνοκατοικημένες και αστικοποιημένες περιοχές της πολιτείας, έχουν το υψηλότερο ποσοστό εξόδων, όσον αφορά στην επεξεργασία των αστικών τους λυμάτων (Hanak, 2008).

Η απουσία υγροβιοτόπων, επιφανειακών αποθεμάτων νερού και το υψηλό κόστος επεξεργασίας αστικών λυμάτων αποτελούν το συνδυασμό που δικαιολογεί την επιλογή της Κομητείας Ίνιο στην Καλιφόρνια (Περιοχή IX της EPA) ως την τοποθεσία ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας. Μία αντιστοίχιση με τα εγχώρια δεδομένα θα μπορούσε να γίνει σε περίπτωση εξορθολογισμού του αντίστοιχου κόστους που καταβάλλεται στους δήμους της Κρήτης και άλλων περιοχών της Ελλάδας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η Κομητεία Ίνιο διαθέτει αρκετούς προορισμούς με φυσική ομορφιά, και αποτελεί επιλογή εκατομμυρίων τουριστών, οι οποίοι επιθυμούν να θαυμάσουν τους φυσικούς θησαυρούς της. Αξίζει να σημειωθεί πως ενώ η Κομητεία είναι η δεύτερη μεγαλύτερη στην Καλιφόρνια με συνολική έκταση πάνω από 25.000 τετρ. χιλιόμετρα, ο συνολικός της πληθυσμός, σύμφωνα με την απογραφή του 2000, ήταν 17.945. Εκτός από την πρωτεύουσα Independence, και τις πόλεις Bishop και Big Pine, υπάρχουν πολλές μικρές κοινότητες κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων, όπως ο αυτοκινητόδρομος US 395, καθώς και γύρω από τουριστικές περιοχές. Μερικές από αυτές τις ημιαστικές περιοχές, όπως η Olancha (συνολικός πληθυσμός 134) και η Tecopa (συνολικός πληθυσμός 99) αποτελούν μόνιμες κοινότητες αν και πολύ μικρές. Η πόλη του Bishop με τα προάστια της έχει συνολικό πληθυσμό 12.000 και αποτελεί το επίκεντρο ενδιαφέροντος για την παρούσα εργασία.

Είναι απαραίτητο να γίνει μία αναφορά στην ιστορία της κοιλάδας Owen's, η οποία αποτελεί την περιοχή ανάπτυξης της πόλης του Bishop στον άξονα βορρά-

νότου, ώστε να προετοιμαστεί κατάλληλα το υπόβαθρο για την έρευνα σχετικά με τον Τεχνητό Υγροβιότοπο (Constructed Wetland-CW) που μπορεί να υποστηρίξει την κοινότητα αυτή. Κατ' αρχάς, για πάνω από 100 χρόνια, τρεχούμενο νερό από την κοιλάδα αντλείται ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες μεγάλων γειτονικών αστικών σχηματισμών, όπως το Λος Άντζελες και το περίφημο Υδραγωγείο του (LA Aqueduct). Αυτή η βαθμιαία εκμετάλλευση της υδρολογικής «προίκας» του τοπίου που μεταβαίνει από την απόλυτη ξηρασία των ερήμων Mojave και Great Basin απειλεί την επιβίωση της τοπικής χλωρίδας. Είναι γνωστό ότι φυτικά είδη που ζουν σε λιβάδια, όπως όλα τα είδη χόρτου, έχουν μικρό ρίζωμα και οποιαδήποτε σταδιακή απομείωση στα επίπεδα των επιφανειακών υδάτων τα επηρεάζει αρνητικά. Ο Pataki του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια (Irvine), έχει διαπιστώσει ότι είδη βλάστησης κοντά στο Bishop έχουν αντικατασταθεί βαθμιαία από θάμνους, όπως ο *Atriplex torreyi*, ο *Sarcobatus vermiculatus* και η *Ericameria nauseosa*. Γενικά, μέχρι τώρα, η περικύκλωση των λιβαδιών από είδη θάμνων έχει αποδοθεί στην υπερβόσκηση και την αλλαγή του κλίματος. Πολύ λίγη έρευνα έχει γίνει σχετικά με το ρόλο που παίζει σε αυτό η υδρολογία (Pataki, Χωρίς Ημερομηνία). Είναι ενδιαφέρον και ένα άλλο γεγονός. Ο Pataki έχει διαπιστώσει ότι ο οργανικός C και το N στα εδάφη όπου αναπτύσσονται βλάστηση και θάμνοι ποικίλουν σημαντικά, με τα δύο στοιχεία να απαντώνται σε υψηλότερα επίπεδα στις περιοχές όπου ευδοκιμούν τα χόρτα. Όπως επισημαίνεται οι πραγματικές επιπτώσεις αυτού του γεγονότος, ενώ βρίσκονται ακόμη υπό μελέτη, υπονοούν ότι είτε τα είδη των θάμνων απομυζούν τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους αφού αντικαθιστούν τα είδη των χόρτων, είτε ότι εισέβαλλαν σε αυτές τις περιοχές μετά την εξάντληση των θρεπτικών συστατικών από άλλες αιτίες. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι το εύρος στο ρυθμό διαπνοής από τα είδη θάμνων, η οποία δεν συνάδει ευθέως με τα διαθέσιμα αποθέματα υπόγειων υδάτων. Αυτή η συνδυασμένη διαφοροποίηση ως προς την ύπαρξη θρεπτικών συστατικών και διαπνοής φαίνεται να συνδέεται με τα εκάστοτε υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, ένας πολύ ενδιαφέρον παράγοντας ως προς το ζήτημα της διαχείρισης των υδάτινων πόρων της περιοχής. Πρόσφατα, το 1991, το τμήμα υδάτων του Λος Άντζελες και οι αρχές της Κομητείας Ίνιο συμφώνησαν στον περιορισμό της υπερεκμετάλλευσης των υδάτων της κοιλάδας, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται με κανένα τρόπο η υπάρχουσα βλάστηση.

Είναι επίσης ενδιαφέρον το «Ποτάμιο Πρόγραμμα του Κατώτερου Owen's» (Lower Owen's River Project-LORP), το μεγαλύτερο πρόγραμμα ποτάμιας

αποκατάστασης αυτού του είδους στις ΗΠΑ. Από τότε που ο ποταμός Owen's River εξετράπη για να καλύψει τις ανάγκες του Υδραγωγείου του LA, το 1913, το ποτάμι έχει αποξηρανθεί. Το Δεκέμβριο του 2006, ανελήφθη το LORP με σκοπό να διασφαλίσει την αποκατάσταση τουλάχιστον 100 χιλιομέτρων του ποταμού και των παρακείμενων πεδιάδων μέσω της διάθεσης υδάτων από το τμήμα υδάτων του LA, το οποίο διαχειρίζεται γεωτρήσεις στην περιοχή, ακόμη και κοντά στο Bishop. Αυτός ο αναγεννημένος βιότοπος φαίνεται ότι επιτρέπει την επανάκαμψη φυτικών ειδών, όπως οι ιτιές και οι ιβίσκοι, καθώς και ζωικών ειδών, όπως ωδικά, υδρόβια και παραποτάμια πτηνά. Με την πάροδο του χρόνου, πολλοί επισκέπτες βρίσκουν την περιοχή ενδιαφέρουσα, είτε για περιπάτους, κωπηλασία, κυνήγι, παρατηρήσεις, κλπ (LORP, ICWD, 2010).

Τα δημογραφικά στοιχεία της Κομητείας Ίνιο αποκαλύπτουν τα ακόλουθα:

- i) Μέσο εισόδημα νοικοκυριών (2008): \$47.197.
- ii) Πληθυσμός κάτω από το επίπεδο της φτώχειας (2008): 11,6%.
- iii) Μεγαλύτερη πηγή εισοδήματος: Υπηρεσίες φιλοξενίας και διατροφής (2002): \$60.073.000 (QuickFacts, US Census Bureau, 2010).

Αν και το επίπεδο φτώχειας είναι ελαφρά βελτιωμένο σε σχέση με την υπόλοιπη Καλιφόρνια, το εισόδημα του μέσου νοικοκυριού στην Κομητεία Ίνιο είναι πολύ χαμηλότερο. Επιπλέον, λόγω της ανισομερούς κατανομής των εισοδημάτων, η μέση οικογένεια πιθανόν κερδίζει πολύ λιγότερα από το προαναφερθέν ποσό. Γίνεται επίσης προφανές ότι η Κομητεία Ίνιο εξαρτάται απόλυτα από την έλευση των τουριστών, οι οποίοι επισκέπτονται την περιοχή για να απολαύσουν τα φυσικά της πλούτη. Υπ' αυτό το πρίσμα γίνεται κατανοητό ότι το νερό, ένα από τα ουσιωδέστερα αλλά και πιο σημαντικά, από άποψη αισθητικής, στοιχεία του ανθρώπινου περιβάλλοντος, στην Κομητεία και την περιοχή γύρω από το Bishop, το μεγαλύτερο αστικό σχηματισμό της Κομητείας, πρέπει να πληροί αυστηρά όρια ποιότητας, όχι μόνο όταν χρησιμοποιείται άμεσα, αλλά και για να αποφευχθεί η απόθεση των τουριστών που αναζητούν φυσικές απολαύσεις. Το σημείο αυτό υπογραμμίζει την αναγκαιότητα ενός τεχνητού υδροβιοτόπου που θα μπορούσε να κατασκευαστεί στο Bishop.

A. Συλλογή και Χαρακτηρισμός Δεδομένων

1. Χαρακτηριστικά της Τοποθεσίας

Το Bishop βρίσκεται στο μέσο της βαθύτερης κοιλάδας των ΗΠΑ, της κοιλάδας Owen's, σε υψόμετρο 1240 m. Το κέντρο της πόλης δεν περιορίζεται σε κάποιο συγκεκριμένο εύρος υψομέτρων, αλλά φαίνεται ότι επεκτείνεται σε περιοχή υψωμάτων με μεγάλη διακύμανση υψομέτρων. Οι οροσειρές της Σιέρα Νεβάδα και των Λευκών Ορέων (White Mountains), αμφότερες αρκετά υψηλές με κορυφές που ξεπερνούν τα 3300-4200 m, περιβάλλουν την πόλη. Η περιοχή είναι ημιάνυδρη με τα ακόλουθα κατά προσέγγιση κλιματικά χαρακτηριστικά:

Θερμοκρασία: εαρινή 3...23° C,

θερινή 11...35° C,

φθινοπωρινή 1...25° C

και χειμερινή -5...13.

Βροχόπτωση: μέση ετήσια 132 mm.

Χιονόπτωση: μέση ετήσια 147 mm

Υγρασία: Χαμηλή (BACC, 2010).

Η περιοχή κατέγραψε την υψηλότερη θερμοκρασία (43° C) τον Ιούλιο 2003.

Η χαμηλότερη που έχει καταγραφεί ήταν -22° C, τον Ιανουάριο 1987.

Έκταση περιοχής Bishop: 4,5 km²,

Κλίση: 2,84 m/km,

Συνολικός πληθυσμός: 12000+20% (εποχιακοί)~14500,

Αριθμός κατοικιών: 1870+25%(εμπορικές και νοσοκομειακές εγκαταστάσεις)~2350.

2. Κύρια Χαρακτηριστικά Επεξεργασίας

Η στρατηγική που ακολουθείται για την επεξεργασία των λυμάτων έχει δύο σκέλη: η κύρια επεξεργασία με μηχανικά μέσα για τη συλλογή των λυμάτων στις δεξαμενές προεπεξεργασίας και την καθίζηση στους διαυγαστήρες και η δευτερεύουσα επεξεργασία στις δεξαμενές οξείδωσης, τις λεκάνες χλωρίωσης και τις μονάδες υγροβιότοπων.

2.1 Συλλογή Λυμάτων

Το Bishop είναι μία απλωμένη πόλη με μόνο 2350 κατοικίες και εμπορικές μονάδες που καλύπτουν έκταση 4,5 km². Υπάρχουν κάποιες ομάδες κατοικιών που συσσωρεύονται σε ορισμένα σημεία, αλλά ως επί το πλείστον και αυτές οι ομάδες

είναι απλωμένες. Επίσης, η αστική περιοχή παρουσιάζει υψομετρικές διαφορές μεταξύ του χαμηλότερου σημείου (300 m) και του υψηλότερου (1240 m). Η στρατηγική συλλογής των λυμάτων έγκειται στη διασύνδεση των ομάδων κατοικιών στον άξονα βορρά-νότου με υπόγειους αγωγούς με την τελική ροή να κατευθύνεται δυτικά. Η οροσειρά της Σιέρα Νεβάδα βρίσκεται στην ανατολική πλευρά της πόλης και θεωρείται ότι η πλαγιά έχει την κατεύθυνση ανατολή-δύση. Επίσης θεωρείται ότι η σχετικά απότομη κλίση (2,84 m/km) θα υποβοηθήσει τη ροή των λυμάτων.

2.2 Χαρακτηριστικά Υγρών Λυμάτων

Μέση ετήσια παροχή: 6,62 εκατομμύρια λίτρα/ημέρα- $6,6 \times 10^6$ l/d

Μέγιστη μηνιαία παροχή: 13×10^6 l/d

Μέγιστη παροχή: $17,7 \times 10^6$ l/d

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά Αστικών Εκροών της Πόλης Bishop

Μονάδα	COD	BOD ₅	NH ₄ N	NO _x N	TN	TP	TSS
Προεπεξεργασίας	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)	(kg/d)
	1620	1490	1080	440	1725	280	1180

2.3. Προεπεξεργασία

Τα λύματα από το αποχετευτικό δίκτυο της πόλης Bishop συλλέγονται στη μονάδα προεπεξεργασίας που βρίσκεται στο χαμηλότερο σημείο της πόλης, σε υψόμετρο περίπου 300 m. Τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια (SS-Suspended Solids), που είναι αρκετά μεγάλα ώστε να κατακρατηθούν στα φίλτρα, απομακρύνονται από δύο κοχλιωτές αντλίες, οι οποίες ανυψώνουν τα λύματα ψηλά (4,5 m), ώστε να υποβοηθείται από τη βαρύτητα, καθώς διέρχεται από εσχάρες και διαχωριστήρες στερεών. Τα λύματα, με την ονομασία πλέον εκροή προεπεξεργασίας, με πολύ μικρό περιεχόμενο σε SS περνά στη συνέχεια στο επόμενο στάδιο, τους διαυγαστήρες. Η παραμένουσα ιλύς, μετά από αναερόβια επεξεργασία στους χωνευτήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας, ανάλογα με τις ανάγκες της περιοχής. Είναι απαραίτητο να απομακρυνθούν τα βαρέα μέταλλα από την επεξεργασμένη ιλύ προτού αυτή χρησιμοποιηθεί. Πιστεύεται ότι τα παθογόνα καταστρέφονται καθώς η χρήση αυτή απαιτεί καύση.

2.4 Οι Λειτουργίες του Διαυγαστήρα

Οι εισροές από την προεπεξεργασία κατευθύνονται στους διαυγαστήρες. Οι διαυγαστήρες για το εργοστάσιο βιολογικού καθαρισμού στην πόλη Bishop, στην Κομητεία Inyo, ακολουθούν μία μοναδική σχεδίαση. Εφόσον ολόκληρο το εργοστάσιο έχει κατασκευαστεί 300 m πάνω από τον πυθμένα της κοιλάδας, οι μονάδες των διαυγαστήρων εκμεταλλεύονται τη διαθέσιμη κλίση του εδάφους. Υπάρχουν τρεις μονάδες διαυγαστήρων που αποτελούνται από 100 δοχεία ο καθένας κατασκευασμένα κατά μήκος της πλαγιάς με κατεύθυνση προς τον πυθμένα της κοιλάδας. Κάθε δοχείο έχει τραπεζοειδές σχήμα με όγκο περίπου $5,2 \text{ m}^3$. Ως εκ τούτου, υπάρχουν τρεις σειρές των 100 δοχείων διαυγαστήρα έκαστη που έχουν κατασκευαστεί κατά μήκος της πλαγιάς. Μόνο δύο από αυτές τις σειρές τίθενται σε λειτουργία, ενώ η τρίτη παραμένει εκτός λειτουργίας. Αυτό επιτρέπει στα συνεργεία συντήρησης να καθαρίζουν κάθε φορά τη σειρά δοχείων που δε λειτουργεί. Κάθε δοχείο διαθέτει αφαιρούμενο πυθμένα, ουσιαστικά ένα μεταλλικό τάσι που μπορεί να μετακινηθεί. Όταν οι εισροές από την προεπεξεργασία αφήνονται να εισέλθουν στις σειρές των δοχείων, το νερό υπερχειλίζει από το ένα δοχείο στο επόμενο, ενώ σταδιακά τα αιωρούμενα στερεά, πλέον μικρότερα σε μέγεθος μετά το φιλτράρισμα στην προεπεξεργασία, καθιζάνουν επάνω στα αφαιρούμενα τάσια στον πυθμένα κάθε δοχείου. Η βαρύτητα χρησιμοποιείται για να ρέει το νερό από το ένα δοχείο στο επόμενο κατά μήκος της πλαγιάς.

Ο συνολικός όγκος για κάθε σειρά 100 δοχείων είναι: $5,2 \times 100 = 520 \text{ m}^3$.

Ο αριθμός των σειρών σε λειτουργία ανά πάσα στιγμή: 2.

Ο συνολικός όγκος σε λειτουργία: $2 \times 520 = 1140 \text{ m}^3$.

Ο συνολικός όγκος ανά λειτουργία διαυγαστήρα ισούται περίπου με το 1/6 της συνολικής ημερήσιας εισροής: $6,62 \times 10^6$ λίτρα.

Χρόνος Λειτουργίας: $24 \times 1/6 = 4$ ώρες (περίπου).

Κάθε διαυγαστήρας χρειάζεται περίπου 4 ώρες κατά τις οποίες οι εισροές, σε ογκομετρική βάση, διασχίζουν τις 2 σειρές δοχείων που λειτουργούν.

Μία δεξαμενή στην κορυφή του διαυγαστήρα δέχεται τις εισροές από την προεπεξεργασία και διασφαλίζει ομοιόμορφη παροχή του 1/6 του νερού που φεύγει από την προεπεξεργασία.

Κατά τη διάρκεια του καθαρισμού, τα τάσια στον πυθμένα των δοχείων της σειράς που δε λειτουργεί αφαιρούνται και το ίζημα αποξένεται. Το ίζημα που αφαιρείται διοχετεύεται σε έναν οχετό που διατρέχει την πλαγιά παράλληλα με τις σειρές των

δοχείων. Το ίζημα αυτό, μέσα στον οχετό, αργότερα ξεπλένεται ώστε να συναντήσει τη ιλύ που προέρχεται από την προεπεξεργασία και καταλήγει στους χωνευτήρες.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα χαρακτηριστικά των εκροών από τις μονάδες διαυγαστήρων. Συμπεριλαμβάνεται το αποτέλεσμα της προεπεξεργασίας και της επεξεργασίας των διαυγαστήρων πάνω στις εισροές από το δίκτυο αστικών λυμάτων.

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά Κύριων Εκροών (kg/d)

Τύπος Εκροών	COD (kg/d)	BOD ₅ (kg/d)	NH ₄ N (kg/d)	NO _x N (kg/d)	TN (kg/d)	TP (kg/d)	TSS (kg/d)
Εκροές προς Χωνευτήρες	1215	1117	810	330	1280	210	880
Εκροές προς HSSF CW	405	373	270	110	445	70	300

2.5 Χαρακτηριστικά και Αποθήκευση των Εκροών

Σε συμφωνία με τον παρακάτω Πίνακα 6, είναι προφανές ότι η συγκέντρωση BOD₅ στις εισροές στον HSSF βρίσκονται μέσα στην προβλεπόμενη παραμετρική τιμή (Kadlec, 2009) των 25 mg/l παρόλο που η συγκέντρωση NH₄⁺N είναι υψηλότερη από τη συνιστώμενη μέγιστη των 22 mg/l στα 40.8 mg/l. Η υψηλότερη συγκέντρωση αμμωνίου στις εισροές επιτρέπεται σε αυτήν την περίπτωση καθώς, σύμφωνα με τους Tao & Wang (2009), οι ιδανικές συνθήκες για την ANAMMOX απαιτούν υψηλή τιμή προϊόντων αμμωνίου στις εισροές.

Οι εκροές από τους διαυγαστήρες συλλέγονται σε μία δεξαμενή τοποθετημένη στον πυθμένα της κοιλάδας 300 m κάτω από τις μονάδες των διαυγαστήρων. **Οι εισροές τυγχάνουν μόνον ήπιας επεξεργασίας με γλώριο ώστε να απαλλαγούν από κολοβακτηρίδια και άλλα παθογόνα.** Στη συνέχεια μεταφέρονται ~6 km μακριά από τη βάση της πλαγιάς δια μέσου της κοιλάδας σε μία τοποθεσία αρκετά μακριά από την πόλη του Bishop, ώστε να αποφεύγεται η όχληση του πληθυσμού από παράγοντες όπως οι οσμές και τα κουνούπια. Σε αυτό το σημείο οι εκροές επανασυλλέγονται σε μία δεξαμενή και προετοιμάζονται για την διάθεσή τους στον Τεχνητό Υγροβιότοπο τύπου HSSF, ο οποίος έχει κατασκευαστεί εκεί κοντά ως δευτερεύον στάδιο επεξεργασίας.

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά Εκροών Διαυγαστήρα και HSSF CW (mg/l)

Τύπος Επεξεργασίας	COD (mg/l)	BOD ₅ (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	NO _x -N (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)	TSS (mg/l)
Συγκεντρώσεις Εισροών HSSF CW	61	56	40,8	16	68	10,5	45
Συγκεντρώσεις Εκροών HSSF CW	39,04 (64%)	45,6 (81%)	40,8	16	68	10,5	45

B. Περιγραφή του Μοντέλου

1. Επιφάνεια, Σχήμα και Αριθμός HSSF

Ο κυριότερος μηχανισμός δευτερεύουσας επεξεργασίας που επελέγη για αυτήν την εργασία είναι οι Τεχνητοί Υγροβιότοποι Οριζόντιας Υποεπιφανειακής Ροής (Horizontal Subsurface Flow-HSSF). Η επιφάνεια για τους υγροβιότοπους HSSF υπολογίζεται με βάση τις οδηγίες της EPA USA (2000) που καθορίζουν ότι οι μονάδες HSSF μπορούν να έχουν μέγιστη φόρτιση BOD₅ ίση με 6 g/m².d. Οι επιφανειακοί υπολογισμοί για τις μονάδες HSSF βασίζονται εξολοκλήρου σε αυτό το καθορισμένο από την EPA (2000) κριτήριο.

Επιτρεπτή φόρτιση BOD₅: 6 g/m².d.

Συνολική φόρτιση BOD₅ (Πίνακας 5, όπως παραπάνω): 373 kg (3,73 × 10⁵ g).

Επιτρεπόμενη Επιφάνεια HSSF: (Συνολική Φόρτιση BOD) / (Επιτρεπόμενη Φόρτιση BOD) (i)

(Ο παρονομαστής στην παραπάνω εξίσωση αντικαθίσταται με τη αποδεκτή φόρτιση BOD₅ για αυτό το σχέδιο ως μέγιστο 5 g/m².d.)

$$(i) = (3.73 \times 10^5) / 5 = 0.746 \times 10^5 \text{ m}^2 = 74,6 \text{ στρέμματα.}$$

Η επιφάνεια του HSSF προσεγγίζεται στα 75 στρέμματα. Αυτή η έκταση διπλασιάζεται καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι πρόνοιες για τη δυνατότητα μείωσης και για το BOD₅ και για το COD καθώς και για μερική νιτροποίηση / ANAMMOX και νιτροποίηση / απονιτροποίηση. Δύο λίμνες με έκταση περίπου 40 στρέμματα η καθεμία κατασκευάζονται μαζί με ένα άλλο μεγαλύτερο HSSF 80 στρεμμάτων. Ουσιαστικά, οι δύο μικρότερες λίμνες σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτρέπουν τη λειτουργία του μέγιστου δυναμικού για μερική και ολική νιτροποίηση,

ενώ η μεγαλύτερη λίμνη βελτιστοποιεί τις διεργασίες της ANAMMOX και απονιτροποίησης αντίστοιχα.

Διάγραμμα 1: Σχηματική Απεικόνιση Διάταξης HSSF CW.

Καθένας από τους δύο μικρότερους HSSF κατασκευάζεται ως ελλειψοειδές με μεγάλο άξονα 270 m και μικρό άξονα 190 m. Τροφοδοτούνται εναλλάξ με εισροές από εισαγωγές που βρίσκονται στα ανατολικά τους. Οι εισαγωγές τοποθετούνται στο σημείο που ο μικρός άξονας συναντά την περιφέρεια. Οι εξαγωγές τοποθετούνται στη νότια πλευρά όπου ο μεγάλος άξονας συναντά την περιφέρεια. Οι εξαγωγές παρέχουν εναλλάξ εκροές στο μεγαλύτερο HSSF που βρίσκεται στη συνέχεια της ροής.

Ο μεγαλύτερος HSSF έχει παρόμοιο σχήμα με τους μικρούς και, ουσιαστικά, έχει την ίδια διάταξη. Είναι ελλειψοειδές με μεγάλο άξονα 410 m και μικρό άξονα 240 m διατηρώντας την ίδια διάταξη εισαγωγών και εξαγωγών.

Πραγματική Φόρτιση BOD ανά $m^2/d = (\text{Πραγματική Φόρτιση BOD ανά Ημέρα}) / (\text{Πραγματική Επιφάνεια Βάσης}) = 373 \times 10^3 / 157.91 \times 10^3 = 2.36 \text{ g/m}^2.d$.

2. Επίστρωση και Βάθος HSSF

Σε όλους τους HSSF, κάθε κοιλότητα είναι καλυμμένη με αδιάβροχο σκυρόδεμα και επιπλέον με επίστρωση HDPE (High Density Polyethylene-Πολυαιθυλαίνιο Υψηλής Πυκνότητας) 1.5 mm ενσωματωμένης σε γεωφάσμα (Frazer-Williams, 2007) ώστε να προστατεύεται από τυχόν φθορές. Αυτά τα μέτρα λαμβάνονται ώστε να αποφευχθεί η εισροή υδάτων από το σύστημα στον πολύτιμο υδροφορέα της περιοχής. Επίσης, οι κοιλότητες κατασκευάζονται αρκετά μακριά από γεωτρήσεις που παρέχουν νερό για χρήση τοπικά ή στην πόλη του Λος Άντζελες. Πλέον αυτής της προληπτικής επίστρωσης με το σκυρόδεμα και την επίστρωση HDPE, κάθε HSSF εφοδιάζεται με μία διπλή ενεργή επίστρωση συνολικού πάχους 80 cm. Αυτή είναι η

επίστρωση ενεργού στράγγισης και προορίζεται για την εκτέλεση του καθαρισμού της κοιλότητας.

Για τους μικρότερους HSSF, υπάρχει μία προκαταρκτική επίστρωση (50 cm), ακριβώς πάνω από την επίστρωση HDPE, αποτελούμενη από λεπτό χαλίκι (διαμέτρου 3-6 mm) και προορίζεται να είναι κορεσμένο με μεγάλο ποσοστό νερού (65%). Αυτή στη συνέχεια θα αναφέρεται ως επίστρωση πυθμένα. Πάνω από αυτήν την επίστρωση πυθμένα τοποθετείται μία άλλη επίστρωση αποτελούμενη από 15 cm χονδρότερου χαλικιού (5-10 mm) και 15 cm αμμώδους αργίλου / ασβεστόλιθου (ισοδύναμο CaCO_3 90%). Αυτή η συνδυασμένη επίστρωση συνολικού πάχους 30 cm θα αναφέρεται ως επιφανειακή επίστρωση. Είναι μέτρια κορεσμένη και γι αυτό περιέχει χαμηλό ποσοστό νερού, περίπου 45%. Ο αμμώδης άργιλος έχει pH 7.3, οργανικό φορτίο 1-1.5 % (το χαμηλό οργανικό φορτίο αναμένεται να μειώσει το ρυθμό απονιτροποίησης) και διάμετρο κόκκων 0.05mm και απλώνεται σε μία βάση από ασβεστολιθικά βότσαλα. Η διάμετρος των ασβεστολιθικών βότσαλων πρέπει να είναι περίπου μέχρι 5-10 mm ώστε να είναι δυνατή η μέγιστη έκθεση ασβεστολιθικής επιφάνειας. Οι Tao & Wang (2009) αναφέρουν ότι ο ασβεστόλιθος τείνει να αυξάνει το pH κατά 0.4-0.9% και ότι η μερική νιτροποίηση υποσκελίζεται από την ANAMMOX σε εύρος pH 7.9-8.4. Ο ασβεστόλιθος, εκτός από τη χρησιμότητά του ως κατάλληλο αλκαλικό μέσο για την ANAMMOX, θα λειτουργήσει επίσης ως μονωτικό για τη μερική νιτροποίηση, η οποία αναμένεται να λάβει χώρα στην επιφανειακή επίστρωση όπου το οξυγόνο είναι περιορισμένο αλλά επαρκές. Αντιθέτως, η ANAMMOX αναμένεται να λάβει χώρα στην περιοχή του ασβεστόλιθου, στο όριο μεταξύ της επιφανειακής και της επίστρωσης του πυθμένα, όπου η τιμή του pH είναι περίπου 8.3-8.5 και η παροχή οξυγόνου είναι χαμηλή αλλά φειδωλά διαθέσιμη.

Για τους μεγαλύτερους HSSF, η επίστρωση του πυθμένα (50 cm) ακριβώς πάνω από την επίστρωση HDPE είναι λεπτό χαλίκι (διαμέτρου 3-6 mm) και αναμένεται να είναι κορεσμένη με το ίδιο ποσοστό νερού όπως και στις μικρές κοιλότητες (65%). Μετά από αυτήν την επίστρωση πυθμένα τοποθετείται μία άλλη επίστρωση (30 cm) αποτελούμενη από μεγαλύτερα χαλίκια (5-10 mm) και αμμώδη άργιλο. Αυτή είναι η επιφανειακή επίστρωση της μεγάλης κοιλότητας. Ο αμμώδης άργιλος έχει μέγιστο pH 7.3, οργανικό φορτίο 4-5% (το υψηλό οργανικό φορτίο υποβοηθά την ετερότροφη απονιτροποίηση) και διάμετρο κόκκων 0.10 mm. Η επιφανειακή επίστρωση έχει πολύ μικρό κλάσμα ύδατος (30%) αφού η μεγάλη

κοιλότητα αναμένεται να λειτουργεί ως αντιδραστήρας κυρίως για τις αναερόβιες διεργασίες των εισερχόμενων υδάτων που προέρχονται από την κύρια αερόβια και ανοξική μικροβιακή δραστηριότητα των μικρότερων κοιλοτήτων. Για το λόγο αυτό, η επίστρωση του πυθμένα με τα αναερόβια χαρακτηριστικά διατηρείται κορεσμένη.

Για όλους τους HSSF, τα βότσαλα μικρής διαμέτρου υποβοηθούν την υδραυλική ροή και διευκολύνουν τον μικροβιακό αποικισμό με τη μεγαλύτερη και υγρότερη επιφάνειά τους. Σε κάθε περίπτωση, το μέγεθος των βότσαλων κοντά στις εισαγωγές και τις εξαγωγές τηρείται μεταξύ 50-100 mm ώστε να διευκολύνεται η ροή από και προς την κοιλότητα.

Σημειώνεται ότι οι δύο μικρότεροι HSSF δεν αλληλοσυνδέονται απευθείας και τα λύματα εισέρχονται εναλλακτικά σε αυτούς. Οι εισροές από αυτούς τους μικρούς HSSF κατευθύνονται στον μεγάλο HSSF σε μόνιμη βάση. Έτσι ο αριθμός των δεξαμενών σε σειρά είναι $N = 2$, όπου οι δύο μικρές δεξαμενές λογίζονται ως η μία μονάδα και η μεγάλη δεξαμενή ως η άλλη.

3. Αερισμός HSSF

Η διαπερατότητα των δύο τύπων HSSF παρουσιάζει διαφορετικές τιμές. Για την επιφανειακή επίστρωση των μικρών HSSF, με ποσοστό νερού 45%, η διαπερατότητα διατηρείται στο 58%. Οι επιφανειακές επιστρώσεις παραμένουν ακόρεστες με ένα ποσό φυσικά παρεχόμενου αερισμού. Οι επιστρώσεις πυθμένα των μικρών HSSF παρουσιάζουν ποσοστό διαπερατότητας σχεδόν 42% αλλά είναι κορεσμένες με πολύ λίγο αερισμό. Το συνολικό ποσοστό διαπερατότητας, με συνολικό ύψος 0.8 m, κατανέμεται σε 0.3 m στην επιφανειακή επίστρωση και σε 0.5 m στην επίστρωση του πυθμένα ως εξής:

$$P_{SF} = \left(\frac{58}{100} \times \frac{30}{80}\right) + \left(\frac{42}{100} \times \frac{50}{80}\right) = 0.48$$

Ομοίως, για το μεγάλο HSSF, η επίστρωση πυθμένα των 0.5 m έχει την ίδια διαπερατότητα όπως και οι μικροί HSSF στα 42% και στο ίδιο επίπεδο συνολικού κορεσμού. Η επιφανειακή επίστρωση, όμως, παρουσιάζει μικρότερο ποσοστό διαπερατότητας σε σχέση με τους μικρούς HSSF στο 30%. Το συνολικό ποσοστό διαπερατότητας του μεγάλου HSSF είναι ως εξής:

$$P_{LF} = \left(\frac{30}{100} \times \frac{30}{80}\right) + \left(\frac{42}{100} \times \frac{50}{80}\right) = 0.375$$

Το συνολικό ποσοστό διαπερατότητας όλου του συστήματος με βάση την αναλογία των επιφανειών είναι:

$$\{(\frac{80.6}{157.9}) \times 0.48\} + \{(\frac{77.3}{157.9}) \times 0.375\} = 0.245 + 0.184 = 0.429.$$

4. Βλάστηση και Μικροβιακοί Παράγοντες των HSSF

4.1 Βλάστηση

Οι Kadlec & Wallace (2008), συμπεριλαμβάνουν και τα *Typha sp.* και τα *Scirpus sp.* ως κοινά είδη επιφανειακών φυτών για HSSF CW στις ΗΠΑ. Ούτως ή άλλως, όπως υποστηρίζουν, η χρησιμότητα των φυτών στα συστήματα HSSF είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό, συχνά εξωτικά και διακοσμητικά είδη φυτών, όπως η *Canna flacida* και η *Iris pseudocorus* βρίσκουν εφαρμογή στους HSSF CW στις ΗΠΑ, για κανέναν άλλο λόγο παρά μόνο για καλλωπισμό (Kadlec & Wallace, 2008).

Για την παρούσα εργασία, σε όλες τις κοιλότητες θα φυτευτούν *Schoenoplectus californicus* και *Typha domingensis*. Οι Kadlec & Wallace (2008), αναφέρουν κάποια ελαφρά πλεονεκτήματα που τα φυτά παρέχουν στους HSSF CW, όπως παρακάτω:

- τα συστήματα των ριζών παρέχουν επιπλέον επιφάνεια για την ανάπτυξη των βιοϋμενίων,
- φυτά όπως τα *Typha sp.* μεταβιβάζουν οξυγόνο στο ριζικό τους σύστημα, αλλά αυτή η μεταφορά οξυγόνου είναι αμελητέα σε σχέση με τις μεγάλες οργανικές φορτίσεις, εσωτερικές και εξωτερικές, για τους HSSF,
- τα φυτά βοηθούν στην αποτοξίνωση του ριζικού τους περιβάλλοντος μέσω των εξιδρωμάτων,
- συχνά προκαλούν πρόσθετη μυκητιακή ανάπτυξη, και
- τα ριζικά συστήματα προστατεύουν συμβιωτικές βακτηριακές αποικίες (Kadlec & Wallace, 2008).

Υπάρχουν κάποια ασυνήθη οφέλη στα παραπάνω, όπως το δυναμικό αποτοξίνωσης, κλπ. και η παρούσα εργασία κινείται στην άποψη πως η περιοχή του HSSF CW αντί για μία άγονη περιοχή θα έχει ανώτερη όψη με την ανάπτυξη φυτών εντός του και κατά μήκος της περιμέτρου του. Οι μικρότερες κοιλότητες θα φυτευτούν επιμελώς με δύο επιφανειακά είδη, τα *S. californicus* και *T. domingensis*. Αυτό θα γίνει γιατί η μερική νιτροποίηση, μία διεργασία που απαιτεί μέτρια οξυγόνωση, και η νιτροποίηση, μία διεργασία που είναι αερόβια, έχουν σχεδιαστεί να λάβουν χώρα στις μικρότερες κοιλότητες. Τα φυτά στις μικρότερες κοιλότητες θα βοηθήσουν στον αερισμό της επιφανειακής επίστρωσης, παρέχοντας οξυγόνο μέσω

διάχυσης και διάλυσης σε αυτές τις διεργασίες. Για τις μικρές κοιλότητες, θα φυτευτούν νεαρά φυτά και των δύο ειδών σε πυκνότητα τεσσάρων ατόμων ανά m^2 . Ελπίζεται ότι αυτή η τεχνική θα βοηθήσει στην παροχή πυκνής ανάπτυξης και στις δύο μικρότερες κοιλότητες.

Θα υπάρχουν επίσης και κάποια φυτά σε όλη την έκταση γύρω από την έξοδο της μεγαλύτερης κοιλότητας, έτσι ώστε οι αποτοξινωτικές τους δράσεις να μπορούν σε κάποιο βαθμό να βοηθούν στον καθαρισμό των εκροών. Ο *Calochortus excanatus*, ένα φυτικό είδος που απαντάται σε αυτήν την περιοχή και ευδοκιμεί σε αλκαλικά λιβάδια όπως αυτό που καταλαμβάνει τον πυθμένα της κοιλάδας Owen's, θα χρησιμοποιηθεί για την περίφραξη όλων των κοιλοτήτων.

Σύμφωνα με τους Tao & Wang (2009), τα καλάμια και τα βούρλα έχουν φύλλα και βλαστούς που περιέχουν κατά μέσο όρο 0.2-0.4% άζωτο σε ξηρό βάρος. Επίσης, η βιομάζα υπεράνω του εδάφους φθάνει κατά μέσο όρο τα 5-10 g. Λαμβάνοντας αυτήν την τιμή για την παρούσα εργασία, το συνολικό άζωτο στη φυτική μάζα είναι όπως παρακάτω:

- Συνολικός αριθμός φυτών με πυκνότητα φύτευσης 4 άτομα ανά $m^2 = 80.6 \times 10^3$ (έκταση μικρού HSSF) $\times$ 4 (αριθμός φυτών ανά m^2) = 322.4×10^3 φυτά.
- Συνολική βιομάζα = $322.4 \times 10^3 \times 7.5$ (μέσο βάρος βιομάζας ανά φυτό) = 2418 kg.
- Σύμφωνα με τους Maltais-Landry et al. (2009), το μέσο περιεχόμενο φυτικού αζώτου κατά βάρος είναι 2.10%. Λαμβάνεται αυτό το υψηλότερο ποσοστό αντί για το ποσοστό βάρους ξηρής μάζας που αναφέρεται από τους Tao & Wang (2009). Πάλι σύμφωνα με τους Maltais-Landry et al. (2009), η απορρόφηση N από τα φυτά, όπως τα *Typha sp.*, ανέρχεται σε ~ 50 g N/ m^2 .y.
- Υποθέτοντας ότι αυτό συμβαίνει στους μικρούς HSSF, η απορρόφηση N ανέρχεται σε: $50 \times 80.6 \times 10^3 = 4030$ kg.
- Ημερήσια απορρόφηση: 11.034 kg.

Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό μέγεθος και θα αναλυθεί περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

4.2 Μικροβιακοί Παράγοντες

Σχετικά με τα χαρακτηριστικά διαπερατότητας των δύο τύπων HSSF, τους μικρούς και τον μεγάλο, ενώ οι επιστρώσεις πυθμένα και των δύο τύπων έχουν το ίδιο

ποσοστό διαπερατότητας με πολύ μεγάλο κλάσμα νερού που υποδεικνύει πολύ χαμηλό αερισμό, η διαπερατότητα και τα κλάσματα νερού για τις επιφανειακές επιστρώσεις διαφέρουν. Για τους μικρούς HSSF, ο συνδυασμός σχετικά υψηλού ποσοστού διαπερατότητας, ακόρεστου κλάσματος νερού και βλάστησης (επιφανειακά είδη φυτών) έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό αερισμό ο οποίος επιτρέπει ένα ποσό αερόβιας καθώς και κατά κύριο λόγο ανοξικής επεξεργασίας.

Βακτήρια Αναγωγής Οργανικού Άνθρακα

Στις επιφανειακές επιστρώσεις των μικρών HSSF διαβιούν ετερότροφοι μικροοργανισμοί καθώς και άλλες αναερόβιες ποικιλίες που μπορούν να βοηθήσουν στην επεξεργασία του οργανικού άνθρακα μέσω των αντιδράσεων του 1^{ου} ζυμωτικού σταδίου. Κάτω από αυτήν την επίστρωση, αμέσως μετά την περιοχή του ασβεστόλιθου, στα κατώτερα στρώματα υφίστανται θειοαναγωγικά και μεθανότροφα που υποβοηθούν στις αντιδράσεις του δεύτερου ζυμωτικού σταδίου.

Αφού η επιφανειακή αλλά και η επίστρωση πυθμένα του μεγάλου HSSF είναι από τη φύση τους έντονα αναερόβιες, υπερτερεί η καλλιέργεια θειοαναγωγικών, μεθανότροφων και ακετότροφων βακτηρίων. Πιστεύεται ότι το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού άνθρακα θα αναχθεί σε αέριο μεθάνιο στα κατώτερα στρώματα του μεγάλου HSSF.

Βακτήρια Επεξεργασίας Αζώτου

Το σύμπλεγμα του υδροβιότοπου τείνει προς τη μερική νιτροποίηση, την ANAMMOX και την απονιτροποίηση με χαμηλές απαιτήσεις σε οξυγόνο. Οι επιφανειακές επιστρώσεις των μικρών HSSF είναι ιδανικές για τη μερική νιτροποίηση ακριβώς πάνω από την περιοχή του ασβεστόλιθου και για την ANAMMOX στην περιοχή του ασβεστόλιθου. Οι βακτηριακοί παράγοντες που είναι ικανοί για αυτές θα καλλιεργηθούν εδώ, ενώ για τις επιστρώσεις πυθμένα με τις αναερόβιες δυνατότητες, θα εφαρμοστούν βακτηριακοί παράγοντες ικανοί για απονιτροποίηση.

Αναμένεται ότι τα νιτρώδη και τα νιτρικά από τη μερική νιτροποίηση και ένα μέρος από τη νιτροποίηση, καθώς και ανεπεξέργαστο αμμώνιο θα προχωρήσουν από τους μικρούς HSSF στον μεγάλο για απονιτροποίηση, η οποία και θα λάβει χώρα σε αυτό το δεύτερο στάδιο. Μία ποσότητα αερίου αζώτου μπορεί να εκλυθεί στους μικρούς HSSF, αλλά το μεγαλύτερο μέρος αναμένεται από τον μεγάλο HSSF.

Εκτιμάται ότι όλα τα μικροβιακά είδη για την επεξεργασία θα επιλεγούν τηρώντας την τοπική νομοθεσία και τους ισχύοντες κανονισμούς, αποφεύγοντας την εισαγωγή ειδών ξένων προς το οικοσύστημα

Γ. Ανάπτυξη και Εφαρμογή Αλγορίθμου

1. Υδραυλικός Όγκος των HSSF

Εμβαδό των μικρότερων: $B_{SA} = \pi r_1 r_2 = 40.30 \times 10^3 \text{ m}^2$.

Συνολικός όγκος της επιφανειακής επίστρωσης: $V_{ST} = B_{SA} \times h_u = 12.09 \times 10^3 \text{ m}^3$ (h_u : πάχος επιφανειακής επίστρωσης).

Αφού οι μικρότερες κοιλότητες έχουν επιφανειακή επίστρωση με κλάσμα νερού 45%, ο V_{ST} θα προσαρμοστεί ανάλογα:

$$V_{SU} = V_{ST} \times 45\% = 5.44 \times 10^3 \text{ m}^3.$$

Ο συνολικός όγκος των επιφανειακών επιστρώσεων για τις μικρότερες κοιλότητες θα είναι: $V_{2SU} = 10.88 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Παρόμοια, ο συνολικός όγκος νερού για την επίστρωση πυθμένα για κάθε μικρή κοιλότητα με πάχος 50 cm και κλάσμα νερού 65% θα είναι: $V_{2SL} = 13.10 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Συνεπώς, ο συνολικός όγκος νερού για τις επιστρώσεις πυθμένα των μικρών κοιλοτήτων θα είναι: $26.20 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Ο συνολικός υδραυλικός όγκος για τις μικρότερες κοιλότητες θα είναι: $V_{2SH} = 37.08 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Ο συνολικός υδραυλικός όγκος για κάθε μικρή κοιλότητα θα είναι: **$V_{SH} = 18.54 \times 10^3 \text{ m}^3$** .

Η μεγαλύτερη κοιλότητα έχει εμβαδό: $B_{LA} = 77.30 \times 10^3 \text{ m}^2$.

Παρόμοια, για τη μεγαλύτερη κοιλότητα, ο συνολικός όγκος για την επιφανειακή επίστρωση των 30 cm με διαπερατότητα 30% θα είναι: $V_{LU} = 6.96 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Ο συνολικός όγκος της επίστρωσης πυθμένα των 50 cm με διαπερατότητα 65% θα είναι: $V_{LL} = 25.12 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Συνολικός υδραυλικός όγκος της μεγαλύτερης κοιλότητας: **$V_{LH} = 32.08 \times 10^3 \text{ m}^3$** .

Συνολικός όγκος νερού και στους τρεις: $69.16 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Συνολικός όγκος εισροών σε 3 ημέρες (χρόνος παραμονής): $19.86 \times 10^3 \text{ m}^3$.

2. Υδραυλική Φόρτιση

$$\begin{aligned}\text{Υδραυλική Φόρτιση} &= \frac{\text{Ημερήσιες Εισροές (m}^3\text{)}}{\text{Εμβαδό HSSF (m}^2\text{)}} \\ &= \frac{(6.62 \times 10^3)}{(157.9 \times 10^3)} = \mathbf{4.19 \text{ cm/d.}}\end{aligned}\quad (14)$$

Η μέση υδραυλική φόρτιση των 4.19 cm/d βρίσκεται αρκετά κάτω από το συνιστώμενο όριο για τους HSSF των 7 cm/d, σύμφωνα με τον Kadlec (2009). Δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί καλύτερη μέση υδραυλική φόρτιση καθώς οι συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα των εισροών στο δευτερεύον στάδιο επεξεργασίας είναι υψηλές στα BOD₅ (56 mg/l) και COD (61 mg/l). Η επιφάνεια του HSSF έχει καθοριστεί σύμφωνα με τις συστάσεις της EPA USA (2000) ώστε να επιτυγχάνεται λιγότερο από το μέγιστο φορτίο BOD₅ των 6 g/m².d. Σημειώνεται επίσης ότι τα φορτία BOD₅ και αμμωνίας είναι 56 και 40.8 mg/l αντίστοιχα. Αφού, σύμφωνα με τον Kadlec (2009), η συνιστώμενη υδραυλική φόρτιση αφορά μόνο τα φορτία οργανικού άνθρακα, πιστεύεται ότι η επιδίωξη απομάκρυνσης επιπλέον ρύπων απαιτεί μεγαλύτερη αξιοποιήσιμη έκταση. Αυτό, συνεπώς, μειώνει συγκριτικά όλες τις παραμέτρους σε σχέση με τις προτεινόμενες για τους HSSF, καθώς οι τελευταίες συνήθως προκύπτουν μόνο για συγκεκριμένες ομάδες ρύπων, όπως οργανικό άνθρακα ή άζωτο. Εφόσον η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την πρόβλεψη για απομάκρυνση πολλαπλών ρύπων, οι παράμετροι λαμβάνονται ελαφρώς διαφοροποιημένες σε σχέση με τις προτεινόμενες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Vymazal & Kropfelova (2008) βρίσκουν επίσης ότι ο μέσος ρυθμός υδραυλικής φόρτισης (Hydraulic Loading Rate -HLR) για τους HSSF που επεξεργάζονται δευτεροβάθμια αστικά λύματα πλησιάζει τα 7 cm/d, το ίδιο με τον Kadlec (2009), αλλά για την παρούσα εργασία, όπου προβλέπεται η απομάκρυνση διαφόρων συστατικών, πιστεύεται ότι ένα χαμηλότερο HLR είναι καταλληλότερο.

3. Υδραυλική Απόδοση

Από το Διάγραμμα 2 φαίνεται ότι η ανάμειξη στους ελλειψοειδείς HSSF μεγιστοποιείται στο τραπεζοειδές τμήμα τους περί το κέντρο. Για το λόγο αυτό, το εμβαδό του τραπεζίου λαμβάνεται ως η περιοχή αντίδρασης κάθε HSSF και ο λόγος της ογκομετρικής απόδοσης υπολογίζεται ως κλάσμα του εμβαδού του τραπεζίου και του συνολικού εμβαδού κάθε ελλειψοειδούς HSSF.

Εμβαδό τραπεζίου των μικρότερων HSSF: $51.3 \times 10^3 \text{ m}^2$.

Εμβαδό τραπεζίου του μεγάλου HSSF: $49.2 \times 10^3 \text{ m}^2$.

Συνολικό εμβαδό τραπεζίων: $100.5 \times 10^3 \text{ m}^2$.

Ενεργός όγκος $V_E = (\text{Εμβαδό τραπεζίων}) \times (\text{Υψος} \times \text{Συνολική διαπερατότητα})$

[Υψος $h = 0.8 \text{ m}$; Συνολική διαπερατότητα $= 0.548$]

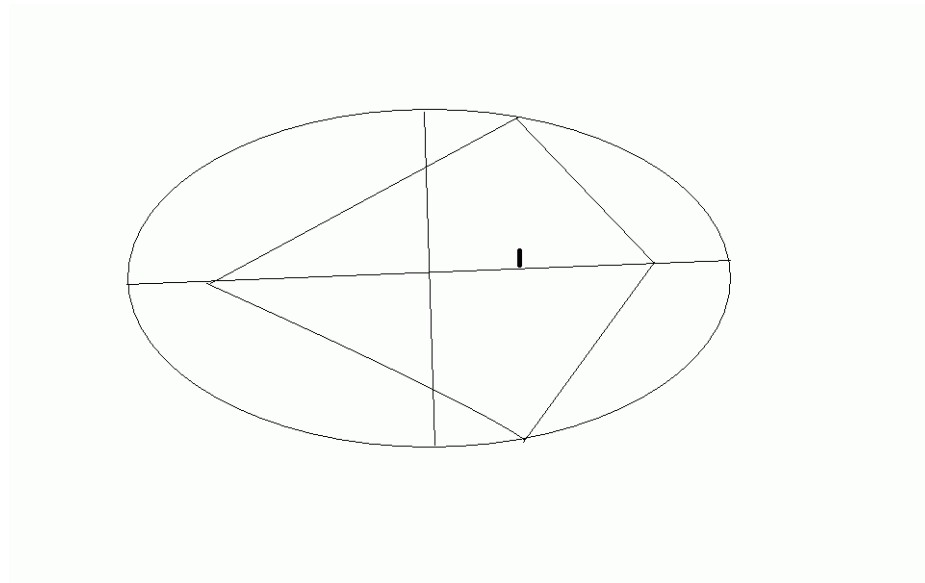
$V_E = 44.06 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Συνολικός όγκος νερού και στους τρεις HSSF: $V_T = 69.16 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Λόγος ογκομετρικής απόδοσης $e_v = V_E / V_T = 0.64$.

Απόδοση διανομής χρόνου παραμονής (retention time distribution-RTD): $e_{\text{RTD}} = 1 - \frac{1}{N}$
 $= 0.5$ για $N = 2$ (Kadlec, 2008).

Ως εκ τούτου, η υδραυλική απόδοση είναι: $\lambda = e_v \cdot e_{\text{RTD}} = 0.32$.



Διάγραμμα 2: Σχηματική Απεικόνιση Ελλειψοειδούς HSSF.

4. Μέσος Χρόνος Παραμονής

Ο ονομαστικός χρόνος παραμονής, t_n είναι 3 ημέρες, αλλά με το λόγο ογκομετρικής απόδοσης στο 0.64, ο μέσος χρόνος παραμονής θα είναι: $t_m = t_n \times V_E = 1.92 \text{ d}$.

5. Κατακρημνίσεις, Εξατμισοδιαπνοή και Υγρασία

Οι κατακρημνίσεις στην περιοχή της πόλης του Bishop της επαρχίας Inyo της Καλιφόρνια αναλύεται ως ακολούθως:

Βροχοπτώσεις: 0.13716 m ,

Χιονοπτώσεις: 0.1524 m,

Συνολικές κατακρημνίσεις: 0.28956 m.

Συνολικό εμβαδό των τριών HSSF: $157.9 \times 10^3 \text{ m}^2$.

Ο συνολικός όγκος νερού από βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις που προστίθεται στους HSSF μέσα σε ένα χρόνο είναι κατά προσέγγιση: $45.72 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration-ET) στην περιοχή ανέρχεται σε 1.3716 m ετησίως. Πρόκειται πιθανώς για την υψηλότερη τιμή στις ΗΠΑ.

ET: 1.3716 m.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο οι δύο μικρές κοιλότητες έχουν βλάστηση, ενώ η τρίτη, μεγάλη κοιλότητα είναι εκτεθειμένη. Οι HSSF έχουν σχετικά καλυμμένες υδάτινες επιφάνειες και οι ρυθμοί εξάτμισης δεν επηρεάζουν πολύ τους υδάτινους όγκους. Ούτως ή άλλως, η εξάτμιση για τη μεγάλη κοιλότητα θα ληφθεί ως 10% του ετήσιου ρυθμού, ενώ για τις μικρές κοιλότητες θα ληφθεί ως 25%, καθώς μία ποσότητα νερού εξατμίζεται από τις επιφάνειες των HSSF λόγω της επιφανειακής τάσης και των μηχανισμών διάχυσης. Ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής θα εφαρμοστεί συνολικά στην επιφάνεια των μικρότερων κοιλοτήτων.

ET στους μικρούς HSSF: $80.6 \times 10^3 \times (1.3716 \times 0.25) = 27.64 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Εξάτμιση στο μεγάλο HSSF: $77.3 \times 10^3 \times (1.3716 \times 0.1) = 10.60 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Συνολική προσθήκη νερού = Συνολική προσθήκη από κατακρημνίσεις – Συνολική απομάκρυνση λόγω ET = $(45.72 \times 10^3) - (38.24 \times 10^3) = 7.48 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Συνολικός σταθερός όγκος νερού (με κατακρημνίσεις, χωρίς ET): $V_C = 76.64 \times 10^3 \text{ m}^3$.

6. Χαρακτηριστικά Ρυθμού Ροής

Ο χρόνος παραμονής (t_r), σύμφωνα με τον Πίνακα 1 του Κεφαλαίου II.A.3, για τους HSSF CW καθορίζεται στις 3 ημέρες. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, όπου το μοντέλο αναπτύσσεται χωρίς τη χρήση χρωματικών δεικτών ιχνηλασίας (tracers), ο συνολικός όγκος εισροών ανά ημέρα ($V_I = 6.62 \times 10^3 \text{ m}^3$) στο σύστημα HSSF από την αστική δευτεροβάθμια βάση της πόλης του Bishop αναμένεται να εκλύεται εξ' ολοκλήρου μέσω της εκροής των λυμάτων κάθε ημέρα.

Ο συνολικός όγκος των εκροών ανά ημέρα από το σύστημα HSSF είναι όπως παρακάτω:

Συνολικές εκροές (V_E) = $V_I + V_P$; όπου V_P είναι η ημερήσια προσθήκη λόγω κατακρήμνισεων μείον την εξατμισοδιαπνοή στο συνολικό σταθερό όγκο του HSSF.

$$V_E = [6.62 \times 10^3] + [0.0205 \times 10^3] = 6.6405 \times 10^3 \text{ m}^3.$$

{Η ημερήσια κατακρήμνιση μείον την εξατμισοδιαπνοή V_P υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$V_P = (7.48 \times 10^3) / 365.25 = 0.0205 \times 10^3 \text{ m}^3$. Αυτό είναι αμελητέο αλλά η προστιθέμενη επίδραση της ημερήσιας κατακρήμνισης μείον την εξατμισοδιαπνοή, συνολικά, κατ' έτος, απαλείφεται με αυτόν τον τρόπο έτσι ώστε ο συνολικός σταθερός όγκος κατ' έτος να παραμένει περί το μέσο όρο.}

Μέσος ρυθμός ροής $q = V_E/t_E = 92 \text{ m}^3$.

7. Χαρακτηριστικά Θερμοκρασίας

Θερμοκρασία:

Εαρινός Μέσος Όρος: 2...23°C,

Θερινός Μέσος Όρος: 11...35°C,

Φθινοπωρινός Μέσος Όρος: 1...25°C,

Χειμερινός Μέσος Όρος: -6...13°C.

Η στρατηγική που θα ακολουθηθεί συνίσταται στη λήψη δύο μέσων θερμοκρασιών, μία για άνοιξη-καλοκαίρι και μία για φθινόπωρο-χειμώνα.

Άνοιξη-καλοκαίρι: 17.92°C,

Φθινόπωρο-χειμώνας: 8.33°C.

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν την επεξεργασία του N και μπορούν να ποσοτικοποιηθούν όπως παρακάτω με μία μορφή της εξίσωσης του Arrhenius:

$$k = k_{20} \cdot \theta^{(T-20)} \text{ (Kadlec, 2008),}$$

όπου k είναι η σταθερά επιφανειακής μεταβολής $1^{\text{ου}}$ βαθμού σε m/d, k_{20} είναι η σταθερά επιφανειακής μεταβολής $1^{\text{ου}}$ βαθμού στους 20°C σε m/d, T είναι η θερμοκρασία σε °C και θ είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας. Η εξίσωση αυτή επιτρέπει στην παρούσα εργασία να βασιστεί στη μικροβιακή δραστηριότητα, όπου αυτή αναμένεται να διαμορφώσει τις διεργασίες απομάκρυνσης. Σε άλλη περίπτωση, η περιγραφή διεργασιών που διαμορφώνονται από τα φυτά χρειάζονται άλλες αναλυτικές μεθόδους.

Οι Kadlec & Knight (1998), (Πηγή: Vymazal & Kropfelova, 2008), θεωρούν ότι η απομάκρυνση των BOD, TSS, P και κοπρανωδών κολοβακτηριδίων

στους υδροβιότοπους HF δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία για $\theta = 1$. Σε άλλη περίπτωση, για $\text{NH}_4\text{-N}$ ($\theta = 1.04$), $\text{NO}_3\text{-N}$ ($\theta = 1.09$) και TN ($\theta = 1.05$) με τους ρυθμούς απομάκρυνσης να επηρεάζονται αρνητικά από τις χαμηλότερες θερμοκρασίες (Vymazal & Kropfelova, 2008).

Αλλιώς, οι Reed et al. (1988), (Πηγή: Vymazal & Kropfelova, 2008), επισημαίνουν ότι η σχεδιασμένη σταθερά επιφανειακής μεταβολής $1^{\text{ου}}$ βαθμού στους 20°C για συγκεκριμένο μέσο υποστρώματος είναι όπως παρακάτω:

Είναι

$$k_{20} = k_0 (37.31 n^{4.172}) \quad (15)$$

όπου k_0 είναι η βέλτιστη σταθερά επιφανειακής μεταβολής στους 0°C για υπόστρωμα με πλήρως αναπτυγμένη ριζική ζώνη και n είναι η συνολική διαπερατότητα του υποστρώματος σε δεκαδική μορφή.

Είναι

$$k_0 = 1.839 \text{ d}^{-1} \quad (16)$$

για συνηθισμένα αστικά λύματα (Vymazal & Kropfelova, 2008).

Για την παρούσα εργασία, οι μικρότεροι HSSF έχουν πλήρως αναπτυγμένες ριζικές ζώνες και η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν οι σταθερές επιφανειακής μεταβολής $1^{\text{ου}}$ βαθμού για την επεξεργασία N στους μικρότερους HSSF. Μεταφέροντας την τιμή του k_{20} στην εξίσωση του Arrhenius, για $n = 0.575$ και μεταβλητές τιμές θ ανάλογα με το είδος N , προκύπτει:

$$k = k_0 (37.31 n^{4.172}) \theta^{(T-20)}. \quad (17)$$

8. Απομάκρυνση του Οργανικού Άνθρακα

Η εξίσωση από τους Reed et al. (1988), (Πηγή: Vymazal & Kropfelova, 2008) όπως με την προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των σταθερών επιφανειακής μεταβολής για τον οργανικό άνθρακα (organic carbon - OC), TSS, P και κοπρανώδη κολοβακτηρίδια καθώς δεν επηρεάζεται από τη θεροκρασία.

Για τους μικρότερους HSSF, είναι $n = 0.575$ και για το μεγαλύτερο HSSF, είναι $n = 0.519$. Η διαπερατότητα έχει αντικατασταθεί με το κλάσμα νερού καθώς αυτός είναι ο καθοριστικός παράγοντας για τον όγκο του νερού στην παρούσα εργασία. Το κλάσμα νερού για ολόκληρη την εγκατάσταση για όλους τους HSSF στη βάση του διαθέσιμου εμβαδού είναι: $\{(\frac{80.6}{157.9}) \times 0.575\} + \{(\frac{77.3}{157.9}) \times 0.519\} = 0.294 + 0.254 = 0.548$.

Είναι

$$k_0 = 1.839 \text{ d}^{-1}. \quad (18)$$

Αντιμεταθέτοντας το k_c (σταθερά επιφανειακής μεταβολής $1^{\text{ου}}$ βαθμού για την απομάκρυνση OC) στην εξίσωση, προκύπτει:

$$k_C = k_0 (37.31 \text{ n}^{4.172}) = 5.58 \text{ περίπου}.$$

Παρατηρείται τώρα ότι το συνολικό κλάσμα νερού και για τους τρεις HSSF δεν επαρκεί για να έχει ουσιαστικό αποτέλεσμα στην ανάμειξη. Είναι απαραίτητο να προκύψει μεταβολή στη σταθερά επιφανειακής μεταβολής $1^{\text{ου}}$ βαθμού σύμφωνα με την πραγματική υδραυλική απόδοση λ εκπεφρασμένη σε δεκαδική μορφή, όπως παρακάτω:

$$k_C = k_0 (37.31 \text{ n}^{4.172}) \times \lambda. = 1.7856 \text{ περίπου}.$$

$$\frac{C_{out}}{C_{in}} = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{k t_n}{N} \right)} \right)^N \text{ (Persson \& Wittgren, 2003)} \quad (19)$$

9. Απομάκρυνση BOD

Στη βάση της παραπάνω εξίσωσης (19), το C_{out} (συγκέντρωση εξόδου) του οργανικού άνθρακα (για $k_C = 3.57$, $t_m = 1.92\text{d}$, $N = 2$, και $C_{in} = 56 \text{ mg/l}$) προκύπτει όπως παρακάτω:

$$C_{out} = 7.60 \text{ mg/l}.$$

Απόδοση απομάκρυνσης $R_{OC} = 86.43\%$.

10. Απομάκρυνση COD

$$k_{COD} = 1.7856.$$

$C_{in} = 61 \text{ mg/l}$. Στην ίδια βάση με το BOD.

$$C_{out} = 8.28 \text{ mg/l}.$$

Απόδοση απομάκρυνσης $R_{OC} = 86.43\%$.

11. Απομάκρυνση Αζώτου

Για την επεξεργασία του N λαμβάνονται υπόψη δύο μέσες θερμοκρασίες:

Άνοιξη-καλοκαίρι: 17.92°C ,

Φθινόπωρο-χειμώνας: 8.33°C .

Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις, προκύπτει:

$$k_{Amm} = k_0 (37.31 \text{ n}^{4.172}) \cdot \theta^{(T-20)}, \text{ για } \text{NH}_4\text{-N } (\theta = 1.04), k_0 = 1.839 \text{ d}^{-1} \text{ και } T = 18^\circ\text{C} \text{ (άνοιξη-καλοκαίρι)}.$$

Η συνολική εισροή αμμωνίας καθημερινά κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ των δύο περιόδων, άνοιξη-καλοκαίρι (20.4 mg/l) και φθινόπωρο-χειμώνα (20.4 mg/l).

$$k_{\text{Amm}} = 1.7856 \times 0.925 = 1.65 \text{ περίπου (άνοιξη-καλοκαίρι)}.$$

$$k_{\text{Amm}} = 1.7856 \times 0.633 = 1.13 \text{ περίπου (φθινόπωρο-χειμώνας)}.$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση του λόγου των συγκεντρώσεων (Persson & Wittgren, 2003):

$$\text{Άνοιξη-καλοκαίρι: } \frac{C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}} = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{kt_n}{N} \right)} \right)^N, C_{\text{out}} = 3.06 \text{ mg/l}.$$

$$\text{Απόδοση απομάκρυνσης: } R = 85.00\%.$$

$$\text{Φθινόπωρο-χειμώνας: } C_{\text{out}} = 4.69 \text{ mg/l}.$$

$$\text{Απόδοση απομάκρυνσης: } R = 67.00\%.$$

Ετήσια απόδοση απομάκρυνσης: 76.00%.

Ομοίως, για τα νιτρώδη, λαμβάνονται συγκεντρώσεις εισόδου 16 mg/l μοιρασμένες ομοιόμορφα ανάμεσα στις δύο περιόδους.

$$k_{\text{NOX}} = k_0 (37.31 \text{ n}^{4.172}) \cdot \theta^{(T-20)}, \text{ όπου } \theta = 1.09,$$

$$k_{\text{NOX}} = 1.7856 \times 0.8417 = 1.50 \text{ (άνοιξη-καλοκαίρι)}$$

$$k_{\text{NOX}} = 1.7856 \times 0.3658 = 0.65 \text{ (φθινόπωρο-χειμώνας)}.$$

$$\text{Άνοιξη-καλοκαίρι: } \frac{C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}} = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{kt_n}{N} \right)} \right)^N, C_{\text{out}} = 1.34 \text{ mg/l}.$$

$$\text{Απόδοση απομάκρυνσης: } R = 83.25\%.$$

$$\text{Φθινόπωρο-χειμώνας: } C_{\text{out}} = 3.03 \text{ mg/l}.$$

$$\text{Απόδοση απομάκρυνσης: } R = 62.13\%.$$

Ετήσια απόδοση απομάκρυνσης: 72.69%.

12. Απομάκρυνση Φωσφόρου

Η απομάκρυνση του φωσφόρου επίσης δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και η εξίσωση ισορροπίας απομάκρυνσης μάζας είναι παρόμοια με αυτή των στοιχείων οργανικού άνθρακα και με παρόμοια απόδοση απομάκρυνσης:

$$K_p = 1.7856$$

$$C_{\text{in}} = 10.5 \text{ mg/l}$$

$$C_{\text{out}} = 1.43 \text{ mg/l}$$

$$\text{Απόδοση απομάκρυνσης: } R = 86.43\%.$$

13. Απομάκρυνση TSS

Η απομάκρυνση TSS έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τον οργανικό άνθρακα και το φώσφορο καθώς δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία:

$$K_p = 1.7856$$

$$C_{in} = 45 \text{ mg/l}$$

$$C_{out} = 6.11 \text{ mg/l}$$

Απόδοση απομάκρυνσης: $R = 86.43\%$.

IV. Ανάλυση

Λόγω της απουσίας δοκιμών με χρήση χρωμάτων ιχνηλασίας (tracers), δεν είναι δυνατό να αναπτυχθεί πολύ ακριβής αλγόριθμος, καθώς οι ακριβείς διαστάσεις της ογκομετρικής απόδοσης των HSSF παραμένουν άγνωστες. Επίσης, η επιτόπια εκτίμηση των συγκεντρώσεων εξόδου στην απορροή μπορεί να αποδώσει πιο ρεαλιστικά χαρακτηριστικά της απόδοσης. Είναι δυνατό τέτοιοι ρεαλιστικοί μηχανισμοί εκτίμησης, όπως οι δοκιμές με χρήση χρωμάτων ιχνηλασίας και οι μετρήσεις συγκεντρώσεων εξόδου να αποδίδουν σταθερές επιφανειακού ρυθμού 1^{ου} βαθμού λιγότερο αποτελεσματικές σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Προφανώς, η διόρθωση σύμφωνα με τα αποτελέσματα δοκιμών με χρήση χρωμάτων ιχνηλασίας είναι επιθυμητή. Οι τιμές του βαθμού απόδοσης και των ογκομετρικών και των σειρών κατανομής χρόνων παραμονής μπορούν να υποστούν αλλαγές, καθώς δοκιμές με χρήση χρωμάτων ιχνηλασίας με ασθενέστερη αποτελεσματικότητα αυξάνει τις συγκεντρώσεις εισόδου και μειώνει τις τιμές του βαθμού απόδοσης. Οι σταθερές επιφανειακού ρυθμού 1^{ου} βαθμού μπορούν επίσης να μειωθούν ανάλογα με τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Υπάρχουν επίσης δυνατότητες για περισσότερες τροποποιήσεις του μοντέλου με πραγματικές και επιτόπιες εκτιμήσεις των διαφόρων παραμέτρων των CW. Τέτοιες παράμετροι, όπως οι συγκεντρώσεις υποβάθρου των ρύπων, η πραγματική ποσότητα βιομάζας που παράγεται από την ενδημική χλωρίδα, η πραγματική απορρόφηση από τα φυτά θρεπτικών συστατικών, όπως τα νιτρώδη, κλπ., δεν μπορούν να προκύψουν με ακρίβεια, παρά μόνο με επιτόπια μέτρηση στους CW. Η διαθεσιμότητά τους θα οδηγήσει προφανώς σε πιο ακριβή αποτελέσματα απομάκρυνσης και αποδοτικότητας.

Επί του παρόντος, το μοντέλο έχει αναπτυχθεί στη βάση της θεωρητικής προσομοίωσης παραγόμενης μέσα από μία ανάμειξη πρωτότυπης σκέψης και βιβλιογραφικής αναδρομής. Ούτως ή άλλως, ισχύει ότι το παρόν μοντέλο είναι ρεαλιστικό με την έννοια ότι μέσω της φυσικής εκτίμησης μπορεί να εφαρμοστεί ως λειτουργική και βιώσιμη λύση για τη δευτερογενή κατεργασία των αστικών λυμάτων, ειδικά για μία μικρή και απομονωμένη κοινότητα, όπως η πόλη Bishop. Αυτό από μόνο του είναι ένα αξιόλογο επίτευγμα αλλά βέβαια πολλά περισσότερα χρειάζεται να γίνουν για να αποδειχθεί ότι η όλη διαδικασία δεν εκτελέστηκε άσκοπα.

A. Ανάλυση Διεργασιών

1. Χαρακτηριστικά Απομάκρυνσης Άνθρακα

Από την παράγραφο III.A.2.2 παρατηρούμε ότι τα αστικά λύματα της πόλης Bishop περιέχουν 1490 kg/d BOD₅. Αυτό είναι πολύ υψηλότερο από τα 60g ανά άτομο και ημέρα που οι Vymazal & Kropfelova (2008) αποδέχονται για την έρευνά τους, παρόλο που προειδοποιούν ότι η τιμή αυτή ενδεχομένως να ποικίλλει έντονα. Παρατηρείται επίσης από τους Vymazal & Kropfelova (2008) ότι το μέσο ειδικό εμβαδό ανά άτομο για την επεξεργασία δευτερογενούς αστικού BOD είναι 10.7 m²/άτομο. Τα ειδικά εμβαδά ανά άτομο χωρίς να ληφθεί υπόψη η ποσότητα BOD που παράγεται ανά άτομο και ημέρα για την παρούσα εργασία είναι ως ακολούθως:

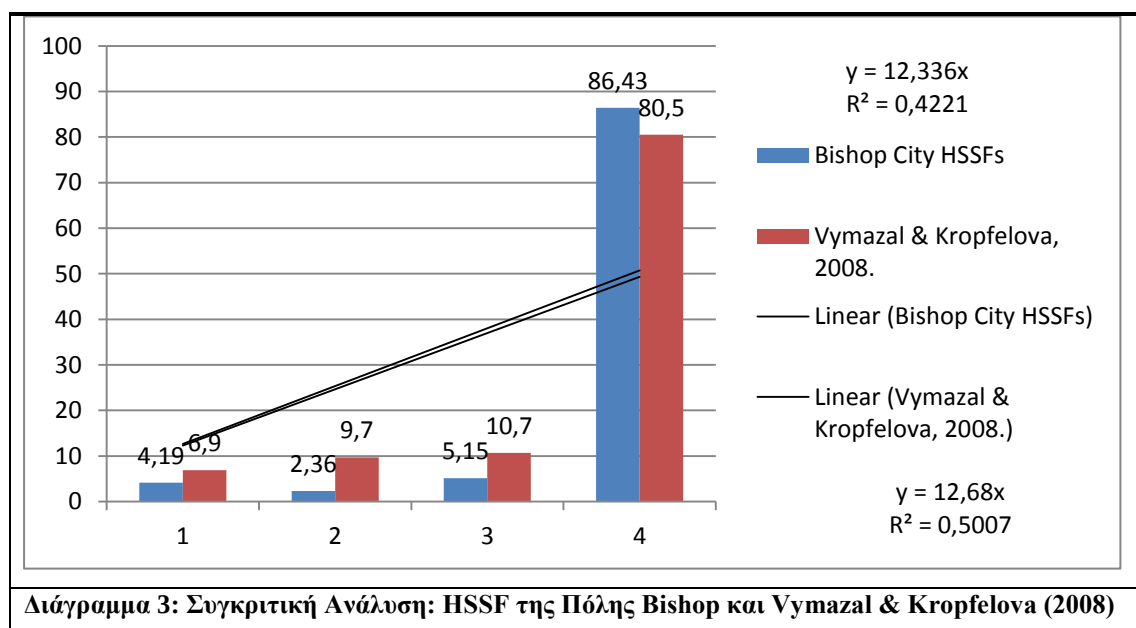
$$\frac{\text{Συνολικό Εμβαδό για τους 3 HSSF}}{\text{Αριθμός Κατοίκων στην Πόλη Bishop}} = 74.6 \times 10^3 / 14500 = 5.145 \text{ m}^2/\text{άτομο}.$$

Η τιμή αυτή είναι εξαιρετικά χαμηλή, σχεδόν 50% μικρότερη, καθώς το φορτίο BOD στα αστικά λύματα της πόλης Bishop ανά άτομο είναι 102.76 g. Για μία τόσο υψηλή φόρτιση BOD, το ειδικό εμβαδό που χρησιμοποιείται κυμαίνεται στην περιοχή των 18-20 m². Ενδεχομένως, οι συγγραφείς έχουν μελετήσει μόνο ευρωπαϊκούς CW, ενώ οι αντίστοιχοι στις ΗΠΑ απαιτούν πιο εντατική επεξεργασία καθώς εκεί το φορτίο BOD είναι υψηλότερο ανά άτομο και ημέρα. Ούτως ή άλλως, ο μέσος ρυθμός υδραυλικής φόρτισης (HLR) για την παρούσα εργασία είναι πολύ χαμηλότερη στα 4.19 cm/d σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή των 6.9 cm/d που δέχονται οι Vymazal & Kropfelova (2008). Αυτό υπονοεί ότι η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί πολύ χαμηλότερο όγκο νερού και εμβαδό σε σχέση με τα στατιστικά στοιχεία που παρουσιάζονται από τους Vymazal & Kropfelova (2008), παρόλο που αυτό μπορεί να οφείλεται στην από μέρους τους μελέτη και σύγκριση μονάδων CW στην Ευρώπη.

Επίσης, σύμφωνα με τους Vymazal & Kropfelova (2008), παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης για την απομάκρυνση του BOD σε δευτερογενή αστικά λύματα είναι σχεδόν 80.5%, ενώ η παρούσα εργασία δέχεται βαθμό απόδοσης 86.43% (Παράγραφος III.Γ.9). Όπως προαναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, αυτός ο υψηλός βαθμός απομάκρυνσης μπορεί να μειωθεί με επιτόπιες μετρήσεις και επανακαθορισμό των παραμέτρων σε ρεαλιστικότερη βάση.

Πίνακας 7: Σύγκριση Παραμέτρων: HSSF Πόλης Bishop και Vymazal & Kropfelova (2008)

Data Type	HLR (cm/d)	BOD (g/m ² .d)	m ² /person	BOD Removal Efficiency (%)
Bishop City	4.19	2.36	5.15	86.43
Vymazal & Kropfelova	6.9	9.7	10.7	80.50



Διάγραμμα 3: Συγκριτική Ανάλυση: HSSF της Πόλης Bishop και Vymazal & Kropfelova (2008)

Το παραπάνω διάγραμμα (3) απεικονίζει τους ρυθμούς υδραυλικής φόρτισης (1), το φορτίο BOD σε g/m².d (2), το ειδικό εμβαδό του CW ανά άτομο (3) και την απόδοση απομάκρυνσης του BOD των HSSF της πόλης Bishop και τους αντίστοιχους μέσους όρους που συνέλλεξαν οι Vymazal & Kropfelova (2008) στη μελέτη τους.

Αληθεύει ότι οι επιλεγμένες παράμετροι είναι ελαφρώς ασύνδετες, αλλά, παρ' όλα αυτά, γίνεται άμεσα αντιληπτό από το διάγραμμα και τις σχετικές αναδρομικές εξισώσεις, η πάνω για την πόλη Bishop και η κάτω για τους ερευνητές, ότι υπάρχει κάποιος συσχετισμός μεταξύ των δύο ομάδων δεδομένων. Η κλίση και η τιμές του R^2 και για τις δύο εξισώσεις είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, 12.33 και 12.68, για τις κλίσεις της πόλης Bishop και για τους Vymazal & Kropfelova (2008) αντίστοιχα και 0.422 και 0.500 για τις τιμές R^2 αντίστοιχα.

Αυτή η εγγύς συσχέτιση υποδεικνύει τη βιωσιμότητα του σχεδίου της παρούσας εργασίας παρόλο που είναι αλήθεια ότι απαιτείται περαιτέρω επιτόπια μελέτη με πραγματικές εκτιμήσεις και μετρήσεις με τη μορφή δοκιμών με χρώματα ιχνηλασίας και ανάλυση των συγκεντρώσεων των εκροών. Αξίζει επίσης να

σημειωθεί ότι οι Vymazal & Kropfelova (2008) επισημαίνουν ότι οι μέσοι όροι που έχουν χρησιμοποιηθεί στη μελέτη τους συχνά παρουσιάζουν ασθενείς συσχετίσεις. Ούτως ή άλλως, τέτοιες συσχετίσεις έχουν επιτευχθεί μόνο μέσα στις ίδιες ομάδες παραμέτρων επιλεγμένων από διαφορετικούς CW από διαφορετικές χώρες και όχι όπως χρησιμοποιήθηκαν εδώ για μία ομάδα ανόμοιων παραμέτρων.

Δεν έχει γίνει καμία ανάλυση για το ρυθμό απομάκρυνσης του COD καθώς είναι παρόμοιο με αυτόν του BOD. Για να είναι ο ρυθμός απομάκρυνσης του COD πιο ρεαλιστικός και παρόμοιος με άλλους CW και στις ΗΠΑ και αλλού, πιστεύεται ότι μία πραγματική εκτίμηση των συγκεντρώσεων των εκροών θα ήταν πολύ χρήσιμη στην παροχή ενδείξεων ως προς το τί πραγματικά την επηρεάζει στο πλαίσιο των HSSF της πόλης Bishop.

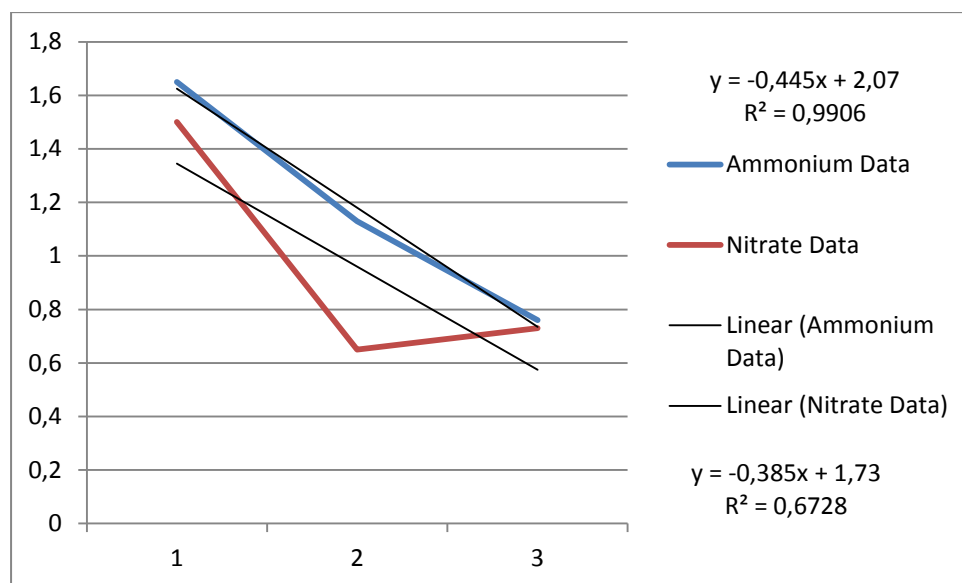
Όσον αφορά στην παράγραφο III.B.4.2, οι μικροί HSSF έχουν αποικισθεί από μικροβιακούς παράγοντες κατάλληλους για την αερόβια και το 1^ο στάδιο της αναερόβιας ζύμωσης. Πιστεύεται ότι τα περισσότερα από τα προϊόντα του 1^{ου} σταδίου της αναερόβιας ζύμωσης δεν ανοργανοποιούνται στα δύο στρώματα των μικρών HSSF. Αντιθέτως, τα οργανικά οξέα και οι αλκοόλες αναμένεται να διασπασθούν από τα θειοαναγωγικά και τα μεθανογόνα βακτήρια στα κατώτερα στρώματα των μικρών HSSF. Ένα ποσό αερίων διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου θα εκπεμφθούν από τους μικρούς HSSF. Ούτως ή άλλως, σύμφωνα με την παράγραφο III.B.4.2, οι μικροί HSSF προορίζονται για την παραγωγή των προϊόντων του 1^{ου} σταδίου της αναερόβιας ζύμωσης και τίποτα παραπάνω. Ο ρόλος της περαιτέρω επεξεργασίας επιφυλάσσεται για τα πολυπληθή θειοαναγωγικά, μεθανογόνα και ακετοδιασπαστικά βακτήρια στα δύο στρώματα του μεγάλου HSSF. Ως εκ τούτου, τα περισσότερα από τα τελικά προϊόντα της αναερόβιας ζύμωσης, τα αέρια του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου, θα απελευθερωθούν από την επιφάνεια του μεγάλου HSSF.

Δεν έχει γίνει καμία ανάλυση για αυτά τα επιμέρους βήματα, καθώς είναι δυνατή η καλύτερη εκτίμηση μέσα από τη λήψη πραγματικών επιτόπιων μετρήσεων των ποσοτήτων των προϊόντων. Η εκπομπή αερίων όπως του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου μπορεί επίσης να παρέξει ακριβείς ενδείξεις για τις διεργασίες που αναπτύσσονται μέσα στους δύο τύπους των HSSF.

2. Ανάλυση Απομάκρυνσης Αζώτου

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά Απομάκρυνσης Αμμωνίου & Νιτρικών

Τύπος Δεδομένων	Ρυθμοί Θέρους- Άνοιξης	Ρυθμοί Χειμώνα- Φθινοπώρου	Απόδοση Απομάκρυνσης
NH ₄ -N	1.65	1.13	0.76
NO ₃ -N	1.50	0.65	0.73



Διάγραμμα 4: Απομάκρυνση Αμμωνίου & Νιτρικών

Τα αναγραφόμενα δεδομένα στον παραπάνω Πίνακα 8 περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά απομάκρυνσης αμμωνίου και νιτρικών, σύμφωνα με την παράγραφο III.Γ.11. Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η ομάδα δεδομένων του NH₄-N έχει μεγαλύτερη συσχέτιση, η τιμή R² είναι εγγύτερα στη μονάδα, σε σχέση με την ομάδα δεδομένων των νιτρικών. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι HSSF της εργασίας δεν προσανατολίζονται στη νιτροποίηση / απονιτροποίηση αλλά στη μερική νιτροποίηση / ANAMMOX και την απονιτροποίηση.

3. Απομάκρυνση COD, P & TSS

Δεν έχει γίνει ανάλυση σχετικά με την απομάκρυνση των COD, P και TSS. Η σταθερά επιφανειακού ρυθμού 1^{ου} βαθμού για την απομάκρυνση COD, P και TSS, σύμφωνα με τους Kadlec & Knight (1998), δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Αυτό υποδεικνύει ότι εκτός και αν έχουν ληφθεί πραγματικές μετρήσεις στα

χαρακτηριστικά της απορροής για αυτούς τους ρυπαντές, δεν μπορεί να υποστηριχθεί κάποιο μοντέλο, όπως έγινε για την απομάκρυνση των BOD και N.

Σημειώνεται ότι η απομάκρυνση P μέσω μικροβιακών παραγόντων σε υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής αποτελεί αμφιλεγόμενη διεργασία. Αντίθετα, πολυάριθμοι ερευνητές, συμπεριλαμβανομένων και των Brix et al. (2001), προτείνουν ότι κατάλληλα υποστρώματα, όπως ασβεστολιθικές άμμοι και θρυμματισμένο μάρμαρο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ξεχωριστές δεξαμενές ειδικά για την απομάκρυνση του P. Ο μηχανισμός απομάκρυνσης δεν είναι άεναος και το υλικό του υποστρώματος πρέπει να ανανεώνεται περιοδικά μετά την εξάντληση της ικανότητας απορρόφησης του P (Brix et al, 2001). Αναφέρονται επίσης περιπτώσεις υποβρύχιας βλάστησης ικανής να απομακρύνει το P, αλλά αυτό δε θα ταίριαζε στην εργασία τόσο πολύ σε υποεπιφανειακά επίπεδα. Για να διατηρηθεί η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης, μπορεί να κατασκευαστεί ένας ξεχωριστός μικρότερος HSSF κοντά στους μικρούς HSSF αυτής της εργασίας και να επιστρωθεί με ασβεστολιθικό υλικό ώστε να αναλάβει την απομάκρυνση του P. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο και αφού έχουν εκτελεστεί πραγματικές μετρήσεις αποδοτικότητας και δοκιμές με τη χρήση χρωματικών ιχνηλατών.

Υπάρχει ένα ιδιαίτερο πρόβλημα ύπαρξης σκόνης στην περιοχή που σχετίζεται με την κοιλάδα Owen's μέσα στην οποία πρόκειται να κατασκευαστούν οι HSSF (Reheis, 1994). Η σκόνη είναι πολύ λεπτή και με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα. Αυτό μπορεί να αλλάξει τις τιμές pH μέσα στους HSSF, ειδικά στους μικρότερους HSSF, οι οποίοι είναι πολύ ευαίσθητοι σε αλλαγές του pH. Εφόσον η διατήρηση του σωστού εύρους για το pH είναι ουσιώδες για την εξακολούθηση της μερικής νιτροποίησης και του ANAMMOX, είναι απαραίτητο να παρακολουθείται η διείσδυση σκόνης και οι τιμές του pH να μετρώνται περιοδικά. Ένας πιθανός τρόπος για την καταπολέμηση του προβλήματος ίσως να είναι η χρήση αποσπασματικών στεγάστρων στις επιφάνειες των HSSF όπου η φυτική κάλυψη δεν είναι διαθέσιμη. Ενδεχομένως να προκύψει μείωση των ρυθμών εξάτμισης εξαιτίας αυτού του πρόσθετου μέτρου αλλά αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα παρά μόνο για τον επανυπολογισμό των ημερήσιων ρυθμών ροής και την επακόλουθη αλλαγή της ημερήσιας απορροής, η οποία μπορεί να χρειάζεται να αυξηθεί ώστε να αντισταθμιστεί η μείωση των ρυθμών εξάτμισης.

4. Μικροοργανισμοί «Δείκτες» και Παθογόνα

Σύμφωνα με την παράγραφο III.A.2.5 η εκροή από τους διαυγαστήρες είναι μέτρια χλωριωμένη για να εξασφαλίζεται η μη είσοδος παθογόνων από τα λύματα της πόλης Bishop στο περιβάλλον των HSSF.

Είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί ότι η χλωρίωση μπορεί να μειώσει την τιμή του pH των εισροών στους HSSF και θα πρέπει να γίνονται συνεχείς έλεγχοι ότι από αυτή τη διαδικασία δεν προκύπτει pH πάνω από 7.2-7.3. Κάτι τέτοιο μπορεί να βλάψει τα βακτήρια της μερικής νιτροποίησης και του ANAMMOX που βρίσκονται στα ενδιάμεσα στρώματα των μικρών HSSF.

Ενδείκνυται επίσης η εξασφάλιση ότι οι εισροές στους HSSF, μετά τη χλωρίωση, δεν εισέρχεται στους υδροβιότοπους με βακτηριοκτόνο περιεχόμενο. Αυτό μπορεί να βλάψει τους ωφέλιμους βακτηριακούς παράγοντες που διαβιούν στο σύστημα.

Οι Jimenez et al. (2010) αναφέρουν ότι τα συμβατικά απολυμαντικά, όπως το ελεύθερο χλώριο, που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των λυμάτων, δεν έχουν αποτέλεσμα στην προσπάθεια καθαρισμού του νερού από παρασιτικά στοιχεία, ειδικά τα αυγά των ελμίνθων (σκωλήκων). Οι ερευνητές προτείνουν, αντίθετα, τη χρήση ενός διπλού συστήματος διήθησης / διύλισης μέσω βαθέων στρωμάτων τραχιάς άμμου για την επεξεργασία των εισροών στους HSSF. Ο υδραυλικός ρυθμός φόρτισης μπορεί να διατηρηθεί στα 0.65 m^3 ανά ημέρα και ανά m^2 επιφάνειας αμμώδους στρώματος (Jimenez et al, 2010). Αυτό θα μειώσει ουσιαστικά τις παρασιτικές κύστες και τα αυγά των ελμίνθων, ενώ η χλωρίωση θα εξαλείψει τα ενυπάρχοντα παθογόνα βακτήρια. Για επιπρόσθετη εξασφάλιση, οι εκροές μπορούν να διέλθουν επιπλέον επεξεργασίας με ακτινοβολία UV ώστε να προετοιμαστούν για την απόρριψή τους στο άμεσο υδάτινο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο όταν έχουν πληρωθεί όλα τα κριτήρια απόρριψης των εκροών.

Σύμφωνα με την παράγραφο III.B.4.1 παρατηρείται ότι οι μικροί HSSF έχουν φυτευθεί με το σκεπτικό ότι η παθογονοανασταλτική φύση των αναδυόμενων φυτών μειώνει τη διάδοση των περιεχόμενων παθογόνων στις εκροές που τελικά απορρίπτονται από τους HSSF.

B. Καινοτόμα Στοιχεία

Μηχανισμοί Απομάκρυνσης Αζώτου: Η απομάκρυνση του N από το σχέδιο της παρούσας εργασίας αναμένεται να αποτελέσει ένα καινοτόμο στοιχείο καθώς η

μερική νιτροποίηση και η ANAMMOX είναι οι βασικοί μηχανισμοί πάνω στους οποίους αναπτύσσεται το σχέδιο. Η ακόλουθη παράγραφος αναλύει τον ακριβή μηχανισμό μέσω του οποίου η διττή αυτή διεργασία, μαζί με την πιο συμβατική νιτροποίηση / απονιτροποίηση επιτυγχάνει την απομάκρυνση του N.

Κατ' αρχάς είναι απαραίτητο να γίνουν κατανοητοί οι ενδότεροι μηχανισμοί μέσω των οποίων οι μικροβιακοί παράγοντες επηρεάζουν την ισορροπία του αζώτου μέσα στο σύστημα του CW.

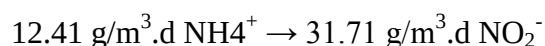
Αφού τα ανώτερα στρώματα των μικρών HSSF είναι τα καλύτερα αεριζόμενα, αλλά με μικρή συγκέντρωση οξυγόνου, συμπεραίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος της μερικής νιτροποίησης λαμβάνει χώρα εκεί.

Βήμα 1:

Μερική Νιτροποίηση:

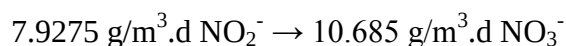


Υπολογίζεται ότι περίπου το 50% του αμμωνίου αναλώνεται μέσω της μερικής νιτροποίησης.



Βήμα 2:

Υπολογίζεται επίσης ότι περίπου το 25% των νιτρικών που παράγεται (345 kg) από την παραπάνω αντίδραση αναλώνεται μέσω της νιτροποίησης για την παραγωγή νιτρικών.

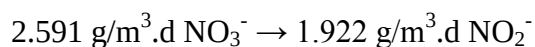


Στην παραπάνω εξίσωση, τα νιτρικά που παράγονται έχουν μάζα 116.25 kg. Το φορτίο νιτρικών στην εισαγωγή είναι 110 kg/d. Η συνολική κατανομή νιτρικών στα κατώτερα στρώματα για την απονιτροποίηση είναι 226.25 kg/d.

Βήμα 3:



Από το συνολικό φορτίο νιτρικών, εκτιμάται ότι το 30% αναλώνεται μέσω της απονιτροποίησης σε νιτρώδη στα κατώτερα στρώματα των μικρών HSSF. Για το λόγο αυτό, η κατανομή νιτρικών είναι 67.875 kg στα κατώτερα στρώματα των μικρών HSSF και 158.375 kg στο μεγάλο HSSF.

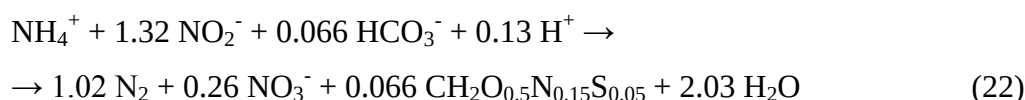


Βήμα 4:

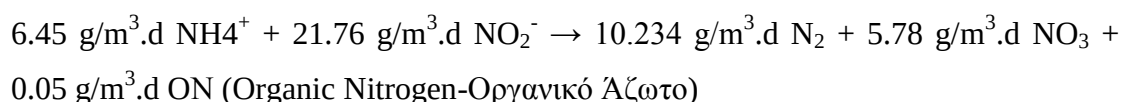
Τα νιτρώδη που παράγονται από την παραπάνω εξίσωση προστίθενται στα υπολειπόμενα νιτρώδη από το 1^ο Βήμα:

$$258.75 + 50.36 = 309.11 \text{ kg.}$$

Αυτό το φορτίο καταλήγει στο ενδιάμεσο στρώμα των μικρών HSSF για την αλληλεπίδραση με το αμμώνιο μέσω της ANAMMOX. Μετά το πρώτο βήμα, υπάρχει 50% $\text{NH}_4\text{-N}$ (135 kg). Αφού η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης για το $\text{NH}_4\text{-N}$ είναι 76%, η ποσότητα που παραμένει ακατέργαστη είναι 64.8 kg. Το υπόλοιπο (70.2 kg) κατευθύνεται στην αντίδραση αυτού του βήματος μαζί με το φορτίο των νιτρωδών.



(Αμμώνιο: 91.63 kg, Νιτρώδη: 82.06 kg)



Η ποσότητα του αερίου αζώτου που παράγεται σε αυτό το βήμα είναι 111.35 kg. Το άζωτο στην αέρια μορφή προτιμάται σε σχέση με άλλες μορφές που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία, όπως το N_2O , το οποίο στην πραγματικότητα είναι προϊόν ατελούς απονιτροποίησης. Επίσης, το N_2O είναι ένα από τα γνωστά «αέρια του θερμοκηπίου».

Η ποσότητα των νιτρικών που παράγεται είναι 62.89 kg. Η συνολική μεταφορά νιτρικών στο μεγάλο HSSF είναι 221.265 kg. Το συνολικό ανεπεξέργαστο αμμώνιο είναι 64.8 kg. Τα συνολικά ανεπεξέργαστα νιτρώδη είναι: $309.11 - 236.75 = 72.36 \text{ kg}$.

Υπάρχει επίσης παραγωγή 0.544 kg οργανικού αζώτου. Αν και αυτό δε συμπεριλαμβάνεται στο πλαίσιο της απομάκρυνσης του N, σε ετήσια βάση η παραγωγή του είναι σημαντική και μπορεί να ανέλθει σε περίπου 150 kg οργανικού αζώτου.

Βήμα 5:

Στο μεγάλο HSSF ακολουθεί απονιτροποίηση με σκοπό την ανάλωση των υπόλοιπων νιτρικών. Το συνολικό επεξεργασμένο $\text{NO}_3\text{-N}$ είναι 192.578 kg. Από αυτό, το 10% (19.258 kg) βρίσκεται στο πάνω στρώμα του μεγάλου HSSF και το 90% (173.32 kg) στο κάτω στρώμα.



Πάνω στρώμα: $2.767 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d NO}_3^- \rightarrow 2.053 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d NO}_2^- \rightarrow 1.25 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d N}_2$

Η ποσότητα του παραγόμενου αερίου αζώτου είναι 8.70 kg.

Κάτω στρώμα: $6.9 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d NO}_3^- \rightarrow 5.119 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d NO}_2^- \rightarrow 3.116 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d N}_2$

Τα ανεπεξέργαστα νιτρώδη από το τέταρτο βήμα (72.36 kg) περνούν από επεξεργασία στο μεγάλο HSSF, κυρίως στο κατώτερο στρώμα.

$2.881 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d NO}_2^- \rightarrow 1.7537 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d N}_2$

Η συνολική ποσότητα αερίου αζώτου που παράγεται στο πάνω στρώμα είναι 122.33 kg.

Το συνολικό αέριο άζωτο που παράγεται στο μεγάλο HSSF είναι 131.03 kg.

Συγκεντρώσεις εξόδου:

Από τα συνολικά ανεπεξέργαστα νιτρικά (28.687 kg), σύμφωνα με την παράγραφο III.B.4.1, τα φυτά απορροφούν 11.034 kg. Η συγκέντρωση των ρύπων στο περιβάλλον δεν έχει ληφθεί υπόψη καθώς δεν έχουν ληφθεί πραγματικές μετρήσεις. Ως εκ τούτου, το πραγματικό φορτίο νιτρικών στην έξοδο είναι 17.653 kg.

Το συνολικό ανεπεξέργαστο αμμώνιο είναι 64.8 kg.

Η συνολική έξοδος ανά ημέρα (Παράγραφος III.Γ.6) είναι $6.6405 \times 10^3 \text{ m}^3 = 6.6405 \times 10^6 \text{ lt}$.

Η συγκέντρωση $\text{NH}_4\text{-N}$ εξόδου είναι 9.758 mg/l.

Η συγκέντρωση $\text{NO}_3\text{-N}$ εξόδου είναι 7.335 mg/l.

Πίνακας 9: Στατιστικά Απομάκρυνσης N

Τύπος Λυμάτων	Συγκέντρωση Εισροών (mg/l)	Συγκέντρωση Εκροών (mg/l)	Αποδοτικότητα Απομάκρυνσης (%)	Απορρόφηση Φυτών (%)
$\text{NH}_4\text{-N}$	40.8	9.758	76.08	--
$\text{NO}_3\text{-N}$	16	2.66	83.38	10.39

Η απορρόφηση του N από τα φυτά (%) συμπεριλαμβάνεται στην αποδοτικότητα απομάκρυνσης του N (%).

Πίνακας 10: Δεδομένα Απομάκρυνσης Μικρών & Μεγάλου HSSF

Τύπος HSSF	NH ₄ -N (kg)	NO ₃ -N (kg)	NO ₂ -N (kg)	N ₂ (kg)
Μικρός	205.2	67.88	236.75	111.35
Μεγάλος	--	192.58	72.36	131.03

Πίνακας 11: Εισροή, Επεξεργασία, Παραγωγή και Εκροή Ρύπων για τους HSSF

Ρύπος	Μικροί HSSF					Μεγάλος HSSF				
	Εισροή (kg)	Επεξεργασία (kg)	Βιομάζα (kg)	Πρόσληψη Φυτών (kg)	Διατήρηση	Εκροή (kg)	Εισροή (kg)	Επεξεργασία (kg)	Παραγωγή (kg)	Εκροή (kg)
NH ₄ -N	270	205.2	--	--	--	64.8	64.8	--	--	64.8
NO ₃ -N	110	67.88	179.14	11.03	--	210.24	210.24	192.58	--	17.65
NO ₂ -N	--	323	395.36	--	--	72.36	72.36	72.36	--	--
Αέριο N ₂	--	--	111.35	--	--	111.35	--	--	131.03	131.03
ON	--	--	0.54	--	0.54	--	--	--	--	--

Οι αριθμοί με κυανό χρώμα προσθέτουν στο φορτίο του ρύπου σε ένα συγκεκριμένο σύστημα (μικρό ή μεγάλο) ενώ αυτοί με κόκκινο αφαιρούν από το φορτίο. Οι αριθμοί με πορτοκαλί χρώμα περιγράφουν το καθαρό αποτέλεσμα εκροής.

V. Συμπεράσματα

Παρατηρείται ότι τα χαρακτηριστικά της απόδοσης των σχεδιασμένων HSSF για την απομάκρυνση των ρύπων ταιριάζουν αρκετά καλά με άλλα παρόμοια συστήματα που έχουν κατασκευαστεί στις ΗΠΑ. Εφόσον έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της ριζικής ζώνης, σύμφωνα με την παράγραφο III.Γ.7, για τη διαμόρφωση των σταθερών επιφανειακού ρυθμού απομάκρυνσης 1^{ου} βαθμού, παρόλο που και οι τρεις HSSF δε διαθέτουν πλήρη κάλυψη από βλάστηση, έχουν συμπεριληφθεί ρυθμίσεις με τη μορφή πολύ συντηρητικά υπολογισμένων υδραυλικής και ογκομετρικής αποδοτικότητας, όπως στην παράγραφο III.Γ.3, ώστε να αντισταθμιστεί η ελαχιστοποίηση των φυτικών λειτουργιών. Επίσης, οι συντηρητικές εκτιμήσεις των αποδόσεων έχουν και άλλον ένα στόχο: η έλλειψη δοκιμών με χρωματικούς ιχνηλάτες και επιτόπιων μετρήσεων των συγκεντρώσεων εξόδου δε θα επηρεάσουν σημαντικά τις εκτιμήσεις για την αποδοτικότητα καθώς οι πραγματικές δοκιμές και μετρήσεις, λόγω των ήδη χαμηλών υπολογισμών, μπορούν να δείξουν ότι οι σχεδιασμένοι HSSF είναι πιο αποδοτικοί.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, έχουν προταθεί αρκετές ουσιαστικές προσθήκες. Αυτές είναι καινοτόμες και απαριθμούνται όπως παρακάτω:

1. Οι εισροές στους HSSF από τους διαυγαστήρες θα πρέπει να υπόκεινται σε ήπια χλωρίωση καθώς και να διέρχονται από στρώματα τραχιάς άμμου ώστε να απομακρύνονται αποτελεσματικά τα βακτήρια, οι παρασιτικές κύστες και τα αυγά ελμίνθων, όπως στην παράγραφο IV.A.4.
2. Εκτός από τους τρεις HSSF, μπορεί να προστεθεί άλλος ένας παρόμοιος μικρός HSSF χωρίς βλάστηση με υπόστρωμα ασβεστολιθικής άμμου, όπως στην παράγραφο IV.A.3, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το φορτίο του P.
3. Αν οι εισροές από τους HSSF δεν τηρούν τα κριτήρια απόρριψης όσον αφορά στις συγκεντρώσεις ρύπων, θα πρέπει τα λύματα να διέρχονται από τριτογενή επεξεργασία, κατά προτίμηση μέσω ενός FWS (free water surface-ελεύθερης επιφάνειας) CW, ο οποίος διαθέτει επαρκή κάλυψη από τοπικά είδη επιπλεόντων φυτών.

4. Πριν την τελική απόρριψη, τα λύματα πρέπει να διέρχονται από κατεργασία με ακτινοβολία UV ως ένα τελικό μέτρο κατά των παθογόνων.
5. Η παραγωγή βιοαερίου από την ιλύ στους χωνευτήρες μπορεί να παράγει ενέργεια η οποία θα χρησιμοποιείται για την εν μέρει λειτουργία του κύριου συστήματος κατεργασίας.
6. Αφού οι περισσότεροι υδροφορείς της περιοχής χρησιμοποιούνται για την άντληση ποσίμου νερού, συνίσταται η αποφυγή οποιασδήποτε απευθείας απόρριψης λυμάτων σε αυτούς. Αντιθέτως, κάποιες περιοχές της τοπικής άνυδρης ζώνης μπορούν να ευεργετηθούν με την προσθήκη νερού με κάποιο κατάλληλο τρόπο, όπως η δημιουργία ανοικτών ταμιευτήρων για αισθητικούς και λόγους δημιουργίας βιοτόπων άγριας ζωής.
7. Η φύτευση του είδους *Calochortus excavates*, το οποίο απαντάται μόνο σε αυτήν την περιοχή και είναι απειλούμενο, όπως στην παράγραφο III.B.4.1, θα ενισχύσει την αισθητική θελκτικότητα του συστήματος.
8. Η έναρξη χρήσης μερικής νιτροποίησης και ANAMMOX στους HSSF θα επιτρέψει την εκμετάλλευση μιας νέας τεχνολογίας στην επεξεργασία λυμάτων με τη χρήση υδροβιοτόπων.
9. Οι επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών στις απορροές θα αναπληρώσει τις από καιρό εξαντλημένες ποσότητες στο έδαφος της περιοχής και θα επιτρέψει την ανάπτυξη ενδημικών ειδών χαμηλής βλάστησης αντί για εισαγόμενα είδη θάμνων.
10. Το N_2O , ένα βαρύ αέριο και ένας παράγοντας που συμβάλλει στην παγκόσμια θέρμανση, έχει αφαιρεθεί από την εμπλοκή στη μικροβιακή διεργασία απομάκρυνσης ρύπων. Αυτός είναι ένας νέος τρόπος με τον οποίο η παρούσα εργασία επιδιώκει να συμβάλλει στις διεθνείς προσπάθειες για την προστασία του περιβάλλοντος.

Συνολικά, η παρούσα εργασία αναμένεται στην τελική της μορφή και εάν υλοποιηθεί να βοηθήσει τους κατοίκους της περιοχής της πόλης Bishop να διατηρήσουν τον άμεσο φυσικό τους περίγυρο σε μια όσο το δυνατό αδιατάρακτη μορφή. Κατ’

επέκταση, περιοχές και χώρες με παρόμοια κλιματικά χαρακτηριστικά και χλωρίδα, όπως η Ελλάδα και η νήσος Κρήτη μπορούν να ωφεληθούν από αντίστοιχες δράσεις, με την προϋπόθεση της λεπτομερούς μελέτης και ανάλυσης των κατά τόπους κλιματικών χαρακτηριστικών και της ενδημικής χλωρίδας και μικροβιακής πανίδας. Η έλλειψη ακραίων φαινομένων, όπως ο ολικός παγετός και η ερημική ξηρασία εξασφαλίζει την αδιατάρακτη εφαρμογή σχεδίων όπως αυτό που αναλύεται στην παρούσα εργασία, με αποτέλεσμα να προβάλει η περιοχή αυτή ως ένα πρότυπο φυσικό εργαστήριο για τη μελέτη και την περαιτέρω εξέλιξη τέτοιων μεθόδων.

Βιβλιογραφία

1. (LAO Primer): California's Water: A LAO (Legislative Analyst's Office) Primer, 2008. Πρόσβαση στις 12 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: http://www.lao.ca.gov/2008/rsrc/water_primer/water_primer_102208.aspx
2. Austin, D. & Nivala, J., "Energy requirements for nitrification and biological nitrogen removal in engineered wetlands", *Ecological Engineering* 35, 184-192, 2009.
3. BACC (Bishop Area Chamber of Commerce and Visitors, 2010. Πρόσβαση στις 12 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: <http://www.bishopvisitor.com/index.php3>
4. Baptista, Joana de C. et al., "The microbial diversity of laboratory-scale wetlands appears to be randomly assembled", *Water Research*, 42 (2008); 3182-3190.
5. Brix, H. et al., "Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands", *Water Science and Technology*, Vol.44, No.11-12, 2001.
6. CWIS (California Wetlands Information Systems), 2007. Πρόσβαση στις 11 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: <http://ceres.ca.gov/wetlands/>
7. Dong, Zeqin & Sun, Tieheng, "A potential new process for improving nitrogen removal in constructed wetlands: Promoting coexistence of partial nitrification and ANNAMOX", *Ecological Engineering*, 31 (2007); 69-78.
8. Erler, Dirk, V. et al., "The Contribution of ANNAMOX and Denitrification to Sediment N₂ Production in a Surface Flow Constructed Wetland", *Environ. Sci. Technol.*, 2008, 42; 9144-9150.
9. Hammer, Donald A., "Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural", *CRC Press*, 1989, ISBN: 087371184X.
10. Hanak, Ellen, 2008, "Water Supply & Quality, Just the Facts", *Public Policy Institute of California*, 2010. Πρόσβαση στις 11 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: <http://www.ppic.org/main/allpubs.asp?sort=area#a15>
11. Heliotis, Francis D. & DeWitt, Calvin B., "A conceptual model of nutrient cycling in wetlands used for wastewater treatment: A literature analysis", *Wetlands*, Vol.3, No.1, pp.134-152, December 1983.
12. Jimenez, Blanca et al., "Wastewater Treatment for Pathogen Removal and Nutrient Conservation: Suitable Systems for use in Developing Countries", 2010, in Part III, Ed. Drechsel, Pay et al., "Wastewater Irrigation and Health: Assessing and

mitigating risk in low-income countries”, *Earthscan*, 2010. Πρόσβαση στις 30 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: http://www.idrc.ca/en/ev-151734-201-1-DO_TOPIC.html

13. Kadlec, R.H., “Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands”, *Ecological Engineering*, 35 (2009); 159-174.

14. Kadlec, R.H., “The effects of wetland vegetation and morphology on nitrogen processing”, *Ecological Engineering*, 33 (2008); 126-141.

15. LORP, ICWD (Inyo County Water Department), 2010. Πρόσβαση στις 12 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: <http://www.inyowater.org/LORP/default.htm>

16. Lund, Jay et al., “Comparing Futures for the Sacramento-San Joaquin Delta”, 2008, *Publications, Public Policy Institute of California*, 2010. Πρόσβαση στις 11 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: <http://www.ppic.org/main/publication.asp?i=810>

17. Maltias-Landry, Gabriel et al., “Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands”, *Water Research* 43 (2009); 535-545.

18. Moshiri, Gerald A., “Constructed wetlands for water quality improvement”, *CRC Press*, 1993, Illust. Edition, ISBN: 0873715500.

19. NRCS: National Resources Conservation Services, 2010, United States Department of Agriculture Website, Plants Profile: *Schoenoplectus californicus*, California bulrush. Πρόσβαση στις 15 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: <http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=SCCA11>

20. Kadlec, Robert H. & Wallace, Scott, “Treatment wetlands”, *CRC Press*, 2008, 2nd Edition, Illustrated, ISBN: 1566705266.

21. Pataki, Daine E., “Plant Water Use in Owen’s Valley, CA: Understanding the Influence of Climate and Depth to Water”, *Departments of Earth Systems Science, and Ecology and Evolutionary Biology, University of California, Irvine*, Χωρίς Ημερομηνία. Πρόσβαση στις 12 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: http://www.ess.uci.edu/~dpataki/publications/pataki_cv_full.pdf

22. Persson, Jesper & Wittgren, Hans, B., “How hydrological and hydraulic conditions affect performance of ponds”, *Ecological Engineering*, 21 (2003); 259-269.

23. Reheis, Marith C., 1994, “Owens (Dry) Lake, California: A Human-Induced Dust Problem”, *UDSGS Web Document*. Πρόσβαση στις 29 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: <http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/geology/owens/>

24. Ruiz-Rueda, Olaya et al., “Structure and function of denitrifying and nitrifying bacterial communities in relation to plant species in a constructed wetland”, *Microbiol Ecol*, 67 (2009); 308-319.
25. Sirivedhin, Tanita & Gray, Kimberly, A., “Factors affecting denitrification rates in experimental wetlands: Field and laboratory studies”, *Ecological Engineering*, 26 (2006); 167-181.
26. Suutari, Amanda, “USA – California (Arcata) – Constructed Wetland: A Cost-Effective Alternative for Wastewater Treatment”, *EcoTipping Points Website, Stories Section*, 2010. Πρόσβαση στις 13 Μαΐου 2010, στη διεύθυνση: <http://www.ecotippingpoints.org/index.html>
27. Tao, Wendong, & Wang, Jing, “Effects of vegetation, limestone and aeration on nitrification, anammox and denitrification in wetland treatment systems”, *Ecological Engineering*, 2009.
28. United Nations, “World urbanization prospects: the 2003 revision”, *Dept. of Economic and Social Affairs, Population Division, United Nations Publications*, 2004. ISBN: 9211513960
29. Vymazal, Jan & Kropfelova, Lenka, “Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow”, *Volume 14 of Environmental Pollution*, Springer 2008, ISBN: 1402085796.
30. Vymazal, Jan & Kropfelova, Lenka, “Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience”, *Science of the Total Environment*, 2008.