

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση και Σχεδιασμός Τεχνητών Υγροβιότοπων
Υποεπιφανειακής Ροής για την Επεξεργασία Υγρών
Αποβλήτων

Βουμβουλάκη Γ. Ευαγγελία

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Α. Οικονομόπουλος (επιβλέπων)
Ε. Γιδαράκος
Ι. Καρακάσης

Εργαστήριο Διαχείρισης Αέριων, Υγρών και Στερεών Αποβλήτων

Χανιά
Σεπτέμβριος 2003

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Σελίδα

Πίνακας Περιεχομένων.....	ii
Λίστα Εικόνων.....	vii
Λίστα Πινάκων.....	viii
Λίστα Διαγραμμάτων	xi
Λίστα Παραρτημάτων.....	xiii
Πίνακας Συμβόλων.....	xiv
Πίνακας Ακρωνύμων.....	xvii
Περίληψη.....	xix

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
1.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΛΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	2
1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΙΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2.1.1 Γενικά.....	7
2.1.2 Φυσικοί Υγροβιότοποι.....	8
2.1.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι.....	8
2.1.4 Υγροβιότοποι SF.....	9
2.1.5 Πλεονεκτήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων.....	10
2.1.6 Μειονεκτήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων.....	11
2.1.7 Σύγκριση Μεταξύ Υγροβιότοπων FWS και SF.....	12
2.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	13
2.2.1 Εκτίμηση και Επιλογή Θέσης.....	13
2.2.2 Προεπεξεργασία Υγρών Αποβλήτων.....	15
2.2.3 Φυσικός Σχεδιασμός και Κατασκευή.....	16

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (συνέχεια)

	<u>Σελίδα</u>
2.2.3.1 Επιφάνεια Θεμελίωσης και Στεγανοποίηση.....	18
2.2.3.2 Υπόστρωμα.....	20
2.2.3.3 Κατασκευές Εισόδου – Εξόδου.....	21
2.2.3.4 Επιλογή και Διαχείριση της Φυτικής Βλάστησης.....	24
2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΟΙ ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	28
2.3.1 Απομάκρυνση BOD ₅	28
2.3.2 Απομάκρυνση TSS.....	31
2.3.3 Απομάκρυνση Αζώτου.....	32
2.3.4 Απομάκρυνση Αμμωνίας (Νιτροποίηση).....	34
2.3.5 Απομάκρυνση Νιτρικών (Απονιτροποίηση).....	36
2.3.6 Απομάκρυνση Φωσφόρου.....	37
2.3.7 Απομάκρυνση Παθογόνων.....	38
2.3.8 Απομάκρυνση Μετάλλων.....	38
2.3.9 Πολύπλοκα Οργανικά Μείγματα.....	39
2.3.10 Συγκεντρώσεις Υποβάθρου.....	40
2.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	41
2.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ.....	45
2.6 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ.....	51
2.6.1 Μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995.....	55
2.6.1.1 Απομάκρυνση BOD ₅	58
2.6.1.2 Απομάκρυνση TSS.....	58
2.6.1.3 Απομάκρυνση Αζώτου.....	59
2.6.1.4 Απομάκρυνση Φωσφόρου.....	62

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (συνέχεια)

	<u>Σελίδα</u>
2.6.1.5 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	63
2.6.2 Μοντέλο Kadlec and Knight, 1996.....	64
2.6.2.1 Απομάκρυνση BOD ₅	66
2.6.2.2 Απομάκρυνση TSS.....	66
2.6.2.3 Απομάκρυνση Αζώτου.....	67
2.6.2.4 Απομάκρυνση Φωσφόρου.....	68
2.6.2.5 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	69
2.6.3 Μοντέλο Crites and Tchobanoglous, 1998.....	70
2.6.3.1 Απομάκρυνση BOD ₅	71
2.6.3.2 Απομάκρυνση TSS.....	71
2.6.3.3 Απομάκρυνση Αζώτου.....	72
2.6.3.4 Απομάκρυνση Φωσφόρου.....	73
2.6.3.5 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	73
2.6.4 Μοντέλο Επιβράδυνσης Crites and Tchobanoglous, 2000.....	75
2.6.4.1 Απομάκρυνση TSS.....	75
2.6.4.2 Απομάκρυνση BOD ₅	78
2.7 ΤΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ (ON SITE).....	83
2.8 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	86
2.9 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ.....	88
2.10 ΚΟΣΤΟΣ.....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	
3.1 ΑΡΧΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ.....	94
3.2 Βήματα Διαδικασίας Υπολογισμού του A _s	96
3.2.1 Απομάκρυνση του BOD ₅	96
3.2.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	97

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (συνέχεια)

	<u>Σελίδα</u>
3.2.3 Απομάκρυνση των κολοβακτηριδίων.....	100
3.3 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΛΙΝΩΝ.....	102
3.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ.....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	
4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ Reed et al., 1995.....	104
4.1.1 Αρχικές Παραδοχές.....	104
4.1.2 Βήματα Διαδικασίας Υπολογισμού του A_s	105
4.1.2.1 Απομάκρυνση BOD_5	105
4.1.2.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	106
4.1.2.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	108
4.1.3 Διαστασιολόγηση Κλινών.....	109
4.1.3.1 Απομάκρυνση BOD_5	110
4.1.3.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	111
4.1.3.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	112
4.1.4 Διαγράμματα.....	115
4.1.4.1 Απομάκρυνση BOD_5	115
4.1.4.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	116
4.1.4.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	117
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ Kadlec & Knight, 1996.....	118
4.2.1 Αρχικές Παραδοχές.....	118
4.2.2 Βήματα Διαδικασίας Υπολογισμού του A_s	119
4.2.2.1 Απομάκρυνση BOD_5	119
4.2.2.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	120
4.2.2.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	120

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (συνέχεια)

	<u>Σελίδα</u>
4.2.3 Διαστασιολόγηση Κλινών.....	121
4.2.3.1 Απομάκρυνση BOD ₅	122
4.2.3.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	123
4.2.3.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	123
4.2.4 Διαγράμματα.....	125
4.2.4.1 Απομάκρυνση BOD ₅	125
4.2.4.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	126
4.2.4.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	127
4.3 MONTELO Crites & Tchobanoglous, 1998.....	128
4.3.1 Αρχικές Παραδοχές.....	128
4.3.2 Βήματα Διαδικασίας Υπολογισμού του A _s	129
4.3.2.1 Απομάκρυνση BOD ₅	129
4.3.2.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	130
4.3.2.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	132
4.3.3 Διαστασιολόγηση Κλινών.....	133
4.3.3.1 Απομάκρυνση BOD ₅	134
4.3.3.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	135
4.3.3.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	136
4.3.4 Διαγράμματα.....	139
4.3.4.1 Απομάκρυνση BOD ₅	139
4.3.4.2 Απομάκρυνση Αζώτου.....	140
4.3.4.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων.....	141
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	142
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	156

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σελίδα

Εικόνα 2-1. Υγροβιότοπος FWS (DuPoldt <i>et al.</i>).....	8
Εικόνα 2-2. Υγροβιότοπος SF (DuPoldt <i>et al.</i>).....	8
Εικόνα 2-3. Τεχνητός υγροβιότοπος SF (EPA, 1988).....	9
Εικόνα 2-4. Διατάξεις προεπεξεργασίας υγρών αποβλήτων, πριν την εισαγωγή τους στον τεχνητό υγροβιότοπο(Sundaravadivel <i>et al.</i> , 2001).....	16
Εικόνα 2-5. Τοποθέτηση βράχων για αερισμό.....	17
Εικόνα 2-6. Υγροβιότοπος με τοποθέτηση βράχων για αερισμό.....	17
Εικόνα 2-7. Επιφάνεια θεμελίωσης και στεγανοποίηση τεχνητού υγροβιότοπου SF.....	19
Εικόνα 2-8. Κατασκευή εισόδου τεχνητού υγροβιότοπου SF.....	23
Εικόνα 2-9. Κατασκευή εξόδου τεχνητού υγροβιότοπου SF.....	23
Εικόνα 2-10. Είδη φυτών: (a) <i>Scirpus</i> , (b) <i>Phragmites</i> , (c) <i>Typha</i>	25
Εικόνα 2-11. Διανομή του μεγέθους των σωματιδίων TSS ανάλογα με το χρόνο ή την απόσταση (Tchobanoglous <i>et al.</i> , 2000).....	77
Εικόνα 2-12(α) και (β). Κλασματική συγκέντρωση BOD που απομένει συναρτήσει της απόστασης, βασισμένη στη βιομετατροπή των οργανικών συνιστωσών, με ρυθμούς αντίδρασης μηδενικής τάξης, (Tchobanoglous <i>et al.</i> , 2000).....	79
Εικόνα 2-13. Τυπικές καμπύλες απομάκρυνσης για BOD ₅ και TSS κατά μήκος λίμνης υακίνθου plug-flow χωρίς ανακύκλωση (Tchobanoglous <i>et al.</i> , 2000).....	82

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Σελίδα

Πίνακας 1-1. Ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα, που εισέρχονται σε εγκαταστάσεις μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους (>10.000 κατοίκους) (Tsagarakis <i>et al.</i> , 2001).....	3
Πίνακας 2-1. Βασικά στοιχεία σχεδιασμού συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων SF (Τσαγκαράκης και Αγγελάκης, 2001).....	44
Πίνακας 2-2. Χαρακτηριστικά τυπικών υποστρωμάτων που θεωρούνται κατάλληλα για συστήματα SF (Reed <i>et al.</i> , 1995).....	44
Πίνακας 4-1. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995, για την απομάκρυνση του BOD_5	105
Πίνακας 4-2. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995, για την απομάκρυνση της αμμωνίας.....	106
Πίνακας 4-3. Τιμές της C_e των νιτρικών σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995.....	107
Πίνακας 4-4. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995, για τη συνολική απομάκρυνση του αζώτου.....	108
Πίνακας 4-5. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων.....	109
Πίνακας 4-6. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995, για την απομάκρυνση του BOD_5	110
Πίνακας 4-7. Διορθωμένες τιμές του A_s για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995, για την απομάκρυνση του BOD_5	111
Πίνακας 4-8. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995, για την απομάκρυνση του αζώτου.....	111
Πίνακας 4-9. Διορθωμένες τιμές του A_s για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Reed <i>et al.</i> , 1995, για την απομάκρυνση του αζώτου.....	112

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ (συνέχεια)

Σελίδα

Πίνακας 4-10. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων.....	112
Πίνακας 4-11. Διορθωμένες τιμές του A_s για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων.....	113
Πίνακας 4-12. Διαστάσεις κλινών που τηρούν τους περιορισμούς σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση και των τριών ρύπων.....	114
Πίνακας 4-13. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση του BOD_5	119
Πίνακας 4-14. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση του αζώτου.....	120
Πίνακας 4-15. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων.....	121
Πίνακας 4-16. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση του BOD_5	122
Πίνακας 4-17. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση του αζώτου.....	123
Πίνακας 4-18. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων.....	123
Πίνακας 4-19. Διαστάσεις κλινών που τηρούν τους περιορισμούς σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση και των τριών ρύπων.....	124
Πίνακας 4-20. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του BOD_5	129

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ (συνέχεια)

Σελίδα

Πίνακας 4-21. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση της αμμωνίας.....	130
Πίνακας 4-22. Τιμές της C_e των νιτρικών σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998.....	131
Πίνακας 4-23. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για τη συνολική απομάκρυνση του αζώτου.....	132
Πίνακας 4-24. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων.....	132
Πίνακας 4-25. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του BOD_5	134
Πίνακας 4-26. Διορθωμένες τιμές του A_s για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του BOD_5	135
Πίνακας 4-27. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του αζώτου.....	135
Πίνακας 4-28. Διορθωμένες τιμές του A_s για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του αζώτου.....	136
Πίνακας 4-29. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων.....	136
Πίνακας 4-30. Διορθωμένες τιμές του A_s για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων.....	137
Πίνακας 4-31. Διαστάσεις κλινών που τηρούν τους περιορισμούς σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση και των τριών ρύπων.....	138

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Σελίδα

Διάγραμμα 4-1. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Reed et al., 1995.....	115
Διάγραμμα 4-2. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Reed et al., 1995.....	116
Διάγραμμα 4-3. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κολοβακτηριδίων, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Reed et al., 1995.....	117
Διάγραμμα 4-4. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 (ανεξάρτητο της θερμοκρασίας) με βάση το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996.....	125
Διάγραμμα 4-5. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996.....	126
Διάγραμμα 4-6. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κολοβακτηριδίων (ανεξάρτητο της θερμοκρασίας) με βάση το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996.....	127
Διάγραμμα 4-7. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998.....	139
Διάγραμμα 4-8. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998.....	140
Διάγραμμα 4-9. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κολοβακτηριδίων, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998.....	141
Διάγραμμα 5-1. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε θερμοκρασία 5°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	144
Διάγραμμα 5-2. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε θερμοκρασία 10°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	144
Διάγραμμα 5-3. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε θερμοκρασία 15°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	145
Διάγραμμα 5-4. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε θερμοκρασία 18,5°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	145
Διάγραμμα 5-5. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε θερμοκρασία 20°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	146
Διάγραμμα 5-6. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε θερμοκρασία 25°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	146

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ (συνέχεια)

Σελίδα

Διάγραμμα 5-7. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 5°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	148
Διάγραμμα 5-8. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 10°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	148
Διάγραμμα 5-9. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 15°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	149
Διάγραμμα 5-10. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 18,5°C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	149
Διάγραμμα 5-11. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 20 °C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	150
Διάγραμμα 5-12. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 25 °C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	150
Διάγραμμα 5-13. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 5 °C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	152
Διάγραμμα 5-14. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 10 °C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	152
Διάγραμμα 5-15. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 15 °C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	153
Διάγραμμα 5-16. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 18,5 °C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	153
Διάγραμμα 5-17. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 20 °C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	154
Διάγραμμα 5-18. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 25 °C με βάση και τα τρία μοντέλα.....	154

ΛΙΣΤΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Σελίδα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΤΙΜΕΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....160

602Pro PRINT PACK Trial

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Ελληνικά Σύμβολα

δ	Πυκνότητα του νερού
θ	Θερμικός συντελεστής στους 20 °C
θ_z	Θερμικός συντελεστής (για την C*)
ν	Τάξη της αντίδρασης
φ	Ηλιακή ακτινοβολία για την τοποθεσία
χ	Απόσταση [L]

Αγγλικά Σύμβολα

602Pro PRINT PACK Trial

A_c	Επιφάνεια κάθετη στην κατεύθυνση ροής [L ²]
A_s	Συνολική επιφάνεια λεκανών, [L ²]
A'	Πραγματικό εμβαδόν διαθέσιμο για τη ροή του υγρού [L ²]
C_e	Συγκέντρωση εκροής ρυπαντή [M/L ³]
C_o	Συγκέντρωση εισροής ρυπαντή [M/L ³]
C^*	Συγκέντρωση υποβάθρου [M/L ³]
c_p	Ειδική θερμότητα του νερού
D_{10}	Μέγιστο μέγεθος 10% κόκκων
H	Βάθος [L]
HLR	Υδραυλικός ρυθμός φόρτισης [L/T]
HLR_A	Ετήσιος υδραυλικός ρυθμός φόρτισης [L/T]
k_A	Συντελεστής απομάκρυνσης BOD ₅ , [L/T]
k_i	Σταθερός συντελεστής απομάκρυνσης
$k_{apparent}$	Φαινομενικός συντελεστής απομάκρυνσης σε χρόνο t [T ⁻¹]
$k_{o(apparent)}$	Αρχικός συνολικός συντελεστής απομάκρυνσης σε χρόνο t=0 [T ⁻¹]
k_s	Υδραυλική αγωγιμότητα μιας μονάδας έκτασης του υδροβιότοπου, κάθετα στη διεύθυνση ροής [L ³ /L ² ·T]

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ (συνέχεια)

k_v	Συντελεστής απομάκρυνσης BOD ₅ που βασίζεται στον όγκο
$k_{(1-n)}$	Αγωγιμότητα των στρωμάτων 1 έως n
K_T	Σταθερά κινητικής σε θερμοκρασία T, d ⁻¹
L	Μήκος λεκάνης παράλληλα στη ροή [L]
L:W	Αναλογία μήκους – πλάτους [L/L]
m	Αύξηση βάθους που εξυπηρετεί ως διαφορικό φορτίο
n	Πορώδες του υποστρώματος
pH	Αντίθετος δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης κατιόντων υδρογόνου
Q	Μέση παροχή στη λεκάνη [L ³ /T]
Q _o	Παροχή εισροής [L ³ /T]
Q _e	Παροχή εκροής [L ³ /T]
q _G	Πρόσθετη ενέργεια από το νερό
q _L	Απώλεια ενέργειας μέσω αγωγιμότητας στην ατμόσφαιρα
q _{solar}	Πρόσθετη ενέργεια από τη ηλιακή ακτινοβολία
R _χ	Συντελεστής επιβράδυνσης που βασίζεται στην απόσταση, [L ⁻¹]
R _t	Συντελεστής επιβράδυνσης που βασίζεται στο χρόνο [T ⁻¹]
r _{BOD}	Ποσότητα του BOD ₅ που χάνεται ανά μονάδα χρόνου και όγκου
r _Z	Ποσοστό ανάπτυξης του ριζικού συστήματος
s	Υδραυλική κλίση ή κλίση της επιφάνειας του νερού [L/L]
S	Ποσοστό της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο νερό του υδροβιότοπου
T _o	Θερμοκρασία του νερού στην είσοδο του υδροβιότοπου
T _{air}	Μέση θερμοκρασία του αέρα
T _c	Μεταβολή της θερμοκρασίας του υδροβιότοπου
T _e	Θερμοκρασία εκροής από τον υδροβιότοπο
T _w	Μέση θερμοκρασία του νερού στον υδροβιότοπο
t	Υδραυλικός χρόνος παραμονής στο σύστημα, d
V	Όγκος

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ (συνέχεια)

u	Ταχύτητα του Darcy ή φαινομενική ταχύτητα ροής μέσω ολόκληρης της κάθετης επιφάνειας του υποστρώματος [L/T]
U	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια την κλίνης του υδροβιότοπου
W	Πλάτος υποστρώματος λεκάνης [L]
x	Αριθμός των κλινών του υδροβιότοπου που βρίσκονται σε σειρά
y	Μέσο βάθος νερού λεκάνης [L]
$y_{(1-n)}$	Βάθος των στρωμάτων 1 έως n
z	Παράγοντας ασφαλείας

602Pro PRINT PACK Trial

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ

Ελληνικά Ακρόνυμα

Ε.Ε	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΚΠΣ	Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης
ΟΟΣΑ	Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης
ΟΤΑ	Οργανισμός Τοπικής Αυτοδιοίκησης
ΠΟΥ	Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας

Αγγλικά Ακρόνυμα

BOD ₅	Biological Oxygen Demand (Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (για 5 ημέρες))
BOD _{5(FCDW)}	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο που εκρέει από τον υδροβιότοπο
BOD _{5(PD)}	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο που προέρχεται από την αποσύνθεση των φυτών
BOD _{5(SDD)}	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο που απελευθερώνεται από την αποσάθρωση της λάσπης και των θραυσμάτων
BOD _{5(RIW)}	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο που απομένει στον υδροβιότοπο
COD	Chemical Oxygen Demand (Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο)
DO	Dissolved Oxygen (Διαλυμένο Οξυγόνο)
FWS	Free Water Surface (Επιφανειακής Ροής)
HRT	Hydraulic Retention Time (Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής)
NH ₃	Αμμωνία
NH ₄ ⁺	Ιονισμένη αμμωνία
O ₂	Οξυγόνο
SF	Subsurface Flow (Υποεπιφανειακής Ροής)
SS	Suspended Solids (Αιωρούμενα Στερεά)
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen (Ολικό Άζωτο Kjeldahl)
TN	Total Nitrogen (Ολικό Άζωτο)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ (συνέχεια)

TP	Total Phosphorous (Ολικός Φώσφορος)
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
WEF	Water Environment Federation

602Pro PRINT PACK Trial

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι ο σχεδιασμός και η προσομοίωση τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού η μελέτη περιλαμβάνει τα εξής κεφάλαια:

Το Κεφάλαιο 1 αποτελεί την εισαγωγή της μελέτης, στην οποία γίνεται αναφορά στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, στις διεργασίες που συντελούνται σε αυτά καθώς και στις κατηγορίες που κατατάσσονται. Δίνονται επίσης στοιχεία για την ποιότητα των λυμάτων στην Ελλάδα και αναφέρονται ο στόχος και οι δυνατότητες εφαρμογής των φυσικών συστημάτων στη χώρα μας.

Το Κεφάλαιο 2 αποτελεί το θεωρητικό μέρος της μελέτης και διαιρείται σε υποκεφάλαια. Το υποκεφάλαιο 2.1 αποτελεί την εισαγωγή της θεωρίας και περιλαμβάνει μία γενικά περιγραφή των υδροβιότοπων (φυσικών και τεχνητών), τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους καθώς και τη σύγκριση μεταξύ των τεχνητών υδροβιότοπων επιφανειακής και υποεπιφανειακής ροής. Στο υποκεφάλαιο 2.2 περιγράφεται ο προκαταρκτικός σχεδιασμός των υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής, ο οποίος περιλαμβάνει την εκτίμηση και επιλογή της θέσης (τοπογραφία, εδαφολογία, χρήση γης, υδρολογία, κλίμα), την προεπεξεργασία των υγρών αποβλήτων καθώς και το φυσικό σχεδιασμό και την κατασκευή (επιφάνεια θεμελίωσης και στεγανοποίηση, υπόστρωμα, κατασκευές εισόδου – εξόδου, επιλογή και διαχείριση της φυτικής βλάστησης). Στο υποκεφάλαιο 2.3 περιγράφονται οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των ρυπαντών (BOD_5 , TSS, Αζώτου, Αμμωνίας, Νιτρικών, Φωσφόρου, Παθογόνων, Μετάλλων, Πολύπλοκων Οργανικών Μειγμάτων) και αναφέρονται οι τυπικοί βαθμοί απόδοσης. Το υποκεφάλαιο 2.4 περιγράφει τη υδραυλική και υδρολογική μελέτη των τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής, δίνει τις σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη αυτή, καθώς και κάποιες ενδεικτικές τιμές για τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού. Οι θερμικές επιδράσεις σε έναν τεχνητό υδροβιότοπο αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 2.5 και δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού της θερμότητας που προστίθεται στον υδροβιότοπο ή της απώλειας θερμότητας, καθώς και της θερμοκρασίας του νερού μέσα στον υδροβιότοπο. Το

υποκεφάλαιο 2.6 περιγράφει την κινητική των διεργασιών απομάκρυνσης των ρύπων, με τη βοήθεια τριών διαφορετικών μοντέλων (μοντέλο Reed et al., 1995, μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998). Για κάθε μοντέλο δίνονται οι σχέσεις που το περιγράφουν καθώς και οι τιμές των σταθερών παραμέτρων των μοντέλων. Αναφέρονται επίσης και τα στοιχεία που είναι διαθέσιμα για ένα νέο μοντέλο κινητικής (μοντέλο Επιβράδυνσης Crites and Tchobanoglous, 2000), εξαιτίας όμως του ότι τα στοιχεία αυτά είναι περιορισμένα, το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό φυσικών συστημάτων επεξεργασίας. Στο υποκεφάλαιο 2.7 γίνεται αναφορά στα τοπικά συστήματα επεξεργασίας (on site) και στο 2.8 στα συστήματα συνδυασμένου τύπου. Στοιχεία για τη λειτουργία και τη συντήρηση των τεχνητών υδροβιότοπων αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 2.9 και τέλος στο υποκεφάλαιο 2.10 περιλαμβάνει στοιχεία για το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης των τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής.

Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει το μοντέλο προσομοίωσης. Οι υπολογισμοί γίνονται με τη βοήθεια του προγράμματος *Excel*. Αναφέρονται οι αρχικές παραδοχές που λαμβάνονται καθώς και οι περιορισμοί που πρέπει να τηρούνται για τη σωστή λειτουργία του συστήματος και περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούνται για τον υπολογισμό των επιθυμητών παραμέτρων. Τα βήματα αυτά εφαρμόζονται για κάθε ένα από τα τρία μοντέλα.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε πίνακες *Excel* καθώς και σε διαγράμματα.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται σύγκριση των τριών μοντέλων με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς και με τη βοήθεια συγκριτικών διαγραμμάτων και για τα τρία μοντέλα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 αναφέρονται τα γενικά συμπεράσματα της μελέτης.

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Όπως είναι γνωστό, στο φυσικό περιβάλλον λαμβάνουν χώρα διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες, οι οποίες οφείλονται στην αλληλεπίδραση του νερού, του εδάφους, της ατμόσφαιρας και των φυτικών και ζωικών οργανισμών. Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας σχεδιάζονται έτσι, ώστε να χρησιμοποιούν τα πλεονεκτήματα τέτοιων φυσικών διεργασιών στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Πολλές φορές οι διεργασίες που εμπλέκονται στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι οι ίδιες με αυτές που συμβαίνουν στα μηχανικά ή συμβατικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι η καθίζηση, το φιλτράρισμα, η μεταφορά αερίων, η προσρόφηση, η ιοντική εναλλαγή, η χημική κατακρήμνιση, η χημική οξείδωση και αναγωγή και η βιολογική μετατροπή και αποδόμηση, καθώς και άλλες που είναι μοναδικές στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι η φωτοσύνθεση, η φωτοοξείδωση και η πρόσληψη από τα φυτά. Στα φυσικά συστήματα οι διεργασίες συντελούνται με “φυσικές” ταχύτητες και τείνουν να διενεργούνται περισσότερες από μία συγχρόνως σε ένα “οικοσυστηματικό αντιδραστήρα”, σε αντίθεση με τα μηχανικά συστήματα στα οποία συμβαίνουν διαδοχικά και σε διαφορετικούς, σε σειρά αντιδραστήρες ή δεξαμενές, με επιταχυνόμενες ταχύτητες, ως αποτέλεσμα της εισρέουσας σε αυτές ενέργειας (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995).

Γενικά, φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ονομάζονται τα συστήματα, που η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου διενεργείται με φυσικά μέσα και διεργασίες, όπως είναι οι φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες ή συνδυασμός τους, που συμβαίνουν στο περιβάλλον “γήινοι σχηματισμοί – φυτό - υγρό απόβλητο”. Τα φυσικά συστήματα κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995):

1. Αυτά που βασίζονται στο έδαφος ή τα γήινα συστήματα επεξεργασίας. Οι κύριοι τύποι συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με εφαρμογή τους στο

- έδαφος και σε βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς είναι οι: α) βραδείας εφαρμογής, β) ταχείας διήθησης, γ) επιφανειακής ροής, δ) συνδυασμένου τύπου.
2. Συστήματα που βασίζονται στα υδροχαρή φυτά, όπως είναι οι φυσικοί και τεχνητοί υγροβιότοποι και τα συστήματα των επιπλεόντων υδροχαρών φυτών.

Με την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων επιδιώκεται:

1. Περιορισμός μέχρι και πλήρης εξάλειψη της ρυπαντικής επίδρασης των αποβλήτων έτσι, που οι ανεπιθύμητες επιδράσεις τους στο περιβάλλον να περιορίζονται ή να εξαλείφονται εντελώς.
2. Εξοικονόμηση πηγών νερού που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες χρήσεις.
3. Κάποιο οικονομικό όφελος με τον εφοδιασμό με νερό και θρεπτικά στοιχεία φυτών ή δένδρων κατάλληλων για αγροτική εκμετάλλευση ή ανάπτυξη χώρων πρασίνου.

1.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΛΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Σύμφωνα με έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στην Ελλάδα, έχουν προσδιοριστεί τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων (Tsagarakis *et al.*, 2001). Τα στοιχεία αυτά αναφέρονται στις μέσες ετήσιες τιμές που εισέρχονται στην εγκατάσταση. Για μεσαίους και μεγάλους οικισμούς, η προτεινόμενη τιμή της παροχής του υγρού αποβλήτου που εισέρχεται στην εγκατάσταση είναι 170 L/κάτοικο·d, ενώ για μικρές εγκαταστάσεις, σε αγροτικές περιοχές, έχουν αναφερθεί τιμές που κυμαίνονται από 100-120L/κάτοικο·d. Πολλές από αυτές τις εγκαταστάσεις έχουν σχεδιαστεί, ώστε να αντιμετωπίζουν με επιτυχία τιμές της τάξης του 200L/κάτοικο·d. Στον Πίνακα 1-1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα, που εισέρχονται σε εγκαταστάσεις μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους.

Πίνακας 1-1. Ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα, που εισέρχονται σε εγκαταστάσεις μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους (>10.000 κατοίκους) (Tsagarakis *et al*, . 2001)

Μεταβλητή	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή
BOD ₅ (mg/L)	102	614	127	300,0
COD (mg/L)	229	943	201	570,0
SS (mg/L)	110	480	104	296,0
TN (mg/L)	25	110	27	57,0
TP (mg/L)	5	22	5	11,8
Q (L/κατ.·d)	133	190	17	165,0

1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

602Pro PRINT PACK Trial

Σύμφωνα με έρευνες, τα λύματα του 48% περίπου του πληθυσμού της χώρας, που αντιστοιχούν στο 95% των Οργανισμών Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ), δεν διοχετεύονται σε οργανωμένες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων αλλά διατίθενται στο περιβάλλον πρωτογενώς, είτε μέσω συστημάτων απλών απορροφητικών δεξαμενών (βόθροι), είτε απευθείας σε υδάτινα ρεύματα, στο έδαφος, σε λίμνες ή στη θάλασσα (Αναγνωστόπουλος και Γκράτζιου, 2000). Οι ελάχιστες απαιτήσεις για επεξεργασία των αστικών αποβλήτων καθορίζονται ως συνάρτηση του πληθυσμού από την οδηγία 91/271/ΕΟΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε) για υγρούς αποδέκτες, αλλά και από την οδηγία της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας (ΠΟΥ) για άρδευση. Θεώρηση των οδηγιών αυτών σε σχέση με την πληθυσμιακή κατανομή των ΟΤΑ επιτρέπει εκτίμηση του αριθμού των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών αποβλήτων που θα απαιτηθούν μέχρι το 2005. Το συμπέρασμα είναι ότι στις 270 υφιστάμενες εγκαταστάσεις θα πρέπει να προστεθούν σχεδόν ισάριθμες νέες, μικρού όμως μεγέθους, οι οποίες στην πλειοψηφία τους θα εξυπηρετούν οικισμούς με πληθυσμό μικρότερο από 2.000 κατοίκους, κυρίως σε αγροτικές περιοχές (Οικονομόπουλος και Οικονομοπούλου, 1999).

Η χώρα μας με μήκος ακτών 15.021 km έχει τη μεγαλύτερη αναλογία μήκους ακτών ανά κάτοικο και μήκους ακτών ανά επιφάνεια, ανάμεσα στις χώρες του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Ο.Ο.Σ.Α.). Από περιβαλλοντική άποψη περισσότερο από το 95% των ακτών μας αναφέρεται ως καθαρό, το σχετικά μικρό όμως ποσοστό των ρυπασμένων ακτών συμβαίνει κατά τεκμήριο να έχει τη μεγαλύτερη τουριστική και παραθεριστική αξία.

Τα αστικά αποχετευτικά συστήματα το 1971 κάλυπταν μόλις το 19% του αστικού πληθυσμού εκτός Αθηνών και Θεσσαλονίκης και το 5,3% του αγροτικού. Σηπτικοί βόθροι χρησιμοποιούντο εκτενώς στο παρελθόν, με αποτέλεσμα τα ρυπαντικά φορτία που διετίθεντο στα χερσαία και παράκτια νερά να είναι περιορισμένα. Η κατάσταση αυτή έχει αλλάξει σημαντικά από τότε και μέχρι το 2005 όλες οι κοινότητες με μέγεθος άνω των 2000 ισοδύναμων κατοίκων θα καλύπτονται με αποχετευτικά δίκτυα σύμφωνα με την οδηγία 91/271/ΕΟΚ της Ε.Ε. Επιπλέον, ο εσωτερικός και εξωτερικός τουρισμός έχει ακολουθήσει ραγδαία αύξηση, δημιουργώντας θερινούς πληθυσμούς πολλαπλάσιους των χειμερινών σε πολλές κοινότητες, καθώς και αξιόλογου μεγέθους τουριστικές εγκαταστάσεις. Αποτέλεσμα τούτου είναι η σημαντική αύξηση τόσο του αριθμού των πηγών όσο και της ποσότητας των λυμάτων προς διάθεση σε επιφανειακούς και παράκτιους αποδέκτες. Τα παραπάνω επιτείνουν τα προβλήματα ρύπανσης των νερών, ιδιαίτερα κατά την περίοδο της μέγιστης χρήσης τους. Αρκετοί ΟΤΑ και μεγάλες ξενοδοχειακές και τουριστικές μονάδες έχουν προχωρήσει στην κατασκευή μονάδων βιολογικού καθαρισμού.

Όσον αφορά τους ΟΤΑ που είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή, την επεξεργασία και τη διάθεση των αστικών λυμάτων, αξιοποίησαν τα τελευταία χρόνια τις χρηματοδοτήσεις του Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης (ΚΠΣ) για την κατασκευή πολλών έργων αποχέτευσης και επεξεργασίας λυμάτων. Με αυτό τον τρόπο μέχρι το 1994 είχαν κατασκευαστεί περί τις 170 μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, 57 από τις οποίες ανήκαν σε ΔΕΥΑ. Μέχρι το 1997 είχαν καταγραφεί 241 έργα και για το τέλος του 1998 ο αριθμός τους εκτιμήθηκε σε περίπου 270 μονάδες (Οικονομόπουλος και Οικονομοπούλου, 1999). Υφιστάμενες πληροφορίες, όμως, συγκλίνουν στο ότι η λειτουργία των περισσότερων από τις εγκαταστάσεις αυτές δεν είναι ικανοποιητική, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην έλλειψη προσωπικού λειτουργίας και συντήρησης, στην αδυναμία κάλυψης του κόστους λειτουργίας και ενίοτε στην πλημμελή σχεδίαση και κατασκευή.

Στην περίπτωση των τουριστικών εγκαταστάσεων, όπου τα μεγαλύτερα ξενοδοχεία στερούνται τη δυνατότητα διάθεσης των αποβλήτων σε αστικά συστήματα αποχέτευσης πρέπει σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία, να έχουν εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και να διαθέτουν τα επεξεργασμένα λύματα για άρδευση. Λειτουργούν ως εκ τούτου αρκετές εκατοντάδες μονάδων βιολογικού καθαρισμού, ουσιαστικά όλες με σύστημα παρατεταμένου αερισμού. Οι περισσότερες μονάδες συντηρούνται από ηλεκτρομηχανολογική άποψη, πιστεύεται όμως ότι αρκετές δε λειτουργούν συνεχώς και η λειτουργία τους δεν είναι ικανοποιητική λόγω έλλειψης ειδικευμένου προσωπικού και ενίοτε λόγω ελλιπούς σχεδίασης και κατασκευής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι μέσα στα επόμενα χρόνια είναι αναγκαία η κατασκευή μονάδων επεξεργασίας. Το ερώτημα που τίθεται είναι κατά πόσον είναι σκόπιμη η συνέχιση της υφιστάμενης πολιτικής κάλυψης των αναγκών επεξεργασίας των αποβλήτων με μονάδες παρατεταμένου αερισμού ή η αλλαγή της με επιλεκτική χρήση φυσικών συστημάτων. Αυτό μπορεί να απαντηθεί με συγκριτική αξιολόγηση βασικών παραμέτρων, όπως είναι η περιβαλλοντική απόδοση, το κόστος κατασκευής και λειτουργίας και η λειτουργική αξιοπιστία.

Τα φυσικά συστήματα και οι λίμνες σταθεροποίησης ειδικότερα υπερτερούν περιβαλλοντικά σε σχέση με τις μονάδες ενεργού ιλύος λόγω της πολύ μεγάλης απόδοσής τους σε σχέση με την απομάκρυνση των νοσογόνων μικροοργανισμών. Το γεγονός αυτό διευκολύνει σημαντικά τις δυνατότητες διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων σε κάθε αποδέκτη, καθιστώντας τα κατάλληλα ακόμα και για άρδευση.

Τα δημοσιευμένα στοιχεία κόστους και λειτουργίας μονάδων επεξεργασίας από την Ελληνική αγορά είναι περιορισμένα, ιδιαίτερα σε σχέση με τα φυσικά συστήματα τα οποία σε λίγες μόνο περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί. Εξαίρεση αποτελεί πρόσφατη προσπάθεια συγκριτικής εκτίμησης του κόστους κατασκευής μονάδων παρατεταμένου αερισμού και τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής. Σύμφωνα με την εκτίμηση αυτή, το κανονικοποιημένο κόστος κατασκευής των συστημάτων παρατεταμένου αερισμού αυξάνει εκθετικά όσο το μέγεθος της εγκατάστασης μικραίνει, ιδιαίτερα για εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν λιγότερους από 5000 κατοίκους, ενώ το κανονικοποιημένο κόστος των τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής παραμένει σχετικά σταθερό και είναι σημαντικά χαμηλότερο για εγκαταστάσεις δυναμικότητας μικρότερης των 3.000 κατοίκων. Τα λειτουργικά κόστη για εγκαταστάσεις παρατεταμένου αερισμού δυναμικότητας 5.000 έως 20.000

κατοίκων κυμαίνονται από 45 έως 120 χιλιάδες € ετησίως. Το κόστος λειτουργίας των φυσικών συστημάτων δεν είναι διαθέσιμο, με βάση όμως τη διεθνή εμπειρία θεωρείτο βέβαιο ότι είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό των εγκαταστάσεων παρατεταμένου αερισμού. Κατά συνέπεια, για τις μονάδες μικρού μεγέθους, τα φυσικά συστήματα παρέχουν πολύ μικρότερο κόστος επεξεργασίας (κανονικοποιημένο ετήσιο κόστος κεφαλαίου και λειτουργικό) σε σχέση με τα συστήματα παρατεταμένου αερισμού, μικρότερο του 50% για περιοχές με ήπιο κλίμα σαν της χώρας μας, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Η λειτουργική αξιοπιστία μιας εγκατάστασης εξαρτάται από παράγοντες όπως η ικανότητά της να αντιμετωπίσει ξαφνικά φορτία και διακοπές στη λειτουργία, κυρίως όμως από το βαθμό που η λειτουργία εξαρτάται από την ύπαρξη ειδικευμένων χειριστών. Σε σχέση με όλα αυτά τα κριτήρια τα φυσικά συστήματα έχουν σαφή υπεροχή. Γνωστό είναι άλλωστε το πρόβλημα ελλιπούς λειτουργίας μεγάλου ποσοστού (μέχρι και 50% σύμφωνα με αναφορές) των υφιστάμενων εγκαταστάσεων παρατεταμένου αερισμού, ιδιαίτερα των μικρότερων σε μέγεθος μονάδων.

Από όσα προαναφέρθηκαν, προκύπτει ότι η βέλτιστη από κάθε πλευρά λύση για τις ανατομένους μικρού μεγέθους εγκαταστάσεις καθαρισμού είναι η χρήση φυσικών συστημάτων επεξεργασίας. Το γεγονός ότι τα φυσικά συστήματα δεν έχουν ακόμα χρησιμοποιηθεί στη χώρα μας είναι παράδοξο, καθώς το ήπιο κλίμα μας τα ευνοεί, το κόστος κατασκευής και λειτουργίας τους είναι χαμηλό, η λειτουργική αξιοπιστία τους εξαιρετική και τα απόβλητα που παράγουν ασφαλή για άρδευση αλλά και τα πλέον κατάλληλα για διάθεση σε κάθε αποδέκτη. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα των φυσικών συστημάτων, μαζί με την ικανότητα που έχουν να δέχονται μέχρι και τριπλάσια φορτία κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών εξυπηρετώντας έτσι τις τουριστικές ανάγκες, τα καθιστούν ιδανικά για ευρεία χρήση από μικρούς και μεσαίου μεγέθους ΟΤΑ, όπως έχει ήδη γίνει για παράδειγμα στις ΗΠΑ όπου αποτελούν το 30% των εγκαταστάσεων καθαρισμού (Οικονομόπουλος και Οικονομοπούλου, 1999).

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1.1 Γενικά

Οι υγροβιότοποι είναι τμήματα εδάφους, κατακλυζόμενα με νερό, συνήθως μικρού βάθους, στα οποία αναπτύσσονται κάποια είδη φυτών. Η φυτική βλάστηση προσφέρει το κύριο υπόστρωμα ανάπτυξης βακτηρίων, βοηθά στο φιλτράρισμα και την προσρόφιση συστατικών του αποβλήτου, μεταφέρει οξυγόνο στη μάζα του νερού και ελέγχει την ανάπτυξη των αλγών, με τον περιορισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του αποβλήτου στο σύστημα. Στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο οι τεχνητοί, όσο και οι φυσικοί υγροβιότοποι (Αγγελάκης & Τσαγκαράκης, 2003).

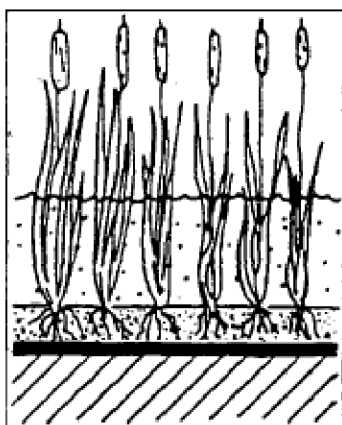
Ένας τεχνητός υγροβιότοπος είναι μία ρηχή λεκάνη γεμάτη με κάποιο είδος υποστρώματος, συνήθως χώμα ή άμμο και αναφυόμενη βλάστηση η οποία είναι ανθεκτική σε κορεσμένες συνθήκες. Το νερό εισάγεται στο ένα άκρο του υγροβιότοπου και ρέει είτε πάνω στην επιφάνεια, οπότε ονομάζεται επιφανειακής ροής (Free Water Surface: FWS), είτε δια μέσω του υποστρώματος, οπότε ονομάζεται υποεπιφανειακής ροής (Subsurface Systems: SF) και εξέρχεται από το άλλο άκρο μέσω κάποιας συσκευής ελέγχου του βάθους του νερού (π.χ. ένα ρυθμιστικό φράγμα). (DuPoldt. *et al.*).

2.1.2 Φυσικοί Υγροβιότοποι

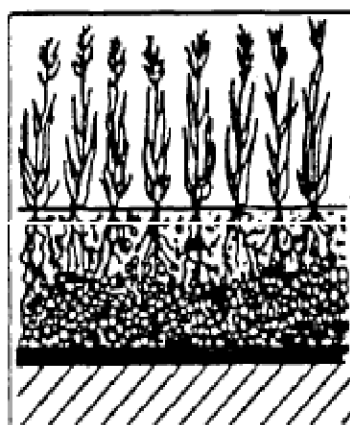
Οι φυσικοί υγροβιότοποι μπορούν να θεωρηθούν ως υδατικοί αποδέκτες. Επί πλέον, το κύριο αντικείμενο χρησιμοποίησης φυσικών υγροβιότοπων ως αποδεκτών εκροών επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων είναι η ενίσχυση υπάρχοντος εθίμου. Τροποποιήσεις σε υπάρχοντες υγροβιότοπους με σκοπό τη βελτίωση των συνθηκών επεξεργασίας θα πρέπει να αποφεύγονται, γιατί μπορεί να προξενήσουν προβλήματα στο φυσικό οικοσύστημα (Αγγελάκης και Τσαγκαράκης, 2003).

2.1.3 Τεχνητοί Υγροβιότοποι

Οι τεχνητοί υγροβιότοποι έχουν όλες τις δυνατότητες των φυσικών υγροβιότοπων αλλά χωρίς τους περιορισμούς που αφορούν τη διάθεση εκροών σε φυσικά οικοσυστήματα. Για την περαιτέρω επεξεργασία προεπεξεργασμένων αποβλήτων με τεχνητούς υγροβιότοπους έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί δύο τύποι συστημάτων, ανάλογα με τη θέση της επιφάνειας του νερού. Έτσι, διακρίνονται σε υγροβιότοπους επιφανειακής ροής (FWS) στους οποίους η επιφάνεια του νερού εκτίθεται στην ατμόσφαιρα και σε υγροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής (SF) όπου η επιφάνεια του νερού διατηρείται κάτω από τη ανώτερη επιφάνεια του υποστρώματος.



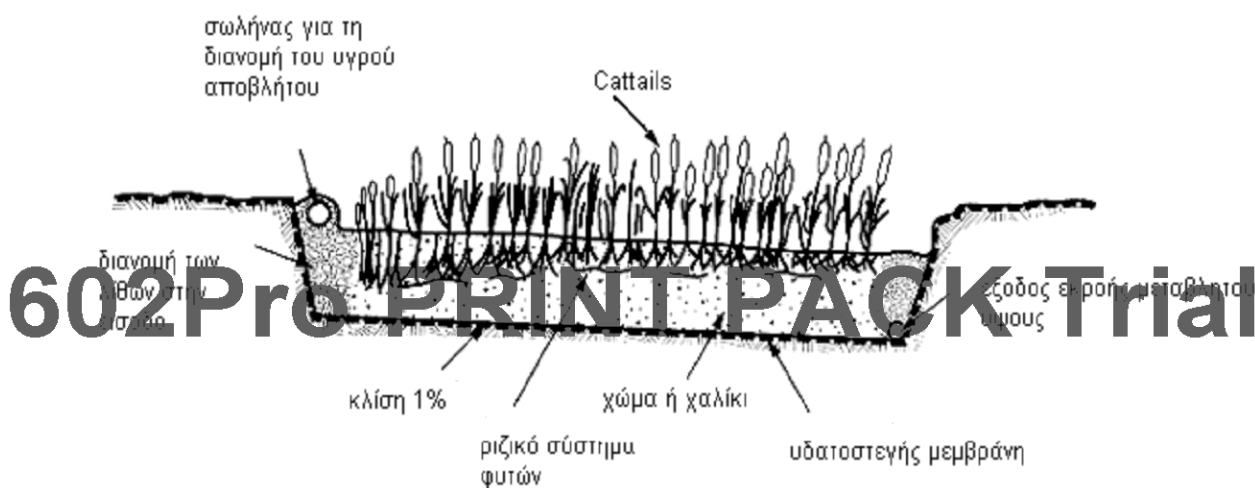
Εικόνα 2-1. Υγροβιότοπος FWS
(DuPoldt *et al.*)



Εικόνα 2-2. Υγροβιότοπος SF
(DuPoldt *et al.*)

2.1.4 Υγροβιότοποι SF

Τα συστήματα τύπου SF σχεδιάζονται με σκοπό την επίτευξη δευτεροβάθμιας ή προωθημένης επεξεργασίας. Ονομάζονται, επίσης, συστήματα “ριζόσφαιρας” ή “φίλτρα εδάφους-καλαμιών” και εκτός από λεκάνες αναπτύσσονται μέσα σε κανάλια ή τάφρους με σχετικά στεγανούς πυθμένες, που περιέχουν άμμο ή άλλα γήινα μέσα υποστήριξης της αναφυόμενης φυτικής βλάστησης. Η επιφάνεια του νερού διατηρείται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή του χρησιμοποιούμενου μέσου.



Εικόνα 2-3. Τεχνητός υγροβιότοπος SF (EPA, 1988)

Η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου οφείλεται σε φυσικές και βιοχημικές αποκρίσεις του μέσου, καθώς επίσης, στην επαφή του με το ριζικό σύστημα των φυτών. Για την κατασκευή των υποστρωμάτων χρησιμοποιούνται, κυρίως, έδαφος, άμμος και διάφορα άλλα χονδρόκοκκα ή ακόμη και πλαστικά ή άλλα αδρανή υλικά όπως επίσης και διάφορα είδη κοπροχωμάτων (composts). Η φυτική βλάστηση φυτεύεται στο επάνω τμήμα του υποστρώματος και χρησιμοποιείται ένα κάλυμμα, αν κριθεί απαραίτητο, για την προστασία του υπόγειου νερού (Αγγελάκης & Τσαγκαράκης, 2003).

2.1.5 Πλεονεκτήματα Τεχνητών Υδροβιότοπων

Τα συστήματα τεχνητών υδροβιότοπων αποτελούν μία οικονομικά αποδοτική και τεχνητά εφικτή προσέγγιση της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων για τους εξής λόγους (DuPoldt *et al.*):

- Είναι φθηνότερα στην κατασκευή, σε σχέση με άλλα συστήματα επεξεργασίας.
- Τα έξοδα λειτουργίας (προσωπικό, ενέργεια , χημικά) και συντήρησης είναι χαμηλά.
- Η λειτουργία και η συντήρηση απαιτούν μόνο περιοδική και όχι συνεχή εργασία στο έργο.
- Μπορούν να αντιμετωπίσουν διακυμάνσεις στη ροή.
- Διευκολύνουν την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση του νερού.
- Μπορούν να κατασκευαστούν έτσι ώστε να ταιριάζουν αρμονικά με το τοπίο.
- Παρέχουν πολλά οφέλη παράλληλα με την βελτίωση της ποιότητας του νερού, όπως είναι η παροχή κατοικίας για θηλαστικά, πουλιά και ψάρια καθώς και ο εμπλουτισμός της αισθητικής των ανοιχτών χώρων.
- Παρέχουν παθητική ψυχαγωγία, όπως είναι η παρακολούθηση των πουλιών και η φωτογράφησή τους.
- Παρέχουν ενεργητική ψυχαγωγία, όπως είναι το κυνήγι.

602Pro PRINT PACK Trial

2.1.6 Μειονεκτήματα Τεχνητών Υγροβιότοπων

Υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί που συνδέονται με τη χρήση των τεχνητών υγροβιότοπων, όπως είναι οι εξής:

- Γενικά, απαιτούν μεγαλύτερες εκτάσεις σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η χρήση υγροβιότοπων είναι οικονομικά αποδοτική σε σχέση με άλλες μεθόδους επεξεργασίας μόνο όταν η εδαφική έκταση είναι διαθέσιμη και η απόκτησή της είναι οικονομικά εφικτή.
- Η απόδοση μπορεί να είναι λιγότερο συνεπής σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα, καθώς η απόδοση μεταβάλλεται εποχιακά εξαιτίας των αλλαγών στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Αν και η μέση απόδοση στο τέλος του χρόνου μπορεί να είναι αποδεκτή, η χρήση του υγροβιότοπου δεν μπορεί να βασιστεί σε αυτό, στις περιπτώσεις που η ποιότητα της εκροής πρέπει να ικανοποιεί διαρκώς κάποια αυστηρά όρια εκροής.
- Τα βιολογικά συστατικά είναι ευαίσθητα σε τοξικά χημικά, όπως είναι η αμμωνία και τα μικροβιοκτόνα.
- Τα φυτά απαιτούν μία ελάχιστη ποσότητα νερού για να επιβιώσουν. Αν και μπορούν να αντιμετωπίσουν την προσωρινή εκκένωση, δεν μπορούν να αντέξουν την πλήρη ξηρασία.

Τέλος, επειδή η χρήση των τεχνητών υγροβιότοπων για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι σχετικά πρόσφατη πρακτική, δεν υπάρχει ομοφωνία για τον βέλτιστο σχεδιασμό των συστημάτων αυτών, καθώς ούτε και πολλές πληροφορίες για την μακροχρόνια επίδοσή τους και οι εξισώσεις σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται είναι εμπειρικές (DuPoldt *et al.*).

2.1.7 Σύγκριση Μεταξύ Υγροβιότοπων FWS και SF

Τα επίπεδα απομάκρυνσης των συστημάτων SF είναι ισοδύναμα με αυτά των συστημάτων FWS. Τα συστήματα SF παρουσιάζουν μειωμένα προβλήματα, σχετικά με την ανάπτυξη κουνουπιών και δυσάρεστων οσμών καθώς και εξασφαλίζουν καλύτερη θερμική προστασία σε ψυχρά κλίματα λόγω του ότι η επιφάνεια του νερού δεν είναι εκτεθειμένη. Πολύ σημαντικός είναι και ο περιορισμός της έκθεσης του κοινού στα συστήματα αυτά, ή της επαφής του με το υγρό απόβλητο, λόγω του ότι η επιφάνειά του είναι καλυμμένη. Τέλος, εξαιτίας του ότι το υπόστρωμα άμμου έχει μεγαλύτερη επιφανειακή έκταση σε σχέση με τους υγροβιότοπους FWS, θα έχει μεγαλύτερους ρυθμούς αντίδρασης, κι έτσι μπορεί να είναι μικρότερο σε έκταση.

Τα πλεονεκτήματα αυτά των υγροβιότοπων SF, μπορεί να αντισταθμιστούν από το σχετικά υψηλό κόστος που προκύπτει από την απόκτηση, τη μεταφορά και την τοποθέτηση του υποστρώματος στις λεκάνες των υγροβιότοπων, παρόλο που η συνολική έκτασή τους είναι μικρότερη από αυτή των υγροβιότοπων FWS.

602Pro PRINT PACK Trial

2.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός των υγροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής περιλαμβάνει την εκτίμηση και επιλογή της θέσης, την προεπεξεργασία των υγρών αποβλήτων, καθώς και το φυσικό σχεδιασμό και την κατασκευή.

2.2.1 Εκτίμηση και Επιλογή Θέσης

Τα βασικά χαρακτηριστικά της θέσης, που πρέπει να θεωρούνται κατά το σχεδιασμό συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων, είναι η τοπογραφία, η εδαφολογία, η χρήση γης, η υδρολογία και το κλίμα της περιοχής (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995).

Τοπογραφία. Για το σχεδιασμό τεχνητών υγροβιότοπων, γενικά, απαιτείται ομοιομορφή τοπογραφία (από επίπεδη έως ελαφρώς κεκλιμένη), με κλίσεις 1% ή ελαφρώς μεγαλύτερες. Τέτοια συστήματα μπορούν να κατασκευαστούν και σε ανομοιομορφες εκτάσεις, αλλά σε τέτοιες περιπτώσεις το κόστος εκσκαφής, ίσως, είναι περιοριστικό. Γενικά, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι κατάλληλες θέσεις για υγροβιότοπους είναι αυτές με κλίσεις μικρότερες από 5%.

Εδαφολογία. Θέσεις με εδάφη ή υπεδάφη με μικρή σχετικά περατότητα ($<5\text{mm/h}$) είναι πιο επιθυμητές για συστήματα υγροβιότοπων, αφού ο αντικειμενικός σκοπός τους είναι η επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε μια υδατική στρώση, πάνω από το χρησιμοποιούμενο εδαφικό υπόστρωμα. Έτσι, ελαχιστοποιούνται οι απώλειες του εφαρμοζόμενου υγρού αποβλήτου με διήθησή του στο έδαφος. Σε συστήματα υγροβιότοπων, οι πόροι στο έδαφος τείνουν να αποφράσσονται, εξαιτίας της κατακράτησης στερεών και των αναπτυσσόμενων αποικιών βακτηρίων. Επίσης, σε φυσικά εδάφη, είναι δυνατή η ελάττωση της περατότητας τους με συμπίεσή τους στη διάρκεια κατασκευής του έργου. Θέσεις με πολύ διαπερατά εδάφη μπορούν να

χρησιμοποιηθούν μόνο στην περίπτωση κατασκευής μικρών συστημάτων με αργιλικές βάσεις ή άλλα τεχνητά υποστρώματα.

Χρήση γης. Γενικά, προτιμούνται ανοιχτές γεωργικές εκτάσεις, ιδιαίτερα εκείνες που βρίσκονται σε υπάρχοντες φυσικούς υγροβιότοπους. Οι τεχνητοί υγροβιότοποι επιδρούν αυξητικά και βελτιωτικά σε υπάρχοντες φυσικούς υγροβιότοπους με προσθήκη υδρόβιας δραστηριότητας και εξασφάλιση σταθεράς υδατοτροφοδοσίας τους. Σε πολλές περιπτώσεις επιδρούν θετικά στην ποιοτική αναβάθμιση των περιοχών εγκατάστασής τους.

Υδρολογία. Οι υγροβιότοποι πρέπει να βρίσκονται έξω από περιοχές επιδεκτικές σε πλημμύρες εκτός όταν παρέχεται ιδιαίτερη προστασία τους από πλημμυρικά συμβάντα. Σε περιπτώσεις που συμβαίνουν μικρής έκτασης πλημμυρικά γεγονότα, ιδιαίτερα στην περίοδο του χειμώνα, που η λειτουργία τους περιορίζεται, δεν απαιτείται ιδιαίτερη προστασία τους.

602Pro PRINT PACK Trial

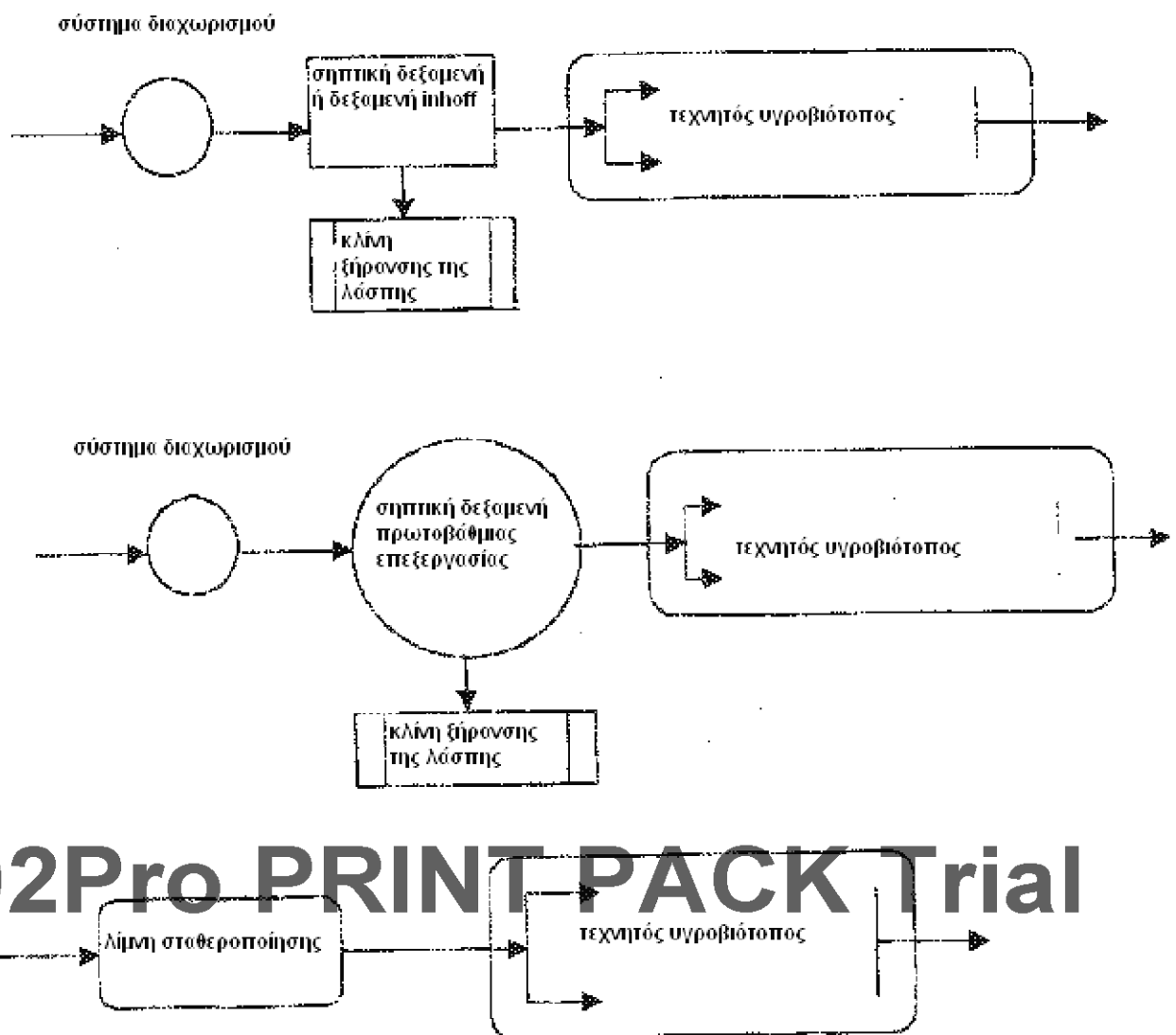
Κλίμα. Η χρήση των τεχνητών υγροβιότοπων είναι δυνατή ακόμα και σε ψυχρά κλίματα. Γενικά, όμως, η αποτελεσματικότητα λειτουργίας ενός συστήματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία του εφαρμοζόμενου υγρού αποβλήτου και τον επιδιωκόμενο σκοπό της επεξεργασίας του. Έτσι, με δεδομένο ότι οι κύριοι μηχανισμοί επεξεργασίας είναι κυρίως βιολογικής φύσης, η απόδοση επεξεργασίας είναι σημαντικά εξαρτώμενη από την επικρατούσα θερμοκρασία. Γι' αυτό απαιτείται αποθήκευση του εφαρμοζόμενου αποβλήτου, όταν δεν επιτυγχάνεται ο αντικειμενικός σκοπός κατασκευής του δεδομένου συστήματος.

2.2.2 Προεπεξεργασία Υγρών Αποβλήτων

Η εμπειρία των τελευταίων δεκαετιών έχει οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η προεπεξεργασία των υγρών αποβλήτων μπορεί να συμβάλει στη καλύτερη λειτουργία και διατήρηση ενός τεχνητού υγροβιότοπου (Sundaravadivel *et al.*, 2001). Το ελάχιστο επίπεδο προεπεξεργασίας υγρών αποβλήτων σε συστήματα υγροβιότοπων είναι εκροές πρωτοβάθμιας επεξεργασίας ή αεριζόμενων τεχνητών λιμνών με μικρό χρόνο κράτησης ή άλλων ισοδύναμων με αυτές.

Το επίπεδο προεπεξεργασίας εξαρτάται από τα ποιοτικά κριτήρια που πρέπει να πληροί η τελική εκροή και την ικανότητα απομάκρυνσης του δεδομένου συστήματος. Σκοπός της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας είναι η απομάκρυνση των μεγαλύτερων στερεών και η μείωση του οργανικού φορτίου και μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση δεξαμενών inhoff, σηπτικών δεξαμενών, δεξαμενών πρωτοβάθμιας καθίζησης ή με λίμνες σταθεροποίησης (Sundaravadivel *et al.*, 2001).

Σημειώνεται ότι σε τεχνητούς υγροβιότοπους έχουν χρησιμοποιηθεί και εκροές δευτεροβάθμιας επεξεργασίας ή ακόμη και προωθημένης επεξεργασίας, προκειμένου να αντιμετωπιστούν τοπικές κανονιστικές απαιτήσεις. Γενικά, όμως, πρέπει να αποφεύγεται η χρήση εκροών οξειδωτικών λιμνών, που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αλγών, επειδή αυτά, όπως και στα συστήματα επιφανειακής ροής, δεν απομακρύνονται αποτελεσματικά και δημιουργούν διάφορα λειτουργικά προβλήματα. Επίσης, επειδή η απομάκρυνση φωσφόρου με τέτοια συστήματα είναι περιορισμένη, συνιστάται η απομάκρυνσή του κατά την προεπεξεργασία του αποβλήτου, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν περιορισμοί ως προς τη συγκέντρωσή του στην τελική εκροή (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995).



Εικόνα 2-4. Διατάξεις προεπεξεργασίας υγρών αποβλήτων, πριν την εισαγωγή τους στον τεχνητό υγροβιότοπο(Sundaravadivel *et al.*, 2001).

2.2.3 Φυσικός Σχεδιασμός και Κατασκευή

Ο φυσικός σχεδιασμός και η κατασκευή ενός υγροβιότοπου SF περιλαμβάνει ένα υποεπιφανειακό φράγμα ροής, την επιλογή και την τοποθέτηση του υποστρώματος, την εμφύτευση της βλάστησης, καθώς και κάποιες κατασκευές στα σημεία εισόδου και εξόδου. Μπορεί, επίσης, να είναι απαραίτητες εγκαταστάσεις σωληνώσεων και απολύμανσης, ή ακόμα και σωληνώσεις μεταφοράς. Λόγω της μειωμένης ποσότητας διαλυμένου οξυγόνου στην εκροή των υγροβιότοπων, πολλές

φορές είναι απαραίτητος ο αερισμός. Όταν το επιτρέπει η τοπογραφία της περιοχής, ο αερισμός αυτός μπορεί να επιτευχθεί με την διαδοχική τοποθέτηση βράχων (Reed *et al.*, 1995). Μία τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στις Εικόνες 2-5 και 2-6, που ακολουθούν.



Εικόνα 2-5. Τοποθέτηση βράχων για αερισμό



Εικόνα 2-6. Υγροβιότοπος με τοποθέτηση βράχων για αερισμό

2.2.3.1 Επιφάνεια Θεμελίωσης και Στεγανοποίηση

Οι υγροβιότοποι υποεπιφανειακής ροής απαιτούν ένα αδιαπέραστο φράγμα, για να εξασφαλιστεί το περιεχόμενο του υγρού αποβλήτου και να αποφευχθεί η ρύπανση του υπόγειου νερού. Σε μερικές περιπτώσεις αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν το χώμα προϋπάρχει, ή αν τα εδάφη του πεδίου μπορούν να θεωρηθούν αδιαπέραστα. Επίσης είναι πιθανή η χημική επεξεργασία, ή η χρήση ενός στρώματος απορροφητικού πηλού, ασφάλτου ή στεγανών μεμβρανών. Στις περιπτώσεις των υγροβιότοπων, οι οποίοι επεξεργάζονται τα προϊόντα διήθησης από του χώρους υγειονομικής ταφής, μπορεί να κριθεί απαραίτητη η διπλή στεγανοποίηση με ανιχνευτή της πιθανής διαρροής.

Η κλίση του πυθμένα του υγροβιότοπου πρέπει να σχεδιάζεται προσεχτικά, πριν από την τοποθέτηση της στεγανοποίησης. Το επιφανειακό έδαφος μπορεί να αφαιρεθεί από την περιοχή και να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα για την εμφύτευση στους υγροβιότοπους FWS ή για άλλες περιπτώσεις. Η στάθμη της επιφάνειας του πυθμένα πρέπει να σχεδιαστεί από πλευρά σε πλευρά για όλη την έκταση της κλίνης του υγροβιότοπου και μπορεί να δοθεί μια ομοιόμορφη κλίση, για να εξασφαλιστεί η διοχέτευση στο σύστημα, αλλά όχι για να εξασφαλιστούν οι απαραίτητες υδραυλικές συνθήκες για ροή στο σύστημα. Η απαραίτητη υδραυλική κλίση και ο έλεγχος του ύψους του νερού σε κάθε κλίση του υγροβιότοπου εξασφαλίζεται με μία συσκευή ρύθμισης στην εκροή.

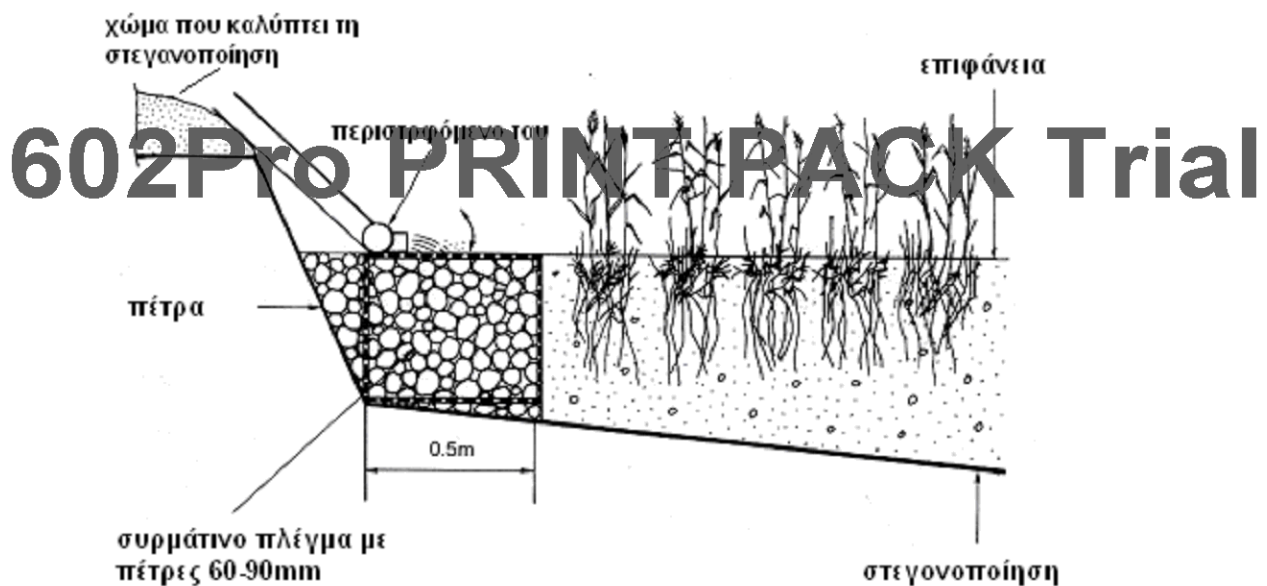
Σε πολλούς υγροβιότοπους έχουν παρατηρηθεί συνθήκες short-circuiting, εξαιτίας του ανεπαρκούς ελέγχου της κλίσης, κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Ιδιαίτερα στους υγροβιότοπους SF, πρόβλημα δημιουργεί η είσοδος των οχημάτων που μεταφέρουν το υπόστρωμα. Τα αυλάκια από τις ρόδες αυτών των οχημάτων μπορεί να προκαλέσουν μόνιμες συνθήκες short-circuiting σε όλο το σύστημα. Η μεταφορά του υποστρώματος στον πυθμένα της κλίνης δεν θα πρέπει να επιτρέπεται κατά τη διάρκεια συνθηκών καιρού που επικρατεί υγρασία.

Όταν χρησιμοποιείται μεμβράνη στεγανοποίησης, τοποθετείται άμεσα στον πυθμένα της συμπληρωμένης κλίνης. Το υπόστρωμα SF μπορεί να τοποθετηθεί άμεσα πάνω σε υλικά στεγανοποίησης, τα οποία είναι ανθεκτικά στην καταπόνηση.

Η επιλογή του υποστρώματος SF είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος. Ακατέργαστη πέτρα έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλούς

υπάρχοντες υγροβιότοπους. Η μεταφορά με φορτηγά αυτού του υλικού κατά τη διάρκεια της κατασκευής, μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα, εξαιτίας του διαχωρισμού των μικρότερων σωματιδίων μέσα στο φορτηγό κατά τη μεταφορά, και έπειτα της απόθεσης όλων των μικρότερων σωματιδίων σε ένα χωριστό σημείο. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει εμπόδια στη ροή και συνθήκες short-circuiting εσωτερικά στο σύστημα. Γενικά προτιμάται βότσαλο ή χαλίκι αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, επίσης, και χονδρόκοκκα υλικά εδάφους για στέρεα κατασκευή.

Για συστήματα μεγάλης κλίμακας, το επάνω τμήμα της τάφρου θα πρέπει να είναι αρκετά πλατύ, ώστε να διευκολύνει τα μικρά φορτηγά και τον εξοπλισμό της συντήρησης και η κάθε κλίση του συστήματος θα πρέπει να έχει μία εξέδρα για να επιτρέπει η είσοδο των οχημάτων (Reed *et al.*, 1995).



Εικόνα 2-7. Επιφάνεια θεμελίωσης και στεγανοποίηση τεχνητού υγροβιότοπου SF

2.2.3.2 Υπόστρωμα

Στους υγροβιότοπους SF η επίστρωση με χαλίκι παρέχει το στρώμα για τη ροή του νερού και το υπόστρωμα για τη εμφύτευση της ανερχόμενης βλάστησης. Σε πολλές περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται πάνω από τέσσερα διαφορετικά μεγέθη χαλικιού σε διάφορα σημεία του υγροβιότοπου. Τα βάθη της κύριας κλίνης, η οποία εξασφαλίζει την επεξεργασία, κυμαίνονται από 0,3 έως 1m, ενώ το τυπικό βάθος είναι 0,6m.

Η διάμετρος της πέτρας που χρησιμοποιείται στο τμήμα επεξεργασίας της κλίνης κυμαίνεται από 6 έως 150mm. Τα συστήματα στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί πέτρα μεγαλύτερου μεγέθους παρουσίασαν προβλήματα φραξίματος, εξαιτίας του ανεπαρκούς υδραυλικού σχεδιασμού. Αν το σύστημα έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με το νόμο του Darcy, με επαρκή υδραυλική κλίση και ρυθμίσεις για τον έλεγχο του ύψους του νερού, δεν είναι απαραίτητα τα υποστρώματα μεγάλου μεγέθους, τα οποία αποτρέπουν τη σωστή ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών.

Τυπικά, χρησιμοποιείται χαλίκι που κυμαίνεται σε μέγεθος από 19 έως 25mm (WEF, 2001). Ο καθορισμός μιας περισσότερο κατάλληλης διαβάθμισης αυτών των υλικών δεν είναι απαραίτητος, λόγω του ότι αυτό μόνο το κόστος θα αυξήσει. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται πιο χονδρόκοκκα υλικά, το κοσκίνισμά τους εξασφαλίζει ένα αποδεκτό υπόστρωμα για τους υγροβιότοπους SF. Τα υλικά αυτά θα πρέπει να πλυθούν, ώστε να περιοριστεί το χόμα καθώς και άλλα σωματίδια που συμβάλλουν στο φράξιμο. Τα πλήρως ανεπτυγμένα ποτάμια επιστρωμένα με στρογγυλεμένο χαλίκι βοηθούν περισσότερο, σε σχέση με τις συνθλιμμένες πέτρες που έχουν αιχμηρές άκρες. Σκληρή στέρα πέτρα προτιμάται πάνω από τον συνθλιμμένο ασβεστόλιθο. Αυτό το χαλίκι εκφορτώνεται από τα φορτηγά και εξαπλώνεται από μπουλντόζες ή από παρόμοιο εξοπλισμό χαμηλής πίεσης εδάφους.

Αν χρησιμοποιηθεί χαλίκι, τα μικρότερα σωματίδια του μείγματος διαχωρίζονται και σταθεροποιούνται στο φορτηγό κατά τη διάρκεια της μεταφοράς, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται σε ένα μόνο σημείο και όχι να διανέμονται σε όλη την έκταση του φορτίου. Αυτές οι τοπικές συσσωρεύσεις των μικρότερων σωματιδίων του μείγματος, μπορούν να οδηγήσουν σε φράξιμο και σε συνθήκες

short-circuiting στο συγκεκριμένο σημείο, παρά τη φροντίδα που πάρθηκε κατά την τον τελικό διαχωρισμό της τοποθεσίας.

Στους περισσότερους υγροβιότοπους SF, οι κατασκευές στα σημεία εισόδου και εξόδου είναι διάτρητοι πολυσύνθετοι σωλήνες οι οποίοι τοποθετούνται στον πυθμένα της κλίνης ή σε ρηχές τάφρους λίγο κάτω από την επικρατούσα στάθμη της κλίνης. Τυπικά, χρησιμοποιείται πέτρα μεγάλου μεγέθους για να καλύψει αυτές τις ζώνες εισόδου – εξόδου, ώστε να εξασφαλιστεί γρήγορη διανομή και συλλογή του νερού. Πέτρα με μέσο μέγεθος 50mm χρησιμοποιείται για όλο το πλάτος της ζώνης εξόδου και για απόσταση περίπου 1m από το θέση των κατασκευών εισόδου – εξόδου (WEF, 2001).

Σε πολλούς υπάρχοντες υγροβιότοπους SF, που χρησιμοποιούν πιο χονδρόκοκκα υλικά εδάφους, τοποθετείται στην κορυφή της κύριας κλίνης ένα στρώμα χαλικιού μεγέθους μπιζελιού (pea gravel), το οποίο εξυπηρετεί ως υπόστρωμα για το ρίζωμα της βλάστησης. Αυτό το υλικό κυμαίνεται από 6 έως 9mm χαλίκι, και η πυκνότητα του στρώματος κυμαίνεται από 75 έως 150mm. Τυπικά, το ύψος του νερού της κλίνης, διατηρείται στη βάση αυτού του στρώματος χαλικιού (pea gravel). Παρόλο που το στρώμα αυτού του είδους χαλικιού χρησιμοποιείται σε πολλά συστήματα, δεν είναι ουσιώδες αν χρησιμοποιείται 19 – 25mm χαλίκι για την κύρια κλίση.

Ένα άλλο είδος πέτρας που χρησιμοποιείται στους υγροβιότοπους SF είναι βράχοι κρηπιδώματος, μεγέθους 75-150mm, που χρησιμοποιούνται για να προστατεύσουν τα εκτεθειμένα καλύμματα, (WEF, 2001).

2.2.3.3 Κατασκευές Εισόδου – Εξόδου

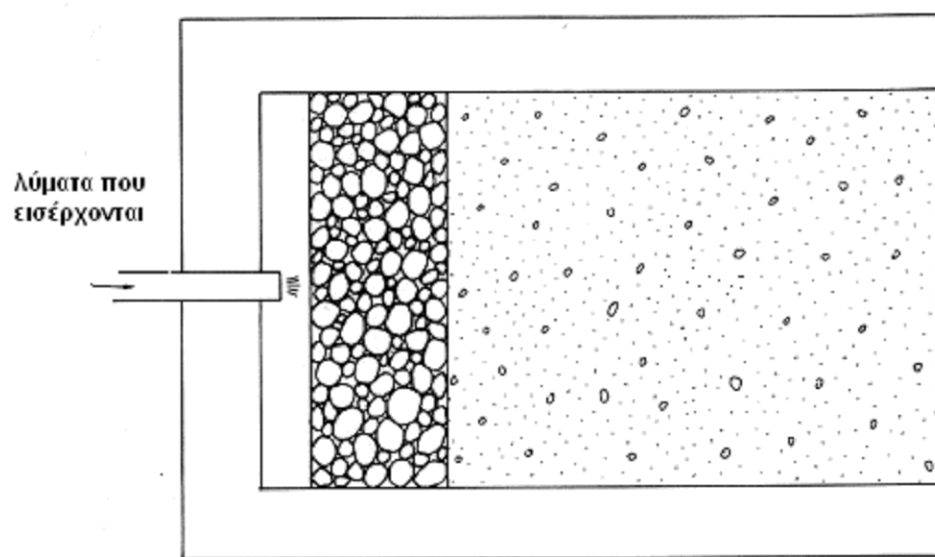
Τόσο οι υγροβιότοποι επιφανειακής όσο και οι υποεπιφανειακής ροής, απαιτούν συνθήκες ομοιόμορφης ροής κατά μήκος της κάθε κλίνης, ώστε να επιτευχθεί η αναμενόμενη απόδοση. Αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί με συστήματα μικρού έως και μεσαίου μεγέθους που αποτελούνται από διάτρητες πολυσύνθετες σωληνώσεις στα σημεία εισόδου – εξόδου, και που εκτείνονται σε όλο το πλάτος της κλίνης. Το μέγεθος των σωληνώσεων, η διάμετρος των ανοιγμάτων και η μεταξύ τους απόσταση, εξαρτώνται από τον επιδιωκόμενο ρυθμό ροής.

Ένας μόνο πολυσύνθετος σωλήνας, με κεντρικό σημείο εισαγωγής, δεν είναι κατάλληλος για έναν υγροβιότοπο μεγάλου πλάτους, γιατί θα είναι δύσκολο να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη ροή από όλα τα σημεία εξόδου. Γι' αυτό το σκοπό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυάριθμοι πολυσύνθετοι σωλήνες (ανά ζεύγη). Διαδοχικά σετ από συσκευές διαχωρισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διανείμουν τη ροή ομοιόμορφα από το κύριο σημείο εισόδου στον απαιτούμενο αριθμό σωληνώσεων (WEF, 2001).

Στα βόρεια κλίματα, όπου παρουσιάζονται εκτεταμένες περιόδους χαμηλών θερμοκρασιών, οι πολυσύνθετες σωληνώσεις πρέπει να προστατεύονται και να τοποθετούνται στον πυθμένα της κλίνης, κάτω από την σχεδιασμένη επιφάνεια του νερού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το ύψος του νερού μπορεί να ανυψωθεί στην αρχή του χειμώνα, για να επιτρέψει το σχηματισμό πάγου στην επιφάνεια του νερού. Αντίθετα, στα θερμά κλίματα οι σωληνώσεις στο σημείο εισόδου μπορούν να τοποθετηθούν σε εκτεθειμένα σημεία, για να επιτρέψουν διατήρηση και ρύθμιση. Εναλλακτικές λύσεις με ανοίγματα από γεωτρήσεις, επιτρέπουν μεγαλύτερο έλεγχο στην διανομή της ροής.

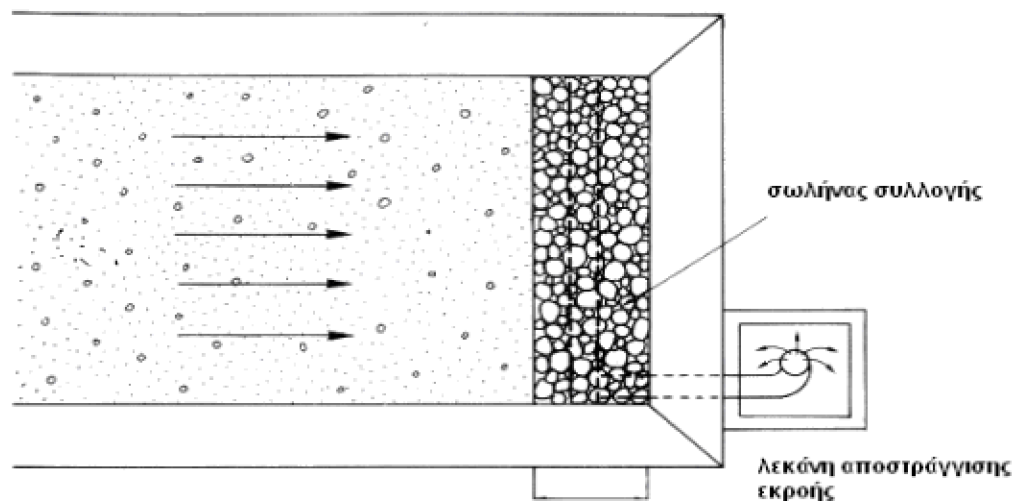
Η ρύθμιση της λειτουργίας των υπόγειων σωληνώσεων δεν είναι δυνατή, γι' αυτό κατά τη διάρκεια της κατασκευής πρέπει να εξασφαλίζεται ότι οι σωληνώσεις αφήνουν ελεύθερη επιφάνεια για τη ζωή που υπάρχει στο σύστημα. Σε ελάχιστο βαθμό μπορεί να απαιτηθούν επιπλέον προσπάθειες στη συμπίεση και προσεχτικός διαχωρισμός στις ζώνες εισόδου και εξόδου. Μπορεί να είναι απαραίτητη, επίσης, η θεμελίωση των σωληνώσεων με τσιμέντο, στα ασταθή εδάφη.

Οι υπόγειες σωληνώσεις της εκροής πρέπει να συνδέονται με μία κατασκευή, στην έξοδο, που να περιέχει μία συσκευή για τον έλεγχο του ύψους του νερού στην κλίνη του υγροβιότοπου. Αυτή η συσκευή μπορεί να είναι ένα ρυθμιστικό φράγμα ποταμού ή μία πύλη ελέγχου ροής (WEF, 2001).



Εικόνα 2-8. Κατασκευή εισόδου τεχνητού υγροβιότοπου SF

602Pro PRINT PACK Trial

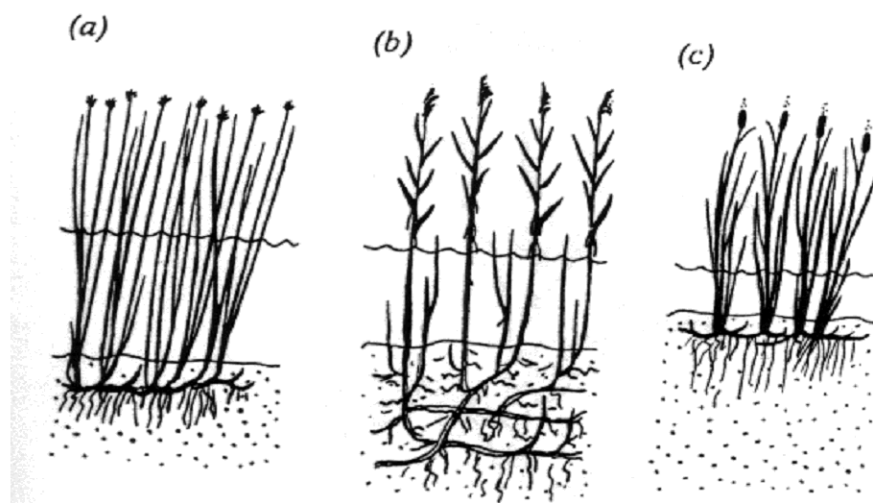


Εικόνα 2-9. Κατασκευή εξόδου τεχνητού υγροβιότοπου SF

2.2.3.4 Επιλογή και Διαχείριση της Φυτικής Βλάστησης

Η φυτική βλάστηση ασκεί ένα πολύ σημαντικό και ολοκληρωμένο ρόλο στη λειτουργία των συστημάτων υδροβιότοπων με τη μεταφορά οξυγόνου δια μέσου του ριζικού συστήματος στον πυθμένα των λεκανών επεξεργασίας. Έτσι, εφοδιάζεται με οξυγόνο το μέσο κάτω από την επιφάνεια του νερού, για ανάπτυξη και συγκράτηση των μικροοργανισμών που διενεργούν τη βασική επεξεργασία του εφαρμοζόμενου αποβλήτου. Διάφορα είδη φυτών, που ριζοβολούν σε χονδρόκοκκα υποστρώματα και αναφύονται ή και βλαστάνουν πάνω από την επιφάνεια του νερού, χρησιμοποιούνται στα συστήματα υδροβιότοπων.

Τα πιο συνήθη είδη φυτών είναι διάφορα είδη της οικογένειας *Cyperaceae*, κυρίως του γένους *Carex spp.* (είδη κύπερης) και των γενών *Scirpus* (Εικόνα 2-10(a)), *Typha* (Εικόνα 2-10(c)) και *Phragmites* (Εικόνα 2-10(b)), δηλαδή βούρλων, ψαθιού και νεροκαλάμων, αντίστοιχα. Τα είδη αυτά συναντώνται σχεδόν παντού και είναι ανεκτικά στην υγρασία και τις χαμηλές θερμοκρασίες (ψύξη). Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτών των φυτών, σχετικά με το σχεδιασμό τεχνητών υδροβιότοπων, είναι το απαιτούμενο βάθος νερού και το βάθος ριζοβολίας σε συστήματα FWS και SF, αντίστοιχα. Τυπικά, τα είδη του γένους *Typha* τείνουν να επικρατούν σε νερό βάθους πάνω από 0,15m, του γένους *Scirpus* αναπτύσσονται σε βάθος νερού από 0,05 έως 0,25m, ενώ οι *Phragmites* αναπτύσσονται σε βάθος νερού μέχρι 1,5m, αλλά ο μεταξύ του ανταγωνισμός περιορίζεται σε μικρά βάθη. Τέλος, τα είδη της οικογένειας *Cyperaceae*, συναντώνται σε μικρά βάθη νερού, μικρότερα ακόμη και από αυτά στα οποία αναπτύσσονται τα είδη του γένους *Scirpus*. Το ριζικό σύστημα των ειδών του γένους *Typha* επεκτείνεται μέχρι βάθους 0,3cm, ενώ αυτό του γένους *Phragmites* άνω των 0,6m και του γένους *Scirpus* άνω των 0,76m. Είδη των γενών *Phragmites* και *Scirpus* θεωρούνται κατάλληλα για συστήματα SF, επειδή το βάθος ριζοβολίας τους επιτρέπει τη χρήση λεκανών μεγαλύτερου βάθους (Αγγελάκης & Tchobanoglous, 1995).



Εικόνα2-10. Είδη φυτών: (a) *Scirpus*, (b) *Phragmites*, (c) *Typha*

Η μεσολάβηση της βλάστησης στην μεταφορά αερίων

Τα φυτά των υγροβιότοπων μπορούν να διευκολύνουν τη μεταφορά αερίων εντός και εκτός των υγρών αποβλήτων ενός συστήματος SF. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κυρίως στη μεταφορά του οξυγόνου μέσα στα υγρά απόβλητα. Ωστόσο, τα φυτά των υγροβιότοπων μπορούν να μεταφέρουν εκτός του υγρού αποβλήτου μεθάνιο και άλλα διαλυμένα αέρια. Η δυνατή ποσότητα οξυγόνου που μπορεί να μεταφερθεί μέσω των ριζών του φυτού στο υγρό απόβλητο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο υγρό απόβλητο, το βάθος των ριζών, η θερμοκρασία των φύλλων και του αέρα καθώς και η κατάσταση της ανάπτυξης των φυτών.

Βάσει της βιβλιογραφίας (U.S. EPA, 2000), η κατάλληλη τιμή της μεταφοράς οξυγόνου κυμαίνεται από μηδέν μέχρι $3,0 \text{ g-O}_2/\text{m}^2\cdot\text{d}$. Όταν αυτή η μέγιστη τιμή είναι της τάξης του φορτίου BOD_5 για ελαφρώς φορτισμένα συστήματα SF ($3,0 \text{ g/m}^2\cdot\text{d} = 30 \text{ kgBOD}_5/\text{ha}\cdot\text{d}$) τότε υπάρχει περιορισμένη μαρτυρία για να στηρίξει την υπόθεση ότι τα φυτά προσθέτουν συγκεκριμένα ποσά οξυγόνου στα συστήματα SF. Οι τυπικές τιμές του διαλυμένου οξυγόνου είναι πολύ χαμηλές ($<1,0 \text{ mg/L}$), αλλά επειδή είναι δύσκολη η ανάγνωση της σωστής τιμής, οι πραγματικές τιμές είναι χαμηλότερες. Στα συστήματα SF όπου μετρήθηκε το δυναμικό μείωσης του οξυγόνου, οι τιμές ήταν τυπικά σχεδόν αρνητικές, υποδηλώνοντας έντονες αναγωγικές συνθήκες.

Τα συστήματα χωρίς ανάπτυξη φυτών δρουν ανάλογα με τα συστήματα με πλήρη ανάπτυξη φυτών, όσον αφορά το BOD_5 και την αφαίρεση του αζώτου. Σύμφωνα με έρευνες για το βάθος των ριζών και τα μονοπάτια της ροής, έχει προκύψει ότι οι ρίζες δεν εισχωρούν μέχρι τον πυθμένα του υποστρώματος και υπάρχει ουσιαστικά μεγαλύτερη ροή κάτω από τη ριζική ζώνη, παρά μέσα σε αυτήν. Το απόθεμα οξυγόνου από τις ρίζες, είναι πιθανό να μην είναι αξιόπιστο, εξαιτίας της ετήσιας καταστροφής των φυτών.

Τα φυτά, επίσης, θα επηρεάσουν την άλλη πηγή οξυγόνου, την άμεση μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα στο υγρό απόβλητο. Έρευνες έχουν δείξει ότι η μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα κυμαίνεται από 0,50 μέχρι 1,0g- $O_2/m^2 \cdot d$. Η αποσύνθεση της φυτικής ουσίας στην κορυφή του υποστρώματος, μπορεί ακόμα και να προκαλέσει χαμηλότερες τιμές μεταφοράς οξυγόνου στο υγρό απόβλητο και εν τέλει μία ζήτηση οξυγόνου, λόγω του ότι η φυτική ουσία ενεργεί σαν μέσο διάχυσης (U.S. EPA, 2000).

602Pro PRINT PACK Trial

Απομάκρυνση θρεπτικών και μετάλλων από τα φυτά των υγροβιότοπων

Τα φυτά των υγροβιότοπων, κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους, απορροφούν τα κύρια συστατικά ανάπτυξης των φυτών (όπως το N και ο P) και τα ιχνοστοιχεία (περιλαμβάνονται και τα μέταλλα) μέσω των ριζών τους. Όταν αρχίσει η γήρανση των φυτών τα περισσότερα θρεπτικά μεταφέρονται από θέση σε θέση στο ρίζωμα, ενώ ένα σημαντικό ποσοστό τους μπορεί να εκχυθεί από τα φυτά. Εκτιμάται ότι το καθαρό ετήσιο ποσό του αζώτου και του φωσφόρου που λαμβάνεται από την αναφερόμενη φυτική βλάστηση κυμαίνεται από 12 μέχρι 120 gN/ $m^2 \cdot y$ και από 1,8 μέχρι 18 gP/ $m^2 \cdot y$, αντίστοιχα. Τα είδη καλαμιών και βούρλων είναι στο κατώτερο άκρο αυτού του εύρους, ενώ τα είδη ψαθιού βρίσκονται στο ανώτερο άκρο. Αυτές οι εκτιμήσεις, στηρίζονται στους ετήσιους ρυθμούς ανάπτυξης και στις συγκεντρώσεις των θρεπτικών ολόκληρου του φυτού. Λόγω, όμως, του ότι στα συστήματα SF γίνεται συγκομιδή μόνο των βλαστών, οι παραπάνω τιμές πρέπει να μειωθούν τουλάχιστο κατά 50%. Η λήψη των μετάλλων από τα φυτά μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απομάκρυνση των θρεπτικών, πρέπει η συγκομιδή των βλαστών να γίνει πριν από τη γήρανση της φυτικής βλάστησης. Η συγκομιδή των φυτών δε συνιστάται να γίνεται κατά την περίοδο ανάπτυξης, γιατί οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσουν επιπλοκές στα φυτά.

Οι αναμενόμενοι μέγιστοι ρυθμοί απομάκρυνσης του N, του P, και των μετάλλων είναι μικροί σε σχέση με το τυπικό φορτίο των συστημάτων SF. Η απομάκρυνσή τους μεταβάλλεται με το χρόνο. Η μεγαλύτερη απορρόφηση των θρεπτικών επέρχεται κατά τη διάρκεια ταχείας ανάπτυξης των φυτών, την άνοιξη και το καλοκαίρι, και αν η συγκομιδή δεν γίνει πριν από τη γήρανση των φυτών, ένα σημαντικό μέρος των θρεπτικών που κρατούνται από τα φυτά, απελευθερώνεται πίσω στο νερό. Έτσι, αν ο βαθμός απομάκρυνσης των θρεπτικών δεν είναι μεταβλητός και σύγχρονος με την λήψη από τα φυτά και την απελευθέρωσή τους, η παρουσία των φυτών θα είναι περισσότερο επιζήμια παρά χρήσιμη στο να βρεθούν τα επίπεδα της απομάκρυνσης των θρεπτικών (U.S. EPA, 2000).

Ο ρόλος της βλάστησης στη θερμική μόνωση

Ένα από τα πλεονεκτήματα των φυτών στους υδροβιότοπους είναι ότι προσφέρουν θερμική μόνωση στο υγρό απόβλητο κατά τη διάρκεια χαμηλών θερμοκρασιών. Η νεκρή φυτική βιομάζα στην κορυφή του υποστρώματος βοηθά στον περιορισμό των απωλειών θερμότητας λόγω της μεταφοράς θερμότητας από το υγρό απόβλητο και λόγω της διείσδυσης του λιωμένου χιονιού μέσα στο υγρό απόβλητο.

Πολλές έρευνες έχουν γίνει για να διερευνηθεί το κατά πόσο τα φυτά εμποδίζουν το χάσιμο της θερμότητας, παρ' όλα αυτά όμως, δεν είναι ξεκάθαρο το πόσο σημαντικός είναι αυτός ο παράγοντας στην απομάκρυνση των ρυπαντών, λόγω του ότι α) δεν έχει αποδειχθεί αν τα συστήματα SF με φυτική βλάστηση δρουν καλύτερα από τα συστήματα SF χωρίς φυτική βλάστηση ακόμα και το χειμώνα και β) το νεκρό φυτικό στρώμα στην κορυφή του υποστρώματος λειτουργεί σαν φράγμα στην μεταφορά οξυγόνου και ως πηγή του βιοδιασπόμενου άνθρακα και των νιτρικών του υγρού αποβλήτου (U.S. EPA, 2000).

2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΟΙ ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η συλλογή δεδομένων για την απόδοση των υπαρχόντων συστημάτων είναι σημαντική για την ανερχόμενη τεχνολογία, όπως είναι τα συστήματα υγροβιότοπων. Τέτοιες πληροφορίες αποδεικνύουν τις ικανότητες της διαδικασίας επεξεργασίας διαφόρων παραμέτρων των υγρών αποβλήτων και εξασφαλίζουν τη βάση για την ανάπτυξη λογικών μοντέλων σχεδιασμού.

2.3.1 Απομάκρυνση BOD₅

Το φορτίο BOD₅ αποτελεί περιοριστικό παράγοντα σχεδιασμού για τους τεχνητούς υγροβιότοπους. Η βάση γι' αυτούς τους περιορισμούς είναι η διατήρηση αερόβιων συνθηκών εντός της ανώτερης στήλης νερού της μονάδας, καθώς και ο αποτελεσματικός έλεγχος των οσμών. Φυσικές πηγές του διαλυμένου οξυγόνου (DO) σε αυτά τα συστήματα αποτελούν ο επιφανειακός επαναερισμός και η φωτοσυνθετική οξυγόνωση. Ο επιφανειακός επαναερισμός έχει νόημα σε ανεμώδης συνθήκες ή όταν η επιφάνεια διαταράζεται με μηχανικά μέσα (Reed *et al.*, 1995).

Η απομάκρυνση του BOD₅, στους υγροβιότοπους, γίνεται γρήγορα μέσω της καθίζησης και της παγίδευσης στα αναπτυσσόμενα στο νερό τμήματα της βλάστησης. Τα παγιδευμένα υλικά και το διαλυτό BOD₅ οξειδώνονται ή ανάγονται αρχικά από τους περιφυτικούς οργανισμούς του συστήματος. Η παραγωγή του BOD₅, προκαλείται από το πάνω τμήμα της φυτικής βλάστησης και από άλλα οργανικά υλικά που συναντώνται στη φύση. Γι' αυτό το λόγο, στην τελική εκροή του υγροβιότοπου βρίσκονται πάντα κάποιες συγκεντρώσεις BOD₅ οι οποίες δεν γίνεται να μειωθούν, κάνοντας αυτά τα συστήματα ανέκανα να απομακρύνουν πλήρως το BOD₅.

Στην πραγματικότητα το BOD₅ της εκροής, αποτελείται από το BOD₅ που απορρέει από την αποσύνθεση των φυτών, από την αποσάθρωση της λάσπης και των θραυσμάτων και από το BOD₅ που απομένει από την αρχική συγκέντρωση εισροής. Το εναπομένον BOD₅ που προέρχεται από το BOD₅ της εισροής, τυπικά θα

αποτελείται από κυτταρικούς ιστούς και κυτταρικά τεμάχια, ιδιαίτερα σε συστήματα με μεγάλους χρόνους παραμονής (Tchobanoglous *et al.*, 2000).

Το ολικό BOD₅ στην εκροή, δίνεται από τη σχέση:

$$\text{BOD}_{5(\text{ECW})} = \text{BOD}_{5(\text{PD})} + \text{BOD}_{5(\text{SDD})} + \text{BOD}_{5(\text{RIW})} \quad (2.3.1-1)$$

όπου BOD_{5(ECW)} = εκροή BOD₅ από τον υγροβιότοπο, mg/L

BOD_{5(PD)} = BOD₅ που προέρχεται από την αποσύνθεση των φυτών, mg/L

BOD_{5(SDD)} = BOD₅ που απελευθερώνεται από την αποσάθρωση της λάσπης και των θραυσμάτων, mg/L

BOD_{5(RIW)} = BOD₅ που απομένει στον υγροβιότοπο, mg/L

Έχει παρατηρηθεί ότι οι παράμετροι BOD_{5(PD)}, BOD_{5(SDD)} και BOD_{5(RIW)} μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους και αυτή η μεταβλητότητα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό των τεχνητών υγροβιότοπων. Προς το παρόν, τα στοιχεία που υπάρχουν για τη μεταβλητότητα των BOD_{5(PD)} και BOD_{5(SDD)} είναι περιορισμένα και αλληλοσυγκρούονται. Σε κάποια συστήματα η συνεισφορά BOD από την αποσύνθεση των φυτών, της λάσπης και του υποστρώματος αυξάνεται κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Γι' αυτό το λόγο συνίσταται η χρήση μιας αθροιστικής τιμής για τον υπολογισμό των BOD_{5(PD)} και BOD_{5(SDD)} (Tchobanoglous *et al.*, 2000).

Η συγκέντρωση υποβάθρου BOD₅ που απομένει μπορεί να κυμαίνεται από 2 έως 10 mg/L. Γενικά, τα συστήματα SF είναι αποτελεσματικά στην απομάκρυνση BOD₅ εξαιτίας των σχετικά μικρών ταχυτήτων ροής και της μεγάλης επιφανειακής έκτασης του υποστρώματος (WEF, 2001).

Σε όλες τις περιπτώσεις, ανεξάρτητα από τις συγκεντρώσεις στην εισροή, οι συγκεντρώσεις στην εκροή του υγροβιότοπου είναι μικρότερες από 30 mg/L, που αποτελεί το όριο της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Τα περισσότερα από τα συστήματα, μάλιστα, παρουσιάζουν τελική εκροή μικρότερη από 20 mg/L (εκτός από κάποιες εξαιρέσεις). Η πραγματοποίηση της απαιτούμενης συγκέντρωσης BOD₅ στην εκροή, μπορεί να γίνει εμφανής όταν η συγκέντρωση εισροής είναι σε χαμηλά επίπεδα (≤ 20 mg/L) όπου η επιπρόσθετη απομάκρυνση BOD₅ είναι ελάχιστη.

Έχει αποδειχθεί ότι τα συστήματα με απομάκρυνση μικρότερη από 20%, έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις στην εισροή, γι' αυτό και μόνο ένα μικρό ποσοστό

απομάκρυνσης είναι απαραίτητο για να επιτευχθεί η συγκέντρωση που απαιτείται στην εκροή (WEF, 2001).

Στους τεχνητούς υδροβιότοπους τα φορτία BOD₅ θα πρέπει να ρυθμίζονται έτσι ώστε η ζήτηση οξυγόνου στο εφαρμοζόμενο απόβλητο να μην υπερβαίνει την ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου με τη φυτική βλάστηση. Απαιτείται εμπειρία στη χρήση κριτηρίων έκτασης – φορτίου, επειδή το πραγματικό φορτίο δεν εφαρμόζεται ομοιόμορφα, αλλά συνήθως παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις του κυρίως στις εισόδους, ενώ το οξυγόνο ουσιαστικά τροφοδοτείται ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του συστήματος. Εκτιμούμενοι ρυθμοί μεταφοράς οξυγόνου για αναφυόμενα φυτά κυμαίνονται από 5 έως 45g/m²·d με μια μέση τιμή 20g/m²·d, που θεωρείται τυπική για τα περισσότερα συστήματα. Το οξυγόνο μεταφέρεται από εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα φύλλα και στελέχη των φυτών στο ριζικό τους σύστημα. Στα συστήματα SF που οι ρίζες των φυτών είναι σε επαφή με τη ροή της εκροής του εφαρμοζόμενου αποβλήτου, το μεταφερόμενο οξυγόνο στο ριζικό σύστημα είναι διαθέσιμο στους μικροοργανισμούς που αποικούν σε αυτό και αποδομούν το διαλυμένο BOD₅ στην εκροή της επαφής.

Όπως στα συστήματα FWS έτσι και στα SF, τα κατάλοιπα της φυτικής αποσάθρωσης και άλλα οργανικά υλικά συνεισφέρουν BOD₅. Έτσι, η απομάκρυνση του BOD₅ συναρτήσει του χρόνου αυξάνεται μέχρι ένα ποσοστό 95% και έπειτα η μεταβολή είναι γραμμική. Σε αυτά τα συστήματα SF η εκροή BOD₅ δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 5mg/L, εξαιτίας της συνεισφοράς των φυσικών οργανικών υλικών του συστήματος (Reed *et al.*, 1995).

Το BOD₅ στην εκροή ενός συστήματος SF πιθανών να μην είναι υλικό που πέρασε μέσα από το σύστημα, αλλά αντιθέτως υλικό που μετασχηματίστηκε ή παράχθηκε εσωτερικά. Έτσι είναι πιθανό να διαφέρει σε μέγεθος και σύνθεση από το BOD₅ της εισροής.

Η πραγματική απομάκρυνση του BOD₅ επέρχεται όταν το υλικό που προκαλεί το BOD₅ μετασχηματίζεται πλήρως από αναερόβιες βιολογικές διαδικασίες, σε αέρια τελικά προϊόντα. Τα πιο κατάλληλα αναερόβια μονοπάτια είναι η ζύμωση του μεθανίου και η αναγωγή του θεικού οξέος. Εξαιτίας του ότι η ζύμωση του μεθανίου εμποδίζεται σε θερμοκρασίες κάτω των 10°C, για την απομάκρυνση του διαλυτού BOD₅ τους κρύους μήνες επικρατεί η αναγωγή του θεικού οξέος. Παρ' όλα αυτά η εποχιακή απόδοση δεν μεταβάλλεται τόσο, όσο θα περίμενε κανείς εξαιτίας της επιρροής της διαφοράς θερμοκρασίας στις βιολογικές αντιδράσεις. Έχει παρατηρηθεί

ότι τα βιοδιασπώμενα τμήματα που μετακινούνται φυσικά κατά τη διάρκεια των ψυχρών μηνών, υποβαθμίζονται πιο αργά και συσσωρεύονται (U.S. EPA, 2000). Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, ο ρυθμός της χημικής αποικοδόμησης των παγιδευμένων τμημάτων αυξάνεται, οδηγώντας σε μείωση των συσσωρευμένων στερεών και απελευθέρωση του BOD₅. Αυτή η θεωρία εξηγεί γιατί οι ρυθμοί απομάκρυνσης του BOD₅ που βασίζονται στο φορτίο BOD₅ της εισροής δεν είναι σημαντικά μεγαλύτεροι σε σχέση με το χειμώνα. Η ανάγκη για μόνωση της επιφάνειας των συστημάτων SF στα βόρεια κλίματα έχει συζητηθεί αλλά δεν έχει ποσοτικοποιηθεί.

Εναλλακτικά συστήματα SF θα μπορούσαν να επιτύχουν υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς οξυγόνου, έτσι ώστε να βελτιωνόταν η απομάκρυνση του BOD₅, εξαιτίας της επικράτησης αερόβιων βιολογικών διαδικασιών. Παρ' όλα αυτά, όμως, θα υπήρχε η πιθανότητα αύξησης στην παραγωγή της μικροβιακής βιομάζας, η οποία θα μπορούσε να αυξήσει τα προβλήματα φραξίματος.

602Pro PRINT PACK Trial

2.3.2 Απομάκρυνση TSS

Η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, τόσο στους υδροβιότοπους επιφανειακής όσο και στους υποεπιφανειακής ροής, οφείλεται στις φυσικές διεργασίες και επηρεάζεται μόνο από τη θερμοκρασία λόγω της υπάρχουσας εσωτερικής τριβής στο νερό που ρέει. Η εσωτερική αυτή τριβή μπορεί να αμεληθεί. Η απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα σχεδιασμού για τους τεχνητούς υδροβιότοπους, εφόσον επιτυγχάνεται πολύ γρήγορα σε σχέση με την απομάκρυνση του BOD₅ και του αζώτου. Τα περισσότερα από τα στερεά των υγρών αποβλήτων είναι οργανικά και αποσυντίθενται έγκαιρα, αφήνοντας ελάχιστα υπολείμματα.

Μία συγκέντρωση TSS παραμένει στο σύστημα, η οποία είναι παραπροϊόν της αποσυνθεμένης βλάστησης και άλλων φυσικών οργανικών υλών των υδροβιότοπων. Όλα τα συστήματα έχουν συγκεντρώσεις εκροής μικρότερες από 30 mg/L, που αποτελεί το όριο της δευτερογενούς επεξεργασίας. Τα περισσότερα από τα συστήματα, μάλιστα, παρουσιάζουν τελική εκροή μικρότερη από 20 mg/L. Η βασική απομάκρυνση των TSS γίνεται μέσα στο πρώτο 20% της κλίνης του υδροβιότοπου.

Αυτό το τακτοποιημένο υλικό υποβάλλεται, έπειτα, σε αερόβια ή αναερόβια αποσύνθεση, ανάλογα με την κατάσταση του οξυγόνου στη συγκεκριμένη θέση (WEF, 2001).

Γενικά η απομάκρυνση των TSS είναι πολύ γρηγορότερη από την απομάκρυνση του BOD₅. Υπάρχει γενική ομοφωνία στο ότι αν ένας υγροβιότοπος που έχει σχεδιαστεί σωστά για απομάκρυνση BOD₅ ή ολικού αζώτου, θα πρέπει να παρέχει, στην εκροή, συγκεντρώσεις TSS κοντά σε αυτές που απαιτούνται.

2.3.3 Απομάκρυνση Αζώτου

Ο σχεδιασμός για την απομάκρυνση του αζώτου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, εξαιτίας του ότι το άζωτο εμφανίζεται με διάφορες μορφές και απαιτεί έναν αριθμό από χημικές και περιβαλλοντικές συνθήκες για τον μετασχηματισμό ή την απομάκρυνσή του. Η μορφή του αζώτου που εισέρχεται στον υγροβιότοπο εξαρτάται από το είδος της προεπεξεργασίας που έχει πραγματοποιηθεί. Αεριζόμενα συστήματα πλήρους μίξης με επαρκή υδραυλικό χρόνο παραμονής, μπορούν να παράγουν σημαντικές συγκεντρώσεις νιτρικών.

Η απομάκρυνση του αζώτου είναι συνήθως ο περιοριστικός παράγοντας όταν επιβάλλονται όρια για τις συγκεντρώσεις εκροής της αμμωνίας ή ολικού αζώτου. Σε ψυχρά κλίματα με εκτεταμένες περιόδους χαμηλών θερμοκρασιών, οι απαιτήσεις σε άζωτο μπορεί να περιορίσουν την επιτευξιμότητα της λειτουργίας το χειμώνα. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να είναι απαραίτητη η αποθήκευση του υγρού αποβλήτου κατά τη διάρκεια του χειμώνα και η επεξεργασία το καλοκαίρι. Έτσι η διαστασιολόγηση του υγροβιότοπου με βάση την απομάκρυνση του αζώτου πρέπει να γίνεται σε συνδυασμό με του θερμικούς υπολογισμούς (Reed *et al.*, 1995).

Το αμμωνιακό άζωτο είναι η μορφή που ρυθμίζεται πιο συχνά στην τελική εκροή, εξαιτίας του ότι η μη-ιονισμένη αμμωνία, ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις, μπορεί να είναι τοξική για τα ψάρια και η οξείδωση της αμμωνίας στην λαμβανόμενη ροή μπορεί να χαμηλώσει το επίπεδο του οξυγόνου

Τυπικά, το μεγαλύτερο μέρος του αζώτου που εισέρχεται σε έναν υγροβιότοπο, θα είναι ένας συνδυασμός οργανικού αζώτου και αμμωνίας – αμμωνιακού αζώτου. Αυτός ο συνδυασμός χαρακτηρίζεται ως ολικό άζωτο Kjeldahl,

TKN (Total Kjeldahl Nitrogen). Η ισορροπία διαλυμένης αμμωνίας – αμμωνίου στο νερό, είναι συνάρτηση του pH και της θερμοκρασίας (ως παραδοχή, ο συνδυασμός αυτός αναφέρεται ως αμμωνιακό άζωτο). Το οργανικό άζωτο, συνδέεται με τα στερεά του υγρού αποβλήτου και με τα άλλα που εισέρχονται στο σύστημα. Αυτά τα ξεχωριστά σωματίδια διαχωρίζονται γρήγορα από το νερό που ρέει και έπειτα αυξάνεται η διαλυτότητά τους και μετατρέπονται σε αμμωνία (WEF, 2001).

Στους υγροβιότοπους πολλοί τρόποι είναι διαθέσιμοι για την απομάκρυνση της αμμωνίας. Μπορεί να απομακρυνθεί μέσω της λήψης από τα φυτά, της απορρόφησης από το έδαφος ή της μετατροπής της σε νιτρικά όταν επικρατούν αερόβιες συνθήκες. Το μη-ιονισμένο κλάσμα της αμμωνίας (NH_3) είναι πτητικό και μπορεί να χαθεί απευθείας στην ατμόσφαιρα. Η λήψη από τα φυτά είναι προσωρινή, εξαιτίας του ότι πολύ από αυτό το άζωτο επανεισέρχεται στο περιβάλλον του υγροβιότοπου σαν οργανικό άζωτο όταν τα πράσινα (φρέσκα) μέρη των φυτών γερνούν κάθε χρόνο και αποτίθενται στη λεκάνη. Η προσρόφηση στο έδαφος μπορεί να είναι σημαντική, αλλά είναι μία βραχυπρόθεσμη ανταπόκριση, λόγω του ότι οι διαθέσιμες περιοχές για προσρόφηση είναι περιορισμένες σε αριθμό.

Ένας καινούριος τεχνητός υγροβιότοπος θα χρειαστεί μία ή περισσότερες περιόδους ανάπτυξης για να επιτύχει ισορροπία, όσον αφορά την ανάπτυξη των φυτών και τις αντιδράσεις προσρόφησης από το έδαφος. Κατά τη διάρκεια αυτής της πρώιμης περιόδου η απομάκρυνση της αμμωνίας μπορεί να είναι υψηλή. Στο σύστημα επιτυγχάνεται η ισορροπία, όταν η βλάστηση φτάσει τη μέγιστη αναμενόμενη πυκνότητα και σε αυτό το σημείο, σταθεροποιηθεί η απομάκρυνση της αμμωνίας στα μακροπρόθεσμα επίπεδα που έχουν τεθεί.

Όταν σχεδιάζεται ένας υγροβιότοπος με βάση την απομάκρυνση της αμμωνίας, καλό είναι να υποθέσουμε ότι όλο το εισερχόμενο TKN θα εμφανιστεί στο σύστημα ως αμμωνία, εξαιτίας των συνεχόμενων μετασχηματισμών που πραγματοποιούνται μέσα σε αυτό. Όποια ποσότητα νιτρικών εισέλθει στον υγροβιότοπο, είναι πιθανό να απονιτροποιηθεί σε επίπεδα υποβάθρου, εκτός και αν ο υγροβιότοπος έχει ρηχά βάθη νερού με αερόβια διαλυμένα επίπεδα οξυγόνου. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός για απομάκρυνση ολικού αζώτου, είτε για περιβαλλοντολογικούς σκοπούς, είτε για την προστασία των πηγών του πόσιμου νερού (όριο νιτρικών = 10mg/L) (WEF, 2001).

Για τη διαστασιολόγηση βάση του επιθυμητού βαθμού απομάκρυνσης αζώτου εξετάζονται ξεχωριστά η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση. Και οι δύο αυτές

βιολογικές αντιδράσεις εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και ο ρυθμός της μεταφοράς οξυγόνου στις ρίζες των φυτών εξαρτάται από την εποχή.

2.3.4 Απομάκρυνση Αμμωνίας (Νιτροποίηση)

Μετά από την απομάκρυνση των BOD₅, TSS και των κολοβακτηριδίων στα συστήματα υγροβιότοπων επεξεργασίας, επιβάλλεται η απομάκρυνση την αμμωνίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ανάγκη αυτή σχετίζεται με το απαιτούμενο οξυγόνο στην λαμβανόμενη ροή και το πρόβλημα είναι το κλάσμα της ιονισμένης αμμωνίας (NH₄⁺). Πολλές φορές είναι ανησυχητική η τοξικότητα, και η παρουσία του μη – ιονισμένου κλάσματος αμμωνίας είναι κρίσιμη.

Η συγκομιδή η οποία πραγματοποιείται στα εδαφικά συστήματα δεν είναι πρακτική και οικονομική στην περίπτωση των υγροβιότοπων, επομένως ο μόνος ουσιαστικός μακροπρόθεσμος μηχανισμός που είναι διαθέσιμος για την απομάκρυνση της αμμωνίας είναι η βιολογική νιτροποίηση. Η νιτροποίηση είναι μία αερόβια διαδικασία, αλλά οι συνθήκες που επικρατούν στους υγροβιότοπους δεν είναι αερόβιες εκτός από την περιοχή κοντά στην επιφάνεια του νερού και στις επιφάνειες των καλυμμένων με νερό φυτών και των ριζών.

Θεωρητικά, απαιτούνται 4,6gr οξυγόνου για την οξειδωση 1 gr αμμωνίας. Οι διαθέσιμες πηγές οξυγόνου στους υγροβιότοπους FWS και SF δεν εξασφαλίζουν τις απαραίτητες συνθήκες για γρήγορη νιτροποίηση. Γι' αυτό το λόγο, παρόλο που η απομάκρυνση BOD₅ και TSS μπορεί να φτάσει σε χαμηλά επίπεδα μέσα σε λίγες μέρες, η απομάκρυνση της αμμωνίας (νιτροποίηση) μπορεί να απαιτεί λίγες εβδομάδες για να φτάσει σε χαμηλά επίπεδα χωρίς συμπληρωματικές πηγές οξυγόνου.

Ως εναλλακτική λύση για τα συστήματα μεγάλων υγροβιότοπων έχουν συνδυαστεί με επιτυχία υγροβιότοποι σχεδιασμένοι για απομάκρυνση BOD₅ με άλλες μεθόδους νιτροποίησης, όπως είναι τα σταλαγματικά φίλτρα. Άλλη εναλλακτική λύση είναι η ενσωμάτωση βαθιά τοποθετημένων ζωνών στον υγροβιότοπο (>1m). Αυτές οι ζώνες εμφυτεύονται με είδη φυτών που καλύπτονται από το νερό, τα οποία ελευθερώνουν οξυγόνο και χρησιμεύουν σαν υπόστρωμα για τη νιτροποίηση των μικροοργανισμών. Άλλες επιτυχημένες εφαρμογές σε συστήματα υγροβιότοπων SF

έχουν χρησιμοποιήσει μηχανικό αερισμό στην κλίνη, ή έχουν εφαρμόσει τη λειτουργία τροφοδοσίας - εκκένωσης για να επαναφέρουν, περιοδικά, τις αερόβιες συνθήκες.

Σε πολλά συστήματα υγροβιότοπων παρουσιάζεται ένα αρνητικό ποσοστό απομάκρυνσης, που σημαίνει ότι η συγκέντρωση εκροής της αμμωνίας ήταν μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση εισροής. Σε κάποια συστήματα παρατηρήθηκαν αρνητικά ποσοστά απομάκρυνσης αμμωνίας, μεγαλύτερα από -100%, τα οποία οφείλονταν στην παρουσία των αλγών στις εκροές των επαμφοτερίζουσών λιμνών που εισέρχονταν στους υγροβιότοπους. Η αποσύνθεση αυτών των αλγών και άλλου οργανικού υλικού στους υγροβιότοπους, παρήγαγε την επιπρόσθετη αμμωνία.

Με βάση δεδομένα από συστήματα που έχουν μελετηθεί, κατά τη διάρκεια των πρώτων 10-15 ημερών, η απομάκρυνση της αμμωνίας βελτιωνόταν καθώς αυξανόταν ο υδραυλικός χρόνος παραμονής. Στοιχεία, όμως με υδραυλικούς χρόνους παραμονής 15-20 ημέρες δεν παρουσιάζουν αυτή την τάση. Συστήματα αυτής της τάξης δέχθηκαν χαμηλές συγκεντρώσεις εισροής αμμωνίας και παρήγαγαν συγκεντρώσεις εκροής της τάξης του 0,1-2mg/L, ενώ κανένα δεν έδειξε απομάκρυνση 100%.

Εκτός από επαρκές οξυγόνο, οι αντιδράσεις νιτροποίησης απαιτούν και αλκαλικότητα. Η θεωρητική αναλογία είναι 7,1 αλκαλικότητα (σαν διοξείδιο του ασβεστίου) ανά γραμμάριο αμμωνίας που οξειδώνεται. Τα περισσότερα δημοτικά υγρά απόβλητα έχουν επαρκή αλκαλικότητα αλλά δεν ισχύει το ίδιο με κάποια βιομηχανικά και εμπορικά υγρά απόβλητα. Αν σε έναν υγροβιότοπο απαιτείται η απομάκρυνση της αμμωνίας, είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί αν η εισροή του συστήματος θα έχει επαρκή αλκαλικότητα.

Όπως και σε άλλες συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας προσκολλούμενης βιομάζας, μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικό να μειωθούν οι συγκεντρώσεις του BOD₅ σε μία τάξη του 15-20mg/L πριν από την ενσωμάτωση του βήματος της νιτροποίησης στην επεξεργασία. Επίσης, η νιτροποίηση είναι μία αντίδραση που εξαρτάται από τη θερμοκρασία κι έτσι για θερμοκρασίες του νερού του υγροβιότοπου χαμηλότερες από 5°C, δεν επιτυγχάνονται σημαντικές απομακρύνσεις (WEF, 2001).

2.3.5 Απομάκρυνση Νιτρικών (Απονιτροποίηση)

Σε αντίθεση με την απομάκρυνση της αμμωνίας, η απομάκρυνση των νιτρικών στους υγροβιότοπους FWS και SF μπορεί να επιτευχθεί γρήγορα και αποτελεσματικά εξαιτίας των αναερόβιων συνθηκών που επικρατούν και των διαθέσιμων πηγών άνθρακα οι οποίες υποστηρίζουν τις αντιδράσεις επεξεργασίας. Τυπικά, απαιτείται μία πηγή οξυγόνου των 5 με 9g BOD₅, για την απονιτροποίηση 1g νιτρικών (WEF, 2001). Σε τυπικούς υγροβιότοπους το μεγαλύτερο μέρος του BOD₅, έχει απομακρυνθεί πριν αρχίσει να πραγματοποιείται η απονιτροποίηση στον υγροβιότοπο, αλλά το φυτικό στρώμα και άλλα φυσικά οργανικά κατάλοιπα αποσάθρωσης που είναι παρόντα μπορούν να προμηθεύσουν την απαιτούμενη πηγή του άνθρακα.

Οι υγροβιότοποι FWS, σε σχέση με τους υγροβιότοπους SF, είναι πιο αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση των νιτρικών, εξαιτίας της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας σε άνθρακα που έχουν από την αποσάθρωση των φυτών. Παρά το γεγονός ότι οι υγροβιότοποι SF διαθέτουν μεγαλύτερη επιφανειακή έκταση για βιολογικές αντιδράσεις, είναι κατανοητό ότι η μικρή διαθεσιμότητα σε άνθρακα στο σύστημα περιορίζει τους ρυθμούς απονιτροποίησης. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η απόδοση των δύο ειδών υγροβιότοπων είναι περίπου η ίδια.

Η ανακύκλωση της νιτροποιημένης εκροής στην αρχή της μονάδας του υγροβιότοπου θα εκμεταλλευτεί τις πηγές άνθρακα του BOD₅ του υγρού αποβλήτου. Οι αντιδράσεις απονιτροποίησης που μετατρέπουν τα νιτρικά σε στοιχειώδες αέριο άζωτο (N₂) το οποίο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, εξαρτώνται από τη θερμοκρασία περισσότερο από ότι εξαρτώνται από αυτήν η απομάκρυνση του BOD₅ ή της αμμωνίας.

Συγκρίνοντας την απομάκρυνση της αμμωνίας και των νιτρικών στους υγροβιότοπους FWS και SF παρατηρούμε ότι σε αυτά τα συστήματα οι αντιδράσεις νιτροποίησης που απαιτούνται για την απομάκρυνση της αμμωνίας, αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για την απομάκρυνση του αζώτου. Αναφέρεται ότι σε ένα τυπικό περιβάλλον υγροβιότοπου η νιτροποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί στις αερόβιες μικροπεριοχές με την απονιτροποίηση των νιτρικών να λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα στις ανοξικές συνθήκες του υγροβιότοπου.

Μία εξαίρεση μπορεί να είναι η χρήση βαθιά τοποθετημένων ζωνών, οι οποίες αποτελούνται από φυτά καλυμμένα με νερό. Σε αυτή την περίπτωση η νιτροποίηση

πραγματοποιείται σε αυτές τις εμφυτευμένες αερόβιες ζώνες και ακολουθεί η απονιτροποίηση στο διαδοχική ζώνη που αποτελείται από ανερχόμενη βλάστηση (WEF, 2001).

2.3.6 Απομάκρυνση Φωσφόρου

Η απομάκρυνση του φωσφόρου στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας γίνεται μέσω της λήψης από τα φυτά, της προσρόφησης, της κροκίδωσης και της κατακρήμνισης. Η απομάκρυνση στα συστήματα των υδροβιότοπων δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο είναι στα εδαφικά συστήματα, εξαιτίας της περιορισμένης δυνατότητας επαφής μεταξύ του υγρού αποβλήτου και του εδάφους καθώς και του γεγονότος ότι δεν γίνεται συγκομιδή της βλάστησης.

Τα συστήματα υδροβιότοπων μπορούν να επιτύχουν αποτελεσματική απομάκρυνση του φωσφόρου κατά τη διάρκεια των πρώτων 1-2 ετών, εξαιτίας της προσρόφησης του εδάφους και της λήψης από τα φυτά, τα οποία παρουσιάζουν σημαντική εξάπλωση. Ωστόσο, όταν το σύστημα φτάσει σε ισορροπία, η απομάκρυνση του φωσφόρου είναι πιθανό να περιοριστεί παρόλο που συνεχίζεται η λήψη από τα φυτά. Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι με την αποσύνθεση της βλάστησης ένα μέρος του ελευθερώνεται πίσω στο νερό.

Ένα μικρό τμήμα των φυτών δεν αποσυντίθεται πλήρως αλλά γίνεται μέρος του φυτάνθρακα (peat). Ο φώσφορος που σχετίζεται με την ετήσια προσαύξηση του φυτάνθρακα, είναι ένα από τα μόνιμα μονοπάτια απομάκρυνσης φωσφόρου μέσα στο σύστημα του υδροβιότοπου. Τα μοντέλα σχεδιασμού που αναπτύχθηκαν για την απομάκρυνση του φωσφόρου από τους Kadlec and Knight (1996), βασίστηκαν σε αυτό το μονοπάτι απομάκρυνσης, όπως και τα περισσότερα μοντέλα απομάκρυνσης φωσφόρου που υπάρχουν.

Στους υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής η καλύτερη απομάκρυνση παρατηρείται για εισροή φωσφόρου περίπου 5mg/L. Αυτά τα στοιχεία συλλέχθηκαν κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του συστήματος, στο οποίο ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε χαλίκι με μεγάλη περιεκτικότητα σε σίδηρο, βάθους μόνο 0,3m, γι' αυτό και επικρατούσαν αερόβιες συνθήκες περισσότερο από ότι στα τυπικά συστήματα υδροβιότοπων.

Ο φώσφορος συνήθως υπάρχει στα περισσότερα αστικά υγρά απόβλητα σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 4 έως 15mg/L. Στις τιμές ροής και υδραυλικών φορτίων, που κάτω από φυσιολογικές συνθήκες εμφανίζονται στα συστήματα αυτά των υγροβιότοπων, είναι δυνατό να απομακρυνθεί 30-60% του φωσφόρου της εισροής με υδραυλικό χρόνο κράτησης μικρότερο των 10 ημερών (WEF, 2001).

2.3.7 Απομάκρυνση Παθογόνων

Στα συστήματα υγροβιότοπων είναι πιθανό να εμφανιστούν στην εκροή συγκεντρώσεις υποβάθρου κοπρωδών κολοβακτηριδίων, οι οποίες δεν επιδέχονται περαιτέρω μείωση. Το επίπεδο υποβάθρου εκτιμάται ότι είναι 300 με 500cfu/100ml. Πολλοί από τους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση των TSS και άλλων ιζημάτων χρησιμοποιούνται και για την απομάκρυνση βακτηρίων και άλλων μικροβίων.

Σε αυτά τα συστήματα η απομάκρυνση των μικροβίων είναι ισοδύναμη με την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων. Σύμφωνα με στοιχεία από υγροβιότοπο στην Καλιφόρνια, η απομάκρυνση των κολοβακτηριδίων ήταν μεγαλύτερη από 92% και των μικροβίων μεγαλύτερη από 99%, με υδραυλικό χρόνο παραμονής, περίπου 6 ημέρες (WEF, 2001).

Στις περιπτώσεις που η μείωση της συγκέντρωσης των κοπρωδών κολοβακτηριδίων δεν είναι επαρκής ώστε να φτάσει σε ένα τυπικό όριο εκροής (200cfu/100mL), είναι απαραίτητη συμπληρωματική απολύμανση.

2.3.8 Απομάκρυνση Μετάλλων

Ο τρόπος με τον οποίο απομακρύνεται ο φώσφορος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την απομάκρυνση των διαλυμένων ή των σωματιδίων των μετάλλων. Το τελικό υλικό που κατακάθεται μόνιμα είναι ξανά το βυθισμένο ίζημα. Παρόλο που δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για την απομάκρυνση των μετάλλων από τους υγροβιότοπους, ώστε να μπορούμε να εξάγουμε κάποια λογικά μοντέλα

σχεδιασμού, τα περιορισμένα στοιχεία που έχουμε οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ικανότητα απομάκρυνσης είτε της μάζας, είτε της συγκέντρωσης των περισσότερων μετάλλων εξαρτάται από τη συγκέντρωση ή το φορτίο μάζας στην εισροή (π.χ. μεγαλύτερο φορτίο, μεγαλύτερο ποσοστό απομάκρυνσης).

Το τελικό υλικό που κατακάθεται φαίνεται να είναι σύμφωνο με το βυθισμένο ίζημα. Δυστυχώς, αυτά τα συστήματα δημιουργούν συνέχεια νέο οργανικό υλικό στο στρώμα της βλάστησης, αλλά μακροπρόθεσμα ή όταν το οργανικό φορτίο είναι μεγάλο, μπορεί να φτάσουν σε τοξικά επίπεδα για τα θηλαστικά πουλιά και ψάρια που κατοικούν εκεί. Στην περίπτωση των τυπικών δημοτικών υγρών αποβλήτων, η ωφέλιμη αναμενόμενη ζωή ενός υγροβιότοπου, όσον αφορά τη συσσώρευση των μετάλλων, είναι της τάξης των 100 χρόνων ή και περισσότερο (WEF, 2001)

Είναι, επίσης, φρόνιμο να ελαχιστοποιηθεί η παρουσία των θηλαστικών, πουλιών και ψαριών στα πρώτα στάδια της επεξεργασίας του συστήματος, όπου πραγματοποιείται το μεγαλύτερο μέρος της απόθεσης ιζήματος των μετάλλων.

2.3.9 Πολύπλοκα Οργανικά Μείγματα

Απλή οργανική ύλη πλούσια σε άνθρακα, χαρακτηριζόμενη ως BOD₅ των οικιακών και αστικών υγρών αποβλήτων, απομακρύνονται αποτελεσματικά από τα συστήματα υγροβιότοπων. Συστήματα υγροβιότοπων έχουν χρησιμοποιηθεί και για την επεξεργασία περισσότερο πολύπλοκων οργανικών μειγμάτων, όπως είναι οι υδρογονάνθρακες, τα απορρυπαντικά, τα μικροβιοκτόνα και οι φαινόλες. Αυτές οι έρευνες, περιλαμβάνουν υγρά απόβλητα από διυλιστήρια, από κατασκευαστές μικροβιοκτόνων και χημικών, από εγκαταστάσεις παραγωγής τροφίμων και από τα προϊόντα διήθησης των χώρων υγειονομικής ταφής.

Αρκετά δεδομένα για τις παραπάνω περιπτώσεις δεν υπάρχουν κι έτσι δεν μπορούν να εξαχθούν λογικά μοντέλα σχεδιασμού. Τα διαθέσιμα δημοσιευμένα στοιχεία δείχνουν δοκιμασμένη απομάκρυνση των υλικών και σε πολλές περιπτώσεις η απομάκρυνση ακολουθεί την γενική τάση που ισχύει για το BOD₅ στα οικιακά και δημοτικά υγρά απόβλητα (WEF, 2001).

2.3.10 Συγκεντρώσεις Υποβάθρου

Ένας επιτυχημένος υγροβιότοπος επεξεργασίας αποτελεί επίσης, ένα επιτυχημένο κατοικήσιμο οικοσύστημα που περιέχει τη βλάστηση και την σχετική χλωρίδα και πανίδα. Ο κύκλος της ζωής και του θανάτου αυτής της φυσικής χλωρίδας και πανίδας του συστήματος παράγει υπολείμματα τα οποία μπορούν να μετρηθούν ως BOD₅, TSS, άζωτο, φώσφορος και κοπρώδη κολοβακτηρίδια. Έτσι, δεν είναι δυνατό αυτά τα συστήματα να παράγουν μηδενική συγκέντρωση υποβάθρου αυτών των υλικών.

Παρόλο που οι συγκεντρώσεις υποβάθρου δεν παράγονται από τα συστατικά του υγρού αποβλήτου, μπορεί να συνδέονται έμμεσα με τα φορτία του συστήματος. Ένα σύστημα υγροβιότοπου που δέχεται ένα υγρό απόβλητο πλούσιο σε θρεπτικά, είναι πιθανό να παράγει συγκεντρώσεις υποβάθρου σε υψηλότερα επίπεδα από ότι ένας φυσικός υγροβιότοπος που δέχεται καθαρό νερό. Οι συγκεντρώσεις υποβάθρου μεταβάλλονται επίσης εποχιακά, εξαιτίας της εποχιακής αποσύνθεσης των φυτών και της αστάθειας της δράσης των πουλιών και οποιασδήποτε ζωής υπάρχει στον υγροβιότοπο. Αυτές οι συγκεντρώσεις υποβάθρου μπορούν να προσδιοριστούν στην εκροή ελαφρώς φορτισμένων υγροβιότοπων με σχετικά μεγάλους υδραυλικούς χρόνους παραμονής (WEF, 2001).

2.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Τυπικά, ένας υδροβιότοπος είναι ένα ρηχό σώμα κινούμενου νερού με μία σχετικά μεγάλη έκταση. Ωστόσο, αναπτύσσεται μία σημαντική αντίσταση τριβής στην ροή εξαιτίας της βλάστησης και του υποστρώματος, η οποία περιπλέκει τον υδραυλικό σχεδιασμό (WEF, 2001).

Στον σχεδιασμό, η πρώτη παραδοχή θεωρεί τη συνολική ροή να κατανέμεται ομοιόμορφα στα σημεία τροφοδοσίας της λεκάνης και την ανεμπόδιστη ροή κατά μήκος της. Αυτή η υπόθεση είναι υδρολογικά περίπλοκη γιατί η καθίζηση, η εξάτμιση, η εξατμισοδιαπνοή και το υγρό από διαρροή επηρεάζουν τον όγκο του νερού που υπάρχει στον υδροβιότοπο καθώς και τη συγκέντρωση των ρυπαντών και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (Hydraulic Retention Time: HRT). Η δεύτερη παραδοχή περιγράφει τη ροή με γνωστές εξισώσεις υδραυλικής που ισχύουν για ροή σε ανοιχτούς αγωγούς (Manning) ή ροή σε πορώδες μέσο (Darcy) με την εισαγωγή του πορώδους σαν διορθωτή του εμβαδού (Reed *et al.*, 1995, WEF, 2001).

Σε όλα τα μοντέλα σχεδιασμού το υγρό απόβλητο, θεωρείται ότι βρίσκεται συνέχεια σε επαφή με τους οργανισμούς οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την επεξεργασία του αποβλήτου. Στους υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής, είναι επίσης απαραίτητο να εξασφαλισθεί ότι θα διατηρηθούν οι συνθήκες υποεπιφανειακής ροής για όλη τη διάρκεια σχεδιασμού του συστήματος.

Για τα συστήματα υποεπιφανειακής ροής θεωρείται ότι ο νόμος του Darcy, που περιγράφει τη ροή υγρού σε πορώδες μέσο, αποτελεί μια καλή προσέγγιση για τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται χαλίκι για την κατασκευή του υποστρώματος:

$$u = k_s \cdot s \quad (2.4-1)$$

και

$$u = \frac{Q}{Wy} \quad (2.4-2)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$Q = k_s \cdot A_c \cdot s \quad (2.4-3)$$

όπου Q = μέση παροχή στη λεκάνη, m^3/d

s = υδραυλική κλίση ή κλίση της επιφάνειας του νερού, m/m

k_s = υδραυλική αγωγιμότητα μιας μονάδας έκτασης του υδροβιότοπου, κάθετα στη διεύθυνση ροής, $m^3/m^2 \cdot d$

A_c = επιφάνεια κάθετη στην κατεύθυνση ροής, m^2

u = “ταχύτητα του Darcy” ή φαινομενική ταχύτητα ροής μέσω ολόκληρης της κάθετης επιφάνειας του υποστρώματος, m/d

Το υπόστρωμα από χαλίκι προκαλεί, κυρίως, αντίσταση στη ροή μέσα στον υδροβιότοπο. Μακροπρόθεσμα, η εξάπλωση του ριζικού συστήματος των φυτών στην κλίση και η συσσώρευση των μη-διασπάσιμων υπολειμμάτων στους κενούς πόρους του χαλικιού δημιουργούν επιπρόσθετη αντίσταση. Η διαφορά ύψους μεταξύ της επιφάνειας του νερού στο σημείο εισόδου και στο σημείο εξόδου του υδροβιότοπου, εξασφαλίζει την ενέργεια που χρειάζεται για να ξεπεραστεί η αντίσταση. Η υψομετρική αυτή διαφορά μπορεί να εξασφαλισθεί δίνοντας μια κλίση στον πυθμένα του υδροβιότοπου, χωρίς όμως αυτή να είναι η βέλτιστη λύση, εξαιτίας του ότι δεν είναι οικονομική και επίσης αν η αντίσταση στη ροή αυξηθεί με το χρόνο, η κλίση που θα έχει δοθεί στο σύστημα δεν θα είναι αποτελεσματική στην αλλαγή αυτή. Η προτεινόμενη προσέγγιση είναι να κατασκευαστεί ο πυθμένας του υδροβιότοπου με μία επαρκή κλίση ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης διοχέτευση, όταν είναι απαραίτητο, και να προβλέπεται μία εκροή η οποία θα επιτρέπει τη ρύθμιση του ύψους του νερού στο τελικό άκρο του υδροβιότοπου ώστε να εξουδετερώνεται η αντίσταση, η οποία αυξάνεται με το χρόνο. Αυτή η ρύθμιση θα μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιαδήποτε κλίση της επιφάνειας του νερού απαιτείται, και στο χαμηλότερο σημείο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διοχέτευση του υδροβιότοπου (WEF, 2001).

Ο λόγος $L:W$ που επιλέγεται για έναν υδροβιότοπο SF επηρεάζει, επίσης, το σύστημα ροής, εξαιτίας του ότι η αντίσταση στη ροή αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος. Ο Reed *et al.* (1995) δημιούργησε ένα μοντέλο που μπορεί να υπολογίσει το ελάχιστο επιτρεπτό πλάτος λεκάνης για να ισχύουν οι συνθήκες ροής του Darcy (Reed *et al.*, 1995):

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{QA_s}{mk_s} \right)^{0,5} \quad (2.4-4)$$

με: $s = \frac{m \cdot y}{L}$, $L = \frac{A_s}{W}$, $A_c = W \cdot y$

όπου W = πλάτος υποστρώματος λεκάνης, m

A_s = συνολική επιφάνεια λεκανών, m²

L = μήκος λεκάνης παράλληλα στη ροή, m

m = αύξηση βάθους που εξυπηρετεί ως διαφορικό φορτίο (εκφράζεται ως δεκαδικός αριθμός), συνήθως 0,01-0,03

y = βάθος νερού λεκάνης, m

Q = μέση παροχή στη λεκάνη, m³/d

k_s = υδραυλική αγωγιμότητα του υποστρώματος που χρησιμοποιείται, m³/m²·d

Η τιμή του m , τυπικά, θα κυμαίνεται από 5 έως 20% του διαθέσιμου δυναμικού φορτίου. Το μέγιστο δυναμικό φορτίο ισούται με το πλήρες βάθος νερού της λεκάνης (y), όταν $m=100\%$. Αυτό δεν αποτελεί μια συντηρητική σχεδιαστική διαμόρφωση εξαιτίας του ότι ο υγροβιότοπος μπορεί να ξεραθεί στην περιοχή της εκροής και να μην υπάρχει απόθεμα αν η αντίσταση ροής στον υγροβιότοπο έπρεπε να αυξηθεί περισσότερο.

Για την αποφυγή συσσωρεύσεων, φραξίματος, επιδράσεων του ιζώδους και άλλων ανεπιθύμητων ενδεχομένων, προτείνεται η υδραυλική αγωγιμότητα (k_s) να έχει τιμή $\leq 1/3$ και η αύξηση βάθους που εξυπηρετεί ως διαφορικό φορτίο (m) να μην ξεπερνά το 20%.

Τα βασικά στοιχεία σχεδιασμού συστημάτων τεχνητών υγροβιότοπων SF δίνονται στον Πίνακα 2-1 και χαρακτηριστικά τυπικών υποστρωμάτων δίνονται στον Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-1. Βασικά στοιχεία σχεδιασμού συστημάτων τεχνητών υδροβιότοπων SF (Τσαγκαράκης και Αγγελάκης, 2001)

Παράμετροι σχεδιασμού	Μονάδες	Τιμές
Υδραυλικός χρόνος κράτησης	d	3-4 (BOD ₅) 6-10 (N)
Βάθος νερού	m	0,3–0,6
Μέγιστος ρυθμός φορτίου BOD	kg/στρ.·d	<100
Ταχύτητα υδραυλικού φορτίου	m ³ /m ² ·d	0,015-0,045
Απαιτούμενη έκταση	στρ./m ³ ·d	20-70
Αναλογία μήκους - πλάτους (L:W)	-	0,75-4:1
Έλεγχος κουνουπιών	-	Δεν απαιτείται
Συχνότητα συγκομιδής φυτικής βλάστησης	yr	Δεν απαιτείται
Αναμενόμενη ποιότητα εκροής		
BOD ₅	mg/L	<20
TSS	mg/L	<20
TN	mg/L	<10
TP	mg/L	<5

Πίνακας 2-2. Χαρακτηριστικά τυπικών υποστρωμάτων που θεωρούνται κατάλληλα για συστήματα SF (Reed *et al.*, 1995)

Τύπος υποστρώματος	Μέγιστο μέγεθος 10% κόκκων D ₁₀ (mm)	Πορώδες n (%)	Υδραυλική αγωγιμότητα k _s (m ³ /m ² ·d)
Λεπτή άμμος	2	28-32	100-1000
Χαλικώδης άμμος	8	30-35	500-5000
Λεπτό χαλίκι	16	35-38	1000-10000
Μέτριο χαλίκι	32	36-40	10000-50000
Μικρές κροκάλες	128	38-45	50000-250000

2.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ

Οι συνθήκες της θερμοκρασίας σε έναν υγροβιότοπο επηρεάζουν τις φυσικές και τις βιολογικές δραστηριότητες του συστήματος. Σε ακραίες περιπτώσεις, οι επικρατούσες συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών και ο επακόλουθος σχηματισμός πάγου προκαλούν φυσική αποτυχία του υγροβιότοπου.

Οι βιολογικές αντιδράσεις που είναι υπεύθυνες για την απομάκρυνση του BOD₅, τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Παρ' όλα αυτά, σε πολλά συστήματα υγροβιότοπων που υπάρχουν σε ψυχρά κλίματα, δεν είναι προφανής η εξάρτηση της απομάκρυνσης του BOD₅ από τη θερμοκρασία. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο μεγάλο υδραυλικό χρόνο παραμονής που παρέχεται σε αυτά τα συστήματα, ο οποίος τείνει να εξισορροπήσει τους χαμηλούς ρυθμούς αντίδρασης κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Πολλά συστήματα στον Καναδά και στις ΗΠΑ αποδεικνύουν μειωμένη ικανότητα απομάκρυνσης του αζώτου κατά τη διάρκεια του χειμώνα και αυτό πιστεύεται ότι οφείλεται στην επίδραση της θερμοκρασίας στις βιολογικές αντιδράσεις καθώς και στην έλλειψη οξυγόνου λόγω του σχηματισμού ενός καλύμματος πάγου στην επιφάνεια του νερού.

Η πραγματική θερμική κατάσταση ενός υγροβιότοπου SF μπορεί να είναι πολύπλοκη. Μπορεί να υπάρχει πρόσθετη ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία ή απώλεια θερμότητας στο υποκείμενο έδαφος, στο υγρό απόβλητο που ρέει μέσα στο σύστημα καθώς και στην ατμόσφαιρα. Οι βασικοί θερμικοί μηχανισμοί περιλαμβάνουν την αγωγιμότητα προς ή από το έδαφος, την αγωγιμότητα προς ή από το υγρό απόβλητο, την αγωγιμότητα και τη μεταγωγή θερμότητας από και προς την ατμόσφαιρα και την εκπομπή ακτινοβολίας από και προς την ατμόσφαιρα.

Η ενέργεια που προσφέρεται από το έδαφος μπορεί να είναι σημαντική, αλλά σε ένα συντηρητικό σχεδιασμό δίνεται μικρή σημασία. Είναι επίσης συντηρητικό να αγνοηθεί η πρόσθετη ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία και αυτό είναι κατάλληλο στις βόρειες περιοχές κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όπου οι συνθήκες θερμοκρασίας είναι κρίσιμες.

Οι απώλειες θερμότητας σε μία ανοιχτή επιφάνεια νερού, λόγω μεταφοράς που οφείλεται στη δράση του ανέμου, μπορεί να είναι σημαντικές, αλλά όχι στην περίπτωση αυτή των υγροβιότοπων SF, εξαιτίας του ότι το υγρό απόβλητο προστατεύεται από τη βλάστηση και το έδαφος. Αυτό το γεγονός μετριάξει την

επίδραση του ανέμου στο υποκείμενο νερό του υγροβιότοπου και σαν αποτέλεσμα, οι απώλειες θερμότητας λόγω μεταφοράς είναι σχετικά ασήμαντες και μπορούν να αγνοηθούν στο θερμικό μοντέλο.

Η θερμοκρασία σε κάθε σημείο του υγροβιότοπου μπορεί να προβλεφθεί συγκρίνοντας τις απώλειες θερμότητας που έχουν υπολογιστεί, με την διαθέσιμη ενέργεια του συστήματος. Οι απώλειες θεωρείται ότι συμβαίνουν μέσω της αγωγιμότητας προς την ατμόσφαιρα, και η μόνη διαθέσιμη πηγή ενέργειας θεωρείται ότι είναι η ροή του νερού δια μέσου του υγροβιότοπου. Καθώς το νερό παγώνει, ελευθερώνει ενέργεια η οποία ορίζεται ως ειδική θερμότητα. Η ειδική θερμότητα του νερού είναι το ποσό της ενέργειας που είτε αποθηκεύεται, είτε ελευθερώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται και εξαρτάται από την πίεση, και σε έναν ασήμαντο βαθμό, από τη θερμοκρασία. Εφόσον στους υγροβιότοπους SF επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια του νερού και η επίδραση της θερμοκρασίας θεωρείται ασήμαντη, η ειδική θερμότητα θεωρείται σταθερή για πρακτικούς λόγους.

Μία τιμή για την ειδική θερμότητα είναι $4215 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (Reed *et al.*, 1995). Η σχέση της ειδικής θερμότητας εφαρμόζεται για θερμοκρασίες κάτω από το σημείο πήξης του νερού 0°C . Το νερό στους 0°C δεν πήζει, μέχρι να χαθεί η διαθέσιμη λανθάνουσα θερμότητα, η οποία θεωρείται σταθερή και ίση με $334,944 \text{ J/kg}$. Η λανθάνουσα θερμότητα είναι, ουσιαστικά, ο τελικός παράγοντας ασφαλείας για την προστασία του συστήματος από την πήξη. Παρ' όλα αυτά, όταν η θερμοκρασία πέσει στους 0°C , η πήξη είναι άμεση και το σύστημα είναι στα πρόθυρα φυσικής αποτυχίας. Για να εξασφαλιστεί ένας συντηρητικός σχεδιασμός, η λανθάνουσα θερμότητα περιλαμβάνεται ως ένας παράγοντας σε αυτούς του υπολογισμούς, μόνο όταν επιτυγχάνεται ο καθορισμός του βάθους του πάγου.

Η διαθέσιμη ενέργεια στο νερό που ρέει μέσω του υγροβιότοπου καθορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q_G = c_p \cdot \delta \cdot A_s \cdot y \cdot n \quad (2.5-1)$$

όπου q_G = ενέργεια που προστίθεται στον υγροβιότοπο από το νερό, J°C

c_p = ειδική θερμότητα του νερού, $4215 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

δ = πυκνότητα του νερού, 1000 kg/m^3

A_s = συνολική επιφάνεια λεκανών, m^2

y = βάθος νερού λεκάνης, m

n = πορώδες του υποστρώματος

Αν είναι επιθυμητός ο υπολογισμός της ημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού, καθώς ρέει δια μέσου του υγροβιότοπου, ο όρος A_s στην εξίσωση (1), αντικαθίσταται από τον όρο A_s/t :

$$q_G = \frac{c_p \cdot \delta \cdot A_s \cdot y \cdot n}{t} \quad (2.5-2)$$

όπου q_G = ενέργεια που προστίθεται στον υγροβιότοπο σε μία μέρα ροής, $J/^\circ C \cdot d$

t = υδραυλικός χρόνος παραμονής στο σύστημα, d

Οι απώλειες θερμότητας από όλο το σύστημα του υγροβιότοπου SF, μπορούν να προσδιοριστούν από τη σχέση:

$$q_L = (T_o - T_{air}) \cdot U \cdot \sigma \cdot A_s \cdot t \quad (2.5-3)$$

όπου q_L = απώλεια ενέργειας μέσω αγωγιμότητας στην ατμόσφαιρα, J

T_o = θερμοκρασία του νερού στην είσοδο του υγροβιότοπου, $^\circ C$

T_{air} = μέση θερμοκρασία του αέρα, $^\circ C$

U = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια την κλίνης του υγροβιότοπου, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

A_s = συνολική επιφάνεια λεκανών, m^2

t = υδραυλικός χρόνος παραμονής στο σύστημα, d

Αν είναι επιθυμητός ο υπολογισμός των απωλειών θερμότητας σε ημερήσια βάση, η σχέση (3) γίνεται:

$$q_L = \frac{(T_o - T_{air}) \cdot U \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (1d)}{t} \quad (2.5-4)$$

όπου q_L = ημερήσια απώλεια ενέργειας μέσω J/d (Btu/d)

T_o = θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται στο τμήμα του υγροβιότοπου που μας ενδιαφέρει, $^\circ C$

Οι τιμές του T_{air} στις εξισώσεις (2.5-3) και (2.5-4) λαμβάνονται από τοπικά αρχεία καιρού ή από τον πλησιέστερο σταθμό καιρού στην προτεινόμενη θέση υγροβιότοπου. Το έτος με τις χαμηλότερες χειμερινές θερμοκρασίες κατά τα τελευταία 20 ή 30 χρόνια επιλέγεται ως το “έτος σχεδιασμού” για υπολογιστικούς σκοπούς. Είναι επιθυμητό, γι’ αυτούς τους θερμικούς υπολογισμούς, να χρησιμοποιηθεί μία μέση θερμοκρασία αέρα, για χρονική περίοδο ίση με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής σχεδιασμού του υγροβιότοπου. Αν οι μηνιαίες μέσες θερμοκρασίες για το “έτος σχεδιασμού” είναι διαθέσιμες, θα δώσουν μια αποδεκτή πρώτη προσέγγιση για υπολογιστικούς σκοπούς. Αν τα αποτελέσματα των θερμικών υπολογισμών δείξουν ότι επικρατούν συνθήκες οριακά αποδεκτές, τότε είναι αναγκαία περαιτέρω βελτίωση για τον τελικό σχεδιασμό του συστήματος.

Η αγωγιμότητα ή η τιμή U στην εξίσωση (2.5-3) είναι ο ολικός συντελεστής θερμικής μεταφοράς του σχεδιασμένου υγροβιότοπου. Είναι ένας συνδυασμός της θερμικής αγωγιμότητας του καθενός από τα κύρια συστατικά, διαιρεμένο με το βάθος του, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.5-5):

$$U = \frac{1}{\left(\frac{y_1}{k_1}\right) + \left(\frac{y_2}{k_2}\right) + \left(\frac{y_3}{k_3}\right) + \left(\frac{y_n}{k_n}\right)} \quad (2.5-5)$$

όπου U = αγωγιμότητα, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$k_{(1-n)}$ = αγωγιμότητα των στρωμάτων 1 έως n , $W/m \cdot ^\circ C$

$y_{(1-n)}$ = βάθος των στρωμάτων 1 έως n , m

Η μεταβολή της θερμοκρασίας T_c που οφείλεται στη θερμότητα που προστίθεται ή χάνεται, μπορεί να προσδιοριστεί συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.5-1) και (2.5-3):

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} = \frac{(T_0 - T_{air}) \cdot U \cdot \sigma \cdot A_s \cdot t}{c_p \cdot \delta \cdot A_s \cdot y \cdot n} \quad (2.5-6)$$

όπου T_c = μεταβολή της θερμοκρασίας του υγροβιότοπου, °C

Η θερμοκρασία της εκροής του υγροβιότοπου T_e είναι:

$$T_e = T_o - T_c \quad (2.5-7)$$

ή

$$T_e = T_o - (T_o - T_{air}) \frac{U \cdot \sigma \cdot t}{c_p \cdot \delta \cdot y \cdot n} \quad (2.5-8)$$

Αν οι υπολογισμοί εκτελούνται σε καθημερινή βάση, το T_o είναι η θερμοκρασία εισόδου στο τμήμα του υγροβιότοπου που μας ενδιαφέρει, το T_e είναι η θερμοκρασία της εκροής από αυτό το τμήμα, και το T_{air} είναι η μέση θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της ισοδύναμης περιόδου.

Επομένως, η μέση θερμοκρασία του νερού σε έναν υγροβιότοπο SF είναι:

$$T_w = \frac{T_o + T_e}{2} \quad (2.5-9)$$

602Pro PRINT PACK Trial

Η μέση αυτή θερμοκρασία είναι συγκρίσιμη με την τιμή της θερμοκρασίας που λαμβάνεται, όταν το μέγεθος και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής του υγροβιότοπου υπολογίζονται με βάση τα μοντέλα σχεδιασμού απομάκρυνσης του BOD₅, ή του αζώτου. Αν οι δύο θερμοκρασίες δεν είναι πολύ κοντά τότε, είναι απαραίτητο να γίνουν επαναλήψεις στους υπολογισμούς μέχρι να συγκλίνουν οι τιμές τους.

Περαιτέρω βελτίωση αυτής της διαδικασίας είναι δυνατή, περιλαμβάνοντας την ενέργεια που προστίθεται ή χάνεται από την ηλιακή ακτινοβολία και την αγωγιμότητα προς ή από το έδαφος. Κατά τους χειμερινούς μήνες, η αγωγιμότητα από το έδαφος είναι πιθανό να αντιπροσωπεύει ένα καθαρό ποσό ενέργειας που προστίθεται, εφόσον η θερμοκρασία του εδάφους είναι πιθανό να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του νερού στον υγροβιότοπο το φθινόπωρο και το χειμώνα. Η ενέργεια εισροής από το έδαφος μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (2.5-3), με μία λογική τιμή για το U ίση με $0,32 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ και θερμοκρασία εδάφους γύρω στους 10°C . Η πρόσθετη ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να εκτιμηθεί, υπολογίζοντας το καθαρό ποσό της πρόσθετης ενέργειας από την ηλιακή

ακτινοβολία, για την περιοχή που μας ενδιαφέρει, λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλες μετρήσεις.

Η εξίσωση (2.5-10), τότε θα μπορεί να υπολογίσει την θερμότητα εισροής από αυτή την πηγή:

$$q_{\text{solar}} = \phi \cdot A_s \cdot t \cdot S \quad (2.5-10)$$

όπου q_{solar} = πρόσθετη ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία, J

ϕ = ηλιακή ακτινοβολία για την τοποθεσία, $\text{J/m}^2 \cdot \text{d}$

A_s = συνολική επιφάνεια του υδροβιότοπου, m^2

t = υδραυλικός χρόνος παραμονής, d

S = ποσοστό της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο νερό του υδροβιότοπου SF, τυπικά 0,05 ή λιγότερο

Τα αποτελέσματα της εξίσωσης (2.5-10) πρέπει να χρησιμοποιούνται με επιφύλαξη, γιατί είναι πιθανό πολύ από αυτή την ηλιακή ενέργεια να μη φτάσει στο νερό του υδροβιότοπου. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ότι η ακτινοβολία πρώτα επιδρά στη βλάστηση και στο επάνω στρώμα ή σε κάποιο πιθανό αντανάκλαστικό κάλυμμα πάγου, γι' αυτό είναι απαραίτητη κάποια ρύθμιση στην εξίσωση (2.5-10). Όπως προαναφέρθηκε είναι φρόνιμο να παραληφθεί η θερμότητα εισροής στο υδροβιότοπο από αυτές τις πηγές. Όταν υπολογιστούν τα ποσά τη θερμότητας που προστίθενται, πρέπει να προστεθούν στα αποτελέσματα των εξισώσεων (2.5-1) και (2.5-2) και αυτό το τελικό άθροισμα να χρησιμοποιηθεί σαν παρονομαστής στην εξίσωση (2.5-8) για να προσδιοριστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του συστήματος (Reed *et al.*, 1995).

2.6 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ

Οι διαδικασίες σχεδιασμού για την απομάκρυνση των ρυπαντών έχουν εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Το 1990 μόνο ένας περιορισμένος αριθμός σχεδιαστικών μοντέλων ήταν διαθέσιμος και μόνο για μερικούς ρυπαντές. Ως αποτέλεσμα του αυξημένου ενδιαφέροντος και των εκτεταμένων ερευνών για την τεχνολογία αυτή έχουν δημιουργηθεί τρία μοντέλα σχεδιασμού και καλύπτουν τους περισσότερους από τους ρύπους που μας ενδιαφέρουν.

Τα τρία αυτά μοντέλα βασίζονται στην ανάλυση των δεδομένων εισροής-εκροής, ή στις εξισώσεις ισορροπίας της μάζας και χρησιμοποιούν τη γενική μορφή ενός μοντέλου plug flow πρώτης τάξης. Οι εξισώσεις, δηλαδή, που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν τις συγκεντρώσεις στην εκροή του υδροβιότοπου ως συνάρτηση των συγκεντρώσεων εισροής, του ρυθμού ροής και της έκτασης ή του όγκου. Αν και δεν λαμβάνουν υπόψη τους άμεσα τις πολύπλοκες αντιδράσεις και τις αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν στους υδροβιότοπους, χρησιμοποιούν χωρίς διάκριση μία τιμή φαινομενικού συντελεστή για να ερμηνεύσουν την μεταβολή της συγκέντρωσης της μάζας μεταξύ του σημείου εισόδου και εξόδου. Αυτή η προσέγγιση είναι η καλύτερη που μπορεί να επιτευχθεί με την διαθέσιμη βάση δεδομένων που υπάρχει μέχρι τώρα.

Τα μοντέλα, βασικά, είναι ισοδύναμα και θα αναμενόταν να έχουν παρόμοια αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά όμως αυτό δεν ισχύει, εν μέρει επειδή τα μοντέλα αυτά δεν αναπτύχθηκαν με βάση τα ίδια δεδομένα και εν μέρει εξαιτίας των διαφορών στη δομή και στο περιεχόμενό τους.

Τα τρία μοντέλα μπορούν να διακριθούν σε δύο τύπους, στα ογκομετρικά μοντέλα (volumetric models), όπως αυτά που αναπτύχθηκαν από τον Reed *et al.* (1995) και τους Crites and Tchobanoglous (1998) και στα μοντέλα εμβαδικού φορτίου (areal loading models), όπως αυτό που αναπτύχθηκε από τους Kadlec and Knight (1996) (WEF, 2001).

Ογκομετρικά Μοντέλα

Τα ογκομετρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του όγκου του νερού και ως πλεονεκτήματά τους μπορούν να θεωρηθούν τα εξής:

- Ο σχεδιασμός βασίζεται στη μέση ροή δια μέσου του συστήματος, γεγονός το οποίο μπορεί να εξισορροπήσει το νερό που χάνεται ή κερδίζεται λόγω της καθίζησης και της εξατμισοδιαπνοής
- Οι παράγοντες ασφαλείας και οι συγκεντρώσεις υποβάθρου που δεν επιδέχονται μείωση, λαμβάνονται ως εξωτερικές οριακές συνθήκες και δεν επιδρούν περιοριστικά στα μαθηματικά μοντέλα των μοντέλων σχεδιασμού.

Τα ογκομετρικά μοντέλα, όμως, έχουν και τους ακόλουθους περιορισμούς:

- Η διαδικασία απαιτεί τη γνώση του βάθους του νερού μέσα στο σύστημα, το οποίο είναι δύσκολο να ελεγχθεί κατά τη διάρκεια της κατασκευής των μεγάλων συστημάτων και είναι πιθανό να μεταβληθεί μακροπρόθεσμα
- Το πορώδες της βλάστησης και το συσσωρευμένο υλικό πρέπει να είναι γνωστό. Οι τιμές σχεδιασμού που θεωρούνται, βασίζονται στα περιορισμένα δεδομένα που υπάρχουν, και είναι πιθανό να μεταβληθούν μακροπρόθεσμα.
- Με βάση την εμπειρία που υπάρχει από άλλες διαδικασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, η απομάκρυνση του BOD₅ θεωρείται ότι εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Παρ' όλα αυτά όμως, τα δεδομένα από πολλά συστήματα υγροβιότοπων δεν δείχνουν εξάρτηση από τη θερμοκρασία.

Μοντέλα Εμβαδικού Φορτίου

Τα μοντέλα εμβαδικού φορτίου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του της απαραίτητης έκτασης του υγροβιότοπου και ως πλεονεκτήματά τους μπορούν να θεωρηθούν τα εξής:

- Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στο φορτίο μάζας της επιφανειακής έκτασης του υγροβιότοπου. Για το λόγο αυτό, το βάθος του νερού, το οποίο μπορεί να είναι δύσκολο να προσδιοριστεί για μεγάλα συστήματα, δεν αποτελεί παράγοντα των υπολογισμών σχεδιασμού.
- Τα μοντέλα αυτά είναι πιο εύκαμπτα από μαθηματική άποψη. Μία καλύτερη εφαρμογή των υπαρχόντων δεδομένων μπορεί να γίνει, χρησιμοποιώντας

μοντέλα εμβαδικού φορτίου δύο μεταβλητών (K, C*), σε σχέση με τη χρήση ογκομετρικών μοντέλων μίας μεταβλητής.

Τα μοντέλα εμβαδικού φορτίου, όμως, έχουν και τους ακόλουθους περιορισμούς:

- Τα μοντέλα αυτά, ασχολούνται μόνο με τον όγκο εισροής των υγρών αποβλήτων, ο οποίος δεν μπορεί να εξισορροπήσει το νερό που χάνεται ή κερδίζεται στους υπολογισμούς σχεδιασμού.
- Τα δεδομένα των υδροβιότοπων FWS που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία αυτών των μοντέλων, περιλαμβάνουν έναν μεγάλο αριθμό ελαφρώς φορτισμένων συστημάτων υδροβιότοπων, τα οποία μπορούν να παράγουν χαμηλές σταθερές τιμές (K), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε άσκοπους σχεδιασμούς μεγάλων υδροβιότοπων.
- Η χρήση της συγκέντρωσης υποβάθρου (C*) και του παράγοντα ασφαλείας (z), εσωτερικά στο μοντέλο για τον υπολογισμό της έκτασης του υδροβιότοπου, μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά μεγέθη υδροβιότοπων για την επίτευξη χαμηλών συγκεντρώσεων.

602Pro PRINT PACK Trial

Όταν μελετάται η βιβλιογραφία που σχετίζεται με την απομάκρυνση του BOD₅ ή των άλλων συνιστωσών, πρέπει να διευκρινίζεται αν οι σταθεροί συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση, βασίζονται στον όγκο ή στην επιφανειακή έκταση του όγκου ελέγχου. Ο ρυθμός απομάκρυνσης του BOD₅ που χρησιμοποιεί συντελεστή που βασίζεται στον όγκο, δίνεται από τη σχέση (Tchobanoglous *et al.*, 2000):

$$r_{\text{BOD}} = -k_v (\text{BOD}_5)^n \quad (2.6-1)$$

όπου r_{BOD} = η ποσότητα του BOD₅ που χάνεται ανά μονάδα χρόνου και όγκου

k_v = συντελεστής απομάκρυνσης BOD₅ που βασίζεται στον όγκο,

BOD₅ = συγκέντρωση BOD₅

n = τάξη της αντίδρασης (αδιάστατη)

Οι μονάδες του συντελεστή απομάκρυνσης εξαρτώνται από την τάξη της αντίδρασης.

Η αντίστοιχη σχέση που δίνει το συντελεστή, ο οποίος βασίζεται στην έκταση, είναι η ακόλουθη:

$$r_{\text{BOD}} = -k_A (A/V) (\text{BOD}_5)^n = - (k_A/H) (\text{BOD}_5)^n \quad (2.6-2)$$

όπου r_{BOD} = η ποσότητα του BOD_5 που χάνεται ανά μονάδα χρόνου και όγκου, $\text{mg/L} \cdot \text{d}$

k_A = συντελεστής απομάκρυνσης BOD_5 , m/d

A = επιφανειακή έκταση, m^2

V = όγκος, m^3

BOD_5 = συγκέντρωση BOD_5 , mg/L

n = τάξη της αντίδρασης (αδιάστατη)

H = βάθος, m

Αν το βάθος του νερού δεν αλλάζει, τότε οι δύο κινητικοί συντελεστές μπορούν να συνδεθούν άμεσα. Η δυσκολία στη χρήση τους εμφανίζεται όταν οι τιμές τους, που χρησιμοποιούνται για κάποιο βάθος νερού, εφαρμόζονται σε άλλα βάθη. Οι σχέσεις (2.6-1) και (2.6-2) είναι αντιπροσωπευτικές όλων των μετασχηματισμών που γίνονται στον υγροβιότοπο. Είναι ξεκάθαρο ότι ο συντελεστής απομάκρυνσης BOD_5 πρέπει να σχετίζεται με την επιφανειακή έκταση της βλάστησης που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού και με το υλικό της αποσύνθεσης μέσα στον υγροβιότοπο. Λόγω της περιορισμένης κατανόησης των πραγματικών μηχανισμών απομάκρυνσης, οι συντελεστές απομάκρυνσης που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα σχεδιασμού των τεχνητών υγροβιότοπων είναι φαινομενικοί συντελεστές και δεν έχουν απαραίτητα θεωρητική βάση. (Crites and Tchobanoglous, 1998, Tchobanoglous *et al.*, 2000).

2.6.1 Μοντέλο Reed *et al.*, 1995

Γενικά οι τεχνητοί υγροβιότοποι μπορούν να θεωρηθούν ως συστήματα προσκολλούμενης βιομάζας και η απόδοσή τους μπορεί να υπολογιστεί από την αντίδραση κινητικής πρώτης τάξης για αντιδραστήρες plug flow με τροφοδοσία στο ένα άκρο της λεκάνης και συλλογή της εκροής στο άλλο άκρο της (Reed *et al.*, 1995, WEF, 2001).

Οι βασικές σχέσεις του μοντέλου Reed *et al.*, 1995 είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t) \quad (2.6.1-1)$$

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T_w - 20)} \quad (2.6.1-2)$$

$$A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T y n} \quad (2.6.1-3)$$

όπου C_e = συγκέντρωση εκροής ρύπου, mg/L

C_o = συγκέντρωση εισροής ρύπου, mg/L

K_T = σταθερά κινητικής σε θερμοκρασία T , d^{-1}

T_w = μέση θερμοκρασία νερού μέσα στον υγροβιότοπο κατά την περίοδο που μας ενδιαφέρει, $^{\circ}C$

θ = θερμικός συντελεστής στους 20 $^{\circ}C$

A_s = συνολική επιφάνεια (πυθμένα) του υγροβιότοπου m^2

Q = μέση παροχή στον υγροβιότοπο, m^3/d

y = μέσο βάθος νερού λεκάνης, m

n = πορώδες του υγροβιότοπου (εκφράζεται ως δεκαδικός αριθμός)

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής σε ένα τεχνητό υδροβιότοπο θεωρείται ο χρόνος ροής που εξαρτάται από την παροχή και τη διατομή ροής και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$t = \frac{A'}{Q} \quad (2.6.1-4)$$

όπου t = υδραυλικός χρόνος παραμονής, d

A' = πραγματικό εμβαδόν διαθέσιμο για τη ροή του υγρού, m^2

Q = μέση παροχή στη λεκάνη, m^3/d

Εάν θεωρηθεί ότι το A' είναι ένα ποσοστό του εμβαδού A της διατομής, της ροής που ορίζεται από τη διατομή διέλευσης των υγρών, τότε το ποσοστό αυτό μπορεί να εκφραστεί από το πορώδες του μέσου ροής. Έτσι η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$t = \frac{LWyn}{Q} \quad (2.6.1-5)$$

602Pro PRINT PACK Trial

όπου t = υδραυλικός χρόνος παραμονής, d

L = μήκος λεκάνης παράλληλα στην ροή, m

W = πλάτος λεκάνης, m

y = βάθος νερού λεκάνης, m

n = πορώδες (εκφράζεται ως δεκαδικός αριθμός)

Q = μέση παροχή στη λεκάνη, m^3/d

Όταν χρησιμοποιείται η παροχή στο σχεδιασμό τεχνητών υδροβιότοπων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τυχόν μεταβολές εξαιτίας : (α) απωλειών διαμέσου της εξατμισοδιαπνοής και διήθησης και (β) εισροών από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Έτσι, η μέση παροχή νερού στη λεκάνη υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q = \frac{Q_o + Q_e}{2} \quad (2.6.1-6)$$

όπου Q = μέση παροχή στον υδροβιότοπο, m^3/d

Q_o = παροχή εισροής, m^3/d

Q_e = παροχή εκροής, m^3/d

Ένα σημαντικό μέγεθος που υπεισέρχεται άμεσα στις εξισώσεις διαστασιολόγησης που καταλήγουν στην εξίσωση (2.6.1-3), είναι η ειδική διαθέσιμη επιφάνεια για τη μικροβιακή δραστηριότητα. Για τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής θεωρείται όλη η διαθέσιμη επιφάνεια του πορώδους μέσου. Τυπικές τιμές για χαλίκι είναι $25 \text{ mm} > 146 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Reed *et al.*, 1995).

Ένα άλλο μέγεθος που υπεισέρχεται άμεσα στις εξισώσεις διαστασιολόγησης είναι το πορώδες n , δηλαδή η διαθέσιμη διατομή για τη διέλευση του νερού, που είναι το ποσοστό της διατομής και εκφράζεται ως δεκαδικός αριθμός. Για τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής, $n: 0,35 < n < 0,45$.

Το βάθος του υγρού που καθορίζει και το πλάτος του υποστρώματος στα συστήματα υποεπιφανειακής ροής, κυμαίνεται από 0,3 έως 0,6m, ενώ θα πρέπει να προβλέπεται και ένα στρώμα 0,05 έως 0,15 λεπτόκοκκου υλικού στην επιφάνεια για την υποβοήθηση της ριζοβολίας των φυτών.

Η συγκέντρωση εκροής του ρυπαντή (C_e) δεν μπορεί να είναι μικρότερη από την συγκέντρωση υποβάθρου (C^*).

2.6.1.1 Απομάκρυνση BOD₅

Στο μοντέλο του Reed et al., 1995, η τιμή του K₂₀ ισούται με 1,104 d⁻¹ και ο θερμικός συντελεστής θ ισούται με 1,06. Άρα η εξίσωση (2.6.1-2) γράφεται ως εξής:

$$K_T = 1,104 (1,06)^{(T-20)} \quad (2.6.1.1-1)$$

Η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 6mg/L (WEF, 2001).

2.6.1.2 Απομάκρυνση TSS

Η απομάκρυνση των TSS σύμφωνα με το μοντέλο του Reed et al., 1995, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{C_e}{C_0} = [0,1058 + 0,0011(HLR)] \quad (2.6.1.2-1)$$

όπου HLR = υδραυλικός ρυθμός φόρτισης, mm/d × 0,1

$$HLR = \frac{Q}{A_s} 100 \quad (2.6.1.2-2)$$

Η απομάκρυνση των TSS δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, και η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 6mg/L (WEF, 2001).

Υπάρχουν πολλοί περιορισμοί στη χρήση αυτού του μοντέλου, καθώς δεν είναι αποτελεσματικό για τους υδραυλικούς ρυθμούς φόρτισης που οι τιμές τους είναι πέρα από το πεδίο τιμών που χρησιμοποιούνται για να παραχθούν τα μοντέλα (HLR = 0,4-75cm/d). Πολύ μεγάλοι ή υπερβολικά μικροί υδραυλικοί ρυθμοί φόρτισης, θα δώσουν λανθασμένα αποτελέσματα. Η απομάκρυνση των TSS περιορίζεται από τα υπολείμματα οργανικών ουσιών.

2.6.1.3 Απομάκρυνση Αζώτου

Για τη διαστασιολόγηση βάση του επιθυμητού βαθμού απομάκρυνσης αζώτου εξετάζονται ξεχωριστά η απομάκρυνση της αμμωνίας (νιτροποίηση) και η απομάκρυνση των νιτρικών (απονιτροποίηση). Και οι δύο αυτές βιολογικές αντιδράσεις εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και ο ρυθμός της μεταφοράς οξυγόνου στις ρίζες των φυτών εξαρτάται από την εποχή.

➤ Απομάκρυνση Αμμωνίας (Νιτροποίηση)

Δεν υπάρχει ομοφωνία για το πόσο οξυγόνο μπορεί να προμηθευτεί στη ζώνη του ριζώματος ώστε να υποστηριχθεί η βιολογική δράση, ή για την ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου πολλών φυτικών ειδών. Υπάρχει ομοφωνία στο ότι αυτά τα είδη φυτών μεταβιβάζουν αρκετό οξυγόνο στις ρίζες τους ώστε να μπορούν να ζήσουν σε επίπεδα φυσιολογικής πίεσης. Σύμφωνα με εκτιμήσεις το οξυγόνο που απαιτείται κυμαίνεται από 5 έως 45 g O₂/ m².d της επιφανειακής έκτασης του υδροβιότοπου.

Στη νιτροποίηση με βάση το μοντέλο Reed *et al.*, 1995 η σταθερά κινητικής K_T εξαρτάται από τη θερμοκρασία και παίρνει τιμές:

Στους	0 °C:	$K_T = 0 \text{ d}^{-1}$
Στους	1-10 °C:	$K_T = K_{10}(1,15)^{(T-10)}, \text{ d}^{-1}$
Στους	10+ °C:	$K_T = K_{NH}(1,048)^{(T-20)}, \text{ d}^{-1}$

Για τεχνητούς υδροβιότοπους υποεπιφανειακής ροής υπεισέρχεται η σταθερά ρυθμού νιτροποίησης στους 20 °C K_{NH} που εξαρτάται από το ποσοστό ανάπτυξης του ριζικού συστήματος. Το r_z εκφράζεται ως δεκαδικός και κυμαίνεται από 0 έως 1, ανάλογα με το βάθος των ριζών.

$$K_{NH} = 0,01854 + 0,3922(rz)^{2,6077} \quad (2.6.1.3-1)$$

Είναι φρόνιμο να υποθέτουμε ότι όλο το TKN που εισέρχεται στον υγροβιότοπο εμφανίζεται ως αμμωνία, άρα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η συγκέντρωση εισροής της αμμωνίας (C_0) ισούται με την εισροή του TKN. Η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 0,2mg/L (WEF, 2001).

Δεν είναι σωστό να υποθέσουμε ότι η ανάπτυξη των φυτών καταλαμβάνει αυτόματα όλο τον όγκο της κλίνης, εκτός από τις περιπτώσεις πολύ ρηχών συστημάτων ($\leq 0,3m$) που χρησιμοποιούν πολύ λεπτό χαλίκι (20mm). Οι κλίνες μεγάλου βάθους ($\approx 0,6m$) απαιτούν ειδικά μέτρα, ώστε να προκληθεί και να διατηρηθεί πλήρης διείσδυση των ριζών. Στην περίπτωση που αυτά τα μέτρα δεν εφαρμοστούν, θα ήταν φρόνιμο να υποθέσουμε ότι η ανάπτυξη των φυτών καταλαμβάνει λιγότερο από το 50% του βάθους της κλίνης, εκτός κι αν οι μετρήσεις δείξουν κάτι άλλο. Επίσης, είναι αποδεδειγμένο ότι στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται για υπόστρωμα μεγάλες κροκάλες ($> 50m$), οι ρίζες των φυτών διεισδύουν βαθιά στα μεγάλα κενά διαστήματα.

➤ Απομάκρυνση Νιτρικών (Απονιτροποίηση)

Η παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιείται μόνο για τη μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά και προβλέπει την απαιτούμενη έκταση για ένα καθορισμένο επίπεδο μετατροπής. Όταν απαιτείται όμως, πραγματική απομάκρυνση του αζώτου, τότε είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η απαίτηση για απονιτροποίηση και να γίνει η διαστασιολόγηση με βάση αυτήν. Γενικά, η μεγαλύτερη ποσότητα των νιτρικών που παράγονται στο υγροβιότοπο απονιτροποιείται και μετακινείται εντός της περιοχής που προβλέπεται για τη νιτροποίηση και χωρίς συμπληρωματικές πηγές άνθρακα. Οι υγροβιότοποι FWS σε σχέση με τους υγροβιότοπους SF, είναι πιο αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση των νιτρικών εξαιτίας της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας σε άνθρακα που έχουν από την αποσάθρωση των φυτών. Παρά το γεγονός ότι οι υγροβιότοποι SF διαθέτουν μεγαλύτερη επιφανειακή έκταση για

βιολογικές αντιδράσεις, είναι κατανοητό ότι η μικρή διαθεσιμότητα σε άνθρακα στο σύστημα περιορίζει τους ρυθμούς απονιτροποίησης. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι τα δύο είδη υγροβιότοπων δρουν συγκριτικά.

Στην απονιτροποίηση με βάση το μοντέλο Reed *et al.*, 1995 η σταθερά κινητικής K_T εξαρτάται από τη θερμοκρασία και παίρνει τιμές:

$$\begin{array}{lll} \text{Στους} & 0\text{ }^{\circ}\text{C} : & K_T = 0\text{ d}^{-1} \\ \text{Στους} & 1\text{ }^{\circ}\text{C}+ : & K_T = 1,00(1,15)^{(T-20)},\text{ d}^{-1} \end{array}$$

Η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 0,2mg/L (WEF, 2001).

Είναι συντηρητικό να υποθέσουμε ότι όλη η αμμωνία που απομακρύνθηκε στο προηγούμενο βήμα εμφανίζεται ως νιτρικά. Επομένως, η συγκέντρωση εισροής C_0 των νιτρικών στην απονιτροποίηση ισούται με το άθροισμα της συγκέντρωσης εκροής C_e που προκύπτει από τη νιτροποίηση και οποιασδήποτε επιπρόσθετης συγκέντρωσης νιτρικών υπάρχει στην εισροή.

➤ Συνολική Απομάκρυνση Αζώτου

Συγκεκριμένο μοντέλο για τον υπολογισμό της συνολικής απομάκρυνσης του αζώτου δεν είναι διαθέσιμο. Η εκροή του ολικού αζώτου μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα της εναπομένουσας αμμωνίας και των νιτρικών που παραμένουν στο σύστημα.

$$\text{Εκροή TN} = C_{e(\text{αμμωνίας})} + C_{e(\text{νιτρικών})} \quad (2.6.1.3-2)$$

Η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 0,4mg/L (WEF, 2001).

2.6.1.4 Απομάκρυνση Φωσφόρου

Η απομάκρυνση του φωσφόρου δεν είναι τελείως αποτελεσματική στους υγροβιότοπους FWS και SF. Κατά τη διάρκεια του πρώτου χρόνου της επεξεργασίας, ή και περισσότερο, η απομάκρυνση του φωσφόρου μπορεί να είναι πολύ καλή, ειδικά στους υγροβιότοπους FWS, εξαιτίας της προσρόφησης πάνω στην φρέσκια επιφάνεια εδάφους, στον πυθμένα του υγροβιότοπου. Σε μεγάλες περιόδους, όμως, η απομάκρυνση του φωσφόρου μπορεί να γίνει μόνο μέσω μακροχρόνιας συσσώρευσης του ιζήματος. Η απόθεση του ιζήματος γίνεται μέσω ιζηματοποίησης με χωριστά σωματίδια, μέσω χημικής κατακρήμνισης και μέσω των οργανισμών της βλάστησης που δεν επηρεάζονται από τη γήρανση. Το ίζημα συσσωρεύεται ως τύρφη (φυτάνθρακας) μέσα και στην κορυφή της κλίνης του υγροβιότοπου SF. Ο φώσφορος συγκρατείται σε αυτό το ίζημα σαν κατακρήμνισμα σιδήρου, αλουμινίου, ή ασβεστίου(WEF, 2001).

Ο φώσφορος, συνήθως, υπάρχει στα περισσότερα δημοτικά υγρά απόβλητα σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 4 έως 15 mg/L. Στις τιμές ροής και υδραυλικών φορτίων που κάτω από φυσιολογικές συνθήκες εμφανίζονται στα συστήματα αυτά των υγροβιότοπων, είναι δυνατό να απομακρυνθεί 30-60% του φωσφόρου της εισροής. Αν τα όρια εκροής απαιτούν πολύ χαμηλή συγκέντρωση φωσφόρου (<1 mg/L), τότε η απομάκρυνση του φωσφόρου θα πρέπει να θεωρηθεί ότι αποφεύγει την πολύ μεγάλη εδαφική έκταση του υγροβιότοπου, η οποία σε άλλες περιπτώσεις θα ήταν απαραίτητη.

Εφόσον η απόθεση του ιζήματος είναι το βασικό μονοπάτι απομάκρυνσης του φωσφόρου, ο βαθμός απομάκρυνσης της μάζας είναι μια λειτουργία της επιφανειακής έκτασης του υγροβιότοπου και της συγκέντρωσης του φωσφόρου στο υγρό απόβλητο.

Η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου με βάση το μοντέλο Reed *et al.*, 1995 δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp\left(\frac{-K_p}{HLR}\right) \quad (2.6.1.4-1)$$

όπου $K_p = 2,73 \text{ mm/d} \times 0,1$

HLR= μέση ετήσια τιμή υδραυλικού φορτίου, cm/d

Η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία και η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 0,05mg/L

2.6.1.5 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

Η απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων με βάση το μοντέλο Reed *et al.*, 1995 δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{C_e}{C_o} = [1 / 1 + K_T (t / x)]^x \quad (2.6.1.5-1)$$

όπου $K_{20} = 2,6 \text{ d}^{-1}$
 $\theta = 1,19$

t = υδραυλικός χρόνος παραμονής στο σύστημα, d

x = αριθμός των κλινών του υγροβιότοπου που βρίσκονται σε σειρά

Η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 2000 cfu/100mL (WEF, 2001).

Το μοντέλο αυτό έχει δημιουργηθεί για επαμφοτερίζουσες λίμνες και θεωρείται ότι δίνει μία συντηρητική εκτίμηση για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων στους υγροβιότοπους επιφανειακής και υποεπιφανειακής ροής.

2.6.2 Μοντέλο Kadlec and Knight, 1996

Οι βασικές σχέσεις του μοντέλου Kadlec and Knight (1996) είναι οι εξής:

$$\frac{(C_e - C^*)}{(C_0 - C^*)} = \exp \frac{-K_T}{HLR_A} \quad (2.6.2-1)$$

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (2.6.2-2)$$

$$A = \frac{-Q_0}{K_T} \ln \frac{(C_e(z) - C^*)}{(C_0 - C^*)} \quad (2.6.2-3)$$

602Pro PRINT PACK Trial

όπου C_e = συγκέντρωση εκροής του ρύπου, mg/L

C_0 = συγκέντρωση εισροής του ρύπου, mg/L

C^* = συγκέντρωση υποβάθρου του ρύπου, mg/L

HLR_A = ετήσιος υδραυλικός ρυθμός φόρτισης, m/a

K_T = σταθερά κινητικής σε θερμοκρασία T, m/a

θ = θερμικός συντελεστής

K_{20} = σταθερά κινητικής στους 20 °C, m/a

A_S = συνολική επιφάνεια του υδροβιότοπου m²

Q_0 = ετήσια παροχή εισροής του υγρού αποβλήτου, m³/a

z = παράγοντας ασφαλείας

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην έκταση (areal), εξαρτάται από το υδραυλικό φορτίο ανά μονάδα έκτασης και συγκρίνεται με τα μοντέλα που βασίζονται στο χρόνο κράτησης (μοντέλο Reed *et al.*, 1995 και μοντέλο Crites and Tchobanoglous, 1998). Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) και ο υδραυλικός ρυθμός φόρτισης (HLR) συνδέονται άμεσα για ένα συγκεκριμένο σύνολο συνθηκών στον υδροβιότοπο.

Γι' αυτό το λόγο, όλα τα μοντέλα θα έπρεπε να έχουν παρόμοια αποτελέσματα, αλλά αυτό δεν ισχύει. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις διαφορετικές πηγές δεδομένων που λαμβάνουν υπόψη τους τα μοντέλα. Επίσης, στο μοντέλο Kadlec and Knight, 1996 η συγκέντρωση υποβάθρου και ο παράγοντας ασφαλείας (z) χρησιμοποιούνται εσωτερικά στο μοντέλο, ενώ τα άλλα δύο μοντέλα λαμβάνουν την συγκέντρωση υποβάθρου και τον παράγοντα ασφαλείας, ως οριακές εξωτερικές συνθήκες (WEF, 2001).

Τα Q_0 και HLR_A , όπως χρησιμοποιούνται σε αυτό το μοντέλο, είναι μόνο ο ρυθμός ροής στο σημείο εισόδου, και δεν περιλαμβάνονται ρυθμίσεις για τυχόν μεταβολές εξαιτίας απωλειών διαμέσου της εξατμισοδιαπνοής και διήθησης ή εισροών από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις.

Το πορώδες (n), το βάθος του υγρού (y) και ο χρόνος παραμονής (t) στον υγροβιότοπο δεν περιλαμβάνονται σε αυτό το μοντέλο.

Ο παράγοντας ασφαλείας (z) είναι ο λόγος της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης προς τη μέγιστη μηνιαία συγκέντρωση του ρυπαντή που μας ενδιαφέρει, όπως αποκομίζεται από τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από τους Kadlec and Knight.

Εξαιτίας της χρήσης της συγκέντρωση υποβάθρου και του παράγοντα ασφαλείας εσωτερικά σε αυτό το μοντέλο επεξεργασίας, δεν είναι εφικτός ο σχεδιασμός ενός συστήματος αρκετά μεγάλου, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μία εκροή με συγκεντρώσεις ανάλογες με τις συγκεντρώσεις υποβάθρου. Καθώς η απαιτούμενη συγκέντρωση εκροής πλησιάζει την συγκέντρωση υποβάθρου, η απαιτούμενη έκταση του υγροβιότοπου τείνει στο άπειρο (WEF, 2001)

2.6.2.1 Απομάκρυνση BOD₅

Στο μοντέλο αυτό οι παράμετροι παίρνουν τις εξής τιμές:

- Σταθερά κινητικής στους 20 °C, $K_{20} = 180\text{m/a} = 0,493\text{m/d}$
- Θερμικός συντελεστής, $\theta = 1,00$
- Θερμικός συντελεστής (για την C^*), $\theta_z = 1,00$
- Παράγοντας ασφαλείας, $z = 0,59$

Η συγκέντρωση υποβάθρου, σε mg/L, δίνεται από τη σχέση:

$$C^* = 3,5 + 0,053C_0 \quad (2.6.2.1-1)$$

Η εξίσωση υπολογισμού της έκτασης επεξεργασίας δεν μπορεί να λυθεί για τιμές εκροής BOD₅ που πλησιάζουν επίπεδα των συγκεντρώσεων υποβάθρου. Για παράδειγμα, αν επιθυμούμε μία εκροή 7 mg/L, η εισροή δεν θα μπορεί να ξεπεράσει τα 12 mg/L. Μία εκροή των 6 mg/L δεν μπορεί να επιτευχθεί (WEF, 2001).

2.6.2.2 Απομάκρυνση TSS

Στο μοντέλο των Kadlec and Knight (1996), οι παράμετροι παίρνουν τις εξής τιμές:

- Σταθερά κινητικής στους 20 °C, $K_{20} = 3000\text{m/a} = 8,219\text{m/d}$
- Θερμικός συντελεστής, $\theta = 1,00$
- Θερμικός συντελεστής (για την C^*) $[C_T^* = C_{20}^* (\theta)^{(T - 20)}]$, $\theta_z = 1,00$
- Παράγοντας ασφαλείας, $z = 0,526$

Η συγκέντρωση υποβάθρου, σε mg/L, δίνεται από τη σχέση:

$$C^* = 3,5 + 0,053C_0 \quad (2.6.2.2-1)$$

Η εξίσωση υπολογισμού της έκτασης δεν μπορεί να λυθεί για χαμηλές τιμές εκροής TSS (C_e). (WEF, 2001).

2.6.2.3 Απομάκρυνση Αζώτου

➤ Απομάκρυνση Οργανικού Αζώτου

Για τη απομάκρυνση του οργανικού αζώτου με βάση το μοντέλο Kadlec and Knight (1996), οι παράμετροι του μοντέλου παίρνουν τις εξής τιμές (WEF, 2001):

- Σταθερά κινητικής στους 20 °C, $K_{20} = 35 \text{ m/a} = 0,096 \text{ m/d}$
- Θερμικός συντελεστής, $\theta = 1,05$
- Συγκέντρωση υποβάθρου, $C'' = 1,5 \text{ (mg/L)}$
- Παράγοντας ασφαλείας, $z = 0,555$

602Pro PRINT PACK Trial

➤ Απομάκρυνση Αμμωνίας (Νιτροποίηση)

Για τη απομάκρυνση της αμμωνίας με βάση το μοντέλο Kadlec and Knight, 1996, οι παράμετροι του μοντέλου παίρνουν τις εξής τιμές (WEF, 2001):

- Σταθερά κινητικής στους 20 °C, $K_{20} = 34 \text{ m/a} = 0,093 \text{ m/d}$
- Θερμικός συντελεστής, $\theta = 1,04$
- Συγκέντρωση υποβάθρου, $C'' = 0 \text{ (mg/L)}$
- Παράγοντας ασφαλείας, $z = 0,4$

➤ Απομάκρυνση Νιτρικών (Απονιτροποίηση)

Για τη απομάκρυνση των νιτρικών με βάση το μοντέλο Kadlec and Knight, 1996, οι παράμετροι του μοντέλου παίρνουν τις εξής τιμές (WEF, 2001):

- Σταθερά κινητικής στους 20°C , $K_{20} = 50 \text{ m/a} = 0,137\text{m/d}$
- Θερμικός συντελεστής, $\theta = 1,09$
- Συγκέντρωση υποβάθρου, $C^* = 0,00 \text{ (mg/L)}$
- Παράγοντας ασφαλείας, $z = 0,400$

➤ Συνολική Απομάκρυνση Αζώτου

Για τη απομάκρυνση του ολικού αζώτου με βάση το μοντέλο Kadlec and Knight (1996), οι παράμετροι του μοντέλου παίρνουν τις εξής τιμές (WEF, 2001):

- Σταθερά κινητικής στους 20°C , $K_{20} = 27 \text{ m/a} = 0,074\text{m/d}$
- Θερμικός συντελεστής, $\theta = 1,05$
- Συγκέντρωση υποβάθρου, $C^* = 1,5 \text{ (mg/L)}$
- Παράγοντας ασφαλείας, $z = 0,625$

2.6.2.4 Απομάκρυνση Φωσφόρου

Για τη απομάκρυνση του φωσφόρου με βάση το μοντέλο Kadlec and Knight, 1996, οι παράμετροι του μοντέλου παίρνουν τις εξής τιμές (WEF, 2001):

- Σταθερά κινητικής στους 20°C , $K_{20} = 12 \text{ m/a} = 0,039\text{m/d}$
- Θερμικός συντελεστής, $\theta = 1,00$
- Συγκέντρωση υποβάθρου, $C^* = 0,02 \text{ (mg/L)}$
- Παράγοντας ασφαλείας, $z = 0,555$

2.6.2.5 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

Για τη απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων με βάση το μοντέλο Kadlec and Knight (1996), οι παράμετροι του μοντέλου παίρνουν τις εξής τιμές (WEF, 2001):

- Σταθερά κινητικής στους 20 °C, $K_{20} = 95 \text{ m/a} = 0,268\text{m/d}$
- Θερμικός συντελεστής, $\theta = 1,00$
- Συγκέντρωση υποβάθρου, $C^* = 800 \text{ cfu/100mL}$
- Παράγοντας ασφαλείας, $z = 0,333$

602Pro PRINT PACK Trial

2.6.3 Μοντέλο Crites and Tchobanoglous, 1998

Οι βασικές σχέσεις του μοντέλου Crites and Tchobanoglous, 1998 είναι οι εξής:

$$t = \frac{-\ln \frac{C_e}{C_0}}{K_T} \quad (2.6.3-1)$$

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T_w - 20)} \quad (2.6.3-2)$$

$$A_s = \frac{(Q)(t)}{(y)(n)} \quad (2.6.3-3)$$

όπου t = υδραυλικός χρόνος παραμονής στον υδροβιότοπο, d

C_e = συγκέντρωση εκροής του ρύπου, mg/L

C_0 = συγκέντρωση εισροής του ρύπου, mg/L

K_T = σταθερά κινητικής σε θερμοκρασία T_w , d⁻¹

T_w = μέση θερμοκρασία νερού μέσα στον υδροβιότοπο κατά την περίοδο που μας ενδιαφέρει, °C

θ = θερμικός συντελεστής στους 20 °C

A_s = συνολική επιφάνεια (πυθμένα) του υδροβιότοπου m²

Q = μέση παροχή στον υδροβιότοπο, m³/d = $(Q_0 + Q_e)/2$

y = μέσο βάθος νερού λεκάνης, m

n = πορώδες του υδροβιότοπου (εκφράζεται ως δεκαδικός αριθμός)

Η μικρότερη πιθανή τιμή της συγκέντρωσης εκροής του ρυπαντή (C_e) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτό το μοντέλο, είναι η εναπομένουσα συγκέντρωση υποβάθρου (WEF, 2001).

Για τη μέση τιμή της ροής μέσα στον υδροβιότοπο ισχύει ότι αναφέρθηκε στο μοντέλο Reed *et al.*, 1995.

Οι τιμές για το πορώδες, στο μοντέλο αυτό, κυμαίνονται από 0,35 έως 0,45, ενώ το μέσο βάθος του υγρού μέσα στον υγροβιότοπο κυμαίνεται από 0,46 έως 0,76m.

2.6.3.1 Απομάκρυνση BOD₅

Στο μοντέλο των Crites and Tchobanoglous, 1998 η τιμή του K_{20} ισούται με $1,104 \text{ d}^{-1}$ και ο θερμοκός συντελεστής θ ισούται με 1,06. Άρα η εξίσωση (2.6.2-2) γράφεται ως εξής:

$$K_T = 1,104 (1,06)^{(T-20)} \quad (2.6.3.1-1)$$

Η συγκέντρωση υποβάθρου κυμαίνεται από 3 έως 5 mg/L (WEF, 2001).

602Pro PRINT PACK Trial

2.6.3.2 Απομάκρυνση TSS

Η απομάκρυνση των TSS σύμφωνα με το μοντέλο των Crites and Tchobanoglous, 1998, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{C_e}{C_0} = [0,1058 + 0,0011(HLR)] \quad (2.6.3.2-1)$$

όπου HLR = υδραυλικός ρυθμός φόρτισης, $\text{mm/d} \times 0,1$

Η απομάκρυνση των TSS δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, και η συγκέντρωση που παραμένει στο σύστημα ισούται με 6mg/L (WEF, 2001).

2.6.3.3 Απομάκρυνση Αζώτου

➤ Απομάκρυνση Αμμωνίας (Νιτροποίηση)

Στη νιτροποίηση με βάση το μοντέλο Crites and Tchobanoglous, 1998 η σταθερά κινητικής K_T εξαρτάται από τη θερμοκρασία και παίρνει τιμές:

Στους	0 °C:	$K_T = 0 \text{ d}^{-1}$
Στους	20 °C:	$K_T = 0,1070(1,048)^{(T-20)}, \text{ d}^{-1}$

Η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 0,2mg/L (WEF, 2001).

➤ Απομάκρυνση Νιτρικών (Απονιτροποίηση)

602Pro PRINT PACK Trial
Στην απονιτροποίηση με βάση το μοντέλο Crites and Tchobanoglous, 1998 η σταθερά κινητικής K_T εξαρτάται από τη θερμοκρασία και παίρνει τιμές:

Στους	0 °C:	$K_T = 0 \text{ d}^{-1}$
Στους	1 °C:	$K_T = 1,00(1,15)^{(T-20)}, \text{ d}^{-1}$

Η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 0,2mg/L (WEF, 2001).

➤ Συνολική Απομάκρυνση Αζώτου

$$\text{Εκροή TN} = 0,193(C_0) + 1,55 \ln(\text{HLR}) - 1,75 \quad (2.6.3.3-1)$$

όπου C_0 = το άθροισμα της εναπομένουσας αμμωνίας και των νιτρικών

HLR = υδραυλικός ρυθμός φόρτισης, mm/d $\times 0,1$

2.6.3.4 Απομάκρυνση Φωσφόρου

Η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου με βάση το μοντέλο Crites and Tchobanoglous, 1998 δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp\left(\frac{-K_p}{HLR}\right) \quad (2.6.3.4-1)$$

όπου $K_p = 2,73 \text{ mm/d} \times 0,1$

$HLR =$ μέση ετήσια τιμή υδραυλικού φορτίου, $\text{mm/d} \times 0,1$

Η απομάκρυνση του ολικού φωσφόρου, όπως και στο μοντέλο Reed *et al.*, 1995 δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία και συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 0,05mg/L (WEF, 2001).

602Pro PRINT PACK Trial

2.6.3.5 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

Η απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων με βάση το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998 δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{C_e}{C_o} = \left[1 / 1 + K_t (t / x)\right]^x \quad (2.6.1.5-1)$$

όπου $K_{20} = 2,6 \text{ d}^{-1}$

$\theta = 1,19$

$t =$ υδραυλικός χρόνος παραμονής στο σύστημα, d

$x =$ αριθμός των κλινών του υγροβιότοπου που βρίσκονται σε σειρά

Η συγκέντρωση υποβάθρου ισούται με 2000 cfu/100mL (WEF, 2001).

Το μοντέλο αυτό έχει δημιουργηθεί για επαμφοτερίζουσες λίμνες και θεωρείται ότι δίνει μία συντηρητική εκτίμηση για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων στους υγροβιότοπους επιφανειακής και υποεπιφανειακής ροής.

Όπως παρατηρούμε στα μοντέλα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, η συγκέντρωση υποβάθρου αποτελεί εξωτερική οριακή συνθήκη για τα μοντέλα Reed *et al.*, 1995 και Crites and Tchobanoglous, 1998, ενώ στο μοντέλο Kadlec and Knight, 1996 χρησιμοποιείται εσωτερικά στις υπολογιστικές εξισώσεις.

Η διαστασιολόγηση του υγροβιότοπου πρέπει να γίνεται με βάση τον περιοριστικό παράγοντα, δηλαδή με αυτόν που απαιτεί τη μεγαλύτερη έκταση επεξεργασίας. Ο υγροβιότοπος θα πρέπει να παρέχει αποδεκτή επεξεργασία για όλες τις άλλες παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν.

Στα μοντέλα Reed *et al.*, 1995 και Crites and Tchobanoglous, 1998 είναι απαραίτητη η χρήση ενός παράγοντα ασφαλείας. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο παράγοντας αυτός εφαρμόζεται μετά από την ολοκλήρωση των προκαταρκτικών υπολογισμών. Στα συγκεκριμένα μοντέλα ο παράγοντας ασφαλείας εφαρμόζεται έπειτα από τη διαστασιολόγηση του υγροβιότοπου και κυμαίνεται από 15 έως 25%, ανάλογα με την αβεβαιότητα των διαθέσιμων δεδομένων και την αυστηρότητα της αναμενόμενης απόδοσης.

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι από τα μοντέλα Reed *et al.*, 1995 και Crites and Tchobanoglous, 1998 αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα. Η διαφορά με το μοντέλο Kadlec and Knight, 1996 οφείλεται στη χρήση του παράγοντα ασφαλείας z , εσωτερικά στο λογαριθμικό τμήμα του σχεδιαστικού μοντέλου (WEF, 2001).

2.6.4 Μοντέλο Επιβράδυνσης Crites and Tchobanoglous, 2000

Τα συμβατικά μοντέλα κινητικής πρώτης τάξης, που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των τεχνητών υγροβιότοπων, δεν είναι πάντα κατάλληλα και αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υπόγειου νερού. Με βάση την παρατήρηση της λειτουργίας τεχνητών υγροβιότοπων είναι ξεκάθαρο ότι η διανομή του μεγέθους των σωματιδίων αλλάζει με την απόσταση ή με το βαθμό της επεξεργασίας. Οι σταθεροί συντελεστές απομάκρυνσης των BOD_5 και TSS που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των τεχνητών υγροβιότοπων είναι συνολικοί εμπειρικοί φαινομενικοί συντελεστές και τις περισσότερες φορές δεν έχουν φυσική σημασία. Για το λόγο αυτό, οι Crites and Tchobanoglous έχουν προτείνει τη χρήση ενός μοντέλου, που εκφράζει το ρυθμό επιβράδυνσης για την απομάκρυνση των BOD_5 και TSS, ώστε να ερμηνεύσουν το γεγονός ότι η απόδοση της επεξεργασίας μειώνεται καθώς τα πιο ευαίσθητα συστατικά απομακρύνονται. Τα στοιχεία που υπάρχουν μέχρι τώρα για το μοντέλο αυτό δεν είναι επαρκή ώστε να είμαστε σε θέση να το χρησιμοποιήσουμε για το σχεδιασμό φυσικών συστημάτων επεξεργασίας. Για το λόγο αυτό, γίνεται μόνο θεωρητική αναφορά στο μοντέλο (Tchobanoglous *et al.*, 2000).

602Pro PRINT PACK Trial

2.6.4.1 Απομάκρυνση TSS

Σημαντικό πρόβλημα στη μοντελοποίηση της απομάκρυνσης των TSS στους τεχνητούς υγροβιότοπους αποτελεί το γεγονός ότι η διανομή του μεγέθους των σωματιδίων μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση ή με το βαθμό της επεξεργασίας. Θεωρούμε την απομάκρυνση των TSS σε έναν τεχνητό υγροβιότοπο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-11. Όπως φαίνεται στην εικόνα αυτή, ο σταθερός συντελεστής απομάκρυνσης για το τυπικό μέγεθος σωματιδίων είναι k_1 . Αν υποθέσουμε ότι τα σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους θα απομακρυνθούν όταν το υγρό απόβλητο διανύσει μια μονάδα απόστασης, τότε ο νέος σταθερός συντελεστής απομάκρυνσης για τη διανομή των σωματιδίων που απομένουν θα είναι ίσος με k_2 . Βάσει μελετών, έχει αποδειχθεί ότι το k_1 είναι μεγαλύτερο από το k_2 και ότι το k_2 θα είναι μεγαλύτερο από το k_3 και συνεχίζεται ανάλογα (Tchobanoglous *et al.*, 2000).

Εξαιτίας του ότι ο συντελεστής απομάκρυνσης των TSS μεταβάλλεται συνεχώς καθώς το υγρό απόβλητο ρέει δια μέσω του υγροβιότοπου, είναι ξεκάθαρο ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας σταθερός συντελεστής απομάκρυνσης για τη μοντελοποίηση της απομάκρυνσης των TSS. Για να ερμηνευθεί το γεγονός ότι η απόδοση της επεξεργασίας μειώνεται καθώς οι πιο ευαίσθητες συνιστώσες απομακρύνονται πρώτες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια έκφραση ρυθμού επιβράδυνσης (Tchobanoglous *et al.*, 2000).

Η τυπική μορφή του συντελεστή επιβράδυνσης πρώτης τάξης είναι η εξής:

$$k_{apparent} = \frac{k_{o(apparent)}}{(1 + R_x x)^v} = \frac{k_{o(apparent)}}{(1 + R_t t)^v} \quad (2.6.4.1-1)$$

όπου $k_{apparent}$ = φαινομενικός συντελεστής απομάκρυνσης σε χρόνο t , d^{-1}

$k_{o(apparent)}$ = αρχικός συνολικός συντελεστής απομάκρυνσης σε χρόνο $t=0$, d^{-1}

R_x = συντελεστής επιβράδυνσης που βασίζεται στην απόσταση, $1/m$

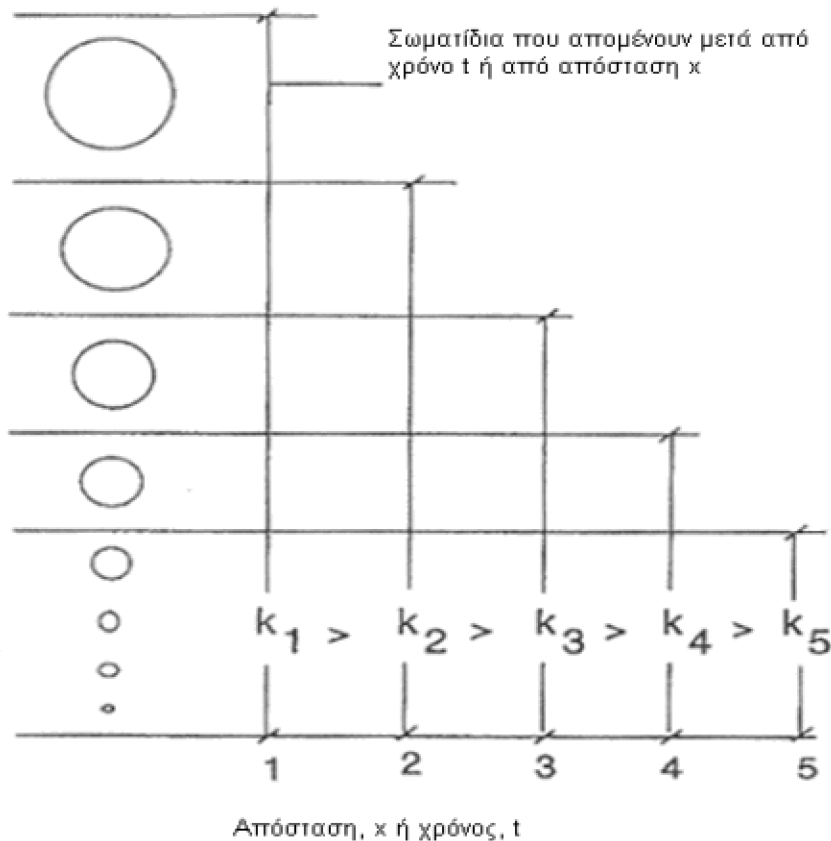
x = απόσταση, m

v = εκθέτης ανάλογος με τη συνιστώσα που απομακρύνεται (αδιάστατος)

R_t = συντελεστής επιβράδυνσης που βασίζεται στο χρόνο, $1/d$

t = χρόνος, d

602Pro PRINT PACK Trial



602Pro PRINT PACK Trial
 Εικόνα 2-11. Διανομή του μεγέθους των σωματιδίων TSS ανάλογα με το χρόνο ή την απόσταση (Tchobanoglous *et al.*, 2000).

Όταν οι τιμές των R ή n είναι ίσες με μηδέν, η τιμή του k/k_0 ισούται με 1 και ο συνολικός συντελεστής απομάκρυνσης είναι σταθερός. Για παράδειγμα, ο συνολικός συντελεστής απομάκρυνσης των TSS θα μπορούσε να είναι σταθερός, αν όλα τα TSS αποτελούνταν από σωματίδια ενός μόνο μεγέθους. Σε αυτή την περίπτωση, ο εκθέτης n ισούται με μηδέν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συμβατική κινητική έκφραση. Η σπουδαιότητα του συντελεστή επιβράδυνσης θα εξαρτηθεί από τη διανομή του μεγέθους των σωματιδίων των TSS.

Η έκφραση ενός αντιδραστήρα plug-flow, στον οποίο επέρχεται ένας συντελεστής επιβράδυνσης πρώτης τάξης, είναι η εξής (Tchobanoglous *et al.*, 2000):

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = - \int_0^t \frac{k}{(1+Rt)^n} dt \quad (2.6.4.1-1)$$

Οι ολοκληρωμένες μορφές της εξίσωσης για $v=1$ και $v \neq 1$ είναι οι εξής:

$$C = C_o \cdot \exp\left[-\frac{k}{R} \ln(1 + Rt)\right] \quad (\text{για } v=1) \quad (2.6.4.1-2)$$

$$C = C_o \cdot \exp\left[-\frac{k}{R(n-1)} \left(1 - \frac{1}{(1 + Rt)^{n-1}}\right)\right] \quad (\text{για } v \neq 1) \quad (2.6.4.1-3)$$

2.6.4.2 Απομάκρυνση BOD₅

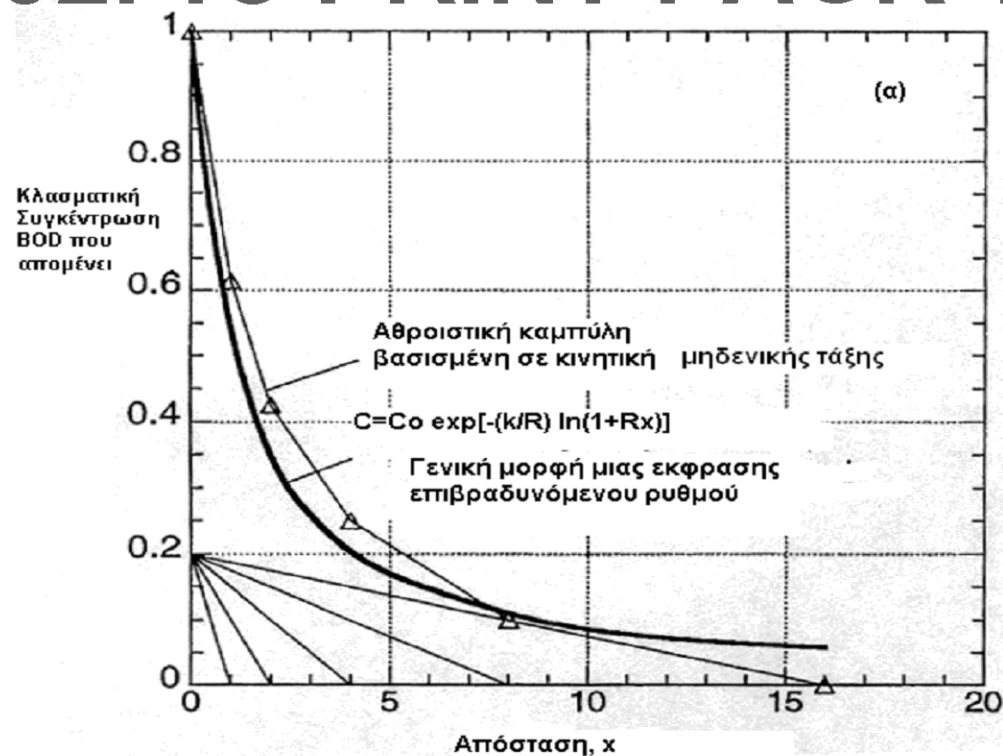
Μία από τις δυσκολίες που αντιμετωπίζεται στη μοντελοποίηση της απομάκρυνσης του BOD₅ στους τεχνητούς υγροβιότοπους, είναι το γεγονός ότι το BOD₅ της εισροής μπορεί να εμφανιστεί σε διαλυτή μορφή, σε κολλοειδή μορφή, ή ως ξεχωριστά σωματίδια. Επίσης, η απομάκρυνση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω αερόβιων, αναερόβιων ή ανοξικών βιολογικών μηχανισμών και από έναν αριθμό φυσικών μεθόδων, όπως η ιζηματοποίηση. Ως συνέπεια, η τιμή του συντελεστή απομάκρυνσης του BOD₅ θα εξαρτάται από την διανομή του μεταξύ των τριών κλασμάτων. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, η τιμή του συντελεστή απομάκρυνσης του BOD₅ μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων που κυμαίνεται από 0,01 έως 100 μm. Συμπληρωματικά, στη στήλη νερού επικρατούν ταυτόχρονα, αερόβιες και αναερόβιες / ανοξικές ζώνες.

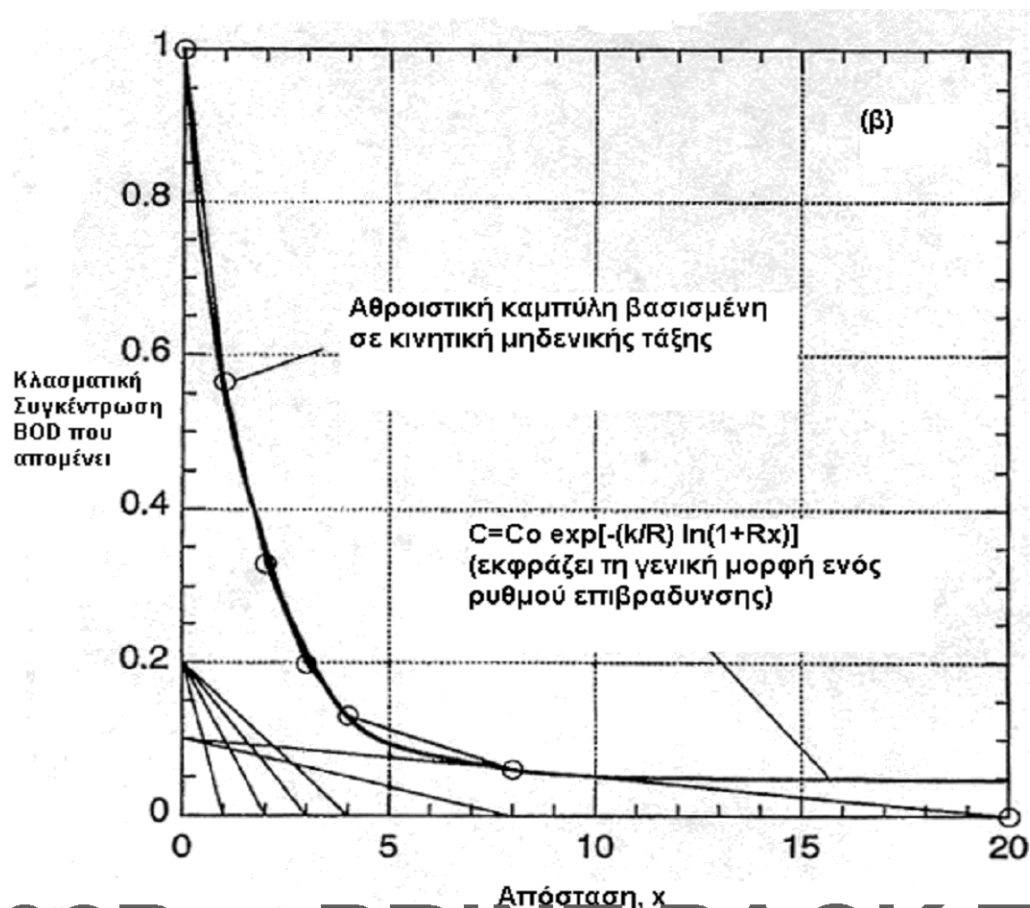
Μέχρι τώρα η απομάκρυνση του BOD₅ στους υγροβιότοπους έχει μοντελοποιηθεί σαν λειτουργία πρώτης τάξης. Παρ' όλα αυτά όμως, σύμφωνα με πιο πρόσφατες μελέτες, έχει παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής απομάκρυνσης για τις ξεχωριστές συνιστώσες που συνθέτουν το ολικό BOD₅ είναι ουσιαστικά μηδενικής τάξης, όσον αφορά τη συγκέντρωση. Τα αποτελέσματα της κινητικής πρώτης τάξης παρουσιάζεται στις εικόνες 2-12 (α) και (β). Το διάγραμμα της εικόνας 2-12(α) προκύπτει θεωρώντας ότι το BOD₅ είναι το σύνολο πέντε διαφορετικών καθαρών μειγμάτων, όπου το καθένα αποτελεί το 0,2 του ολικού BOD₅, ενώ το διάγραμμα της

εικόνας 2-12(β) προκύπτει θεωρώντας ότι το BOD₅ αποτελείται από έξι διαφορετικά μείγματα, τα τέσσερα εκ των οποίων αποτελούν το 0,2 (το καθένα) και τα υπόλοιπα δύο αποτελούν το 0,1(το καθένα) του ολικού BOD₅. Επί πλέον ο μηδενικής τάξης ρυθμός αντίδρασης για κάθε μία συνιστώσα του BOD₅, στο διάγραμμα της εικόνας 2-12(α), ακολουθεί την αναλογία 1 : 0,5 : 0,25 : 0,125 : 0,625, ενώ στο διάγραμμα της εικόνας 2-12(β), ακολουθεί την αναλογία 1 : 0,5 : 0,33 : 0, 25 : 0,125 : 0,0625. Και στις δύο περιπτώσεις, ο μηδενικής τάξης σταθερός ρυθμός των μειγμάτων που αντιδρούν ευκολότερα λαμβάνεται ίσος με 0,2/μονάδα απόστασης. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους ρυθμούς αντίδρασης, το συνολικό ποσό του BOD₅ που απομένει υπολογίζεται αθροίζοντας τα ποσά των χωριστών μειγμάτων που απομένουν σε διάφορες αποστάσεις. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν έχει σημασία αν η βιομετατροπή γίνεται αερόβια, αναερόβια ή σε συνδυασμό αυτών, γιατί το μόνο που μεταβάλλεται είναι ο ρυθμός της μετατροπής.

Οι αθροιστικές καμπύλες των διαγραμμάτων, στις εικόνες 2-12 (α) και (β), αντιπροσωπεύουν την ποσότητα του οργανικού υλικού που απομένει, ως συνάρτηση της απόστασης.

602Pro PRINT PACK Trial





Εικόνα 2-12 (α) και (β). Κλασματική συγκέντρωση BOD που απομένει συναρτήσει της απόστασης, βασισμένη στη βιομετατροπή των οργανικών συνιστωσών, με ρυθμούς αντίδρασης μηδενικής τάξης, (Tchobanoglous *et al.*, 2000).

Οι αθροιστικές καμπύλες των εικόνων 2-12 (α) και (β) μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας μία σχέση επιβράδυνσης πρώτης τάξης (εξίσωση 2.6.4.1-2). Οι καμπύλες των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται με έντονα μαύρη γραμμή. Για την εφαρμογή του ρυθμού επιβράδυνσης στη βιομετατροπή του οργανικού υλικού, ο εκθέτης n εξαρτάται από τον τύπο του οργανικού υλικού και ο συντελεστής επιβράδυνσης είναι συνάρτηση της βιομεταβλητότητας των συνιστωσών που αποτελούν το οργανικό υλικό. Αν το n είναι ίσο με μηδέν, το k/k_0 ισούται με 1 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμβατικές κινητικές σχέσεις, όπως προαναφέρθηκε στην περίπτωση των TSS.

Σε ένα ερευνητικό έργο που πραγματοποιήθηκε στο San Diego σε μία από τις λίμνες υακίνθου plug-flow, παρατηρήθηκε ότι κάτω από ένα συνδυασμό αερόβιων και αναερόβιων συνθηκών, η δευτεροβάθμια επεξεργασία επιτεύχθηκε μέσα στα πρώτα 50ft, ενώ στα υπόλοιπα 350ft της λίμνης η επεξεργασία, αν υπήρχε, ήταν ελάχιστη (εικόνα 2-13). Αν η απομάκρυνση του BOD₅ στα πρώτα 50ft περιγράφεται

με μοντέλα πρώτης τάξης, τότε ο φαινομενικός συντελεστής απομάκρυνσης για το πρώτο τμήμα του αντιδραστήρα plug-flow, θα είναι:

$$\ln \left[\frac{C}{C_o} \right] = -k_{\text{apparent}} \times t \quad (2.6.4.2-1)$$

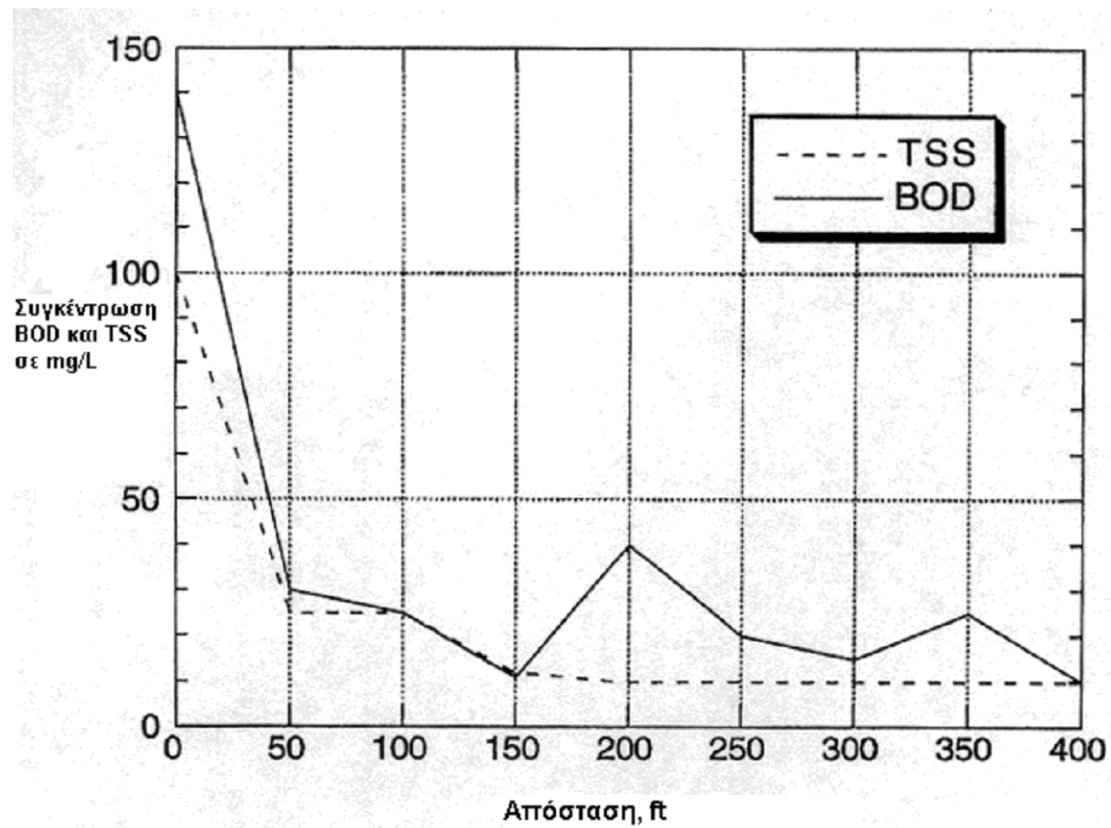
$$\ln \left[\frac{29}{140} \right] = -k_{\text{apparent}} \times 0,8\text{d} \quad \rightarrow \quad k_{\text{apparent}} = 0,197/\text{d}$$

Αν, όμως στη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η τιμή της εκροής από τη ολόκληρη τη λίμνη plug-flow, τότε η αντίστοιχη τιμή του φαινομενικού σταθερού συντελεστή απομάκρυνσης θα είναι:

$$\ln \left[\frac{12}{140} \right] = -k_{\text{apparent}} \times 6,4\text{d} \quad \rightarrow \quad k_{\text{apparent}} = 0,38/\text{d}$$

602Pro PRINT PACK Trial

Η διαφορά των δύο τιμών είναι σημαντική. Αυτό το είδος προβλήματος περνά στις πληροφορίες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία των τεχνητών υδροβιότοπων, στις οποίες ο φαινομενικός σταθερός συντελεστής απομάκρυνσης υπολογίζεται μόνο από τις τιμές εισροής – εκροής, κυρίως εκεί που στα σχεδιαστικά μοντέλα έχουν ενσωματωθεί ποικίλοι παράγοντες ασφαλείας (Tchobanoglous *et al.*, 2000).



Εικόνα 2-13. Τυπικές καμπύλες απομάκρυνσης για BOD και TSS κατά μήκος λίμνης υακίνθου plug-flow χωρίς ανακρόαση (Tchobanoglous *et al.*, 2000)

2.7 ΤΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ (ON SITE)

Τα τοπικά συστήματα ορίζονται ως σχετικά μικρές ευκολίες που εξυπηρετούν μία μόνο πηγή υγρών αποβλήτων ή μία ομάδα οικιστικών αναπτυσσόμενων μονάδων. Συνήθως το τοπικό σύστημα βρίσκεται στην ίδια τοποθεσία με την πηγή του υγρού αποβλήτου, αλλά σε μερικές περιπτώσεις η άντληση σε μία απομονωμένη περιοχή είναι απαραίτητη αν το έδαφος στην περιοχή που βρίσκεται η πηγή του υγρού αποβλήτου δεν είναι κατάλληλο. Είναι απαραίτητη η προκαταρκτική επεξεργασία με σηπτικές δεξαμενές ή με παρόμοιες συσκευές, αλλά σε μερικές περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί φυτά δευτερογενούς επεξεργασίας (Reed *et al.*, 1995). Οι υδροβιότοποι SF παρουσιάζουν πλεονεκτήματα στη χρήση τους ως τοπικά συστήματα. Η διάθεση της τελικής εκροής ενός υδροβιότοπου χρειάζεται σχεδιασμό.

Η EPA προτείνει πολλές απλουστευμένες υποθέσεις για το σχεδιασμό των τοπικών συστημάτων υδροβιότοπων (Reed *et al.*, 1995):

- Καθορισμός της ροής σχεδιασμού. Η τιμή $0,23\text{m}^3/\text{d}$ για την κατά κεφαλήν ροή είναι μία λογική υπόθεση για τα οικιστικά συστήματα. Η τιμή αυτή, βέβαια, είναι μεγάλη για τα Ελληνικά δεδομένα, ειδικά εάν πρόκειται για μικρούς αγροτικούς οικισμούς (Tsagarakis *et al.*, 2001).

- Χρήση μίας πολυτμηματικής σηπτικής δεξαμενής. Χρήση μίας δεξαμενής για μονοκατοικίες και δύο ή περισσότερες δεξαμενές σε σειρά για μεγαλύτερης κλίμακας σχέδια ($>10,000\text{-g/d}$). Ο συνολικός όγκος των δεξαμενών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιος από την καθημερινή ροή σχεδιασμού.

- Υπόθεση ότι η συγκέντρωση του BOD (C_0) που εγκαταλείπει τη σηπτική δεξαμενή είναι συντηρητική ($\geq 100\text{mg/L}$).

- Υπόθεση ότι η συγκέντρωση του BOD (C_e) στο σημείο εξόδου του υδροβιότοπου δεν υπερβαίνει τα 10mg/L .

- Χρήση βότσαλου ως υπόστρωμα επεξεργασίας στην κλίνη, μεγέθους 1,25-2,5cm με συνολικό βάθος 0,6m. Για τον σχεδιασμό υποθέτει ότι το αποτελεσματικό βάθος νερού στην κλίνη, είναι 0,55m. Λογικές εκτιμήσεις είναι: υδραυλική αγωγιμότητα $k_s=1500\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$, πορώδες $n=0,38$. Αν ένας μεγάλος αριθμός συστημάτων πρόκειται να εγκατασταθούν χρησιμοποιώντας τα ίδια υλικά, συνιστάται δοκιμή για την υδραυλική αγωγιμότητα και για το πορώδες, είτε στο πεδίο είτε στο εργαστήριο.

- Χρήση καλαμιών (Phragmites) ως προτεινόμενο είδος φυτών.
- Εκτίμηση της θερμοκρασίας του νερού στην κλίνη, που αναμένεται το χειμώνα και το καλοκαίρι. Το καλοκαίρι και στα καθ' όλο το έτος θερμά κλίματα, προτείνεται η τιμή των 20 °C. Στα ψυχρά χειμερινά κλίματα, προτείνεται ως λογική θερμοκρασία νερού στο σημείο εισόδου οι 6 °C.
- Ο καθορισμός της επιφανειακής έκτασης της κλίνης του υγροβιότοπου μπορεί να γίνει με τη χρήση της εξίσωσης :

$$A_s = (L)(W) \frac{Q \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_{ty} n} \quad (2.7-1)$$

Ως παράγοντας ασφαλείας χρησιμοποιείται η σταθερή τιμή K_{20} , η οποία είναι το 75% της θεμελιώδους τιμής (1,104 d⁻¹). Για το σχεδιασμό μικρών συστημάτων on-site, $K_{20} = 0,828 \text{ d}^{-1}$.

602Pro PRINT PACK Trial

Στους 20 °C και με τους παράγοντες που διευκρινίζονται παραπάνω, η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται ως εξής:

$$A_s = 13.31 (Q) = \text{m}^2 \quad (Q \text{ σε m}^3/\text{d})$$

Στους 6 °C:

$$A_s = 30.1 (Q) = \text{m}^2 \quad (Q \text{ σε m}^3/\text{d})$$

- Θεωρούμε την αναλογία (L:W) = 2:1 και υπολογίζουμε το μήκος και το πλάτος της κλίνης, εφόσον η επιφανειακή έκταση υπολογίστηκε προηγουμένως. Στην γενική περίπτωση, μία αναλογία (L:W) = 2:1 ή μικρότερη, με βάθος κλίνης 0,6m, θα ικανοποιήσει τους περιορισμούς του νόμου του Darcy για τον υδραυλικό σχεδιασμό της κλίνης, επομένως δεν θα απαιτούνται υδραυλικοί υπολογισμοί. Αν οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή δεν επιτρέψουν τη χρήση αναλογίας (L:W) = 2:1 βάθος κλίνης ίσο με 0,6m, τότε οι υδραυλικοί υπολογισμοί που προαναφέρθηκαν, είναι απαραίτητοι.

Αυτή η προσέγγιση θα δώσει ένα HRT περίπου 2,8 μέρες, (στους 20 °C), μέσα στην κλίνη, ο οποίος είναι περισσότερο από επαρκής για την απομάκρυνση του BOD₅ σε 10mg/L. Αν απαιτείται απομάκρυνση αζώτου 10mg/L, το μέγεθος του συστήματος θα πρέπει να διπλασιαστεί, ώστε να παράγει ένα HRT περίπου 6 μέρες. Η απομάκρυνση του αζώτου κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, στα ψυχρά κλίματα, μπορεί να απαιτεί ένα HRT περίπου 10 μέρες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, θα πρέπει να γίνουν υπολογισμοί για το χάσιμο της θερμότητας, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η κλίνη θα είναι επαρκώς προστατευμένη από την ψύξη.

- Κατασκευάζουμε την κλίνη σαν ένα μόνο κελί για μονοκατοικίες. Χρησιμοποιούμε περισσότερα κελιά (τουλάχιστο δύο) παράλληλα, για συστήματα μεγαλύτερου μεγέθους.

- Χρησιμοποιούμε λάσπη, ή άλλο συνθετικό κάλυμμα, για να αποφύγουμε το στάξιμο από την κλίνη.

- Κατασκευάζουμε την κλίνη με οριζόντιο πυθμένα και μία πολλαπλή διάτρητη εκροή στον πυθμένα της κλίνης. Ένα διάτρητο πολλαπλό σημείο εισαγωγής μερικών ιντσών, πάνω από τον πυθμένα της κλίνης, είναι επαρκές για τα περισσότερα μικρά συστήματα. Αυτές οι ζώνες των σημείων εισόδου και εξόδου θα πρέπει να χρησιμοποιούν 2,5-5cm βότσαλου για μήκος περίπου 1m και για όλο το βάθος της κλίνης.

- Η πολλαπλή εκροή θα πρέπει να συνδέεται με έναν περιστροφικό σωλήνα (stand-pipe), ή με μία εύκαμπτο λάστιχο ποτίσματος, ώστε να επιτραπεί ο έλεγχος της στάθμης του νερού μέσα στην κλίνη.

Το σύστημα, όπως περιγράφηκε παραπάνω, θα πρέπει να παράγει μία εκροή με BOD₅≤10mg/L, TSS≤10mg/L και γι' αυτό θα πρέπει να είναι κατάλληλο για εκροή, είτε στην επιφάνεια, είτε μέσα στη γη. Η άριστη ποιότητα του νερού θα επιτρέψει μία σημαντική μείωση στην έκταση της περιοχής που απαιτείται για διάθεση (Reed *et al.*, 1995).

2.8 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΤΥΠΟΥ

Τα συστήματα συνδυασμένου τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για βέλτιστο χειρισμό, ή για συστήματα που συνδυάζουν την επεξεργασία με τον εμπλουτισμό του φυσικού περιβάλλοντος.

Η κατασκευή ενός συστήματος που αποτελείται μόνο από έναν υγροβιότοπο μπορεί να μην είναι η πιο οικονομική μέθοδος για την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας νερού, όπως αυτή που απαιτείται για χαμηλά επίπεδα αμμωνίας, ολικού αζώτου, ή φωσφόρου. Ένας υγροβιότοπος μπορεί, βέβαια, να επιτύχει αυτούς τους σκοπούς, αλλά πιθανό να πρέπει να είναι πολύ μεγάλος σε μέγεθος και αντιοικονομικός. Για ένα σχέδιο αυτού του τύπου, ο σχεδιαστής θα πρέπει να συγκρίνει το κόστος του υγροβιότοπου που εξασφαλίζει πλήρη επεξεργασία, με το κόστος του συστήματος συνδυασμένου τύπου (WEF, 2001).

Στην περίπτωση της απομάκρυνσης αμμωνίας, η σύνθεση ενός υγροβιότοπου, που έχει σχεδιαστεί για να παράγει χαμηλά επίπεδα BOD₅ και TSS, μπορεί να ακολουθηθεί από μία ζώνη με μεγάλο βάθος νερού που να περιέχει φυτά καλυμμένα από το νερό ή από μια αερόβια κλίνη φιλτραρίσματος κάθετης ροής. Ένα σύστημα που σχεδιάζεται για την απομάκρυνση του ολικού αζώτου, μπορεί να περιλαμβάνει αρχικά έναν υγροβιότοπο που έχει σχεδιαστεί για απομάκρυνση BOD₅ και TSS, στη συνέχεια μία διάταξη για νιτροποίηση και τέλος έναν άλλο υγροβιότοπο. Η απομάκρυνση του φωσφόρου μπορεί να επιτευχθεί με μία παρόμοια διάταξη, που να περιλαμβάνει αρχικά έναν υγροβιότοπο που έχει σχεδιαστεί για απομάκρυνση BOD₅ και TSS, και να ακολουθεί μία αερόβια κλίνη κατακόρυφης ροής που περιέχει ένα στρώμα πλούσιο σε σίδηρο.

Τα συστήματα υγροβιότοπων με κλίνες κατακόρυφης ροής σχεδιάζονται για την απομάκρυνση BOD₅, TSS και αμμωνίας – αζώτου. Χρησιμοποιείται υπόστρωμα άμμου ή χαλικιού, και ο ρυθμός εφαρμογής είναι αρκετά αργός, ώστε να διατηρείται η ακόρεστη κατακόρυφη ροή μέσω του υποστρώματος. Αυτό επιτρέπει στο ατμοσφαιρικό οξυγόνο να διεισδύει στο σύστημα, με αποτέλεσμα η απομάκρυνση του BOD₅ και της αμμωνίας να επιτυγχάνεται με γρηγορότερο ρυθμό σε αυτό το αερόβιο περιβάλλον, από ότι στα συμβατικά συστήματα υγροβιότοπων FWS και SF. Αυτά τα συστήματα υγροβιότοπων με κλίνες κατακόρυφης ροής είναι τυπικά συστήματα πολλαπλών κλινών, με τις κλίνες τοποθετημένες παράλληλα ή σε σειρά (WEF, 2001).

Χρησιμοποιούνται, επίσης συχνά, και τα συστήματα διαλείπουσας τροφοδοσίας. Η συχνότητα της τροφοδοσίας ρυθμίζεται χρονικά έτσι ώστε η προηγούμενη εφαρμογή να έχει χρόνο να διεισδύσει μέσω της κλίνης, και τα κενά διαστήματα ξαναγεμίζονται με αέρα.

Οι κλίνες στην Ευρώπη, τυπικά φυτεύονται με *Phragmites*. Παρόλο που μπορεί να υπάρξει κάποια μεταφορά οξυγόνου από τις ρίζες, η κύρια λειτουργία των φυτών είναι η διατήρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας της κλίνης. Το ανώτερο στρώμα αυτών των κλινών είναι, συνήθως, χονδρόκοκκη άμμος και στα ψυχρά κλίματα οι σωληνώσεις διανομής είναι καλυμμένες από αυτό το στρώμα άμμου, για να τους παρέχεται θερμική προστασία.

Πολλαπλές κλίνες σε σειρά χρησιμοποιούνται συνήθως, όταν αναμένονται υψηλές συγκεντρώσεις εισροής BOD₅ και όταν απαιτούνται χαμηλά επίπεδα αμμωνιακού αζώτου.

Βελτίωση στην ποιότητα του νερού μπορεί να αναμένεται μέσω αυτών των συνδυασμένων συστημάτων και μπορεί να υπολογιστεί με τα μοντέλα που αναλύθηκαν παραπάνω (WEF, 2001).

602Pro PRINT PACK Trial

2.9 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Τα κύρια στοιχεία που πρέπει να μας απασχολούν για τη λειτουργία ενός υγροβιότοπου είναι i) η διατήρηση του επιπέδου του νερού, ii) η ομοιομορφία στην διανομή και τη συλλογή της ροής, iii) η ακεραιότητα των τάφρων, iv) η υγεία και η ανάπτυξη του σχεδιασμένου φυτικού συστήματος, v) ο έλεγχος των ενοχλητικών φυτών και ζώων και vi) η απομάκρυνση της ανεπιθύμητης βλάστησης.

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, το ξεκίνημα ενός συστήματος τεχνητού υγροβιότοπου δεν θα πρέπει να γίνει πριν περάσουν τουλάχιστο έξι εβδομάδες από την εμφύτευση της βλάστησης (WEF, 2001). Αυτή η χρονική περίοδος απαιτείται για τον εγκλιματισμό και την ανάπτυξη των φυτών. Σε πραγματικές εφαρμογές, το ξεκίνημα πολλές φορές πραγματοποιείται την επόμενη μέρα της εμφύτευσης, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή της βλάστησης και την επιβράδυνση της προσδοκούμενης απόδοσης του συστήματος.

Οι διαδικασίες του ξεκινήματος είναι απλές και περιλαμβάνουν το άνοιγμα των πυλών ή των βαλβίδων στο σημείο εισόδου, καθώς και τη ρύθμιση του επιθυμητού ύψους νερού στον υγροβιότοπο, με ρυθμιστικό φράγμα. Αν τα φυτά δεν έχουν αναπτυχθεί μέχρι ένα ύψος που να υπερβαίνει το σχεδιασμένο ύψος νερού, τότε το βάθος του νερού πρέπει να αυξηθεί βαθμιαία, καθώς τα φυτά αναπτύσσονται. Στα βόρεια κλίματα το βάθος του νερού αυξάνεται όταν αρχίσει να πέφτει αρκετά η θερμοκρασία, ώστε να εξουδετερωθεί η αναμενόμενη δημιουργία πάγου. Αν τα φυτά είναι πολύ μικρά σε ύψος, τότε αυτή η διαδικασία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί και αναγκαστικά το ξεκίνημα ή ακόμα και η εμφύτευση της βλάστησης αναβάλλονται μέχρι την επόμενη Άνοιξη.

Η περίοδος ξεκινήματος ενός υγροβιότοπου, δηλαδή η αρχική περίοδος μέχρι το σύστημα να επιτύχει τη βέλτιστη απόδοση, μπορεί να διαρκέσει από δύο (σε ψυχρά κλίματα) μέχρι και τέσσερα χρόνια, στη χειρότερη περίπτωση. Το σύστημα θα επιτύχει τη βέλτιστη απόδοση όταν η βλάστηση φτάσει σε είναι πλήρη ανάπτυξη και σταθεροποίηση. Η χρονική περίοδος που απαιτείται για να επιτευχθεί αυτό εξαρτάται από την πυκνότητα της βλάστησης και από την εποχή. Σε κλίματα χαμηλών θερμοκρασιών, αν εμφυτευτεί βλάστηση υψηλής πυκνότητας την Άνοιξη, είναι πιθανό να αναπτυχθεί πλήρως μέχρι το τέλος της δεύτερης περιόδου ανάπτυξης. Στα βόρεια κλίματα, η εμφύτευση βλάστησης μικρής πυκνότητας στο τέλος του φθινοπώρου, μπορεί να απαιτήσει τρία χρόνια ή και περισσότερο για να φτάσει σε

ισορροπία. Στα διαρκώς θερμά κλίματα η περίοδος ξεκινήματος μπορεί να είναι πιο γρήγορη.

Είναι γεγονός ότι σε πολλά συστήματα στο ξεκίνημά τους, δεν εφαρμόζεται η μακροπρόθεσμη θεμελιώδης ροή που έχει σχεδιαστεί και μπορεί να χρειαστούν αυξημένοι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής για την εξισορρόπηση της ελλιπούς φυτικής κάλυψης. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η εμφύτευση μίας βλάστησης μέτριας πυκνότητας ($\leq 1\text{m}$) θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός πυκνού φυτικού καλύμματος μέχρι το τέλος του πρώτου καλοκαιριού και έπειτα από αυτό το σημείο το σύστημα πιθανό να φτάσει τα απαιτούμενα επίπεδα εκκένωσης. Στα ψυχρά κλίματα, η εμφύτευση το φθινόπωρο, μπορεί να μην επιτύχει ισοδύναμη φυτική κάλυψη μέχρι τα μέσα καλοκαιριού του επόμενου χρόνου.

Κατά την περίοδο του ξεκινήματος ο χειριστής θα πρέπει να επιθεωρεί την περιοχή πολλές φορές την εβδομάδα, να παρακολουθεί την ανάπτυξη και την υγεία των φυτών, την ακεραιότητα των τάφρων, καθώς και την εμφάνιση των κουνουπιών (κυρίως στους υδροβιότοπους FWS) και να ρυθμίζει το ύψος του νερού ανάλογα με τις απαιτήσεις. Σε περιπτώσεις που η βλάστηση δεν αναπτύσσεται σωστά και έχουμε

602 Pro PRINT PACK Trial την εμφάνιση περιοχών χωρίς φυτική κάλυψη, η βλάστηση αυτή πρέπει να αντικατασταθεί ώστε να αποφευχθούν συνθήκες short-circuiting.

Η απόδοση της ποιότητας του νερού κατά την περίοδο ξεκινήματος δεν αντιπροσωπεύει τις μακροπρόθεσμες προσδοκίες, αν και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι καλύτερη από την αναμενόμενη (π.χ. απομάκρυνση φωσφόρου και αζώτου στους υδροβιότοπους FWS). Οι νέοι υδροβιότοποι έχουν ανανεωμένες εκτεθειμένες εδαφικές επιφάνειες και ταχέως αναπτυσσόμενη βλάστηση. Και οι δύο αυτές συνθήκες εξασφαλίζουν σύντομα, αλλά βραχυπρόθεσμα μονοπάτια απομάκρυνσης για την αμμωνία και το αμμωνιακό άζωτο. Αυτά τα συστήματα είναι πιθανό να μην φτάσουν σε ισορροπία για αυτές τις δύο παραμέτρους μέχρι το τέλος της πρώτης – δεύτερης περιόδου ανάπτυξης, και έπειτα οι συγκεντρώσεις ισορροπίας στην εκροή μπορεί να είναι υψηλότερες σε σχέση με την περίοδο ξεκινήματος.

Για το BOD₅ και τα TSS αναμένονται τα αντίθετα αποτελέσματα, καθώς οι νέοι υδροβιότοποι έχουν ελάχιστη βλάστηση και ελάχιστο υπόστρωμα για την ανάπτυξη των οργανισμών. Γι' αυτό το λόγο η απομάκρυνση του BOD₅ μπορεί να είναι οριακή και των TSS πολύ μικρή, αν αναπτύσσονται άλγη σε κάθε εκτεθειμένη επιφάνεια νερού. Η απομάκρυνση αυτών των δύο παραμέτρων αναμένεται να βελτιωθεί, καθώς το φυτικό κάλυμμα αυξάνεται σε πυκνότητα.

Η βασική υδραυλική απαίτηση είναι η διατήρηση συνθηκών ομοιόμορφης ροής. Ο χειριστής πρέπει να παρακολουθεί και να ρυθμίζει τις συσκευές στα σημεία εισόδου – εξόδου, συμπεριλαμβανόμενων των συσκευών που διαμοιράζουν τη ροή στην είσοδο και τον έλεγχο του ύψους του νερού στη έξοδο. Οι υδροβιότοποι SF είναι σχεδιασμένοι για να διατηρούν την επιφάνεια του νερού κάτω από το έδαφος, παρόλα αυτά όμως, είναι πιθανό να παρατηρηθεί μία προσωρινή επιφανειακή ροή έπειτα από την υπερφόρτωση μιας έντονης καταιγίδας. Αν αυτή η επιφανειακή ροή είναι συνεχής και μεγάλης κλίμακας, τότε ο χειριστής πρέπει να χαμηλώσει το επίπεδο του νερού κατά ένα κατάλληλο ποσό. Η επιφανειακή ροή, σε αυτά τα συστήματα, αναιρεί τον περιορισμό της έκθεσης του κοινού και μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση κουνουπιών.

Το υλικό που εισέρχεται στους υδροβιότοπους πρέπει να ελέγχεται με δειγματοληψία και, επίσης, πρέπει να ελέγχονται περιοδικά οι συνιστώσες που μας ενδιαφέρουν. Τα δεδομένα από τον έλεγχο αυτό μπορούν να συλλεχθούν και να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό της βέλτιστης λειτουργίας.

Ένας καλά σχεδιασμένος υδροβιότοπος δεν απαιτεί συγκομιδή και απομάκρυνση του καλύμματος και των υλικών των φυτών, για να επιτύχει την επιθυμητή ποιότητα νερού και να διατηρήσει τις αναμενόμενες υδραυλικές συνθήκες.

Η συγκομιδή έχει χρησιμοποιείται μόνο στους υδροβιότοπους FWS για να απαλλαχθούν από την υδραυλική αντίσταση που αναπτύσσεται στα ανεπαρκώς σχεδιασμένα συστήματα με υψηλές αναλογίες L:W, και για να ελεγχθεί η παρουσία των κουνουπιών.

Οι συσκευές εισόδου – εξόδου και ελέγχου του επιπέδου του νερού πρέπει να καθαρίζονται και να ρυθμίζονται περιοδικά. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την απομάκρυνση των υλικών από θραύσματα και τον καθαρισμό των επιφανειών των ρυθμιστικών φραγμάτων, για την απομάκρυνση της ανάπτυξης των βακτηριδίων και άλλων σωματιδίων που προκαλούν φράξιμο. Οι υπόγειες σωληνώσεις εισόδου – εξόδου πρέπει να πλένονται και να καθαρίζονται περιοδικά με μάνικες υψηλής πίεσης.

Η προσωρινή ανύψωση του επιπέδου του νερού μπορεί να ελέγξει το φώλιασμα των ζώων στις τάφρους. Επίσης, αν κριθεί απαραίτητο, μπορούν να δημιουργηθούν τοπικά κρηπιδώματα μεγάλης διαμέτρου (100-150mm). Ο παρασιτισμός των ζώων μπορεί να περιορίσει όλη τη βλάστηση του συστήματος, εξαιτίας του ότι τη χρησιμοποιούν ως πηγή τροφής ή ως υλικό για τις φωλιές τους. Σε

τέτοιες περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία ενός προγράμματος ελέγχου, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει την παγίδευση των ζώων και την απομάκρυνσή τους από το σύστημα ή ακόμα και τη θανάτωσή τους.

Σημαντικός είναι και ο έλεγχος της εμφάνισης των κουνουπιών στους υγροβιότοπους. Στα θερμά κλίματα οι υγροβιότοποι έχουν εμφυτευτεί με σπόρους ψαριού γένους *Gambusia* και κάμπιας γένους *Anisoptera*. Το ψάρι γένους *Gambusia* μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στα βόρεια κλίματα αλλά πρέπει να αποκαθίσταται κάθε χρόνο. Άλλες φυσικές μέθοδοι ελέγχου περιλαμβάνουν την κατασκευή φωλιών για τις νυχτερίδες και τα πουλιά (WEF, 2001).

602Pro PRINT PACK Trial

2.10 ΚΟΣΤΟΣ

Οι κύριοι παράγοντες δαπάνης των τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής περιλαμβάνουν το κόστος του εδάφους, της στεγανοποίησης, του μεγέθους των κλινών, καθώς και το κόστος από την απόκτηση, τη μεταφορά και την τοποθέτηση του υποστρώματος που χρησιμοποιείται.

Το κόστος των συστημάτων αυτών ανά μονάδα επιφάνειας, ανάλογα με το κόστος των τοπικών υλικών του εδάφους, μπορεί να είναι διπλάσιο σε σχέση με αυτό των τεχνητών υδροβιότοπων επιφανειακής ροής. Παρόλα αυτά όμως, ένας υδροβιότοπος SF μπορεί να μην είναι περισσότερο δαπανηρός από έναν υδροβιότοπο FWS, εξαιτίας του ότι οι υδροβιότοποι SF απαιτούν μικρότερη έκταση σε σχέση με τους υδροβιότοπους FWS για την επεξεργασία του ίδιου όγκου υγρών αποβλήτων (Reed *et al.*, 1995).

Η επιλογή της περισσότερο οικονομικά αποτελεσματικής εναλλακτικής λύσης εξαρτάται από τους στόχους της επεξεργασίας, από τη διαθεσιμότητα και το κόστος του εδάφους της περιοχής και στην περίπτωση των υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής από το κόστος του υποστρώματος (U.S. EPA, July 1993).

Τα δημοσιευμένα στοιχεία κόστους και λειτουργίας μονάδων επεξεργασίας από την Ελληνική αγορά είναι περιορισμένα, ιδιαίτερα σε σχέση με τα φυσικά συστήματα τα οποία σε λίγες μόνο περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί. Εξαίρεση αποτελεί πρόσφατη προσπάθεια συγκριτικής εκτίμησης του κόστους κατασκευής μονάδων παρατεταμένου αερισμού και τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής. Σύμφωνα με την εκτίμηση αυτή, το κανονικοποιημένο κόστος κατασκευής των συστημάτων παρατεταμένου αερισμού αυξάνει εκθετικά όσο το μέγεθος της εγκατάστασης μικραίνει, ιδιαίτερα για εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν λιγότερους από 5000 κατοίκους, ενώ το κανονικοποιημένο κόστος των τεχνητών υδροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής παραμένει σχετικά σταθερό και είναι σημαντικά χαμηλότερο για εγκαταστάσεις δυναμικότητας μικρότερης των 3.000 κατοίκων. Τα λειτουργικά κόστη για εγκαταστάσεις παρατεταμένου αερισμού δυναμικότητας 5.000 έως 20.000 κατοίκων κυμαίνονται από 45 έως 120 χιλιάδες € ετησίως.

Το κόστος λειτουργίας των φυσικών συστημάτων δεν είναι διαθέσιμο, με βάση όμως τη διεθνή εμπειρία θεωρείτο βέβαιο ότι είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό των εγκαταστάσεων παρατεταμένου αερισμού. Κατά συνέπεια, για τις μονάδες μικρού μεγέθους, τα φυσικά συστήματα παρέχουν πολύ μικρότερο κόστος επεξεργασίας

(κανονικοποιημένο ετήσιο κόστος κεφαλαίου και λειτουργικό) σε σχέση με τα συστήματα παρατεταμένου αερισμού, μικρότερο του 50% για περιοχές με ήπιο κλίμα σαν της χώρας μας, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία (Οικονομόπουλος και Οικονομοπούλου, 1999).

602Pro PRINT PACK Trial

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το μοντέλο προσομοίωσης τεχνητών υγροβιότοπων υποεπιφανειακής ροής. Οι υπολογισμοί γίνονται με τη βοήθεια του προγράμματος *Excel*. Η διαδικασία που ακολουθείται εφαρμόζεται και στα τρία μοντέλα κινητικής που έχουν προαναφερθεί (Reed et al., 1995, Kadlec & Knight, 1996, Crites & Tchobanoglous, 1998).

3.1 ΑΡΧΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Αρχικά δεχόμαστε κάποιες τιμές για τις παραμέτρους του μοντέλου, οι οποίες βασίζονται σε στοιχεία που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Έτσι δεχόμαστε τις εξής

- τιμές:
- Ημερήσια παροχή: $Q = 170 \text{ L/κατ.} \cdot d$
 - Πληθυσμός: 3.000 κάτοικοι
 - Πορώδες: $n = 0,36$
 - Βάθος νερού: $y = 0,5 \text{ m}$
 - Υδραυλική αγωγιμότητα: $k_s = 4500 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d$
 - Αύξηση βάθους που εξυπηρετεί ως διαφορικό φορτίο: $m = 0,03$
 - Αναλογία μήκους – πλάτους κλίνης $L:W = 0,75:1$
- $$\left. \begin{array}{l} Q = 170 \text{ L/κατ.} \cdot d \\ Q = 170 \text{ L/κατ.} \cdot d \times 3.000 \text{ κατ.} = \\ = 510.000 \text{ L/d} = 510 \text{ m}^3/\text{d} \end{array} \right\}$$

Δεχόμαστε επίσης ότι τα υγρά απόβλητα, πριν την εισαγωγή τους στο σύστημα του τεχνητού υγροβιότοπου, έχουν υποστεί πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30%. Επομένως η ποσότητα του υγρού αποβλήτου που εισέρχεται στον τεχνητό υγροβιότοπο ισούται με το 70% της αρχικής ποσότητας.

Ο σχεδιασμός των τεχνητών υγροβιότοπων SF γίνεται με βάση το BOD_5 , το ολικό άζωτο και τα κοπρώδη κολοβακτηρίδια. Όσον αφορά τα TSS και το φώσφορο, θεωρείται ότι αν ένας υγροβιότοπος έχει σχεδιαστεί σωστά για απομάκρυνση BOD_5 ,

ολικού αζώτου ή κοπρωδών κολοβακτηριδίων, θα παρέχει τις απαιτούμενες συγκεντρώσεις TSS και φωσφόρου στην εκροή.

Για τις συγκεντρώσεις των τριών ρύπων πριν την πρωτοβάθμια επεξεργασία, και στην εισροή και εκροή του υγροβιότοπου, δεχόμαστε τις εξής τιμές:

- BOD₅:

$$C_{BOB5} = 300 \text{ mg/L}$$

$$C_o = 210 \text{ mg/L}$$

$$C_e = 20 \text{ mg/L}$$

- Ολικό άζωτο :

$$C_{TKN} = 60 \text{ mg/L}$$

$$C_o = 42 \text{ mg/L}$$

$$C_e < 10 \text{ mg/L}$$

- Κολοβακτηρίδια:

$$C = 10^8 \text{ cfu/100mL}$$

$$C_o = 7 \cdot 10^7 \text{ cfu/100mL}$$

$$C_e = 2500 \text{ cfu/100mL}$$

602Pro PRINT PACK Trial

3.2 Βήματα Διαδικασίας Υπολογισμού του A_s

3.2.1 Απομάκρυνση BOD₅

- Υπολογίζουμε την έκταση A_s του υγροβιότοπου με βάση τη σχέση:

$$A_s = \frac{Q \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T y n} \quad (\text{για τα μοντέλα Reed et al., 1995 και Crites \& Tchobanoglous, 1998})$$

ή με βάση τη σχέση $A_s = \frac{-Q_0}{K_T} \ln \frac{(C_e(z) - C^*)}{(C_o - C^*)}$ (για το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996), σε διάφορες θερμοκρασίες ($T = 5, 10, 15, 18.5, 20, 25$ °C),

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

- Υπολογίζουμε το ελάχιστο επιτρεπτό πλάτος κλίνης με βάση τη σχέση:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q A_s}{m k_s} \right)^{0.5}$$

- Με βάση την αναλογία μήκους – πλάτους κλίνης ($L:W=0,75:1$) και την έκταση (A_s) που έχουμε υπολογίσει, βρίσκουμε το πλάτος (W) και το μήκος (L) της κλίνης:

$$A_s = L \cdot W \rightarrow A_s = 0,75W \cdot W \rightarrow$$

$$W = \left(\frac{A_s}{0,75} \right)^{0.5} \quad \text{και} \quad L = \frac{A_s}{W}$$

- Ελέγχουμε αν το πλάτος τηρεί τον περιορισμό του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους. Αν ο περιορισμός δεν τηρείται, χωρίζουμε τη μία κλίνη σε περισσότερες (όμοιες κλίνες) και επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω βήματα μέχρι να τηρηθεί ο περιορισμός. Η παροχή, κάθε φορά, θα ισούται με Q/x

όπου x είναι ο αριθμός των κλινών. Μετά από δοκιμές υπολογίστηκε ότι ο περιορισμός του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους τηρείται για δώδεκα κλίνες.

3.2.2 Απομάκρυνση Αζώτου

Για τη διαστασιολόγηση βάση του επιθυμητού βαθμού απομάκρυνσης αζώτου, για τα μοντέλα Reed et al., 1995 και Crites & Tchobanoglous, 1998, εξετάζονται ξεχωριστά η απομάκρυνση της αμμωνίας (νιτροποίηση) και η απομάκρυνση των νιτρικών (απονιτροποίηση).

➤ Απομάκρυνση Αμμωνίας (Νιτροποίηση)

- Θεωρούμε ως C_o αμμωνίας την C_o του ολικού αζώτου (42 mg/L) και ως C_e αμμωνίας θεωρούμε την τιμή $C_e = 6,5$ mg/L για το μοντέλο Reed et al., 1995 και $C_e = 27$ mg/L για το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998,

- Υπολογίζουμε την έκταση A_s του υγροβιότοπου με βάση τη σχέση:

$$A_s = \frac{Q \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T y n}, \text{ σε διάφορες θερμοκρασίες (T=5, 10, 15, 18.5, 20, 25 °C),}$$

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

- Υπολογίζουμε το ελάχιστο επιτρεπτό πλάτος κλίνης με βάση τη σχέση:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q A_s}{m k_s} \right)^{0.5}.$$

- Με βάση την αναλογία μήκους – πλάτους κλίνης (L:W=0,75:1) και την έκταση A_s που έχουμε υπολογίσει, βρίσκουμε το πλάτος W και το μήκος L της κλίνης:

$$A_s = L \cdot W \rightarrow A_s = 0,75W \cdot W \rightarrow$$

$$W = \left(\frac{A_s}{0,75} \right)^{0,5} \quad \text{και} \quad L = \frac{A_s}{W}$$

- Ελέγχουμε αν το πλάτος τηρεί τον περιορισμό του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους. Αν ο περιορισμός δεν τηρείται, χωρίζουμε τη μία κλίνη σε περισσότερες και επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω βήματα μέχρι να τηρηθεί ο περιορισμός. Μετά από δοκιμές υπολογίστηκε ότι ο περιορισμός του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους τηρείται για δώδεκα κλίνες.

- Υπολογίζουμε τον υδραυλικό χρόνο παραμονής με βάση τη σχέση:

$$t = \frac{A_s \gamma n}{Q}$$

602Pro PRINT PACK Trial

➤ Απομάκρυνση Νιτρικών (Απονιτροποίηση)

- Θεωρούμε ως συγκέντρωση εισροής C_0 νιτρικών την $C_0 - C_e$ της αμμωνίας
- Για τις θερμοκρασίες και τους υδραυλικούς χρόνους παραμονής που υπολογίστηκαν στη νιτροποίηση, υπολογίζουμε την συγκέντρωση εκροής των νιτρικών με βάση τη σχέση: $C_e = C_0 \cdot \exp(-K_T \cdot t)$

➤ Συνολική Απομάκρυνση Αζώτου

Η συγκέντρωση εκροής του ολικού αζώτου για το μοντέλο Reed et al., 1995 ισούται με: $C_{e(N)} = C_{e \text{ (Αμμωνίας)}} + C_{e \text{ (Νιτρικών)}}$.

Η συγκέντρωση εκροής του ολικού αζώτου για το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998 ισούται με: $C_{e(N)} = 0,193(C_0) + 1,55 \ln(\text{HLR}) - 1,75$

όπου: $C_0 = C_{e \text{ (Αμμωνίας)}} + C_{e \text{ (Νιτρικών)}}$ και $\text{HLR} = \frac{Q \cdot 100}{A_s}$

- Υπολογίζουμε τη συγκέντρωση εκροής του ολικού αζώτου με βάση τις παραπάνω σχέσεις. Η συγκέντρωση αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10mg/L.

- Η έκταση A_s είναι αυτή που υπολογίσαμε στην νιτροποίηση για τις διάφορες θερμοκρασίες. Για την έκταση αυτή υπολογίζουμε το ελάχιστο επιτρεπτό πλάτος κλίνης με βάση τη σχέση: $W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q A_s}{m k_s} \right)^{0,5}$.

- Με βάση την αναλογία μήκους – πλάτους κλίνης ($L:W=0,75:1$) και την έκταση (A_s) που έχουμε υπολογίσει, βρίσκουμε το πλάτος W και το μήκος L της κλίνης:

$$A_s = L \cdot W \rightarrow A_s = 0,75W \cdot W \rightarrow$$

$$W = \left(\frac{A_s}{0,75} \right)^{0,5} \quad \text{και} \quad L = \frac{A_s}{W}$$

- Ελέγχουμε αν το πλάτος τηρεί τον περιορισμό του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους. Αν ο περιορισμός δεν τηρείται, χωρίζουμε τη μία κλίνη σε περισσότερες και επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω βήματα μέχρι να τηρηθεί ο

περιορισμός. Μετά από δοκιμές υπολογίστηκε ότι ο περιορισμός του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους τηρείται για δώδεκα κλίνες.

Για το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996 η διαστασιολόγηση βάση του επιθυμητού βαθμού απομάκρυνσης αζώτου γίνεται χωρίς να εξετάζονται ξεχωριστά η απομάκρυνση της αμμωνίας (νιτροποίηση) και η απομάκρυνση των νιτρικών (απονιτροποίηση). Χρησιμοποιούνται απευθείας οι σχέσεις του μοντέλου που υπάρχουν για την απομάκρυνση του ολικού αζώτου και ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω.

3.2.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

- Υπολογίζουμε την έκταση A_s του υγροβιότοπου με βάση τη

σχέση: $A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T y n}$, (για τα μοντέλα Reed et al., 1995 και Crites & Tchobanoglous, 1998) ή με βάση τη σχέση $A_s = \frac{-Q_0}{K_T} \ln \frac{(C_e(z) - C^*)}{(C_o - C^*)}$ (για το

μοντέλο Kadlec & Knight, 1996), σε διάφορες θερμοκρασίες ($T=5, 10, 15, 18.5, 20, 25$ °C).

- Υπολογίζουμε το ελάχιστο επιτρεπτό πλάτος κλίνης με βάση τη σχέση:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q A_s}{m k_s} \right)^{0.5}.$$

- Με βάση την αναλογία μήκους – πλάτους κλίνης ($L:W=0,75:1$) και την έκταση (A_s) που έχουμε υπολογίσει, βρίσκουμε το πλάτος W και το μήκος L της κλίνης:

$$A_s = L \cdot W \rightarrow A_s = 0,75W \cdot W \rightarrow$$

$$W = \left(\frac{A_s}{0,75} \right)^{0,5} \quad \text{και} \quad L = \frac{A_s}{W}$$

- Ελέγχουμε αν το πλάτος τηρεί τον περιορισμό του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους. Αν ο περιορισμός δεν τηρείται, χωρίζουμε τη μία κλίνη σε περισσότερες και επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω βήματα μέχρι να τηρηθεί ο περιορισμός. Μετά από δοκιμές υπολογίστηκε ότι ο περιορισμός του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους τηρείται για δώδεκα κλίνες.

602Pro PRINT PACK Trial

3.3 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΛΙΝΩΝ

Από τις τιμές του εμβαδού As που υπολογίσαμε στις διάφορες θερμοκρασίες για τους τρεις ρύπους, επιλέγουμε για κάθε θερμοκρασία τη μεγαλύτερη από τις τρεις τιμές του As , έτσι ώστε το εμβαδόν αυτό να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες επεξεργασίας και των τριών ρύπων.

Με βάση τις μέγιστες αυτές τιμές του As για κάθε θερμοκρασία, ελέγχω αν τηρούνται οι περιορισμοί που θέτουν στη βιβλιογραφία τους ο Reed και οι Crites & Tchobanoglous:

- Απαιτούμενη έκταση (As/Q): $20-70 \text{ m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{d}$
- Ρυθμός υδραυλικού φορτίου (Q/As): $0,015-0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$
- Ρυθμός φορτίου BOD_5 ($Co \cdot Q/As$): $<10 \text{ kg/στρ} \cdot \text{d}$ ($=10.000 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$)

Η απαιτούμενη έκταση (As/Q) κυμαίνεται ανάμεσα στα όρια $20-70 \text{ m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{d}$. Άρα η έκταση As , για την τιμή της παροχής που έχουμε δεχθεί, πρέπει να κυμαίνεται από $20 \cdot Q$ έως $70 \cdot Q$. Στις περιπτώσεις όπου το As ξεπερνά τα όρια, διορθώνουμε την έκταση θέτοντας τις οριακές τιμές. Έτσι:

- Αν $As \cdot Q < 20 \cdot Q$: Θέτουμε $As = 20 \cdot Q$
- Αν $As \cdot Q > 70 \cdot Q$: Θέτουμε $As = 70 \cdot Q$

Με βάση τις διορθωμένες τιμές του As , που δεν υπερβαίνουν τους περιορισμούς, υπολογίζουμε το πλάτος και το μήκος της κάθε κλίνης, σε κάθε θερμοκρασία.

3.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Για να δούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η έκταση A_s του τεχνητού υγροβιότοπου καθώς το υγρό απόβλητο περνά μέσα από αυτόν, κατασκευάζουμε τα διαγράμματα της έκτασης συναρτήσει της συγκέντρωσης εκροής C_e του ρύπου, για κάθε θερμοκρασία. Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση

$C_e = C_0 \cdot \exp(-K_T \cdot t)$ για τα μοντέλα Reed et al., 1995 και Crites & Tchobanoglous, 1998, ενώ για το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996 υπολογίζεται με βάση τη σχέση

$$C_e = (C_0 - C^*) \exp \frac{-K_T}{HLR_A} + C^*.$$

Για κάθε τιμή του t ή του HLR που υπερβαίνει τους

περιορισμούς που έχουν προαναφερθεί, διορθώνουμε την τιμή του A_s , έτσι ώστε να τηρούνται.

Οι περιορισμοί που μελετάμε έχουν τεθεί από τους Reed και Crites & Tchobanoglous και τους εφαρμόζουμε και στα τρία μοντέλα. Στη βιβλιογραφία των Kadlec & Knight, όμως, δεν αναφέρονται τέτοιου είδους περιορισμοί και για το λόγο αυτό δεν ξέρουμε κατά πόσο τα αποτελέσματα που παίρνουμε με την εφαρμογή των περιορισμών αυτών στο μοντέλο των Kadlec & Knight ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Έτσι, για το μοντέλο των Kadlec & Knight, εκτός από τα διαγράμματα που κατασκευάζουμε ώστε να τηρούν τους περιορισμούς, κατασκευάζουμε και τα διαγράμματα που δεν τηρούν τους περιορισμούς (χωρίς διορθώσεις στις τιμές), για να μπορέσουμε να δούμε κατά πόσο διαφέρουν τα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ Reed et al., 1995

Οι βασικές σχέσεις του μοντέλου Reed *et al.*, 1995 είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t), \quad K_T = K_{20} \theta^{(T_w - 20)}, \quad A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T y n}$$

Για τον υδραυλικό σχεδιασμό του συστήματος χρησιμοποιούμε τις σχέσεις:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q A_s}{m k_s} \right)^{0.5}, \quad s = \frac{m \cdot y}{L}, \quad L = \frac{A_s}{W}, \quad A_c = W \cdot y$$

4.1.1 Αρχικές Παραδοχές

$$\left. \begin{array}{l} Q = 170 \text{ L/κατ.}\cdot\text{d} \\ \text{Πληθυσμός: 3.000 κάτοικοι} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} Q = 170 \text{ L/κατ.}\cdot\text{d} \times 3.000 \text{ κατ.} = \\ = 510.000 \text{ L/d} = 510 \text{ m}^3/\text{d} \end{array}$$

$$n = 0,36$$

$$y = 0,5 \text{ m}$$

$$k_s = 4500 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$$

$$m = 0,03$$

$$L:W = 0,75:1$$

Έπειτα από δοκιμές για διαφορετικούς αριθμούς κλινών, υπολογίζεται ότι ο περιορισμός του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους τηρείται για δώδεκα κλίνες, με

$$Q = \frac{510 \text{ m}^3 / \text{d}}{12 \text{ κλίνες}} = 42,5 \text{ m}^3/\text{d}$$

4.1.2 Βήματα Διαδικασίας Υπολογισμού του A_s

Αρχικά υπολογίζουμε την έκταση A_s του τεχνητού υγροβιότοπου με βάση τον κάθε ρύπο χωριστά.

4.1.2.1 Απομάκρυνση BOD_5

$$K_{20} = 1,104 \text{ d}^{-1}$$

$$\theta = 1,06$$

$$C_{BOD5} = 300 \text{ mg/L}$$

$$C_0 = 210 \text{ mg/L (έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30\%)}$$

$$C_e = 20 \text{ mg/L}$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1. Τιμές των A_s , W , L και W_{\min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση του BOD_5

$T (^{\circ}\text{C})$	$K_T (\text{d}^{-1})$	$A_s (\text{m}^2)$	$W (\text{m})$	$L (\text{m})$	$W_{\min} (\text{m})$
5	0,461	1205,195	40,086	30,065	38,957
10	0,616	900,592	34,652	25,989	33,676
15	0,825	672,975	29,955	22,466	29,111
18,5	1,012	548,818	27,051	20,288	26,289
20	1,104	502,886	25,894	19,421	25,165
25	1,477	375,785	22,384	16,788	21,753

4.1.2.2 Απομάκρυνση Αζώτου

➤ Απομάκρυνση Αμμωνίας (Νιτροποίηση)

Στους 0 °C: $K_T = 0 \text{ d}^{-1}$

Στους 1-10 °C: $K_T = K_{10}(1,15)^{(T-10)}, \text{ d}^{-1}$

Στους 10+ °C: $K_T = K_{NH}(1,048)^{(T-20)}, \text{ d}^{-1}$

$K_{NH} = 0,01854 + 0,3922(rz)^{(2,6077)}$

$rz = 0,9$

$C_{TKN} = 60 \text{ mg/L}$

$C_0 = 42 \text{ mg/L}$ (έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30%)

$C_e = 6,5 \text{ mg}$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-2.

602Pro PRINT PACK Trial

Πίνακας 4-2. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση της αμμωνίας

T (°C)	$K_T (\text{d}^{-1})$	$A_s (\text{m}^2)$	$W (\text{m})$	$L (\text{m})$	$W_{min} (\text{m})$	t (d)
5	0,098	4474,035	77,236	57,927	75,060	18,949
10	0,198	2224,386	54,460	40,845	52,925	9,421
15	0,250	1759,559	48,436	36,327	47,072	7,452
18,5	0,295	1493,273	44,621	33,466	43,364	6,324
20	0,317	1391,866	43,079	32,309	41,865	5,895
25	0,400	1101,009	38,315	28,736	37,235	4,663

➤ Απομάκρυνση Νιτρικών (Απονιτροποίηση)

Στους 0 °C: $K_T = 0 \text{ d}^{-1}$

Στους 1+ °C: $K_T = 1,00(1,15)^{(T-20)}, \text{ d}^{-1}$

$C_0 = 36,5 \text{ mg/L}$ (Θεωρώ ως C_0 των νιτρικών την $C_0 - C_e = 42\text{mg/L} - 6,5\text{mg/L}$)

Για τις παραπάνω θερμοκρασίες και για τους υδραυλικούς χρόνους παραμονής που υπολογίστηκαν στο βήμα της νιτροποίησης, υπολογίζουμε την συγκέντρωση εκροής των νιτρικών σε κάθε θερμοκρασία, με βάση τη σχέση:

$$C_e = C_0 \cdot \exp(-K_T \cdot t)$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού της C_e των νιτρικών, σε διάφορες θερμοκρασίες δίνονται στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3. Τιμές της C_e των νιτρικών σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995

T (°C)	$K_T (\text{d}^{-1})$	t (d)	$C_e (\text{mg/L})$
5	0,123	18,949	3,458
10	0,247	9,421	3,458
15	0,497	7,452	0,873
18,5	0,811	6,324	0,210
20	1,000	5,895	0,098
25	2,011	4,663	0,003

Παρατηρούμε ότι για θερμοκρασίες πάνω από 18,5 °C η τιμές του C_e είναι πολύ μικρές (μικρότερες από την $C^* = 0,2 \text{ mg/L}$).

➤ **Συνολική Απομάκρυνση Αζώτου**

Η συνολική απομάκρυνση του αζώτου δίνεται από το άθροισμα της συγκέντρωσης εκροής της αμμωνίας και της συγκέντρωσης εκροής των νιτρικών:

$C_{e(N)} = C_{e(Aμμωνίας)} + C_{e(Νιτρικών)}$. Η συγκέντρωση αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 mg/L. Το εμβαδόν A_s είναι αυτό που υπολογίστηκε στο βήμα της νιτροποίησης,

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του C_e του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-4.

Πίνακας 4-4. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για τη συνολική απομάκρυνση του αζώτου

T (°C)	C_e (mg/L)	$A_s(m^2)$	$W(m)$	$L(m)$	$W_{min} (m)$
5	9,958	4474,035	77,236	57,927	75,060
10	9,958	2224,386	54,460	40,845	52,925
15	7,373	1759,559	48,436	36,327	47,072
18,5	6,710	1493,273	44,621	33,466	43,364
20	6,598	1391,866	43,079	32,309	41,865
25	6,503	1101,009	38,315	28,736	37,235

4.1.2.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

$$K_{20} = 2,6 \text{ d}^{-1}$$

$$\theta = 1,19$$

$$C = 10^8 \text{ cfu/100mL}$$

$$C_o = 7 \cdot 10^8 \text{ cfu/100mL (έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30\%)}$$

$$C_e = 2500 \text{ cfu/100mL}$$

$$C^* = 2000 \text{ cfu/100mL}$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-5.

Πίνακας 4-5. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων

T (°C)	K_T (d ⁻¹)	A_s (m ²)	W(m)	L(m)	W_{min} (m)
5	0,191	12637,051	129,805	97,354	126,148
10	0,457	5295,548	84,028	63,021	81,661
15	1,090	2219,096	54,395	40,796	52,862
18,5	2,003	1207,151	40,119	30,089	38,989
20	2,600	929,911	35,212	26,409	34,220
25	6,205	389,679	22,794	17,096	22,152

4.1.3 Διαστασιολόγηση Κλινών

Από τις τιμές του εμβαδού A_s που υπολογίσαμε στις διάφορες θερμοκρασίες για τους τρεις ρύπους, επιλέγουμε για κάθε θερμοκρασία τη μεγαλύτερη από τις τρεις τιμές του A_s , έτσι ώστε το εμβαδόν αυτό να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες επεξεργασίας και των τριών ρυπών. Έτσι, η μεγαλύτερη τιμή του A_s για κάθε θερμοκρασία είναι η εξής:

- Στους 5 °C: $A_s = 12637,051 \text{ m}^2$
- Στους 10°C: $A_s = 5295,548 \text{ m}^2$
- Στους 15 °C: $A_s = 2219,096 \text{ m}^2$
- Στους 18,5 °C: $A_s = 1493,273 \text{ m}^2$
- Στους 20 °C: $A_s = 1391,866 \text{ m}^2$
- Στους 25 °C: $A_s = 1101,009 \text{ m}^2$

Με βάση τις μέγιστες αυτές τιμές του A_s για κάθε θερμοκρασία, ελέγχω αν τηρούνται οι εξής περιορισμοί:

- Απαιτούμενη έκταση (A_s/Q): $20\text{-}70 \text{ m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{d}$
- Ρυθμός υδραυλικού φορτίου (Q/A_s): $0,015\text{-}0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$
- Ρυθμός φορτίου BOD₅ ($C_o \cdot Q/A_s$): $<10\text{kg}/\sigma\tau\rho \cdot \text{d}$ ($=10.000\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)

4.1.3.1 Απομάκρυνση BOD₅

Πίνακας 4-6. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση του BOD₅

T (°C)	K _T (d ⁻¹)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)	As/Q (m ² /m ³ ·d)	C _o *Q/As (mg/m ² ·d)	Q/As (m ³ /m ² ·d)
5	0,461	12637,051	129,805	97,354	126,148	297,342	706,257	0,003
10	0,616	5295,548	84,028	63,021	81,661	124,601	1685,378	0,008
15	0,825	2219,096	54,395	40,796	52,862	52,214	4021,908	0,019
18,5	1,012	1493,273	44,621	33,466	43,364	35,136	5976,804	0,028
20	1,104	1391,866	43,079	32,309	41,866	32,750	6412,255	0,031
25	1,477	1101,009	38,315	28,736	37,235	25,906	8106,201	0,039

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς.

Η απαιτούμενη έκταση (As/Q) κυμαίνεται ανάμεσα στα όρια 20-70 m²/m³·d. Άρα η έκταση As, για την τιμή της παροχής που έχουμε δεχθεί, πρέπει να κυμαίνεται από 20·Q έως 70·Q, δηλαδή από 850 έως 2975 m². Στις περιπτώσεις όπου το As ξεπερνά τα όρια, διορθώνουμε την έκταση θέτοντας τις οριακές τιμές. Έτσι:

- Αν $As \cdot Q < 20 \cdot Q = 850 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 850 \text{ m}^2$
- Αν $As \cdot Q > 70 \cdot Q = 2975 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 2975 \text{ m}^2$

Με βάση τις διορθωμένες τιμές του τιμές του As, που δεν υπερβαίνουν τους περιορισμούς, υπολογίζουμε το πλάτος και το μήκος της κάθε κλίνης, καθώς και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής σε κάθε θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4-7.

Πίνακας 4-7. Διορθωμένες τιμές του As για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση του BOD₅

T (°C)	K _T (d ⁻¹)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)	As/Q (m ² /m ³ ·d)	C _o *Q/As (mg/m ² ·d)	Q/As (m ³ /m ² ·d)	t (d)
5	0,461	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	3000,000	0,015	12,600
10	0,616	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	3000,000	0,015	12,600
15	0,825	2219,096	54,395	40,796	52,862	52,214	4021,908	0,019	9,399
18,5	1,012	1493,273	44,621	33,466	43,364	35,136	5976,804	0,028	6,324
20	1,104	1391,866	43,079	32,309	41,866	32,750	6412,255	0,031	5,895
25	1,477	1101,009	38,315	28,736	37,235	25,906	8106,201	0,039	4,663

Όπως παρατηρούμε για τις διορθωμένες τιμές του As τηρούνται οι περιορισμοί.

4.1.3.2 Απομάκρυνση Αζώτου

Πίνακας 4-8. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση του αζώτου

T (°C)	K _T (d ⁻¹)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)	As/Q (m ² /m ³ ·d)	Q/As (m ³ /m ² ·d)
5	0,098	12637,051	129,805	97,354	126,148	297,342	0,003
10	0,198	5295,548	84,028	63,021	81,661	124,601	0,008
15	0,250	2219,096	54,395	40,796	52,862	52,214	0,019
18,5	0,295	1493,273	44,621	33,466	43,364	35,136	0,028
20	0,317	1391,866	43,079	32,309	41,866	32,750	0,031
25	0,400	1101,009	38,315	28,736	37,235	25,906	0,039

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς.

Στις περιπτώσεις όπου το As ξεπερνά τα όρια, διορθώνουμε την έκταση θέτοντας τις οριακές τιμές. Έτσι:

- Αν $As \cdot Q < 20 \cdot Q = 850 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 850 \text{ m}^2$
- Αν $As \cdot Q > 70 \cdot Q = 2975 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 2975 \text{ m}^2$

Με βάση τις διορθωμένες τιμές του As , που δεν υπερβαίνουν τους περιορισμούς, υπολογίζουμε το πλάτος και το μήκος της κάθε κλίνης, καθώς και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής σε κάθε θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4-9.

Πίνακας 4-9. Διορθωμένες τιμές του As για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση του αζώτου

$T (^{\circ}C)$	$K_T (d^{-1})$	$As(m^2)$	$W(m)$	$L(m)$	$W_{min} (m)$	$As/Q (m^2/m^3 \cdot d)$	$Q/As (m^3/m^2 \cdot d)$	$t (d)$
5	0,098	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	0,015	12,600
10	0,198	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	0,015	12,600
15	0,250	2219,096	54,395	40,796	52,862	52,836	0,019	9,399
18,5	0,295	1493,273	44,621	33,466	43,364	35,554	0,028	6,324
20	0,317	1391,866	43,079	32,309	41,866	33,140	0,030	5,895
25	0,400	1101,009	38,315	28,736	37,235	26,215	0,038	4,663

602Pro PRINT PACK Trial

4.1.3.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

Πίνακας 4-10. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων

$T (^{\circ}C)$	$K_T (d^{-1})$	$As(m^2)$	$W(m)$	$L(m)$	$W_{min} (m)$	$As/Q (m^2/m^3 \cdot d)$	$Q/As (m^3/m^2 \cdot d)$
5	0,191	12637,051	129,805	97,354	126,148	297,342	0,003
10	0,457	5295,548	84,028	63,021	81,661	124,601	0,008
15	1,090	2219,096	54,395	40,796	52,862	52,214	0,019
18,5	2,003	1493,273	44,621	33,466	43,364	35,136	0,028
20	2,600	1391,866	43,079	32,309	41,866	32,750	0,031
25	6,205	1101,009	38,315	28,736	37,235	25,906	0,039

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς.

Στις περιπτώσεις όπου το As ξεπερνά τα όρια, διορθώνουμε την έκταση θέτοντας τις οριακές τιμές. Έτσι:

- Αν $As \cdot Q < 20 \cdot Q = 850 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 850 \text{ m}^2$
- Αν $As \cdot Q > 70 \cdot Q = 2975 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 2975 \text{ m}^2$

Με βάση τις διορθωμένες τιμές του As , που δεν υπερβαίνουν τους περιορισμούς, υπολογίζουμε το πλάτος και το μήκος της κάθε κλίνης, καθώς και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής σε κάθε θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 4-11. Διορθωμένες τιμές του As για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων

$T (^{\circ}\text{C})$	$K_T (\text{d}^{-1})$	$As (\text{m}^2)$	$W (\text{m})$	$L (\text{m})$	$W_{\min} (\text{m})$	$As/Q (\text{m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{d})$	$Q/As (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d})$	$t (\text{d})$
5	0,191	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	0,015	12,600
10	0,457	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	0,015	12,600
15	1,090	2219,096	54,395	40,796	52,862	52,214	0,019	9,399
18,5	2,003	1493,273	44,621	33,466	43,364	35,136	0,028	6,324
20	2,600	1391,866	43,079	32,309	41,866	32,750	0,031	5,895
25	6,205	1101,009	38,315	28,736	37,235	25,906	0,039	4,663

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, υπολογίσαμε στις διαστάσεις των κλινών, έτσι ώστε να τηρούνται οι απαραίτητοι περιορισμοί. Έτσι οι τιμές που καταλήγουμε είναι οι εξής:

Πίνακας 4-12. Διαστάσεις κλινών που τηρούν τους περιορισμούς σύμφωνα με το μοντέλο Reed et al., 1995, για την απομάκρυνση και των τριών ρύπων

T (°C)	As (m ²)	L (m)	W (m)
5	2975,000	47,236	62,981
10	2975,000	47,236	62,981
15	2219,096	40,796	54,395
18,5	1493,273	33,466	44,621
20	1391,866	32,309	43,079
25	1101,009	28,736	38,315

Για να μπορούν να καλυφθούν οι απαιτήσεις επεξεργασίας σε όλες τις θερμοκρασίες θα πρέπει οι κλίνες να κατασκευαστούν με τις μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτές που έχουν υπολογιστεί στις διάφορες θερμοκρασίες

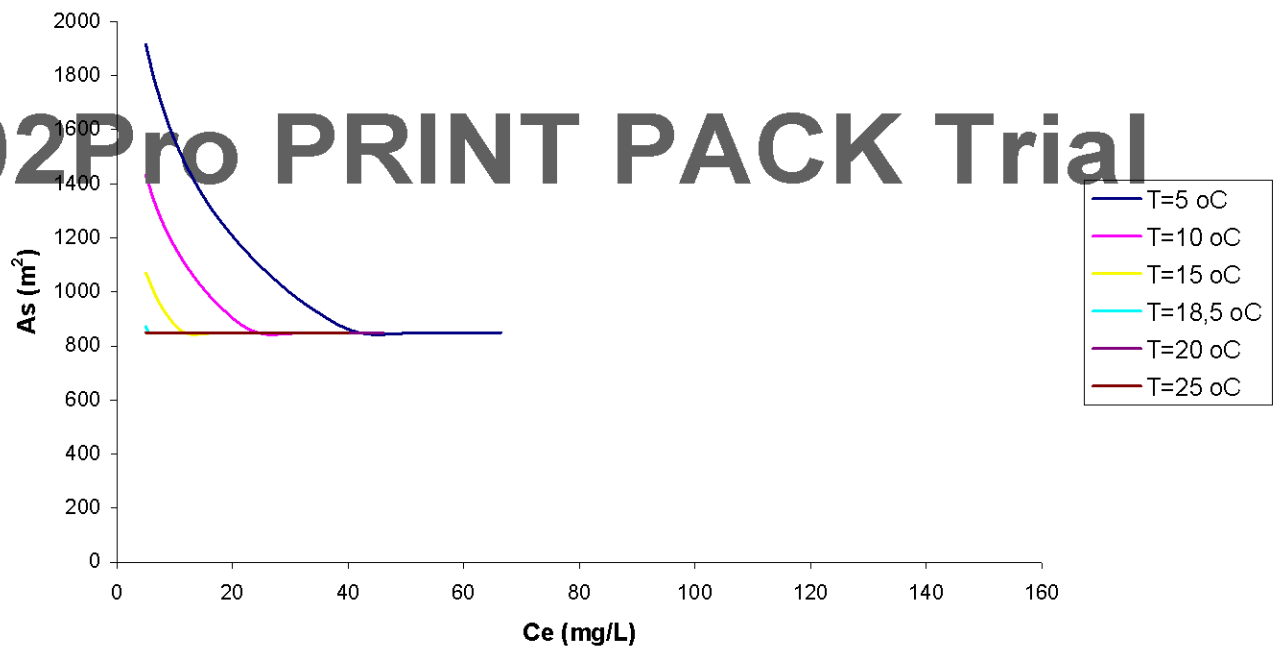
Επομένως, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, θα πρέπει να κατασκευαστούν 12 όμοιες κλίνες με διαστάσεις $A_s = 2975\text{m}^2$, $L = 47,236\text{m}$ και $W = 62,981\text{ m}$.

602Pro PRINT PACK Trial

4.1.4. Διαγράμματα

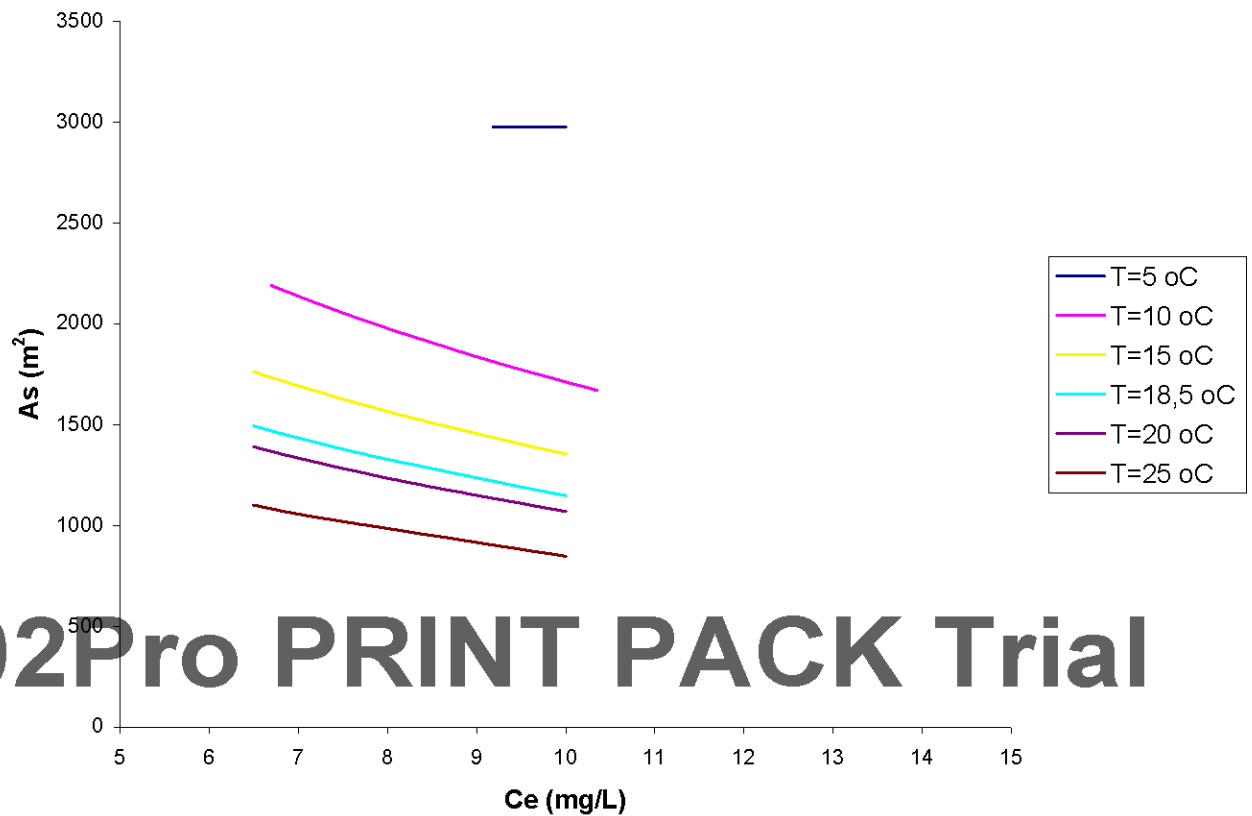
Για να δούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η έκταση A_s του τεχνητού υγροβιότοπου καθώς το υγρό απόβλητο περνά μέσα από αυτόν, κατασκευάζουμε τα διαγράμματα της έκτασης συναρτήσει της συγκέντρωσης εκροής C_e του ρύπου, για κάθε θερμοκρασία. Οι τιμές των διαγραμμάτων και ο υπολογισμός τους, παρουσιάζονται αναλυτικά σε πίνακες στο Παράρτημα.

4.1.4.1 Απομάκρυνση BOD_5



Διάγραμμα 4-1. Μεταβολή του A_s συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Reed et al., 1995

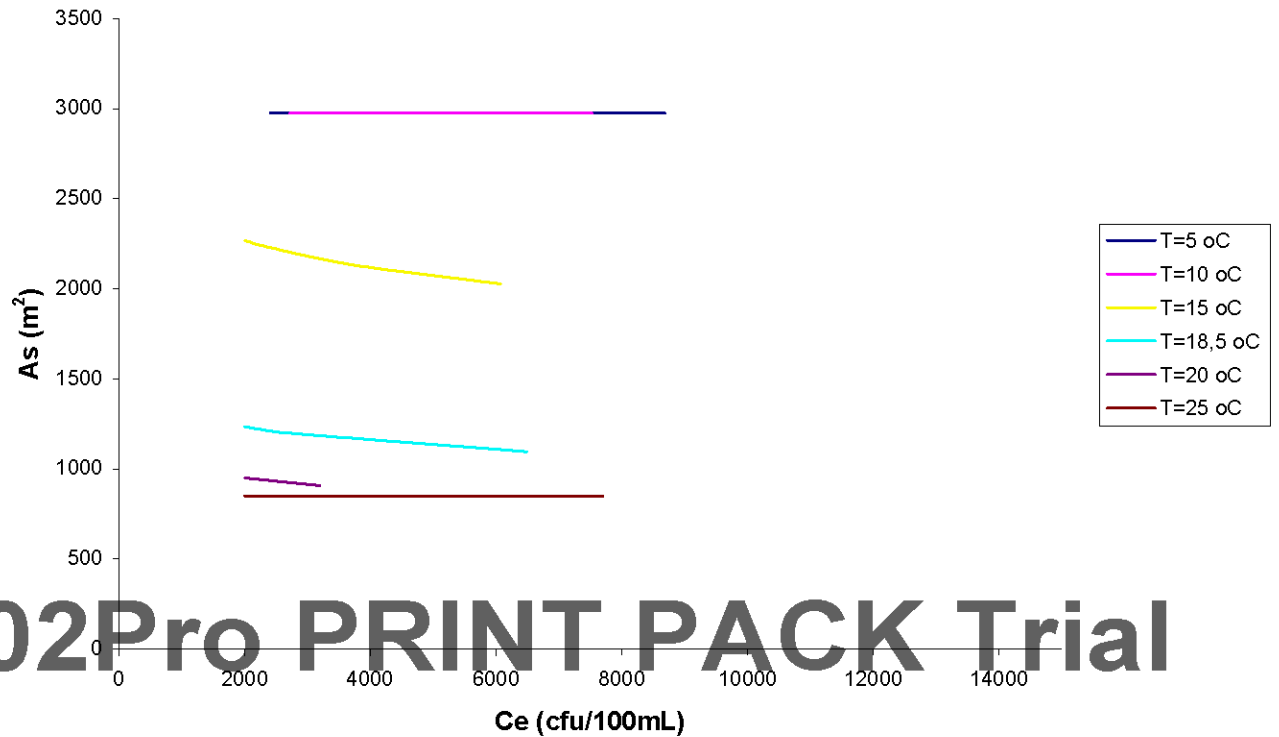
4.1.4.2 Απομάκρυνση Αζώτου



602Pro PRINT PACK Trial

Διάγραμμα 4-2. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Reed et al., 1995

4.1.4.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων



Διάγραμμα 4-3. Μεταβολή του A_s συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Reed et al., 1995

4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ Kadlec & Knight, 1996

Οι βασικές σχέσεις του μοντέλου Kadlec & Knight, 1996 είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{(C_e - C^*)}{(C_0 - C^*)} = \exp \frac{-K_T}{HLR_A}, \quad K_T = K_{20} \theta^{(T_w - 20)}, \quad A_s = \frac{-Q_0}{K_T} \ln \frac{(C_e(z) - C^*)}{(C_0 - C^*)}$$

Για τον υδραυλικό σχεδιασμό του συστήματος χρησιμοποιούμε τις σχέσεις:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{QA_s}{mk_s} \right)^{0,5}, \quad s = \frac{m \cdot y}{L}, \quad L = \frac{A_s}{W}, \quad A_c = W \cdot y$$

602Pro PRINT PACK Trial

4.2.1 Αρχικές Παραδοχές

$$\left. \begin{array}{l} Q = 170 \text{ L/κατ.} \cdot \text{d} \\ \text{Πληθυσμός: 3.000 κάτοικοι} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} Q = 170 \text{ L/κατ.} \cdot \text{d} \times 3.000 \text{ κατ.} = \\ = 510.000 \text{ L/d} = 510 \text{ m}^3/\text{d} \end{array}$$

$$n = 0,36$$

$$y = 0,5 \text{ m}$$

$$k_s = 4500 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$$

$$m = 0,03$$

$$L:W = 0,75:1$$

Έπειτα από δοκιμές για διαφορετικούς αριθμούς κλινών, υπολογίζεται ότι ο περιορισμός του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους τηρείται για δώδεκα κλίνες, με

$$Q = \frac{510 \text{ m}^3 / \text{d}}{12 \text{ κλίνες}} = 42,5 \text{ m}^3/\text{d}$$

4.2.2 Βήματα Διαδικασίας Υπολογισμού του A_s

Αρχικά υπολογίζουμε την έκταση A_s του τεχνητού υγροβιότοπου με βάση τον κάθε ρύπο χωριστά.

4.2.2.1 Απομάκρυνση BOD_5

$$K_{20} = 0,493 \text{ m/d}$$

$$\theta = 1,00$$

$$z = 0,59$$

$$C_{BOD5} = 300 \text{ mg/L}$$

$$C_o = 210 \text{ mg/L (έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30\%)}$$

$$C_e = 28,5 \text{ mg/L}$$

$$C^* = 3,5 + 0.053 (C_o), \text{ mg/L}$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-13.

Πίνακας 4-13. Τιμές των A_s , W , L και W_{\min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση του BOD_5

$T (^{\circ}C)$	$K_T (d^{-1})$	$A_s(m^2)$	$W(m)$	$L(m)$	$W_{\min} (m)$
5	0,493	387,233	22,722	17,042	22,082
10	0,493	387,233	22,722	17,042	22,082
15	0,493	387,233	22,722	17,042	22,082
18,5	0,493	387,233	22,722	17,042	22,082
20	0,493	387,233	22,722	17,042	22,082
25	0,493	387,233	22,722	17,042	22,082

4.2.2.2 Απομάκρυνση Αζώτου

$$K_{20} = 0,074 \text{ m/d}$$

$$\theta = 1,05$$

$$z = 0,625$$

$$C_{TKN} = 60 \text{ mg/L}$$

$$C_0 = 42 \text{ mg/L (έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30\%)}$$

$$C_e = 9 \text{ mg/L}$$

$$C^* = 1,5 \text{ mg/L}$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-14.

Πίνακας 4-14. Τιμές των A_s , W , L και W_{\min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση του αζώτου

T (°C)	K_T (d ⁻¹)	A_s (m ²)	W (m)	L (m)	W_{\min} (m)
5	0,036	2728,340	60,314	45,236	58,615
10	0,045	2137,726	53,388	40,041	51,884
15	0,058	1674,964	47,258	35,443	45,926
18,5	0,069	1412,027	43,390	32,543	42,168
20	0,074	1312,378	41,831	31,373	40,652
25	0,094	1028,283	37,028	27,771	35,984

4.2.2.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

$$K_{20} = 0,260 \text{ m/d}$$

$$\theta = 1,00$$

$$z = 0,333$$

$$C = 10^8 \text{ cfu/100mL}$$

$$C_0 = 7 \cdot 10^8 \text{ cfu/100mL (έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30\%)}$$

$$C_e = 2500 \text{ cfu/100mL}$$

$$C^* = 800 \text{ cfu/100mL}$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-15.

Πίνακας 4-15. Τιμές των A_s , W , L και W_{\min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων

$T (^{\circ}\text{C})$	$K_T (\text{d}^{-1})$	$A_s (\text{m}^2)$	$W (\text{m})$	$L (\text{m})$	$W_{\min} (\text{m})$
5	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759
10	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759
15	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759
18,5	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759
20	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759
25	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759

4.2.3 Διαστασιολόγηση Κλινών

602Pro PRINT PACK Trial

Από τις τιμές του εμβαδού A_s που υπολογίσαμε στις διάφορες θερμοκρασίες για τους τρεις ρύπους, επιλέγουμε για κάθε θερμοκρασία τη μεγαλύτερη από τις τρεις τιμές του A_s , έτσι ώστε το εμβαδόν αυτό να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες επεξεργασίας και των τριών ρύπων. Έτσι, η μεγαλύτερη τιμή του A_s για κάθε θερμοκρασία είναι η εξής:

- Στους 5°C : $A_s = 2728,340 \text{ m}^2$
- Στους 10°C : $A_s = 2381,210 \text{ m}^2$
- Στους 15°C : $A_s = 2381,210 \text{ m}^2$
- Στους $18,5^{\circ}\text{C}$: $A_s = 2381,210 \text{ m}^2$
- Στους 20°C : $A_s = 2381,210 \text{ m}^2$
- Στους 25°C : $A_s = 2381,210 \text{ m}^2$

Με βάση τις μέγιστες αυτές τιμές του As για κάθε θερμοκρασία, ελέγχουμε αν τηρούνται οι εξής περιορισμοί:

- Απαιτούμενη έκταση (As/Q): $20-70 \text{ m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{d}$
- Ρυθμός υδραυλικού φορτίου (Q/As): $0,015-0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$
- Ρυθμός φορτίου BOD_5 ($C_o \cdot Q/As$): $<10 \text{ kg}/\text{στρ} \cdot \text{d}$ ($=10.000 \text{ mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)

4.2.3.1 Απομάκρυνση BOD_5

Πίνακας 4-16. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση του BOD_5

T (°C)	K_T (d^{-1})	$As(\text{m}^2)$	$W(\text{m})$	$L(\text{m})$	$W_{\min}(\text{m})$	As/Q ($\text{m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)	$C_o \cdot Q/As$ ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)	Q/As ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)	$t(\text{d})$	$HLR(\text{m}/\text{d})$
5	0,493	2728,340	60,314	45,236	58,615	64,196	3271,220	0,016	11,555	1,558
10	0,493	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	3748,094	0,018	10,085	1,785
15	0,493	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	3748,094	0,018	10,085	1,785
18,5	0,493	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	3748,094	0,018	10,085	1,785
20	0,493	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	3748,094	0,018	10,085	1,785
25	0,493	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	3748,094	0,018	10,085	1,785

Παρατηρούμε ότι η σταθερά κινητικής K_T δεν μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και επίσης ότι οι περιορισμοί τηρούνται.

4.2.3.2 Απομάκρυνση Αζώτου

Πίνακας 4-17. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση του αζώτου

T (°C)	K _T (d ⁻¹)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)	As/Q (m ² /m ³ ·d)	Q/As (m ³ /m ² ·d)	t (d)	HLR(m/d)
5	0,036	2728,340	60,314	45,236	58,615	64,196	0,016	11,555	1,558
10	0,045	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785
15	0,058	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785
18,5	0,069	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785
20	0,074	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785
25	0,094	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785

Παρατηρούμε ότι οι περιορισμοί τηρούνται, επομένως δεν χρειάζεται να κάνουμε διορθώσεις στην έκταση.

602Pro PRINT PACK Trial

4.2.3.3 Απομάκρυνση Κολοβακτηριδίων

Πίνακας 4-18. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων

T (°C)	K _T (d ⁻¹)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)	As/Q (m ² /m ³ ·d)	Q/As (m ³ /m ² ·d)	t (d)	HLR(m/d)
5	0,260	2728,340	60,314	45,236	58,615	64,196	0,016	11,555	1,558
10	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785
15	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785
18,5	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785
20	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785
25	0,260	2381,210	56,347	42,260	54,759	56,028	0,018	10,085	1,785

Παρατηρούμε ότι η σταθερά κινητικής K_T δεν μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και επίσης ότι οι περιορισμοί τηρούνται.

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, υπολογίσαμε στις διαστάσεις των κλινών, έτσι ώστε να τηρούνται οι απαραίτητοι περιορισμοί. Έτσι οι τιμές που καταλήγουμε είναι οι εξής:

Πίνακας 4-19. Διαστάσεις κλινών που τηρούν τους περιορισμούς σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, για την απομάκρυνση και των τριών ρύπων

T (°C)	As (m ²)	L (m)	W (m)
5	2728,340	45,236	60,314
10	2381,210	42,260	56,347
15	2381,210	42,260	56,347
18,5	2381,210	42,260	56,347
20	2381,210	42,260	56,347
25	2381,210	42,260	56,347

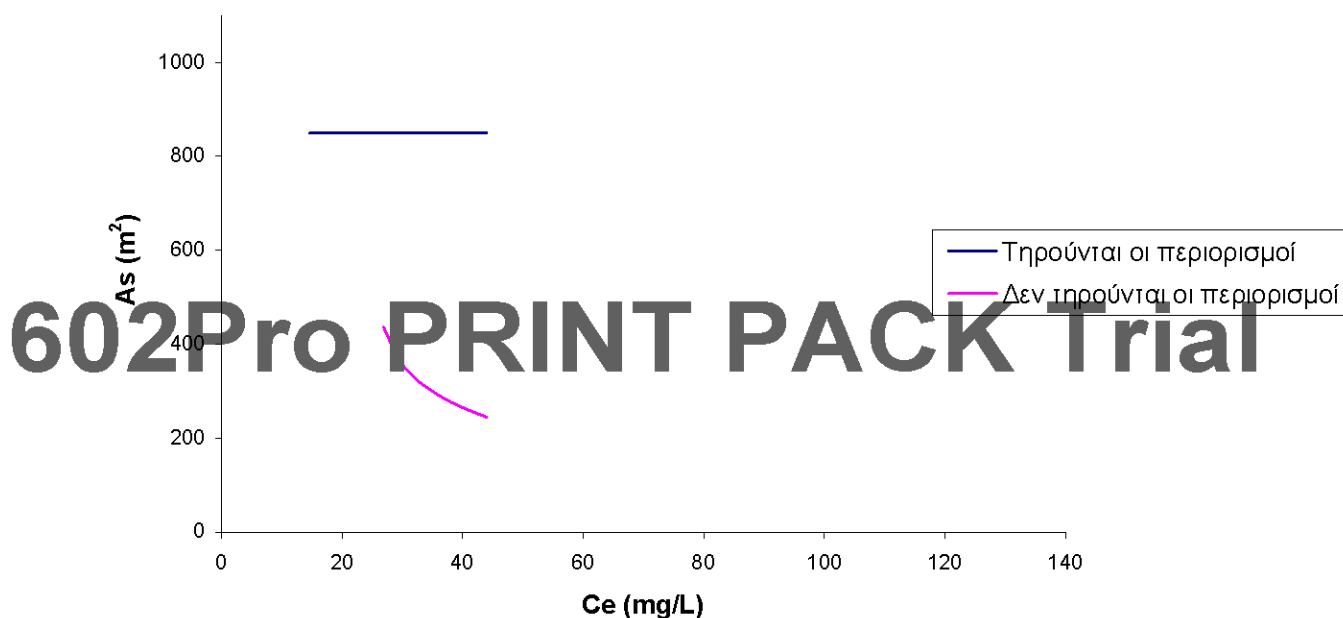
Για να μπορούν να καλυφθούν οι απαιτήσεις επεξεργασίας σε όλες τις θερμοκρασίες, θα πρέπει οι κλίνες να κατασκευαστούν με τις μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτές που έχουν υπολογιστεί στις διάφορες θερμοκρασίες

Επομένως, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, θα πρέπει να κατασκευαστούν 12 όμοιες κλίνες με διαστάσεις $A_s = 2728,340\text{m}^2$, $L = 45,236\text{m}$ και $W = 60,314\text{m}$.

4.2.4. Διαγράμματα

Για να δούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η έκταση A_s του τεχνητού υγροβιότοπου καθώς το υγρό απόβλητο περνά μέσα από αυτόν, κατασκευάζουμε τα διαγράμματα της έκτασης συναρτήσει της συγκέντρωσης εκροής C_e του ρύπου, για κάθε θερμοκρασία. Οι τιμές των διαγραμμάτων και ο υπολογισμός τους, παρουσιάζονται αναλυτικά σε πίνακες στο Παράρτημα.

4.2.4.1 Απομάκρυνση BOD_5



Διάγραμμα 4-4. Μεταβολή του A_s συναρτήσει της C_e του BOD_5 (ανεξάρτητο της θερμοκρασίας) με βάση το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996

Παρατηρούμε ότι με βάση την απομάκρυνση του BOD_5 , η έκταση σχεδιασμού του υγροβιότοπου παρουσιάζει μεγάλη διαφορά στις περιπτώσεις που τηρούνται ή όχι οι περιορισμοί των Reed και Crites & Tchobanoglous. Στην περίπτωση που τηρούνται οι περιορισμοί, η έκταση A_s είναι σταθερή και παίρνει την τιμή της ελάχιστης επιτρεπτής έκτασης ενώ στην περίπτωση όπου δεν τηρούνται οι περιορισμοί, η έκταση μειώνεται καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση εκροής και παίρνει τιμές μικρότερες από την ελάχιστη επιτρεπτή έκταση που προτείνουν οι Reed και Crites & Tchobanoglous.

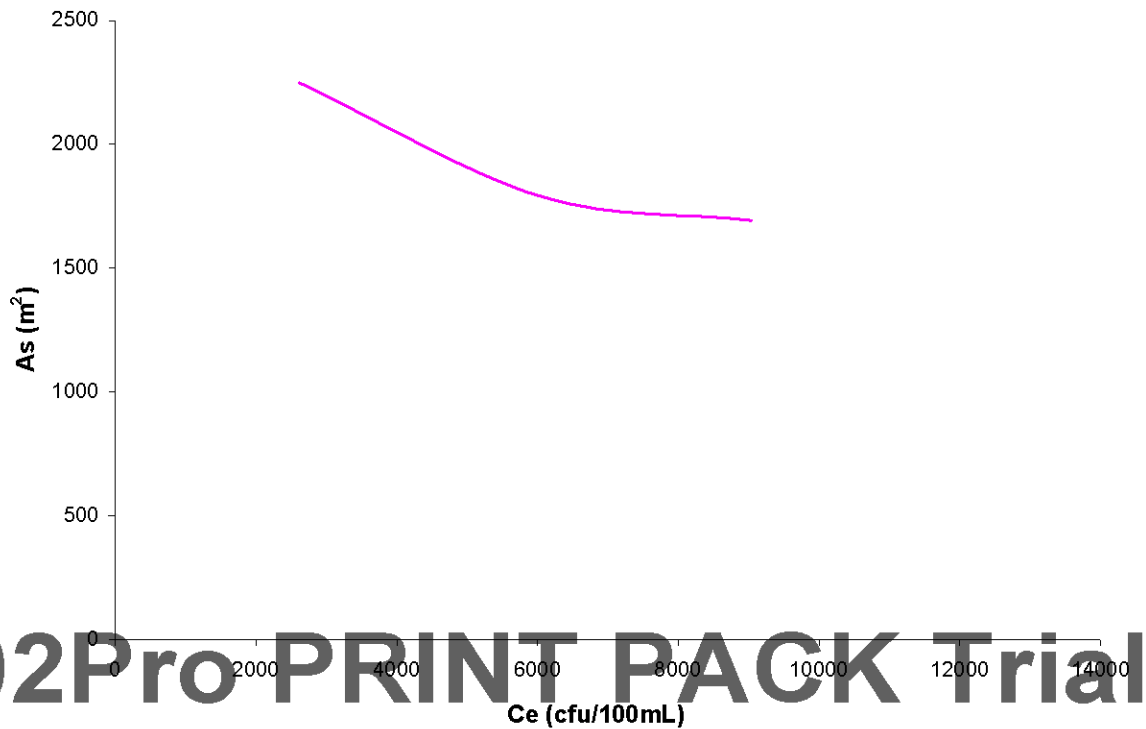
4.2.4.2 Απομάκρυνση Αζώτου



Διάγραμμα 4-5. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996

Με βάση την απομάκρυνση του αζώτου, τα διαγράμματα της μεταβολής του As του υδροβιότοπου συναρτήσει της C_e είναι τα ίδια, είτε τηρούνται οι περιορισμοί των Reed και Crites & Tchobanoglous είτε όχι. Αυτό συμβαίνει γιατί με τη διόρθωση των τιμών της C_e , ώστε να τηρείται ο περιορισμός $C_e < 10\text{ mg/L}$, οι τιμές της έκτασης που προκύπτουν δεν υπερβαίνουν τους περιορισμούς, επομένως δεν απαιτούν διόρθωση.

4.2.4.2 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων



Διάγραμμα 4-6. Μεταβολή του A_s συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων (ανεξάρτητο της θερμοκρασίας) με βάση το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996

Με βάση την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, τα διαγράμματα της μεταβολής του A_s του υγροβιότοπου συναρτήσει της C_e είναι οι τιμές των διαγραμμάτων είναι οι ίδιες, είτε τηρούνται οι περιορισμοί των Reed και Crites & Tchobanoglous είτε όχι.

4.3 MONTEΛΟ Crites & Tchobanoglous, 1998

Οι βασικές σχέσεις του μοντέλου Crites & Tchobanoglous, 1998 είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t), \quad K_T = K_{20} \theta^{(T_w - 20)}, \quad A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T y n}$$

Για τον υδραυλικό σχεδιασμό του συστήματος χρησιμοποιούμε τις σχέσεις:

$$W = \frac{1}{y} \left(\frac{Q A_s}{m k_s} \right)^{0.5}, \quad s = \frac{m \cdot y}{L}, \quad L = \frac{A_s}{W}, \quad A_c = W \cdot y$$

4.3.1 Αρχικές Παραδοχές

602Pro PRINT PACK Trial

Δεδομένα:

$$\left. \begin{array}{l} Q = 170 \text{ L/κατ.} \cdot \text{d} \\ \text{Πληθυσμός: } 3.000 \text{ κάτοικοι} \end{array} \right\} \begin{array}{l} Q = 170 \text{ L/κατ.} \cdot \text{d} \times 3.000 \text{ κατ.} = \\ = 510.000 \text{ L/d} = 510 \text{ m}^3/\text{d} \end{array}$$

$$n = 0,36$$

$$y = 0,5 \text{ m}$$

$$k_s = 4500 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$$

$$m = 0,03$$

$$L:W = 0,75:1$$

Έπειτα από δοκιμές για διαφορετικούς αριθμούς κλινών, υπολογίζεται ότι ο περιορισμός του ελάχιστου επιτρεπτού πλάτους τηρείται για δώδεκα κλίνες, με

$$Q = \frac{510 \text{ m}^3 / \text{d}}{12 \text{ κλίνες}} = 42,5 \text{ m}^3/\text{d}$$

4.3.2 Βήματα Διαδικασίας Υπολογισμού του A_s

Αρχικά υπολογίζουμε την έκταση A_s του τεχνητού υγροβιότοπου με βάση τον κάθε τύπο χωριστά.

4.3.2.1 Απομάκρυνση BOD_5

$$K_{20} = 1,104 \text{ d}^{-1}$$

$$\theta = 1,06$$

$$C_{BOD5} = 300 \text{ mg/L}$$

$$C_0 = 210 \text{ mg/L (έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30\%)}$$

$$C_e = 20 \text{ mg/L}$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-20.

Πίνακας 4-20. Τιμές των A_s , W , L και W_{\min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του BOD_5

$T (^{\circ}\text{C})$	$K_T (\text{d}^{-1})$	$A_s (\text{m}^2)$	$W (\text{m})$	$L (\text{m})$	$W_{\min} (\text{m})$
5	0,461	1205,195	40,086	30,065	38,957
10	0,616	900,592	34,652	25,989	33,676
15	0,825	672,975	29,955	22,466	29,111
18,5	1,012	548,818	27,051	20,288	26,289
20	1,104	502,886	25,894	19,421	25,165
25	1,477	375,785	22,384	16,788	21,753

4.3.2.2 Απομάκρυνση Αζώτου

➤ Απομάκρυνση Αμμωνίας (Νιτροποίηση)

Στους 0 °C: $K_T = 0 \text{ d}^{-1}$

Στους 20 °C+: $K_T = 0,1070(1,048)^{(T-20)}, \text{ d}^{-1}$

$C_{TKN} = 60 \text{ mg/L}$

$C_0 = 42 \text{ mg/L}$ (έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30%)

$C_e = 27 \text{ mg/L}$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-21.

Πίνακας 4-21. Τιμές των A_s , W , L και W_{min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση της αμμωνίας

T (°C)	$K_T (\text{d}^{-1})$	$A_s (\text{m}^2)$	$W (\text{m})$	$L (\text{m})$	$W_{min} (\text{m})$	$t (\text{d})$
5	0,053	1969,744	51,248	38,436	49,804	8,342
10	0,067	1558,129	45,580	34,185	44,295	6,599
15	0,085	1232,528	40,539	30,404	39,396	5,220
18,5	0,100	1046,002	37,345	28,009	36,293	4,430
20	0,107	974,968	36,055	27,041	35,039	4,129
25	0,135	771,230	32,067	24,050	31,164	3,266

➤ Απομάκρυνση Νιτρικών (Απονιτροποίηση)

Στους 0 °C: $K_T = 0 \text{ d}^{-1}$

Στους 1+ °C: $K_T = 1,00(1,15)^{(T-20)}, \text{ d}^{-1}$

$C_0 = 15 \text{ mg/L}$ (Θεωρώ ως C_0 των νιτρικών την $C_0 - C_e = 42 \text{ mg/L} - 27 \text{ mg/L}$)

Για τις παραπάνω θερμοκρασίες και για τους υδραυλικούς χρόνους παραμονής που υπολογίστηκαν στο βήμα της νιτροποίησης, υπολογίζουμε την συγκέντρωση εκροής των νιτρικών σε κάθε θερμοκρασία, με βάση τη σχέση:

$$C_e = C_0 \cdot C_e \cdot \exp(-K_T \cdot t)$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του C_e του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-22.

Πίνακας 4-22. Τιμές της C_e των νιτρικών σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998

$T (^{\circ}C)$	$K_T (d^{-1})$	$t (d)$	$C_e (mg/L)$
5	0,123	8,342	5,381
10	0,247	6,599	2,935
15	0,497	5,220	1,119
18,5	0,811	4,430	0,413
20	1,000	4,129	0,241
25	2,011	3,266	0,021

Παρατηρούμε ότι για θερμοκρασίες πάνω από $20^{\circ}C$ η τιμές του C_e είναι πολύ μικρές (μικρότερες από την $C^* = 0,2 \text{ mg/L}$).

602Pro PRINT PACK Trial

> Συνολική Απομάκρυνση Αζώτου

Η συνολική απομάκρυνση του αζώτου δίνεται από τη σχέση:
 $C_{e(N)} = 0,193(C_o) + 1,55 \ln(HLR) - 1,75$, όπου $C_o = C_{e(\text{Αμμωνίας})} + C_{e(\text{Νιτρικών})}$. Η συγκέντρωση αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 mg/L . Το εμβαδόν A_s είναι αυτό που υπολογίστηκε στο βήμα της νιτροποίησης.

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του C_e του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-23.

Πίνακας 4-23. Τιμές των A_s , W , L και W_{\min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για τη συνολική απομάκρυνση του αζώτου

T (°C)	Ce (mg/L)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)
5	9,260	1969,744	51,248	38,436	49,804
10	9,152	1558,129	45,580	34,185	44,295
15	9,165	1232,528	40,539	30,404	39,396
18,5	9,283	1046,002	37,345	28,009	36,293
20	9,359	974,968	36,055	27,041	35,039
25	9,679	771,230	32,067	24,050	31,164

4.3.2.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

$$K_{20} = 2,6 \text{ d}^{-1}$$

$$\theta = 1,19$$

$$C = 10^8 \text{ cfu/100mL}$$

$$C_0 = 7 \cdot 10^8 \text{ cfu/100mL (έπειτα από πρωτοβάθμια επεξεργασία απόδοσης 30\%)}$$

$$C_e = 2500 \text{ cfu/100mL}$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού του A_s και των επιτρεπτών τιμών των W και L δίνονται στον Πίνακα 4-24.

Πίνακας 4-24. Τιμές των A_s , W , L και W_{\min} σε διάφορες θερμοκρασίες σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων

T (°C)	K _T (d ⁻¹)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)
5	0,191	12637,051	129,805	97,354	126,148
10	0,457	5295,548	84,028	63,021	81,661
15	1,090	2219,096	54,395	40,796	52,862
18,5	2,003	1207,151	40,119	30,089	38,989
20	2,600	929,911	35,212	26,409	34,220
25	6,205	389,679	22,794	17,096	22,152

4.3.3 Διαστασιολόγηση Κλινών

Από τις τιμές του εμβαδού As που υπολογίσαμε στις διάφορες θερμοκρασίες για τους τρεις ρύπους, επιλέγουμε για κάθε θερμοκρασία τη μεγαλύτερη από τις τρεις τιμές του As , έτσι ώστε το εμβαδόν αυτό να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες επεξεργασίας και των τριών ρύπων. Έτσι, η μεγαλύτερη τιμή του As για κάθε θερμοκρασία είναι η εξής:

- Στους 5 °C: $As = 12637,051 \text{ m}^2$
- Στους 10 °C: $As = 5295,548 \text{ m}^2$
- Στους 15 °C: $As = 1219,096 \text{ m}^2$
- Στους 18,5 °C: $As = 1207,151 \text{ m}^2$
- Στους 20 °C: $As = 974,968 \text{ m}^2$
- Στους 25 °C: $As = 771,230 \text{ m}^2$

Με βάση τις μέγιστες αυτές τιμές του As για κάθε θερμοκρασία, ελέγχω αν τηρούνται οι εξής περιορισμοί:

- Απαιτούμενη έκταση (As/Q): $20-70 \text{ m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{d}$
- Ρυθμός υδραυλικού φορτίου (Q/As): $0,015-0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$
- Ρυθμός φορτίου BOD_5 ($C_0 \cdot Q/As$): $<10 \text{ kg/στρ} \cdot \text{d}$ ($=10.000 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$)

4.3.3.1 Απομάκρυνση BOD₅

Πίνακας 4-25. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του BOD₅

T (°C)	K _T (d ⁻¹)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)	As/Q (m ² /m ³ ·d)	C _o *Q/As (mg/m ² ·d)	Q/As (m ³ /m ² ·d)
5	0,461	12637,051	129,805	97,354	126,148	297,342	706,257	0,003
10	0,616	5295,548	84,028	63,021	81,661	124,601	1685,378	0,008
15	0,825	1219,096	40,317	30,238	39,181	28,685	7320,999	0,035
18,5	1,012	1207,151	40,119	30,089	38,989	28,404	7393,441	0,035
20	1,104	974,968	36,055	27,041	35,039	22,940	9154,147	0,044
25	1,477	771,230	32,067	24,050	31,164	18,147	11572,423	0,055

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς.

Η απαιτούμενη έκταση (As/Q) κυμαίνεται ανάμεσα στα όρια 20-70 m²/m³·d. Άρα η έκταση As, για την τιμή της παροχής που έχουμε δεχθεί, πρέπει να κυμαίνεται από 20·Q έως 70·Q, δηλαδή από 850 έως 2975 m². Στις περιπτώσεις όπου το As ξεπερνά τα όρια, διορθώνουμε την έκταση θέτοντας τις οριακές τιμές. Έτσι:

- Αν As·Q < 20·Q = 850 m²: Θέτουμε As = 850 m²
- Αν As·Q > 70·Q = 2975 m²: Θέτουμε As = 2975 m²

Με βάση τις διορθωμένες τιμές του τιμές του As, που δεν υπερβαίνουν τους περιορισμούς, υπολογίζουμε το πλάτος και το μήκος της κάθε κλίνης, καθώς και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής σε κάθε θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4-26.

Πίνακας 4-26. Διορθωμένες τιμές του As για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του BOD₅

T (°C)	K _T (d ⁻¹)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)	As/Q (m ² /m ³ ·d)	C _o *Q/As (mg/m ² ·d)	Q/As (m ³ /m ² ·d)	t (d)
5	0,461	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	3000,000	0,015	12,600
10	0,616	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	3000,000	0,015	12,600
15	0,825	1219,096	40,317	30,238	39,181	28,685	7320,999	0,035	5,163
18,5	1,012	1207,151	40,119	30,089	38,989	28,404	7393,441	0,035	5,113
20	1,104	974,968	36,055	27,041	35,039	22,940	9154,147	0,044	4,129
25	1,477	850,000	33,665	25,249	32,717	20,000	10500,000	0,050	3,600

Όπως παρατηρούμε για τις διορθωμένες τιμές του As τηρούνται οι περιορισμοί.

4.3.3.2 Απομάκρυνση Αζώτου

Πίνακας 4-27. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του αζώτου

T (°C)	K _T (d ⁻¹)	As(m ²)	W(m)	L(m)	W _{min} (m)	As/Q (m ² /m ³ ·d)	Q/As (m ³ /m ² ·d)
5	0,098	12637,051	129,805	97,354	126,148	297,342	0,003
10	0,198	5295,548	84,028	63,021	81,661	124,601	0,008
15	0,250	1219,096	40,317	30,238	39,181	28,685	0,035
18,5	0,295	1207,151	40,119	30,089	38,989	28,404	0,035
20	0,317	974,968	36,055	27,041	35,039	22,940	0,044
25	0,400	771,230	32,067	24,050	31,164	18,147	0,055

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς.

Στις περιπτώσεις όπου το As ξεπερνά τα όρια, διορθώνουμε την έκταση θέτοντας τις οριακές τιμές. Έτσι:

- Αν $As \cdot Q < 20 \cdot Q = 850 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 850 \text{ m}^2$
- Αν $As \cdot Q > 70 \cdot Q = 2975 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 2975 \text{ m}^2$

Με βάση τις διορθωμένες τιμές του As , που δεν υπερβαίνουν τους περιορισμούς, υπολογίζουμε το πλάτος και το μήκος της κάθε κλίνης, καθώς και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής σε κάθε θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4-28.

Πίνακας 4-28. Διορθωμένες τιμές του As για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση του αζώτου

T (°C)	$K_T (d^{-1})$	$As(m^2)$	W(m)	L(m)	$W_{min} (m)$	$As/Q (m^2/m^3 \cdot d)$	$Q/As (m^3/m^2 \cdot d)$	t (d)	HLR(m/d)
5	0,098	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	0,015	12,600	1,429
10	0,198	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	0,015	12,600	1,429
15	0,250	1219,096	40,317	30,238	39,181	29,026	0,034	5,163	3,486
18,5	0,295	1207,151	40,119	30,089	38,989	28,742	0,035	5,113	3,521
20	0,317	974,968	36,055	27,041	35,039	23,214	0,043	4,129	4,359
25	0,400	850,000	33,665	25,249	32,717	20,000	0,049	3,600	5,000

602Pro PRINT PACK Trial

4.3.3.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

Πίνακας 4-29. Έλεγχος τήρησης των περιορισμών, σε διάφορες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων

T (°C)	$K_T (d^{-1})$	$As(m^2)$	W(m)	L(m)	$W_{min} (m)$	$As/Q (m^2/m^3 \cdot d)$	$Q/As (m^3/m^2 \cdot d)$
5	0,191	12637,051	129,805	97,354	126,148	297,342	0,003
10	0,457	5295,548	84,028	63,021	81,661	124,601	0,008
15	1,090	1219,096	40,317	30,238	39,181	28,685	0,035
18,5	2,003	1207,151	40,119	30,089	38,989	28,404	0,035
20	2,600	974,968	36,055	27,041	35,039	22,940	0,044
25	6,205	771,230	32,067	24,050	31,164	18,147	0,055

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς.

Στις περιπτώσεις όπου το As ξεπερνά τα όρια, διορθώνουμε την έκταση θέτοντας τις οριακές τιμές. Έτσι:

- Αν $As \cdot Q < 20 \cdot Q = 850 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 850 \text{ m}^2$
- Αν $As \cdot Q > 70 \cdot Q = 2975 \text{ m}^2$: Θέτουμε $As = 2975 \text{ m}^2$

Με βάση τις διορθωμένες τιμές του As , που δεν υπερβαίνουν τους περιορισμούς, υπολογίζουμε το πλάτος και το μήκος της κάθε κλίνης, καθώς και τον υδραυλικό χρόνο παραμονής σε κάθε θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4-30.

Πίνακας 4-30. Διορθωμένες τιμές του As για τις οποίες τηρούνται οι περιορισμοί, σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων

$T (^{\circ}\text{C})$	$K_T (\text{d}^{-1})$	$As (\text{m}^2)$	$W (\text{m})$	$L (\text{m})$	$W_{\min} (\text{m})$	$As/Q (\text{m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{d})$	$Q/As (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d})$	$t (\text{d})$
5	0,191	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	0,015	12,600
10	0,457	2975,000	62,981	47,236	61,207	70,000	0,015	12,600
15	1,090	1219,096	40,317	30,238	39,181	28,685	0,035	5,163
18,5	2,003	1207,151	40,119	30,089	38,989	28,404	0,035	5,113
20	2,600	974,968	36,055	27,041	35,039	22,940	0,044	4,129
25	6,205	850,000	33,665	25,249	32,717	20,000	0,050	3,600

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, υπολογίσαμε στις διαστάσεις των κλινών, έτσι ώστε να τηρούνται οι απαραίτητοι περιορισμοί. Έτσι οι τιμές που καταλήγουμε είναι οι εξής:

Πίνακας 4-31. Διαστάσεις κλινών που τηρούν τους περιορισμούς σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998, για την απομάκρυνση και των τριών ρύπων

T (°C)	As (m ²)	L (m)	W (m)
5	2975,000	47,236	62,981
10	2975,000	47,236	62,981
15	1219,096	30,238	40,317
18,5	1207,151	30,089	40,119
20	974,968	27,041	36,055
25	850,000	25,249	33,665

Για να μπορούν να καλυφθούν οι απαιτήσεις επεξεργασίας σε όλες τις θερμοκρασίες, θα πρέπει οι κλίνες να κατασκευαστούν με τις μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτές που έχουν υπολογιστεί στις διάφορες θερμοκρασίες

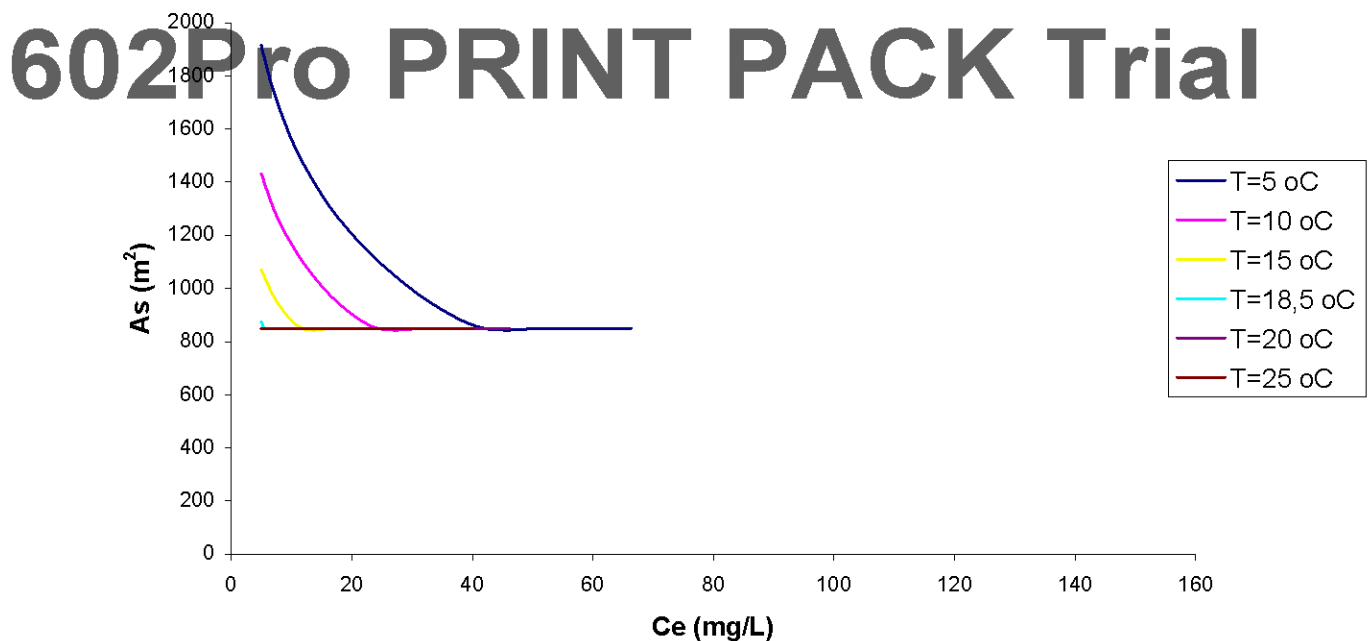
Επομένως, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, θα πρέπει να κατασκευαστούν 12 όμοιες κλίνες με διαστάσεις $A_s = 2975\text{m}^2$, $L = 47,236\text{m}$ και $W = 62,981\text{ m}$.

602Pro PRINT PACK Trial

4.3.4. Διαγράμματα

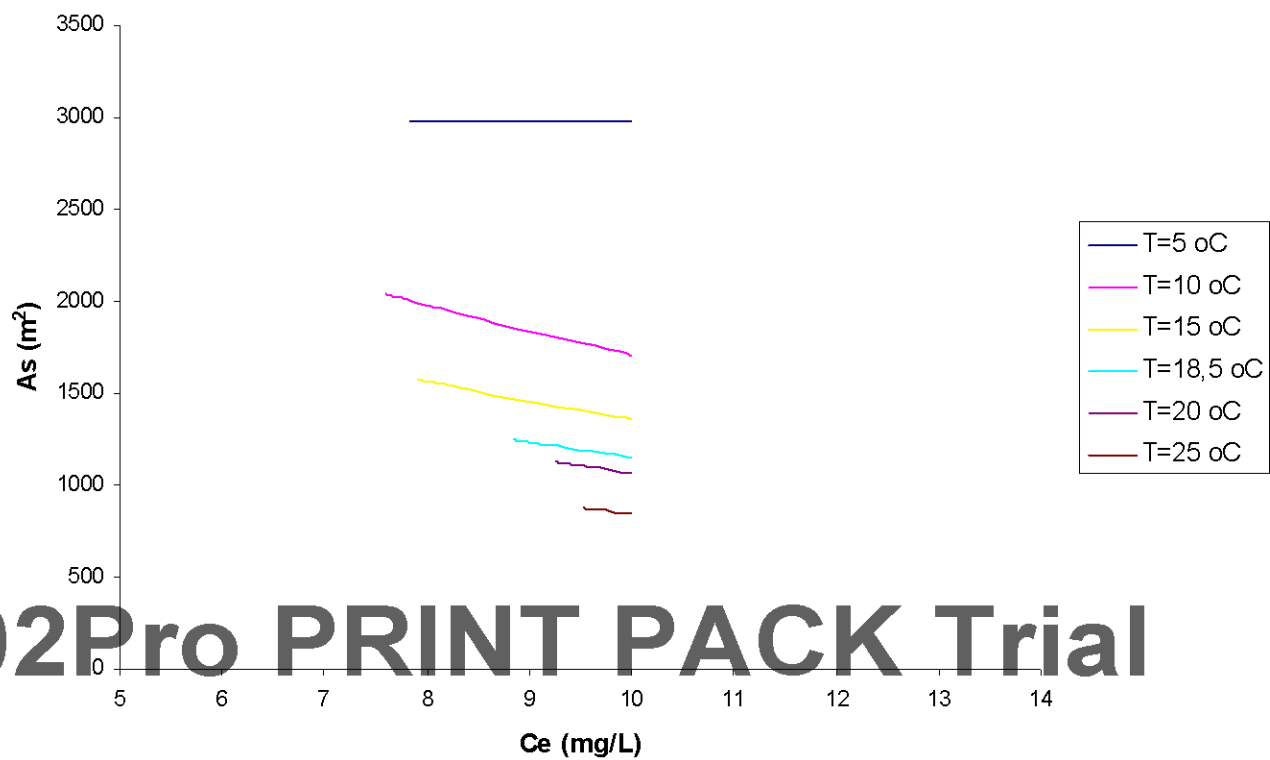
Για να δούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η έκταση As του τεχνητού υγροβιότοπου καθώς το υγρό απόβλητο περνά μέσα από αυτόν, κατασκευάζουμε τα διαγράμματα της έκτασης συναρτήσει της συγκέντρωσης εκροής C_e του ρύπου, για κάθε θερμοκρασία. Οι τιμές των διαγραμμάτων και ο υπολογισμός τους, παρουσιάζονται αναλυτικά σε πίνακες στο Παράρτημα.

4.3.4.1 Απομάκρυνση BOD_5



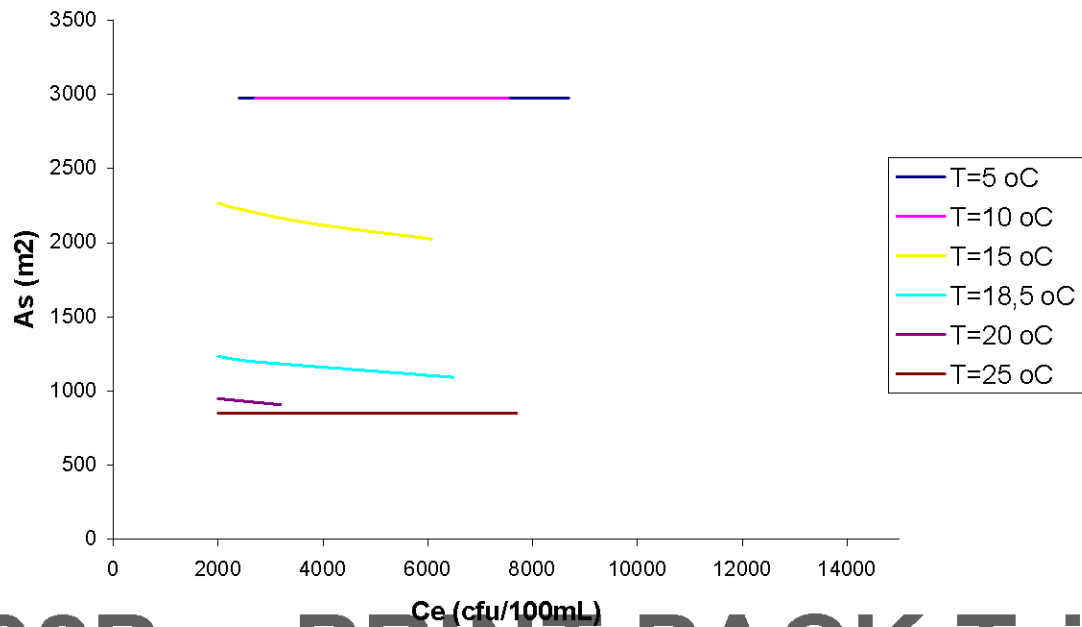
Διάγραμμα 4-7. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD_5 , σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998

4.3.4.2 Απομάκρυνση Αζώτου



Διάγραμμα 4-8. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998

4.3.4.3 Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων



602Pro PRINT PACK Trial

Διάγραμμα 4-9. Μεταβολή του A_s συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε διάφορες θερμοκρασίες με βάση το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998

Η εφαρμογή και των τριών μοντέλων κινητικής, για την προσομοίωση της απομάκρυνσης των ρύπων μέσω υδροβιότοπου υποεπιφανειακής ροής, έγινε με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαστασιολόγηση των κλινών παρουσιάζονται στους πίνακες 4-12, 4-19 και 4-31.

Μοντέλο Reed *et al.*, 1995

T (°C)	As (m ²)	L (m)	W (m)
5	2975,000	47,236	62,981
10	2975,000	47,236	62,981
15	2219,096	40,796	54,395
18,5	1493,273	33,466	44,621
20	1391,866	32,309	43,079
25	1101,009	28,736	38,315

Μοντέλο Kadlec & Knight, 1996

T (°C)	As (m ²)	L (m)	W (m)
5	2728,340	45,236	60,314
10	2381,210	42,260	56,347
15	2381,210	42,260	56,347
18,5	2381,210	42,260	56,347
20	2381,210	42,260	56,347
25	2381,210	42,260	56,347

Μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998

T (°C)	As (m ²)	L (m)	W (m)
5	2975,000	47,236	62,981
10	2975,000	47,236	62,981
15	1219,096	30,238	40,317
18,5	1207,151	30,089	40,119
20	974,968	27,041	36,055
25	850,000	25,249	33,665

Παρατηρούμε ότι στα μοντέλα Reed *et al.*, 1995 και Crites & Tchobanoglous, 1998, όσο μειώνεται η θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη είναι η έκταση που απαιτείται για την επιθυμητή απομάκρυνση των ρύπων. Στο μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, η έκταση που απαιτείται είναι η ίδια σχεδόν σε όλες τις θερμοκρασίες (αλλάζει μόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ($T=5^{\circ}\text{C}$)).

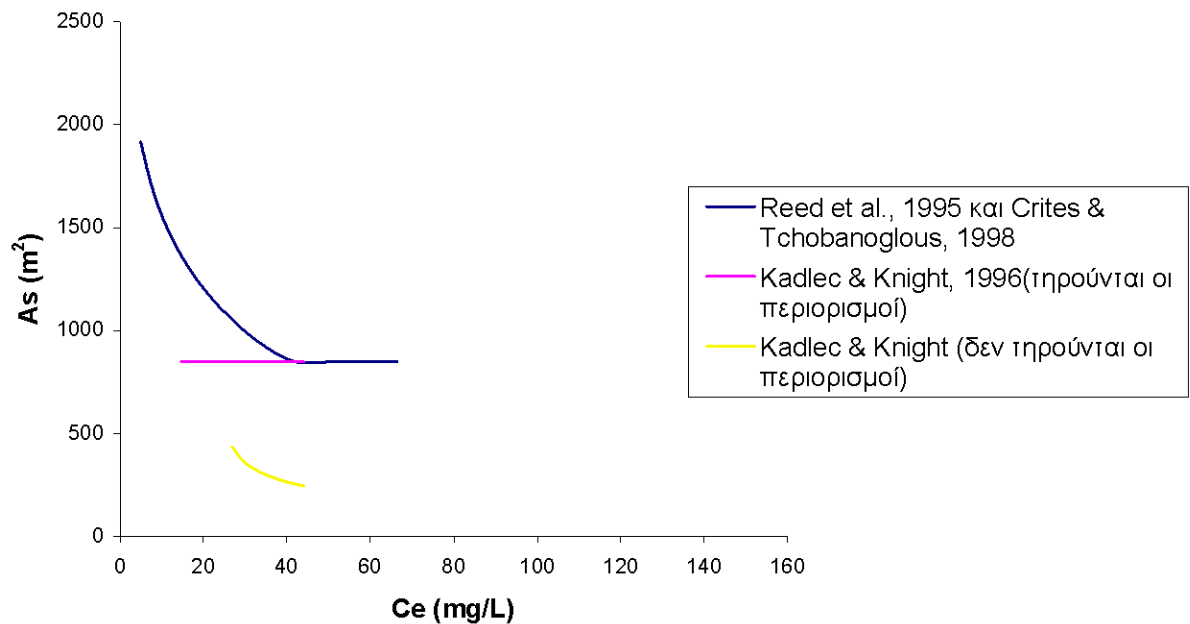
Για να μπορούν να καλυφθούν οι απαιτήσεις επεξεργασίας σε όλες τις θερμοκρασίες, θα πρέπει οι κλίνες να κατασκευαστούν με τις μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτές που έχουν υπολογιστεί στις διάφορες θερμοκρασίες.

Επομένως, σύμφωνα με το μοντέλο Reed *et al.*, 1995 θα πρέπει να κατασκευαστούν 12 όμοιες κλίνες με διαστάσεις $L = 47,236\text{m}$ και $W = 62,981\text{m}$, σύμφωνα με το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996 θα πρέπει να κατασκευαστούν 12 όμοιες κλίνες με διαστάσεις περίπου $L = 45,236\text{m}$ και $W = 60,314\text{m}$ και σύμφωνα με το μοντέλο Crites & Tchobanoglous, 1998 θα πρέπει να κατασκευαστούν 12 όμοιες κλίνες με διαστάσεις περίπου $L = 45,236\text{m}$ και $W = 60,314\text{m}$.

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε την απομάκρυνση των ρύπων με βάση τα τρία μοντέλα, κατασκευάζουμε συγκριτικά διαγράμματα της μεταβολής του As συναρτήσει της C_e για κάθε ρύπο, σε κάθε θερμοκρασία.

Απομάκρυνση BOD₅

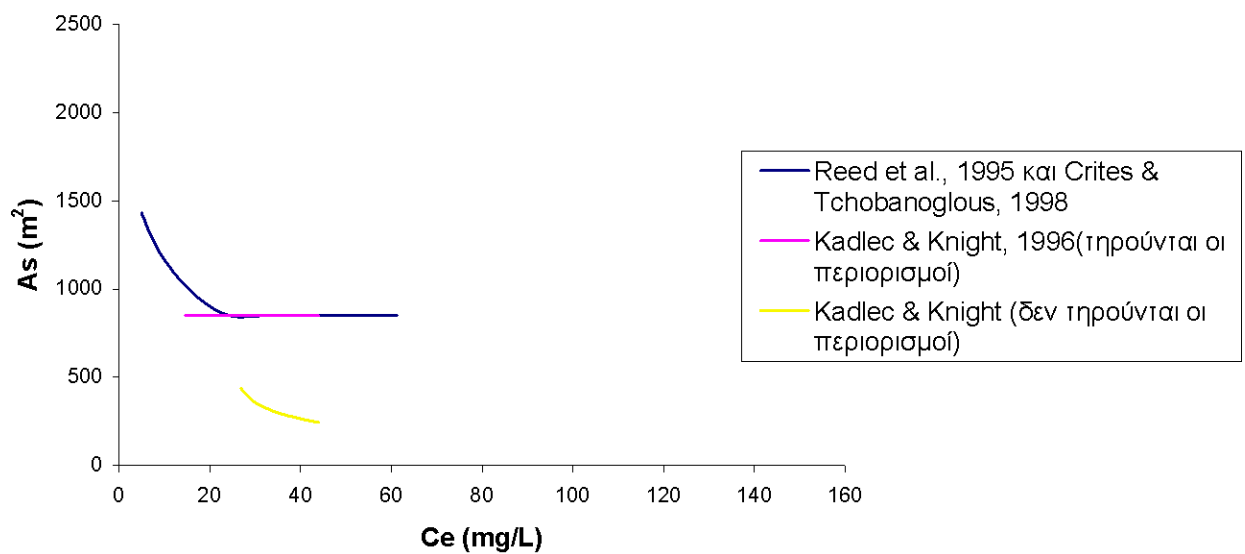
T = 5 οC



Διάγραμμα 5-1. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD₅, σε θερμοκρασία 5°C με βάση και τα τρία μοντέλα

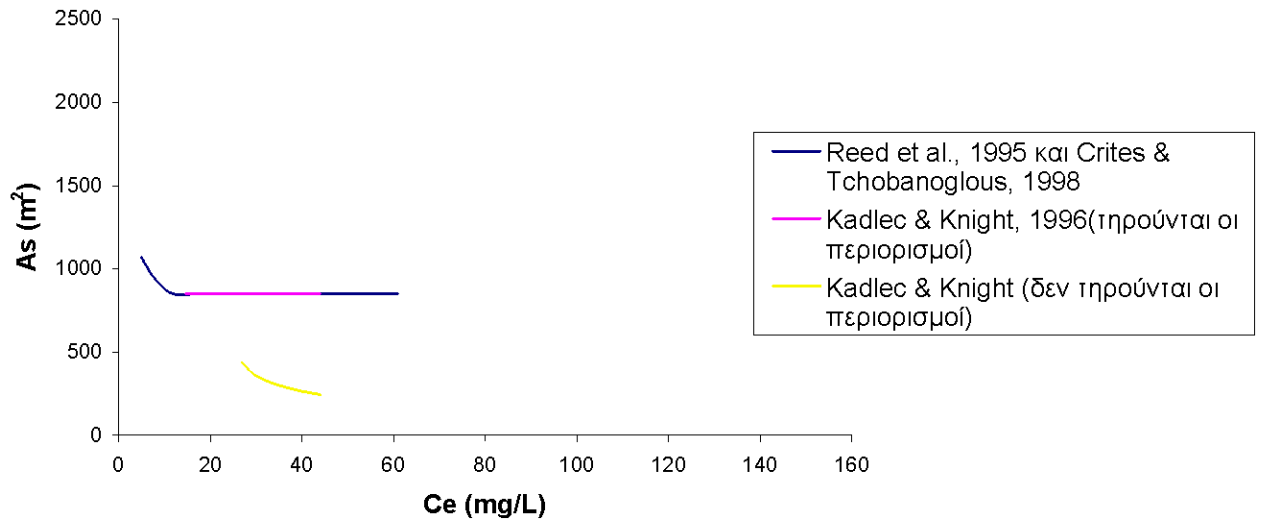
602Pro PRINT PACK Trial

T = 10 οC



Διάγραμμα 5-2. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD₅, σε θερμοκρασία 10°C με βάση και τα τρία μοντέλα

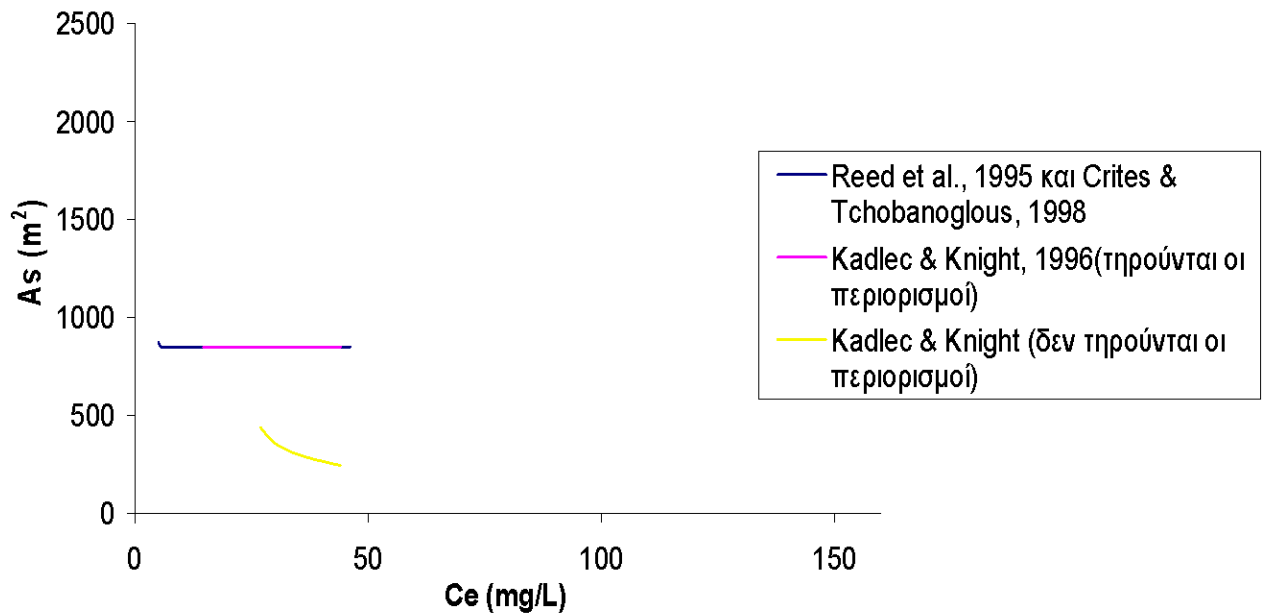
T = 15 οC



Διάγραμμα 5-3. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD₅, σε θερμοκρασία 15°C με βάση και τα τρία μοντέλα

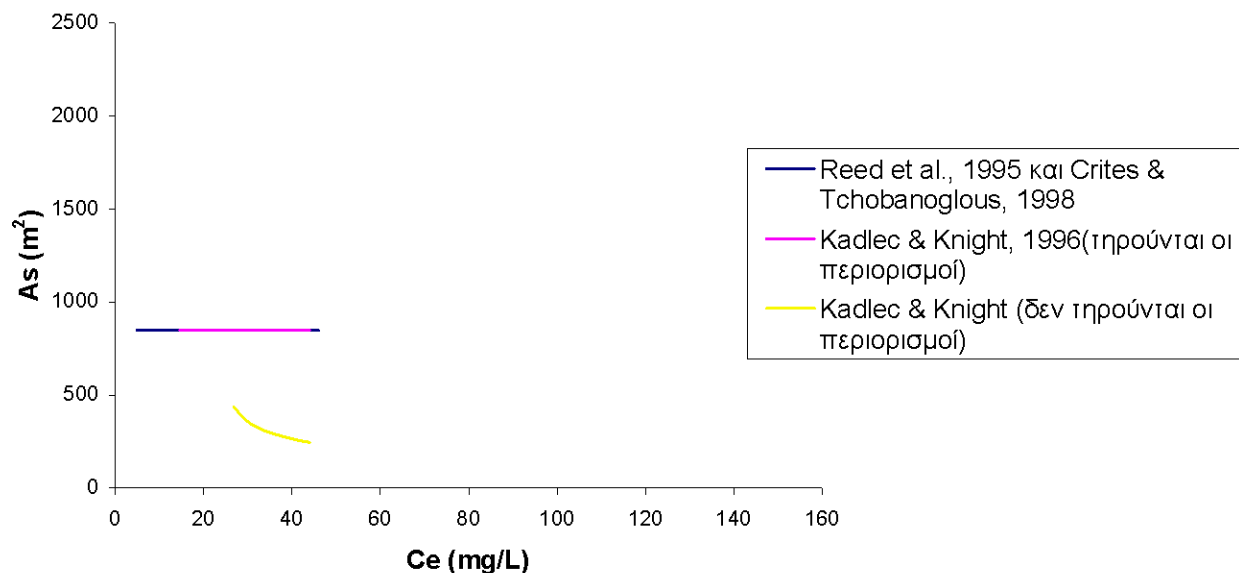
602Pro PRINT PACK Trial

T = 18,5 οC



Διάγραμμα 5-4. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD₅, σε θερμοκρασία 18,5°C με βάση και τα τρία μοντέλα

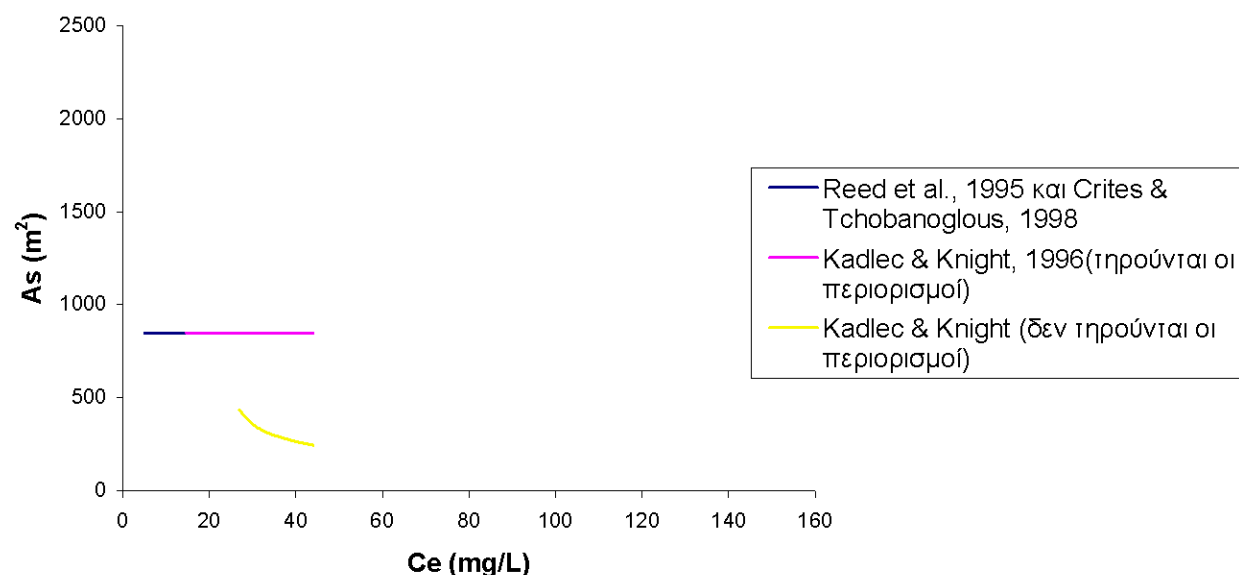
T = 20 oC



Διάγραμμα 5-5. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD₅, σε θερμοκρασία 20°C με βάση και τα τρία μοντέλα

602Pro PRINT PACK Trial

T = 25 oC



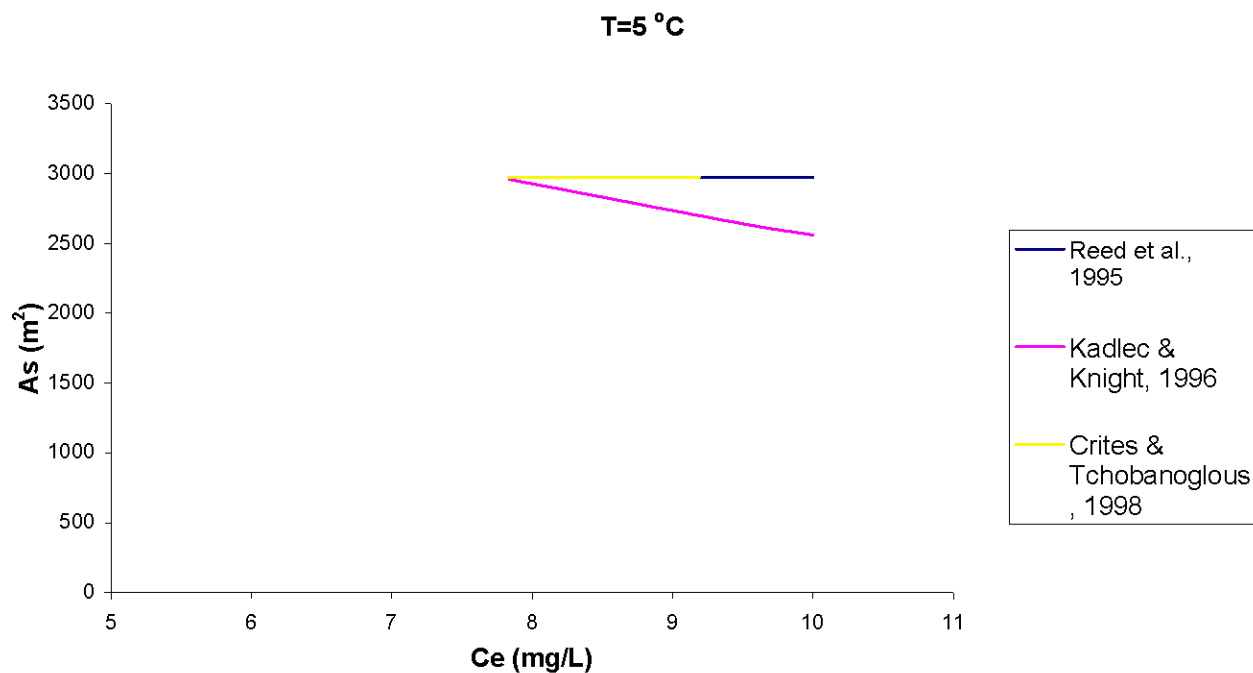
Διάγραμμα 5-6. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του BOD₅, σε θερμοκρασία 25°C με βάση και τα τρία μοντέλα

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η απομάκρυνση του BOD₅ είναι η ίδια για τα μοντέλα Reed *et al.*, 1995 και Crites & Tchobanoglous, 1998, γι' αυτό και οι καμπύλες τους ταυτίζονται. Στα μοντέλα αυτά η έκταση A_s που απαιτείται για την επεξεργασία του ρύπου μειώνεται καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση εκροής και από ένα σημείο και έπειτα η έκταση σταθεροποιείται, λαμβάνοντας την μικρότερη τιμή που μπορεί να πάρει (850m²). Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η καμπύλη των μοντέλων Reed *et al.*, 1995 και Crites & Tchobanoglous, 1998 τείνει να γίνει ευθεία και το A_s να πάρει την οριακή τιμή 850 m².

Στο μοντέλο Kadlec & Knight, 1996, όταν τηρούνται οι περιορισμοί των Reed και Crites & Tchobanoglous, η έκταση δεν μεταβάλλεται με τη συγκέντρωση εκροής και έχει σταθερή τιμή ίση με μικρότερη τιμή που μπορεί να πάρει (850m²), σε όλες τις θερμοκρασίες. Αντίθετα, στην περίπτωση που δε λαμβάνουμε υπόψη μας τους περιορισμούς, η έκταση μειώνεται καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση εκροής και παίρνει τιμές μικρότερες από την ελάχιστη επιτρεπτή έκταση που προτείνουν οι Reed και Crites & Tchobanoglous.

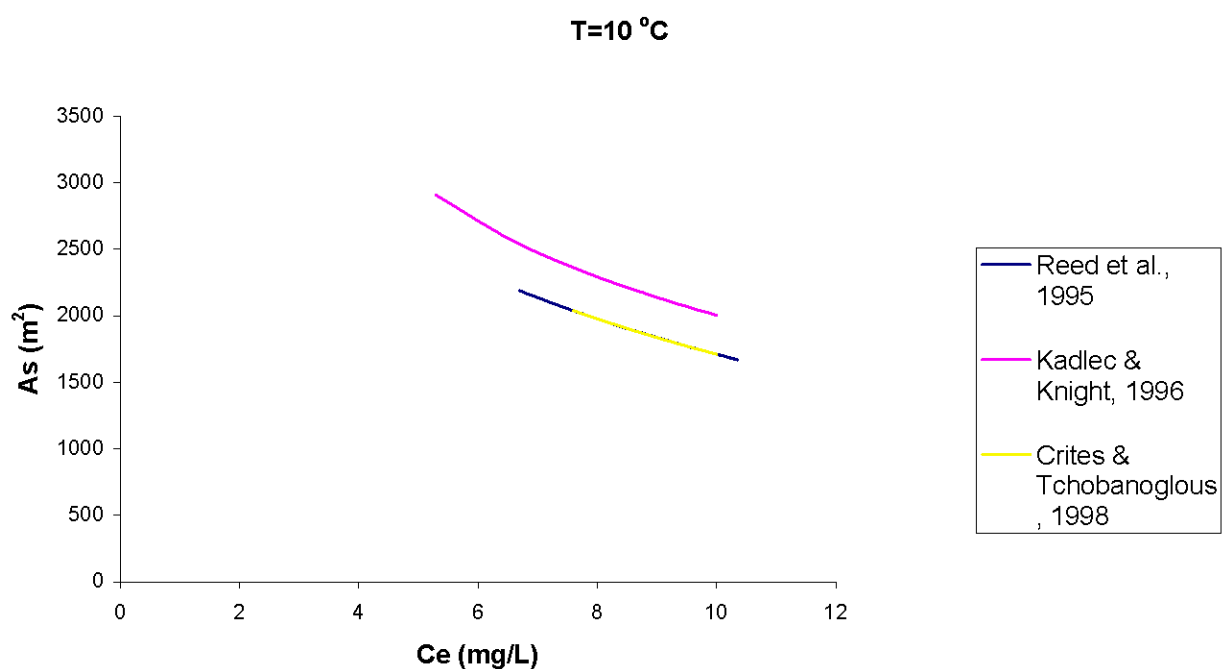
602Pro PRINT PACK Trial

Απομάκρυνση Αζώτου

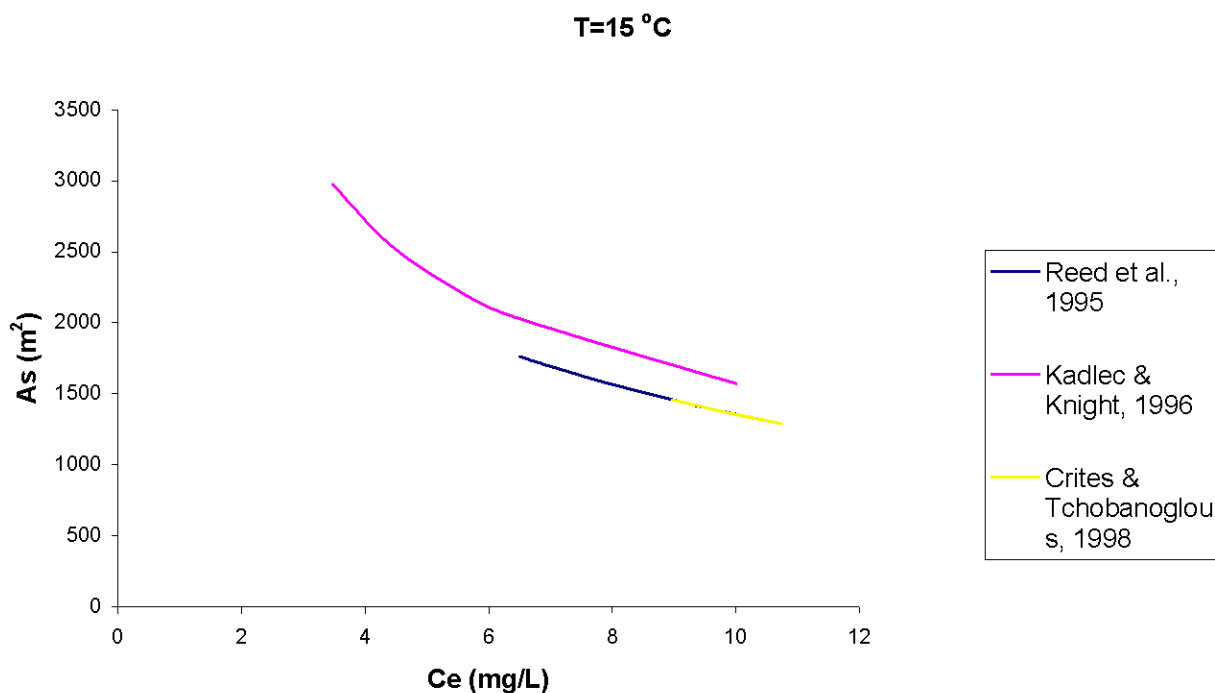


Διάγραμμα 5-7. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 5°C με βάση και τα τρία μοντέλα

602Pro PRINT PACK Trial

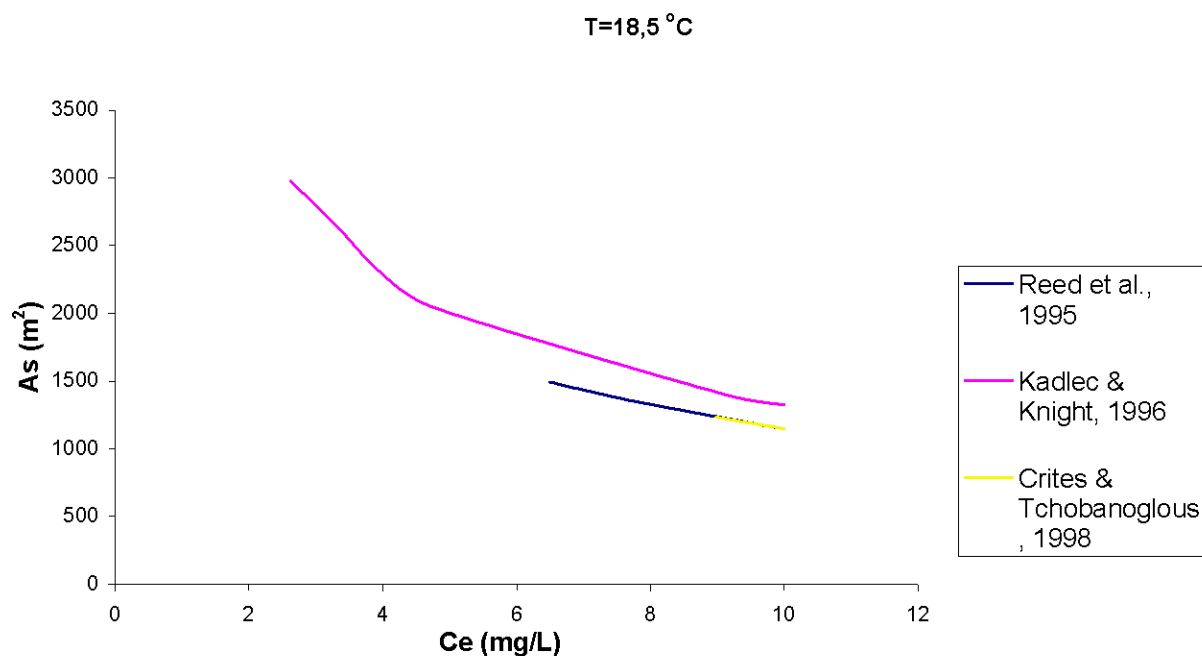


Διάγραμμα 5-8. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 10°C με βάση και τα τρία μοντέλα

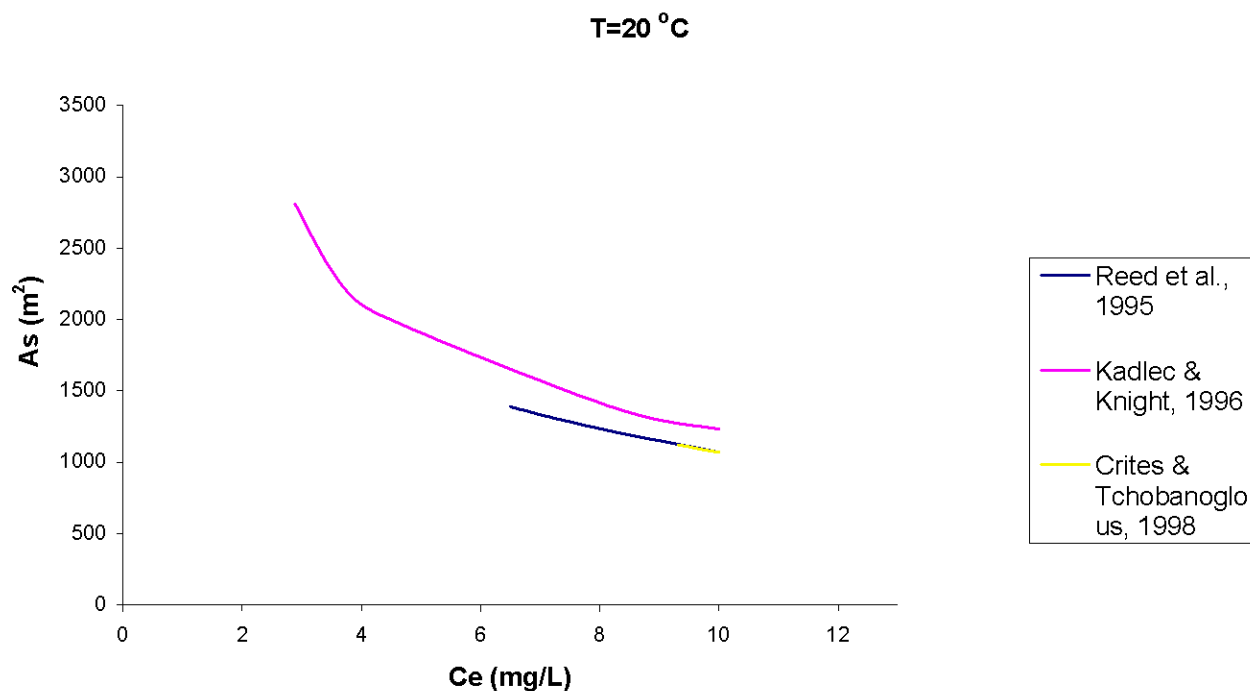


Διάγραμμα 5-9. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 15°C με βάση και τα τρία μοντέλα

602Pro PRINT PACK Trial

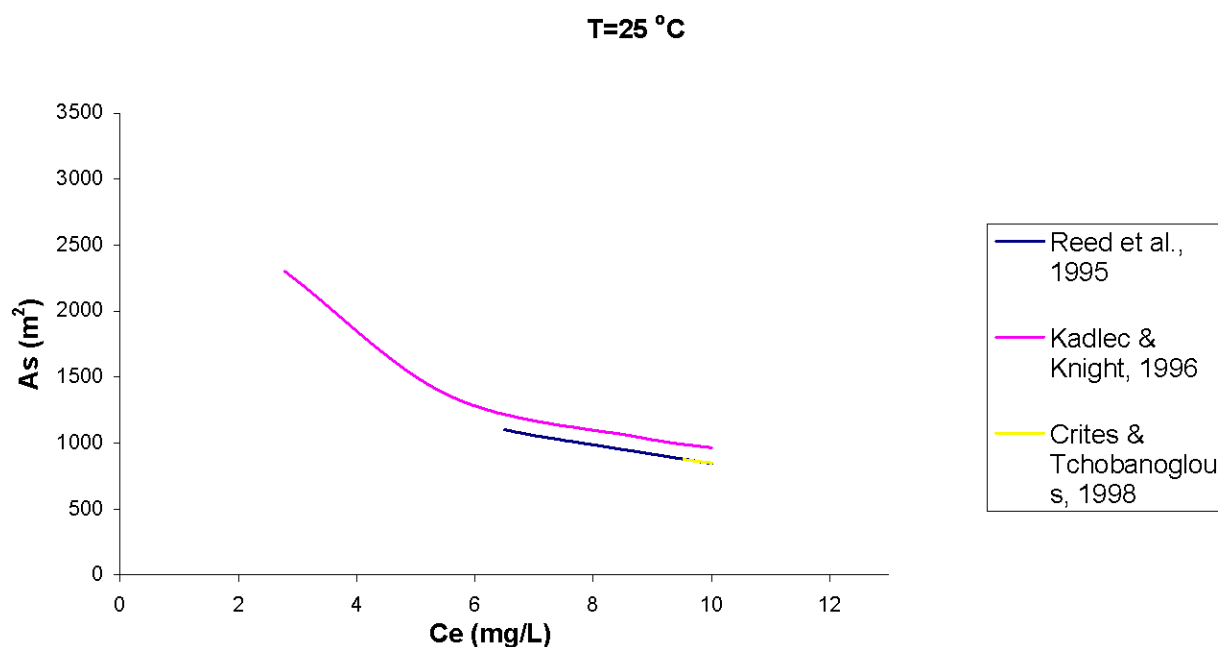


Διάγραμμα 5-10. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 18,5°C με βάση και τα τρία μοντέλα



Διάγραμμα 5-11. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 20 °C με βάση και τα τρία μοντέλα

602Pro PRINT PACK Trial

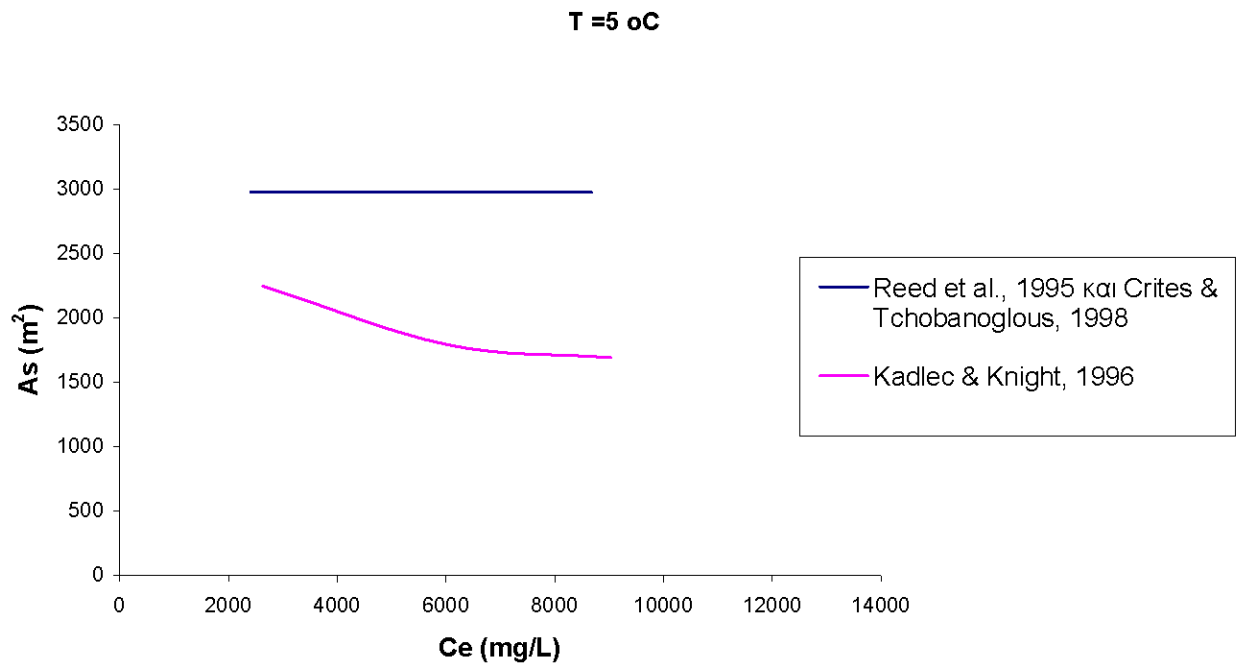


Διάγραμμα 5-12. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e του αζώτου, σε θερμοκρασία 25 °C με βάση και τα τρία μοντέλα

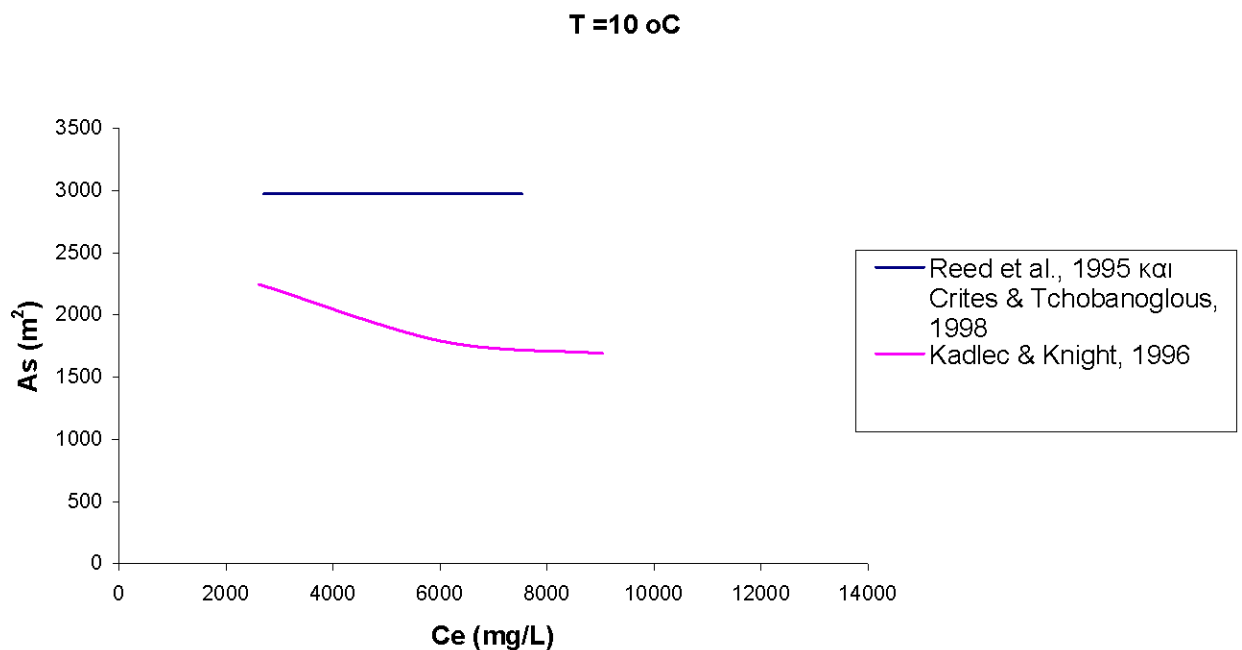
Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για τα μοντέλα Reed *et al.*, 1995 και Crites & Tchobanoglous, 1998, οι τιμές είναι πολύ κοντά. Στα μοντέλα αυτά η έκταση A_s που απαιτείται για την επεξεργασία του ρύπου είναι σταθερή για θερμοκρασία $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ίση με τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η έκταση (2975m^2). Για τις άλλες θερμοκρασίες, η έκταση μειώνεται καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση εκροής. Στο μοντέλο Kadlec & Knight, 1996 η έκταση μειώνεται καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση εκροής. Παρατηρούμε επίσης ότι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία η έκταση A_s μικραίνει. Οι τιμές των διαγραμμάτων για το μοντέλο Kadlec & Knight, 1996 είναι οι ίδιες, είτε τηρούνται οι περιορισμοί είτε όχι.

602Pro PRINT PACK Trial

Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

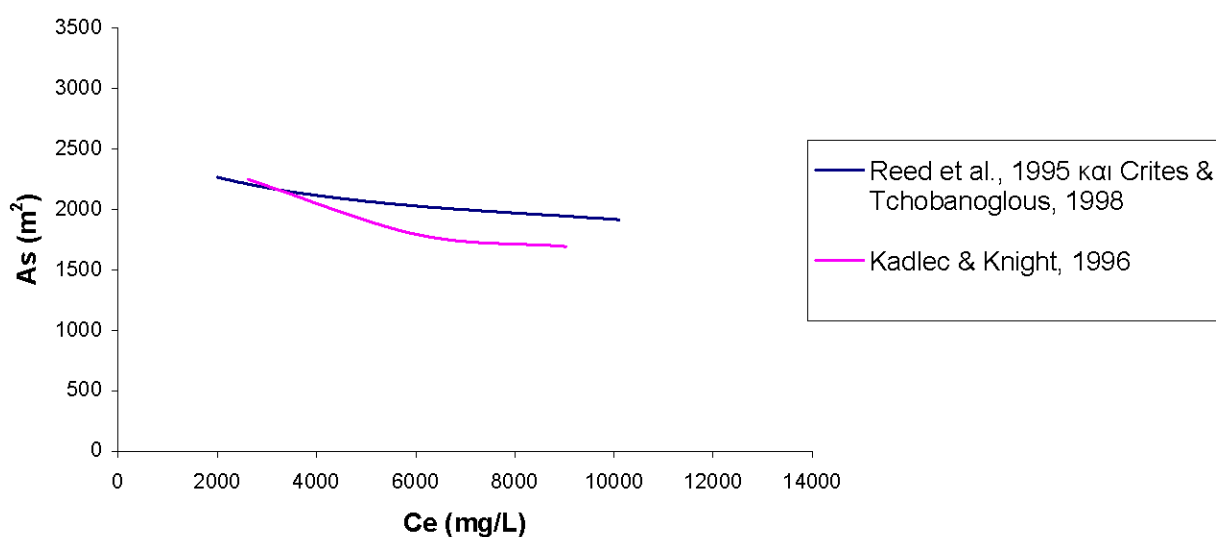


Διάγραμμα 5-13. Μεταβολή του A_s συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 5 °C με βάση και τα τρία μοντέλα



Διάγραμμα 5-14. Μεταβολή του A_s συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 10 °C με βάση και τα τρία μοντέλα

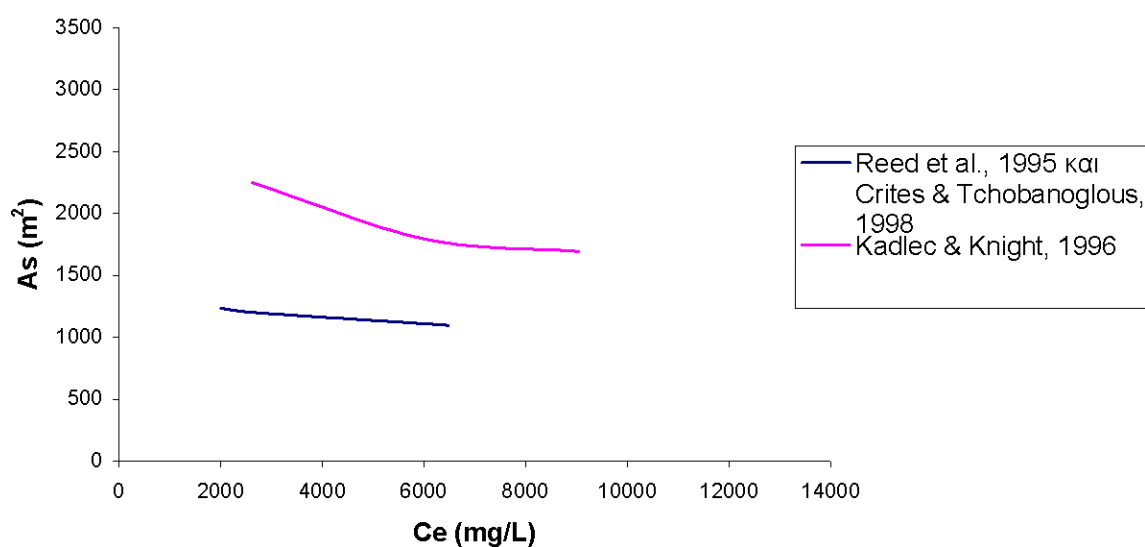
T =15 οC



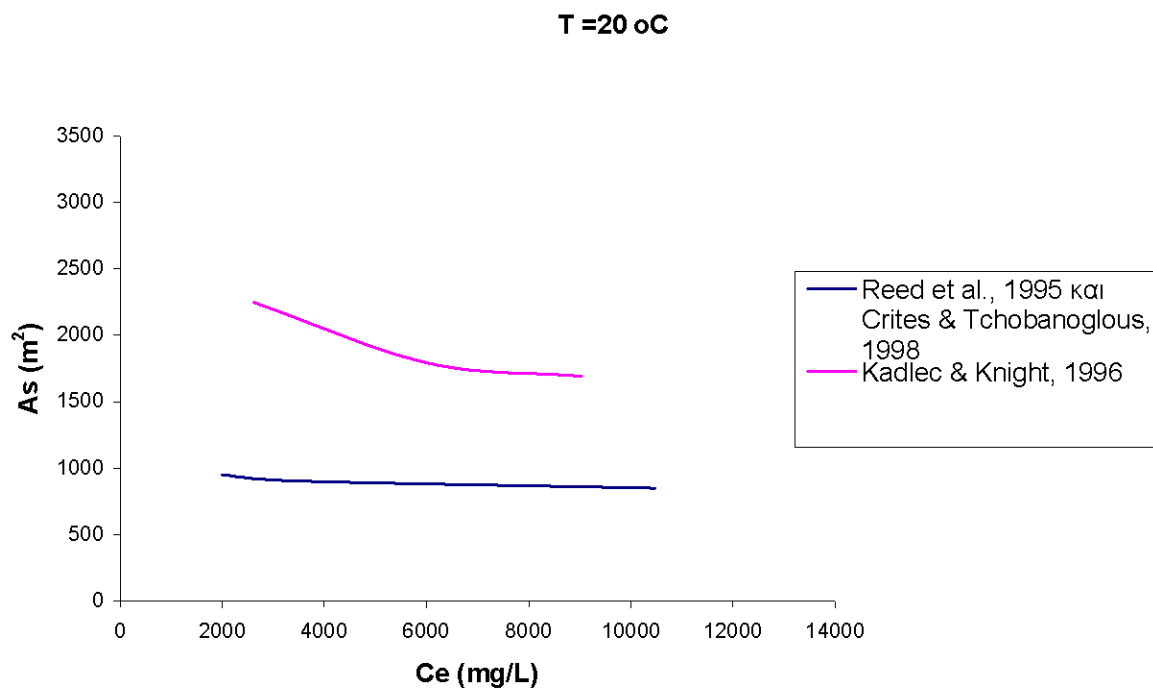
Διάγραμμα 5-15. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 15 °C με βάση και τα τρία μοντέλα

602Pro PRINT PACK Trial

T =18,5 οC

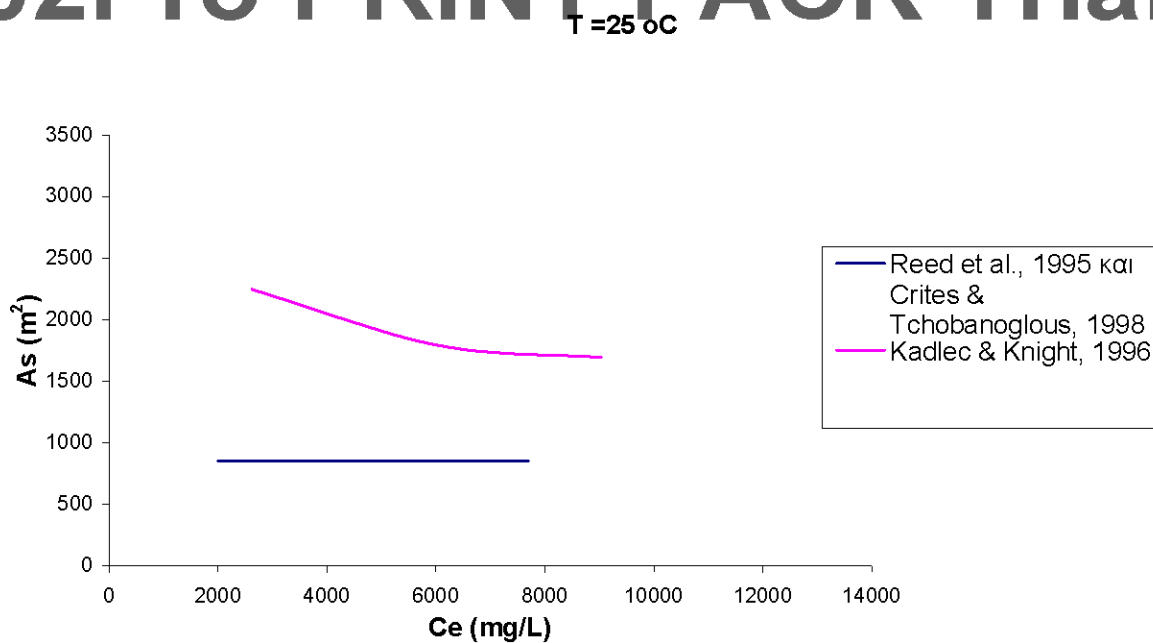


Διάγραμμα 5-16. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 18,5 °C με βάση και τα τρία μοντέλα



Διάγραμμα 5-17. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 20 °C με βάση και τα τρία μοντέλα

602Pro PRINT PACK Trial



Διάγραμμα 5-18. Μεταβολή του As συναρτήσει της C_e των κοπρωδών κολοβακτηριδίων, σε θερμοκρασία 25 °C με βάση και τα τρία μοντέλα

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων είναι η ίδια για τα μοντέλα Reed *et al.*, 1995 και Crites & Tchobanoglous, 1998, γι' αυτό και οι καμπύλες τους ταυτίζονται. Στα μοντέλα αυτά η έκταση A_s που απαιτείται για την επεξεργασία του ρύπου μειώνεται, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση εκροής και από ένα σημείο και έπειτα η έκταση σταθεροποιείται, λαμβάνοντας την μικρότερη τιμή που μπορεί να πάρει (850m^2). Παρατηρούμε επίσης ότι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία η έκταση A_s μικραίνει, με αποτέλεσμα μετά τους 20°C να σταθεροποιείται στη μικρότερη τιμή που μπορεί να πάρει (850m^2).

Στο μοντέλο Kadlec & Knight, 1996 η απομάκρυνση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας. Η έκταση A_s που απαιτείται για την επεξεργασία του ρύπου μειώνεται, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση εκροής μέχρι το σημείο που παίρνει την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή (850m^2), όπου και σταθεροποιείται.

Γενικά, από ότι παρατηρούμε στα παραπάνω διαγράμματα, μπορούμε να πούμε ότι τα μοντέλα Reed *et al.*, 1995 και Crites and Tchobanoglous, 1998 έχουν παρόμοια αποτελέσματα. Το μοντέλο Kadlec and Knight, 1996 διαφοροποιείται λίγο, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στη χρήση του παράγοντα ασφαλείας z και της συγκέντρωσης υποβάθρου C^* , εσωτερικά στις εξισώσεις του σχεδιαστικού μοντέλου.

Η χρήση των τεχνητών υδροβιότοπων για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι σχετικά πρόσφατη πρακτική και δεν υπάρχει ομοφωνία για τον βέλτιστο σχεδιασμό των συστημάτων αυτών, καθώς ούτε και πολλές πληροφορίες για την μακροχρόνια επίδοσή τους.

Ως αποτέλεσμα του αυξημένου ενδιαφέροντος και των εκτεταμένων ερευνών για την τεχνολογία των τεχνητών υδροβιότοπων έχουν δημιουργηθεί τρία μοντέλα σχεδιασμού (Reed *et al.*, 1995, Crites and Tchobanoglous, 1998 και Kadlec & Knight, 1996) τα οποία καλύπτουν τους περισσότερους από τους ρύπους που μας ενδιαφέρουν. Τα τρία αυτά μοντέλα βασίζονται στην ανάλυση των δεδομένων εισροής-εκροής ή στις εξισώσεις ισορροπίας της μάζας και χρησιμοποιούν τη γενική μορφή ενός μοντέλου plug flow πρώτης τάξης. Οι εξισώσεις, δηλαδή, που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν τις συγκεντρώσεις στην εκροή του υδροβιότοπου ως συνάρτηση των συγκεντρώσεων εισροής, του ρυθμού ροής και της έκτασης ή του όγκου. Λόγω της περιορισμένης κατανόησης των πραγματικών μηχανισμών απομάκρυνσης, οι συντελεστές απομάκρυνσης που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα σχεδιασμού των τεχνητών υδροβιότοπων είναι φαινομενικοί και δεν έχουν απαραίτητα θεωρητική βάση.

Για το λόγο αυτό, οι Crites and Tchobanoglous έχουν προτείνει τη χρήση ενός μοντέλου που εκφράζει το ρυθμό επιβράδυνσης για την απομάκρυνση των BOB_5 και TSS, ώστε να ερμηνεύσουν το γεγονός ότι η απόδοση της επεξεργασίας μειώνεται καθώς τα πιο ευαίσθητα συστατικά απομακρύνονται. Τα στοιχεία, όμως, που υπάρχουν μέχρι τώρα για το μοντέλο αυτό δεν είναι επαρκή κι έτσι δεν είμαστε σε θέση να το χρησιμοποιήσουμε για το σχεδιασμό φυσικών συστημάτων επεξεργασίας.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία που μελετήθηκε, παρατηρούμε ότι οι περιορισμοί που θέτονται για την απαιτούμενη έκταση, το ρυθμό του υδραυλικού φορτίου και το ρυθμό φορτίου BOD_5 αναφέρονται μόνο από τους Reed και Crites & Tchobanoglous. Από τους Kadlec & Knight δεν γίνεται αναφορά. Έτσι τα αποτελέσματα του μοντέλου Kadlec & Knight, 1996 θα είναι διαφορετικά αν λάβουμε υπόψη μας τους

περιορισμούς των Reed και Crites & Tchobanoglous και αν δεν τους λάβουμε υπόψη. Παρατηρούμε και στα διαγράμματα ότι στην περίπτωση που δεν δεχόμαστε τους περιορισμούς, η έκταση είναι πολύ μικρότερη από την ελάχιστη έκταση που επιτρέπουν οι περιορισμοί.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε, μπορούμε να πούμε ότι τα μοντέλα Reed *et al.*, 1995 και Crites and Tchobanoglous, 1998 έχουν παρόμοια αποτελέσματα. Το μοντέλο Kadlec and Knight, 1996 διαφοροποιείται λίγο, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στη χρήση του παράγοντα ασφαλείας z και της συγκέντρωσης υποβάθρου C^* , εσωτερικά στις εξισώσεις του σχεδιαστικού μοντέλου.

602Pro PRINT PACK Trial

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγγλόφωνη Βιβλιογραφία:

Crites R., B. Gearheart, W. Reed, G. Tchobanoglous, (2000) “A Review of Treatment Kinetics for Constructed Wetlands”, Copyright 2000 WEF

Crites R. and G. Tchobanoglous, (1998) “Small and Decentralized Wastewater Management Systems”, McGraw-Hill Book Company, New York.

DuPoldt C., L. Garber *et al.* “A Guide to Creating Wetlands for: Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage, Stormwater in the Mid-Atlantic Region”, A Handbook of Constructed Wetlands, Volume 1, General Considerations.

Kadlec R.H, R.L. Knight, (1996) “Treatment Wetlands”, Lewis Publishers, United States

Reed, S.C., R.W. Crites, E.J. Middlebrooks, (1995) “Natural Systems for Waste Management and Treatment”, 2ndEd., McGraw-Hill, New York.

Sundaravadivel M., S. Vigneswaran, (2001) “Constructed Wetlands for Wastewater Treatment”, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 31no4 2001.

Tsarakakis K.P., D.D. Mara and A.N. Angelakis, (May 2002) “Application of Cost Criteria for Selection of Municipal Wastewater Treatment Systems”, 2003 Kluwer Academic Publishers.

U.S. Environmental Protection Agency, (September 1988) “Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Wastewater Treatment”, Design Manual, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development.

U.S. Environmental Protection Agency, (July 1993) “Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment”, EPA, United States.

U.S. Environmental Protection Agency (September 2000) “Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters”, EPA Manual, United States.

U.S. Environmental Protection Agency, (September 2000) “Wetlands: Subsurface Flow”, Wastewater Technology Fact Sheet, Office of Water, Washington, D.C.

Water Environmental Federation, (2001) “Natural Systems for Wastewater Treatment”, WEF Manual of Practice No.FD-16, 2ndEd., Alexandria, VA 22314-1994 USA.

Ελληνόφωνη Βιβλιογραφία:

Αγγελάκης Α.Ν., Γ. Τσoβανoglous, (1995) “Υγρά Απόβλητα: Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας και Ανάκτηση, Επεξεργασία και Διάθεση Εκροών”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο.

Αγγελάκης Α.Ν., Κ.Π. Τσαγκαράκης “Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Αστικών Υγρών Αποβλήτων: Αρχές Σχεδιασμού και Λειτουργίας”, Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας, Ινστιτούτο Ηρακλείου, Ηράκλειο Κρήτης.

Αναγνωστόπουλος Κ.Π., Μ. Γκράτζιου, (2000) “Ανάλυση Ευαισθησίας Συναρτήσεων Υπολογισμού Του Κατασκευαστικού Κόστους Μονάδων Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων με Τεχνητούς Υγροβιότοπους”, 8^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 19-21 Απριλίου 2000, Αθήνα.

Οικονομόπουλος Α.Π, Μ.Α. Οικονομοπούλου, (1999) “Δυνατότητες Χρήσης Φυσικών Συστημάτων για Επεξεργασία Αστικών Αποβλήτων”, 6^ο Διεθνές Συνέδριο Επιστήμης & Τεχνολογίας, Πυθαγόρειο Σάμου 30/8 – 2/9/99.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΤΙΜΕΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

602Pro PRINT PACK Trial

Για να δούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η έκταση As του τεχνητού υγροβιότοπου καθώς το υγρό απόβλητο περνά μέσα από αυτόν, κατασκευάζουμε τα διαγράμματα της έκτασης συναρτήσει της συγκέντρωσης εκροής C_e του ρύπου, για κάθε θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα δίνονται στους πίνακες που ακολουθούν:

Μοντέλο Reed et al., 1995

➤ Απομάκρυνση BOD₅

Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση $C_e = C_0 \cdot \exp(-K_T \cdot t)$.

- Για $T = 5^\circ\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C ₀ *Q/As	Q/As
0,5	166,797	118	2,778	75600,000	0,360
1	132,482	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	105,227	354	8,333	25200,000	0,120
2	83,578	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	66,384	590	13,889	15120,000	0,072
3	52,727	708	16,667	12600,000	0,060
3,5	41,879	826	19,444	10800,000	0,051
4	33,264	944	22,222	9450,000	0,045
4,5	26,420	1063	25,000	8400,000	0,040
5	20,985	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	16,668	1299	30,556	6872,727	0,033
6	13,239	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	10,515	1535	36,111	5815,385	0,028
7	8,352	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	6,634	1771	41,667	5040,000	0,024
8	5,269	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	4,185	2007	47,222	4447,059	0,021
9	3,324	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	166,797	850
1	132,482	850
1,5	105,227	850
2	83,578	850
2,5	66,384	850
3	52,727	850
3,5	41,879	850
4	33,264	944
4,5	26,420	1063
5	20,985	1181
5,5	16,668	1299
6	13,239	1417
6,5	10,515	1535
7	8,352	1653
7,5	6,634	1771
8	5,269	1889
8,5	5,000	1916
9	5,000	1916

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς. Η συγκέντρωση εκροής του BOD₅ δεν πρέπει να ξεπερνά τη συγκέντρωση υποβάθρου που ισούται με 5 mg/L. Έτσι για τις τιμές του υδραυλικού χρόνου παραμονής t που $C_e < 5 \text{ mg/L}$, διορθώνουμε τις τιμές, θεωρώντας $C_e = 5 \text{ mg/L}$. Επίσης, όπου δεν τηρούνται τα όρια της απαιτούμενης έκτασης, διορθώνουμε τις τιμές του As, παίρνοντας ως ελάχιστο, την τιμή 850 m² και ως μέγιστο την τιμή 2975m².

■ Για T = 10 °C

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C _o *Q/As	Q/As
0,5	154,296	118	2,778	75600,000	0,360
1	113,368	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	83,296	354	8,333	25200,000	0,120
2	61,202	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	44,967	590	13,889	15120,000	0,072
3	33,040	708	16,667	12600,000	0,060
3,5	24,276	826	19,444	10800,000	0,051
4	17,836	944	22,222	9450,000	0,045
4,5	13,105	1063	25,000	8400,000	0,040
5	9,629	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	7,075	1299	30,556	6872,727	0,033
6	5,198	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	3,819	1535	36,111	5815,385	0,028
7	2,806	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	2,062	1771	41,667	5040,000	0,024
8	1,515	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	1,113	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,818	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	154,296	850
1	113,368	850
1,5	83,296	850
2	61,202	850
2,5	44,967	850
3	33,040	850
3,5	24,276	850
4	17,836	944
4,5	13,105	1063
5	9,629	1181
5,5	7,075	1299
6	5,198	1417
6,5	5,000	1432
7	5,000	1432
7,5	5,000	1432
8	5,000	1432
8,5	5,000	1432
9	5,000	1432

602Pro PRINT PACK Trial

■ Για T = 15 °C

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C _o *Q/As	Q/As
0,5	139,020	118	2,778	75600,000	0,360
1	92,032	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	60,925	354	8,333	25200,000	0,120
2	40,333	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	26,700	590	13,889	15120,000	0,072
3	17,676	708	16,667	12600,000	0,060
3,5	11,701	826	19,444	10800,000	0,051
4	7,746	944	22,222	9450,000	0,045
4,5	5,128	1063	25,000	8400,000	0,040
5	3,395	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	2,247	1299	30,556	6872,727	0,033
6	1,488	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	0,985	1535	36,111	5815,385	0,028
7	0,652	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	0,432	1771	41,667	5040,000	0,024
8	0,286	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	0,189	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,125	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	139,020	850
1	92,032	850
1,5	60,925	850
2	40,333	850
2,5	26,700	850
3	17,676	850
3,5	11,701	850
4	7,746	944
4,5	5,128	1063
5	5,000	1070
5,5	5,000	1070
6	5,000	1070
6,5	5,000	1070
7	5,000	1070
7,5	5,000	1070
8	5,000	1070
8,5	5,000	1070
9	5,000	1070

- Για $T = 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C _o *Q/As	Q/As
0,5	126,635	118	2,778	75600,000	0,360
1	76,363	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	46,049	354	8,333	25200,000	0,120
2	27,768	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	16,745	590	13,889	15120,000	0,072
3	10,098	708	16,667	12600,000	0,060
3,5	6,089	826	19,444	10800,000	0,051
3,6	5,503	850	20,000	10500,000	0,050
4	3,672	944	22,222	9450,000	0,045
5	1,335	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	0,805	1299	30,556	6872,727	0,033
6	0,486	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	0,293	1535	36,111	5815,385	0,028
7	0,177	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	0,106	1771	41,667	5040,000	0,024
8	0,064	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	0,039	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,023	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	126,635	850
1	76,363	850
1,5	46,049	850
2	27,768	850
2,5	16,745	850
3	10,098	850
3,5	6,089	850
3,6	5,503	850
4	5,000	872
5	5,000	872
5,5	5,000	872
6	5,000	872
6,5	5,000	872
7	5,000	872
7,5	5,000	872
8	5,000	872
8,5	5,000	872
9	5,000	872

602Pro PRINT PACK Trial

- Για $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C _o *Q/As	Q/As
0,5	126,635	118	2,778	75600,000	0,360
1	76,363	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	46,049	354	8,333	25200,000	0,120
2	27,768	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	16,745	590	13,889	15120,000	0,072
3	10,098	708	16,667	12600,000	0,060
3,1	9,126	732	17,222	12193,548	0,058
3,2	8,248	756	17,778	11812,500	0,056
3,3	7,454	779	18,333	11454,545	0,055
3,4	6,737	803	18,889	11117,647	0,053
5,5	0,805	1299	30,556	6872,727	0,033
6	0,486	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	0,293	1535	36,111	5815,385	0,028
7	0,177	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	0,106	1771	41,667	5040,000	0,024
8	0,064	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	0,039	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,023	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	126,635	850
1	76,363	850
1,5	46,049	850
2	27,768	850
2,5	16,745	850
3	10,098	850
3,1	9,126	850
3,2	8,248	850
3,3	7,454	850
3,4	5,000	850
5,5	5,000	850
6	5,000	850
6,5	5,000	850
7	5,000	850
7,5	5,000	850
8	5,000	850
8,5	5,000	850
9	5,000	850

- Για $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C _o *Q/As	Q/As
0,5	120,917	118	2,778	75600,000	0,360
1	69,624	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	40,089	354	8,333	25200,000	0,120
2	23,083	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	13,291	590	13,889	15120,000	0,072
3	7,653	708	16,667	12600,000	0,060
3,35	5,200	791	18,611	11283,582	0,054
4	2,537	944	22,222	9450,000	0,045
4,5	1,461	1063	25,000	8400,000	0,040
5	0,841	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	0,484	1299	30,556	6872,727	0,033
6	0,279	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	0,161	1535	36,111	5815,385	0,028
7	0,092	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	0,053	1771	41,667	5040,000	0,024
8	0,031	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	0,018	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,010	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	120,917	850
1	69,624	850
1,5	40,089	850
2	23,083	850
2,5	13,291	850
3	5,000	850
3,35	5,000	850
4	5,000	850
4,5	5,000	850
5	5,000	850
5,5	5,000	850
6	5,000	850
6,5	5,000	850
7	5,000	850
7,5	5,000	850
8	5,000	850
8,5	5,000	850
9	5,000	850

602Pro PRINT PACK Trial

Με βάση τις παραπάνω διορθωμένες τιμές, κατασκευάζουμε το Διάγραμμα 4-

1 που απεικονίζει τη μεταβολή του As συναρτήσει του C_e, για τις διάφορες θερμοκρασίες.

➤ Απομάκρυνση Αζώτου

Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$C_e = C_{e(\alpha\mu\mu\omega\upsilon\iota\alpha\varsigma)} + C_{e(\nu\iota\tau\mathrm{p}\iota\kappa\omega\upsilon\iota\varsigma)}$$

▪ Για $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	37,891	248	5,836	0,171
2	34,258	491	11,550	0,087
3	31,046	728	17,132	0,058
4	28,205	959	22,572	0,044
5	25,693	1184	27,861	0,036
6	23,471	1402	32,987	0,030
7	21,507	1612	37,941	0,026
8	19,770	1815	42,715	0,023
9	18,234	2010	47,299	0,021
10	16,876	2197	51,687	0,019
11	15,675	2375	55,871	0,018
12	14,614	2544	59,848	0,017
13	13,674	2704	63,613	0,016
14	12,844	2854	67,164	0,015
15	12,110	2996	70,501	0,014
16	11,461	3129	73,625	0,014
16,5	11,165	3192	75,108	0,013
17	10,887	3253	76,539	0,013
17,5	10,625	3312	77,918	0,013
18	10,379	3368	79,246	0,013
18,5	10,147	3422	80,524	0,012
19	9,930	3474	81,753	0,012
19,5	9,725	3525	82,933	0,012
20	9,533	3573	84,066	0,012
20,5	9,352	3619	85,152	0,012
21	9,182	3663	87,218	0,012

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	10,000	2975
2	10,000	2975
3	10,000	2975
4	10,000	2975
5	10,000	2975
6	10,000	2975
7	10,000	2975
8	10,000	2975
9	10,000	2975
10	10,000	2975
11	10,000	2975
12	10,000	2975
13	10,000	2975
14	10,000	2975
15	10,000	2975
16	10,000	2975
16,5	10,000	2975
17	10,000	2975
17,5	10,000	2975
18	10,000	2975
18,5	10,000	2975
19	9,930	2975
19,5	9,725	2975
20	9,533	2975
20,5	9,352	2975
21	9,182	2975

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς. Η συγκέντρωση εκροής του αζώτου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 mg/L. Έτσι για τις τιμές του υδραυλικού χρόνου παραμονής t που $C_e < 10\text{mg/L}$, διορθώνουμε τις τιμές, θεωρώντας $C_e = 10\text{ mg/L}$. Επίσης όπου δεν τηρούνται τα όρια της απαιτούμενης έκτασης, διορθώνουμε τις τιμές του As, παίρνοντας ως ελάχιστο, την τιμή 850 m² και ως μέγιστο την τιμή 2975m².

■ Για $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	34,230	244	5,739	0,174
2	28,161	477	11,215	0,089
3	23,421	696	16,388	0,061
4	19,717	902	21,217	0,047
5	16,825	1091	25,669	0,039
6	14,565	1263	29,715	0,034
7	12,800	1417	33,340	0,030
8	11,421	1553	36,538	0,027
9	10,344	1671	39,317	0,025
10	9,503	1772	41,697	0,024
11	8,846	1858	43,708	0,023
12	8,332	1929	45,385	0,022
13	7,931	1988	46,769	0,021
14	7,618	2036	47,900	0,021
15	7,373	2075	48,816	0,020
16	7,182	2106	49,553	0,020
16,5	7,103	2119	49,864	0,020
17	7,033	2131	50,142	0,020
17,5	6,971	2142	50,390	0,020
18	6,916	2151	50,612	0,020
18,5	6,868	2159	50,808	0,020
19	6,825	2167	50,984	0,020
19,5	6,787	2173	51,139	0,020
20	6,754	2179	51,278	0,020
20,5	6,724	2185	51,401	0,019
21	6,698	2189	52,123	0,019

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	10,000	1711
2	10,000	1711
3	10,000	1711
4	10,000	1711
5	10,000	1711
6	10,000	1711
7	10,000	1711
8	10,000	1711
9	10,344	1671
10	9,503	1772
11	8,846	1858
12	8,332	1929
13	7,931	1988
14	7,618	2036
15	7,373	2075
16	7,182	2106
16,5	7,103	2119
17	7,033	2131
17,5	6,971	2142
18	6,916	2151
18,5	6,868	2159
19	6,825	2167
19,5	6,787	2173
20	6,754	2179
20,5	6,724	2185
21	6,698	2189

■ Για $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	28,097	380	8,934	0,112
2	19,638	907	21,330	0,047
3	14,493	1269	29,855	0,033
4	11,362	1559	36,682	0,027
5	9,458	1778	41,829	0,024
6	8,300	1934	45,496	0,022
7	7,595	2039	47,986	0,021
8	7,166	2109	49,616	0,020
9	6,905	2153	50,657	0,020
10	6,746	2181	51,309	0,019
11	6,650	2198	51,713	0,019
12	6,591	2208	51,962	0,019
13	6,555	2215	52,115	0,019
14	6,534	2219	52,208	0,019
15	6,521	2221	52,265	0,019
16	6,512	2223	52,299	0,019
16,5	6,510	2223	52,311	0,019
17	6,508	2224	52,320	0,019
17,5	6,506	2224	52,328	0,019
18	6,505	2224	52,333	0,019
18,5	6,504	2224	52,338	0,019
19	6,503	2224	52,341	0,019
19,5	6,502	2225	52,344	0,019
20	6,502	2225	52,346	0,019
20,5	6,501	2225	52,347	0,019
21	6,501	2225	52,349	0,019

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	10,000	1355
2	10,000	1355
3	10,000	1355
4	10,000	1355
5	9,458	1408
6	8,300	1531
7	7,595	1615
8	7,166	1670
9	6,905	1705
10	6,746	1727
11	6,650	1741
12	6,591	1749
13	6,555	1754
14	6,534	1757
15	6,521	1759
16	6,512	1760
16,5	6,510	1761
17	6,508	1761
17,5	6,506	1761
18	6,505	1762
18,5	6,504	1762
19	6,503	1762
19,5	6,502	1762
20	6,502	1762
20,5	6,501	1762
21	6,501	1762

- Για $T = 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	22,277	508	11,942	0,084
2	13,511	908	21,359	0,047
3	9,616	1180	27,764	0,036
4	7,885	1339	31,502	0,032
5	7,115	1421	33,435	0,030
6	6,773	1460	34,363	0,029
7	6,622	1479	34,790	0,029
8	6,554	1487	34,983	0,029
9	6,524	1490	35,069	0,029
10	6,511	1492	35,108	0,028
11	6,505	1493	35,125	0,028
12	6,502	1493	35,133	0,028
13	6,501	1493	35,136	0,028
14	6,500	1493	35,138	0,028
15	6,500	1493	35,138	0,028
16	6,500	1493	35,139	0,028
16,5	6,500	1493	35,139	0,028
17	6,500	1493	35,139	0,028
17,5	6,500	1493	35,139	0,028
18	6,500	1493	35,139	0,028
18,5	6,500	1493	35,139	0,028
19	6,500	1493	35,139	0,028
19,5	6,500	1493	35,139	0,028
20	6,500	1493	35,139	0,028
20,5	6,500	1493	35,139	0,028
21	6,500	1493	35,139	0,028

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	10,000	1149
2	10,000	1149
3	9,616	1180
4	7,885	1339
5	7,115	1421
6	6,773	1460
7	6,622	1479
8	6,554	1487
9	6,524	1490
10	6,511	1492
11	6,505	1493
12	6,502	1493
13	6,501	1493
14	6,500	1493
15	6,500	1493
16	6,500	1493
16,5	6,500	1493
17	6,500	1493
17,5	6,500	1493
18	6,500	1493
18,5	6,500	1493
19	6,500	1493
19,5	6,500	1493
20	6,500	1493
20,5	6,500	1493
21	6,500	1493

- Για $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	19,560	569	13,393	0,075
2	11,304	978	23,002	0,043
3	8,267	1211	28,485	0,035
4	7,150	1319	31,029	0,032
5	6,739	1363	32,067	0,031
6	6,588	1380	32,464	0,031
7	6,532	1386	32,613	0,031
8	6,512	1388	32,668	0,031
9	6,504	1389	32,688	0,031
10	6,502	1390	32,696	0,031
11	6,501	1390	32,698	0,031
12	6,500	1390	32,700	0,031
13	6,500	1390	32,700	0,031
14	6,500	1390	32,700	0,031
15	6,500	1390	32,700	0,031
16	6,500	1390	32,700	0,031
16,5	6,500	1390	32,700	0,031
17	6,500	1390	32,700	0,031
17,5	6,500	1390	32,700	0,031
18	6,500	1390	32,700	0,031
18,5	6,500	1390	32,700	0,031
19	6,500	1390	32,700	0,031
19,5	6,500	1390	32,700	0,031
20	6,500	1390	32,700	0,031
20,5	6,500	1390	32,700	0,031
21	6,500	1390	32,700	0,031

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	10,000	1069
2	10,000	1069
3	8,267	1211
4	7,150	1319
5	6,739	1363
6	6,588	1380
7	6,532	1386
8	6,512	1388
9	6,504	1389
10	6,502	1390
11	6,501	1390
12	6,500	1390
13	6,500	1390
14	6,500	1390
15	6,500	1390
16	6,500	1390
16,5	6,500	1390
17	6,500	1390
17,5	6,500	1390
18	6,500	1390
18,5	6,500	1390
19	6,500	1390
19,5	6,500	1390
20	6,500	1390
20,5	6,500	1390
21	6,500	1390

■ Για $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	11,252	777	18,294	0,055
2	7,136	1046	24,618	0,041
3	6,585	1094	25,734	0,039
4	6,511	1100	25,890	0,039
5	6,502	1101	25,912	0,039
6	6,500	1101	25,914	0,039
7	6,500	1101	25,915	0,039
8	6,500	1101	25,915	0,039
9	6,500	1101	25,915	0,039
10	6,500	1101	25,915	0,039
11	6,500	1101	25,915	0,039
12	6,500	1101	25,915	0,039
13	6,500	1101	25,915	0,039
14	6,500	1101	25,915	0,039
15	6,500	1101	25,915	0,039
16	6,500	1101	25,915	0,039
16,5	6,500	1101	25,915	0,039
17	6,500	1101	25,915	0,039
17,5	6,500	1101	25,915	0,039
18	6,500	1101	25,915	0,039
18,5	6,500	1101	25,915	0,039
19	6,500	1101	25,915	0,039
19,5	6,500	1101	25,915	0,039
20	6,500	1101	25,915	0,039
20,5	6,500	1101	25,915	0,039
21	6,500	1101	25,915	0,039

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	10,000	847
2	7,136	1046
3	6,585	1094
4	6,511	1100
5	6,502	1101
6	6,500	1101
7	6,500	1101
8	6,500	1101
9	6,500	1101
10	6,500	1101
11	6,500	1101
12	6,500	1101
13	6,500	1101
14	6,500	1101
15	6,500	1101
16	6,500	1101
16,5	6,500	1101
17	6,500	1101
17,5	6,500	1101
18	6,500	1101
18,5	6,500	1101
19	6,500	1101
19,5	6,500	1101
20	6,500	1101
20,5	6,500	1101
21	6,500	1101

Με βάση τις παραπάνω διορθωμένες τιμές, κατασκευάζουμε το Διάγραμμα 4-2 που απεικονίζει τη μεταβολή του As συναρτήσει του C_e, για τις διάφορες θερμοκρασίες.

➤ Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση $C_e = C_0 \cdot [1 / (1 + K_T (t/x))]^x$

▪ Για $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	57897873,257	234	5,512	0,181
2	48029808,791	465	10,938	0,091
3	39957969,691	692	16,280	0,061
4	33335171,579	916	21,542	0,046
5	27885137,958	1136	26,726	0,037
6	23387262,743	1353	31,834	0,031
7	19664805,180	1567	36,868	0,027
8	16575709,329	1778	41,830	0,024
9	14005438,346	1986	46,723	0,021
10	11861361,410	2191	51,548	0,019
11	10068341,626	2393	56,307	0,018
12	8565256,232	2593	61,001	0,016
13	7302243,128	2789	65,634	0,015
14	6238515,155	2984	70,205	0,014
15	5340619,690	3176	74,718	0,013
20	2527333,281	4099	96,443	0,010
25	1249708,146	4968	116,893	0,009

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	57897873,257	850
2	48029808,791	850
3	39957969,691	850
4	33335171,579	916
5	27885137,958	1136
6	23387262,743	1353
7	19664805,180	1567
8	16575709,329	1778
9	14005438,346	1986
10	11861361,410	2191
11	10068341,626	2393
12	8565256,232	2593
13	7302243,128	2789
14	6238515,155	2975
15	5340619,690	2975
20	2527333,281	2975
25	1249708,146	2975

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς. Η συγκέντρωση εκροής των κοπρωδών κολοβακτηριδίων δεν πρέπει να ξεπερνά τη συγκέντρωση υποβάθρου που ισούται με 2000 cfu/100mL. Έτσι για τις τιμές του υδραυλικού χρόνου παραμονής t που $C_e < 2000\text{ cfu/100mL}$, διορθώνουμε τις τιμές, θεωρώντας $C_e = 2000\text{ cfu/100mL}$. Επίσης όπου δεν τηρούνται τα όρια της απαιτούμενης έκτασης, διορθώνουμε τις τιμές του As, παίρνοντας ως ελάχιστο, την τιμή 850 m² και ως μέγιστο την τιμή 2975m²

▪ Για $T = 10^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	Q/As
1	44719085,933	232	5,452	0,183
2	29033123,739	455	10,709	0,093
3	19134345,819	671	15,782	0,063
4	12788352,144	879	20,685	0,048
5	8659672,486	1081	25,429	0,039
6	5936307,299	1276	30,024	0,033
7	4116557,485	1465	34,478	0,029
8	2885749,655	1649	38,801	0,026
9	2043709,164	1827	42,999	0,023
10	1461394,666	2001	47,080	0,021
11	1054571,849	2170	51,050	0,020
12	767600,755	2334	54,915	0,018
13	563315,538	2494	58,680	0,017
14	416625,964	2650	62,350	0,016
15	310422,721	2802	65,931	0,015
20	78732,239	3512	82,624	0,012
25	22989,592	4148	97,603	0,010

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
1	44719085,933	850
2	29033123,739	850
3	19134345,819	850
4	12788352,144	879
5	8659672,486	1081
6	5936307,299	1276
7	4116557,485	1465
8	2885749,655	1649
9	2043709,164	1827
10	1461394,666	2001
11	1054571,849	2170
12	767600,755	2334
13	563315,538	2494
14	416625,964	2650
15	310422,721	2802
20	78732,239	2975
25	22989,592	2975

▪ Για $T = 15^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	Q/As
1	24670900,973	226	5,318	0,188
2	9451590,816	434	10,210	0,098
3	3887652,757	626	14,740	0,068
4	1700099,735	806	18,957	0,053
5	784209,586	973	22,903	0,044
6	379098,221	1131	26,609	0,038
7	191031,932	1279	30,104	0,033
8	99895,306	1420	33,410	0,030
9	54003,187	1553	36,546	0,027
10	30082,966	1680	39,529	0,025
11	17220,159	1801	42,374	0,024
12	10104,592	1916	45,092	0,022
13	6065,260	2027	47,695	0,021
14	3717,280	2133	50,191	0,020
15	2322,399	2235	52,590	0,019
20	281,661	2692	63,347	0,016
25	46,856	3081	72,493	0,014

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
1	24670900,973	850
2	9451590,816	850
3	3887652,757	850
4	1700099,735	806
5	784209,586	973
6	379098,221	1131
7	191031,932	1279
8	99895,306	1420
9	54003,187	1553
10	30082,966	1680
11	17220,159	1801
12	10104,592	1916
13	6065,260	2027
14	3717,280	2133
15	2322,399	2235
20	2000,000	2267
25	2000,000	2267

▪ Για $T = 18,5^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	Q/As
1	10981661,725	218	5,138	0,195
2	2207818,991	407	9,588	0,104
3	536426,345	574	13,512	0,074
4	151328,870	723	17,022	0,059
5	48172,790	858	20,197	0,050
6	16943,350	982	23,096	0,043
7	6479,873	1095	25,762	0,039
8	2661,362	1200	28,230	0,035
9	1162,336	1297	30,528	0,033
10	535,550	1389	32,677	0,031
11	258,635	1475	34,696	0,029
12	130,214	1555	36,600	0,027
13	68,038	1632	38,400	0,026
14	36,755	1705	40,108	0,025
15	20,462	1774	41,733	0,024
20	1,576	2076	48,845	0,020
25	0,191	2325	54,701	0,018

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
1	10981661,725	850
2	2207818,991	850
3	536426,345	850
4	151328,870	850
5	48172,790	858
6	16943,350	982
7	6479,873	1095
8	2661,362	1200
9	2000,000	1233
10	2000,000	1233
11	2000,000	1233
12	2000,000	1233
13	2000,000	1233
14	2000,000	1233
15	2000,000	1233
20	2000,000	1233
25	2000,000	1233

602Pro PRINT PACK Trial

▪ Για $T = 20^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	Q/As
1	6653324,769	214	5,029	0,199
2	930961,304	392	9,231	0,108
3	171905,871	546	12,840	0,078
4	39110,807	680	16,004	0,062
5	10471,114	800	18,820	0,053
6	3194,214	908	21,357	0,047
7	1084,400	1006	23,665	0,042
8	402,519	1096	25,783	0,039
9	161,151	1179	27,739	0,036
10	68,845	1256	29,556	0,034
11	31,114	1328	31,253	0,032
12	14,773	1396	32,844	0,030
13	7,326	1460	34,343	0,029
14	3,777	1520	35,759	0,028
15	2,016	1577	37,100	0,027
20	0,132	1824	42,922	0,023
25	0,014	2026	47,664	0,021

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
1	6653324,769	850
2	930961,304	850
3	171905,871	850
4	39110,807	850
5	10471,114	850
6	3194,214	908
7	2000,000	950
8	2000,000	950
9	2000,000	950
10	2000,000	950
11	2000,000	950
12	2000,000	950
13	2000,000	950
14	2000,000	950
15	2000,000	950
20	2000,000	950
25	2000,000	950

- Για $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	471110,022	190	4,478	0,223
2	13952,911	324	7,629	0,131
3	921,101	428	10,063	0,099
4	100,586	512	12,046	0,083
5	15,521	583	13,719	0,073
6	3,082	645	15,167	0,066
7	0,742	699	16,442	0,061
8	0,208	747	17,582	0,057
9	0,066	791	18,613	0,054
10	0,023	831	19,553	0,051
11	0,009	868	20,418	0,049
12	0,004	902	21,218	0,047
13	0,002	933	21,963	0,046
14	0,001	963	22,659	0,044
15	0,000	991	23,313	0,043
20	0,000	1109	26,093	0,038
25	0,000	1203	28,299	0,035

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	471110,022	850
2	13952,911	850
3	2000,000	850
4	2000,000	850
5	2000,000	850
6	2000,000	850
7	2000,000	850
8	2000,000	850
9	2000,000	850
10	2000,000	850
11	2000,000	850
12	2000,000	850
13	2000,000	850
14	2000,000	850
15	2000,000	850
20	2000,000	850
25	2000,000	850

Με βάση τις παραπάνω διορθωμένες τιμές, κατασκευάζουμε το Διάγραμμα 4-3 που απεικονίζει τη μεταβολή του As συναρτήσει του Ce, για τις διάφορες θερμοκρασίες.

MONTEAO Kadlec & Knight, 1996

➤ Απομάκρυνση BOD₅

Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$C_e = (C_0 - C^*) \cdot \exp(-K_T / \text{HLR}) + C^*.$$

Όπως παρατηρούμε, η σταθερά κινητικής K_T ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, επομένως η απομάκρυνση του BOD₅ θα είναι η ίδια σε όλες τις θερμοκρασίες.

Για όλες τις θερμοκρασίες

HLR (m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C ₀ *Q/As	Q/As
65	26,882	436,739	10,276	20435,56	0,097312
70	29,561	365,515	8,600	24417,58	0,116274
75	32,354	325,768	7,665	27396,83	0,130461
80	35,222	298,038	7,013	29945,84	0,142599
85	38,136	276,796	6,513	32243,91	0,153542
90	41,070	259,659	6,110	34371,96	0,163676
95	44,005	245,370	5,773	36373,68	0,173208

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

HLR (m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
65	26,882	850,000
70	29,561	850,000
75	32,354	850,000
80	35,222	850,000
85	38,136	850,000
90	41,070	850,000
95	44,005	850,000

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς. Όπου δεν τηρούνται τα όρια της απαιτούμενης έκτασης, διορθώνουμε τις τιμές του As, παίρνοντας ως ελάχιστο, την τιμή 850 m² και ως μέγιστο την τιμή 2975m².

Με βάση τις παραπάνω διορθωμένες τιμές, κατασκευάζουμε το Διάγραμμα 4-4 που απεικονίζει τη μεταβολή του As συναρτήσει του C_e, το οποίο είναι το ίδιο για όλες τις θερμοκρασίες.

➤ Απομάκρυνση Αζώτου

Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$C_e = (C_0 - C^*) \cdot \exp(-K_T / \text{HLR}) + C^*.$$

- Για $T = 5^\circ\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
7	7,834	2960,503	69,659	0,014
8	9,487	2643,233	62,194	0,016
9	11,066	2403,007	56,541	0,018
10	12,551	2214,093	52,096	0,019
15	18,538	1660,368	39,067	0,026
20	22,656	1388,932	32,681	0,031
25	25,590	1227,360	28,879	0,035
30	27,769	1120,105	26,355	0,038
35	29,445	1043,698	24,558	0,041
40	30,772	986,496	23,212	0,043
45	31,847	942,064	22,166	0,045
50	32,735	906,553	21,331	0,047
55	33,482	877,522	20,648	0,048
60	34,117	853,344	20,079	0,050
65	34,665	832,897	19,598	0,051
70	35,142	815,378	19,185	0,052
75	35,560	800,201	18,828	0,053
80	35,931	786,925	18,516	0,054
85	36,261	775,214	18,240	0,055
90	36,558	764,807	17,995	0,056
95	36,825	755,497	17,776	0,056

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
7	7,834	2960,503
8	9,487	2643,233
9	10,000	2559,833
10	10,000	2559,833
15	10,000	2559,833
20	10,000	2559,833
25	10,000	2559,833
30	10,000	2559,833
35	10,000	2559,833
40	10,000	2559,833
45	10,000	2559,833
50	10,000	2559,833
55	10,000	2559,833
60	10,000	2559,833
65	10,000	2559,833
70	10,000	2559,833
75	10,000	2559,833
80	10,000	2559,833
85	10,000	2559,833
90	10,000	2559,833
95	10,000	2559,833

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς. Η συγκέντρωση εκροής του αζώτου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 mg/L. Έτσι για τις τιμές του υδραυλικού ρυθμού φόρτισης HLR που $C_e < 10\text{mg/L}$, διορθώνουμε τις τιμές, θεωρώντας $C_e = 10\text{ mg/L}$. Επίσης όπου δεν τηρούνται τα όρια της απαιτούμενης έκτασης, διορθώνουμε τις τιμές του As, παίρνοντας ως ελάχιστο, την τιμή 850 m² και ως μέγιστο την τιμή 2975m².

- Για $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
7	5,294	2909,363	68,456	0,015
8	6,601	2560,602	60,249	0,017
9	7,921	2304,799	54,231	0,018
10	9,219	2107,122	49,579	0,020
15	14,913	1539,024	36,212	0,028
20	19,182	1264,374	29,750	0,034
25	22,369	1101,613	25,920	0,039
30	24,808	993,795	23,383	0,043
35	26,722	917,077	21,578	0,046
40	28,260	859,687	20,228	0,049
45	29,521	815,132	19,180	0,052
50	30,572	779,537	18,342	0,055
55	31,462	750,446	17,658	0,057
60	32,224	726,223	17,088	0,059
65	32,884	705,742	16,606	0,060
70	33,461	688,196	16,193	0,062
75	33,969	672,998	15,835	0,063
80	34,421	659,705	15,522	0,064
85	34,825	647,980	15,247	0,066
90	35,188	637,561	15,001	0,067
95	35,516	628,242	14,782	0,068

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
7	5,294	2909,363
8	6,601	2560,602
9	7,921	2304,799
10	9,219	2107,122
15	10,000	2005,696
20	10,000	2005,696
25	10,000	2005,696
30	10,000	2005,696
35	10,000	2005,696
40	10,000	2005,696
45	10,000	2005,696
50	10,000	2005,696
55	10,000	2005,696
60	10,000	2005,696
65	10,000	2005,696
70	10,000	2005,696
75	10,000	2005,696
80	10,000	2005,696
85	10,000	2005,696
90	10,000	2005,696
95	10,000	2005,696

602Pro PRINT PACK Trial

- Για $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
8	4,377	2558,751	60,206	0,017
9	5,360	2262,906	53,245	0,019
10	6,383	2045,272	48,124	0,021
15	11,384	1448,811	34,090	0,029
20	15,563	1168,762	27,500	0,036
25	18,876	1004,139	23,627	0,042
30	21,508	895,472	21,070	0,047
35	23,629	818,301	19,254	0,052
40	25,365	760,640	17,897	0,056
45	26,810	715,912	16,845	0,059
50	28,028	680,199	16,005	0,062
55	29,068	651,024	15,318	0,065
60	29,966	626,740	14,747	0,068
65	30,749	606,211	14,264	0,070
70	31,437	588,630	13,850	0,072
75	32,046	573,403	13,492	0,074
80	32,589	560,087	13,179	0,076
85	33,077	548,343	12,902	0,078
90	33,516	537,909	12,657	0,079
95	33,915	528,577	12,437	0,080

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
8	4,377	2558,751
9	5,360	2262,906
10	6,383	2045,272
15	10,000	1571,515
20	10,000	1571,515
25	10,000	1571,515
30	10,000	1571,515
35	10,000	1571,515
40	10,000	1571,515
45	10,000	1571,515
50	10,000	1571,515
55	10,000	1571,515
60	10,000	1571,515
65	10,000	1571,515
70	10,000	1571,515
75	10,000	1571,515
80	10,000	1571,515
85	10,000	1571,515
90	10,000	1571,515
95	10,000	1571,515

602Pro PRINT PACK Trial

- Για $T = 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
8	3,259	2672,828	62,890	0,016
9	3,992	2291,168	53,910	0,019
10	4,793	2039,126	47,979	0,021
15	9,101	1402,603	33,002	0,030
20	13,049	1116,318	26,266	0,038
25	16,343	949,705	22,346	0,045
30	19,046	840,172	19,769	0,051
35	21,273	762,550	17,942	0,056
40	23,127	704,626	16,579	0,060
45	24,688	659,731	15,523	0,064
50	26,018	623,906	14,680	0,068
55	27,163	594,652	13,992	0,071
60	28,157	570,311	13,419	0,075
65	29,029	549,739	12,935	0,077
70	29,798	532,125	12,521	0,080
75	30,483	516,871	12,162	0,082
80	31,095	503,535	11,848	0,084
85	31,647	491,774	11,571	0,086
90	32,145	481,326	11,325	0,088
95	32,598	471,982	11,105	0,090

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
8	3,259	2672,828
9	3,992	2291,168
10	4,793	2039,126
15	9,101	1402,603
20	10,000	1324,817
25	10,000	1324,817
30	10,000	1324,817
35	10,000	1324,817
40	10,000	1324,817
45	10,000	1324,817
50	10,000	1324,817
55	10,000	1324,817
60	10,000	1324,817
65	10,000	1324,817
70	10,000	1324,817
75	10,000	1324,817
80	10,000	1324,817
85	10,000	1324,817
90	10,000	1324,817
95	10,000	1324,817

602Pro PRINT PACK Trial

- Για $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
8	2,886	2811,321	66,149	0,015
9	3,516	2333,320	54,902	0,018
10	4,222	2051,941	48,281	0,021
15	8,195	1387,150	32,639	0,031
20	11,999	1097,149	25,815	0,039
25	15,254	929,417	21,869	0,046
30	17,966	819,412	19,280	0,052
35	20,225	741,549	17,448	0,057
40	22,121	683,486	16,082	0,062
45	23,727	638,505	15,024	0,067
50	25,101	602,622	14,179	0,071
55	26,289	573,328	13,490	0,074
60	27,324	548,957	12,917	0,077
65	28,233	528,364	12,432	0,080
70	29,039	510,732	12,017	0,083
75	29,756	495,466	11,658	0,086
80	30,399	482,118	11,344	0,088
85	30,978	470,349	11,067	0,090
90	31,503	459,894	10,821	0,092
95	31,981	450,544	10,601	0,094

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
8	2,886	2811,321
9	3,516	2333,320
10	4,222	2051,941
15	8,195	1387,150
20	10,000	1231,323
25	10,000	1231,323
30	10,000	1231,323
35	10,000	1231,323
40	10,000	1231,323
45	10,000	1231,323
50	10,000	1231,323
55	10,000	1231,323
60	10,000	1231,323
65	10,000	1231,323
70	10,000	1231,323
75	10,000	1231,323
80	10,000	1231,323
85	10,000	1231,323
90	10,000	1231,323
95	10,000	1231,323

- Για $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
10	2,791	2300,613	54,132	0,018
15	5,571	1358,202	31,958	0,031
20	8,731	1047,043	24,636	0,041
25	11,705	873,639	20,556	0,049
30	14,341	761,374	17,915	0,056
35	16,631	682,399	16,056	0,062
40	18,613	623,712	14,676	0,068
45	20,332	578,347	13,608	0,073
50	21,830	542,212	12,758	0,078
55	23,145	512,743	12,065	0,083
60	24,305	488,247	11,488	0,087
65	25,335	467,560	11,001	0,091
70	26,255	449,858	10,585	0,094
75	27,081	434,536	10,224	0,098
80	27,826	421,144	9,909	0,101
85	28,502	409,339	9,632	0,104
90	29,117	398,855	9,385	0,107
95	29,679	389,481	9,164	0,109

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

HLR(m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
10	2,791	2300,613
15	5,571	1358,202
20	8,731	1047,043
25	10,000	964,774
30	10,000	964,774
35	10,000	964,774
40	10,000	964,774
45	10,000	964,774
50	10,000	964,774
55	10,000	964,774
60	10,000	964,774
65	10,000	964,774
70	10,000	964,774
75	10,000	964,774
80	10,000	964,774
85	10,000	964,774
90	10,000	964,774
95	10,000	964,774

602Pro PRINT PACK Trial

Με βάση τις παραπάνω διορθωμένες τιμές, κατασκευάζουμε το Διάγραμμα 4-

5 που απεικονίζει τη μεταβολή του As συναρτήσει του Ce, για τις διάφορες θερμοκρασίες.

➤ Απομάκρυνση Κοπρωδών Κολοβακτηριδίων

Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$C_e = (C_o - C^*) \cdot \exp(-K_T / \text{HLR}) + C^*.$$

Όπως παρατηρούμε, η σταθερά κινητικής K_T ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, επομένως η απομάκρυνση του BOD₅ θα είναι η ίδια σε όλες τις θερμοκρασίες.

Για όλες τις θερμοκρασίες

HLR (m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
9	2623,365	2247,780	52,889	0,019
10	6039,568	1790,411	42,127	0,024
15	125125,827	1215,840	28,608	0,035

Τιμές που τηρούν τους περιορισμούς

HLR (m/d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
9	2623,365	2247,780
10	6039,568	1790,411
15	125125,827	1215,840

Με βάση τις παραπάνω, κατασκευάζουμε το Διάγραμμα 4-6 που απεικονίζει τη μεταβολή του As συναρτήσει του C_e, το οποίο είναι το ίδιο για όλες τις θερμοκρασίες.

602Pro PRINT PACK Trial

MONTEAO Crites & Tchobanoglous, 1998

➤ Απομάκρυνση BOD₅

Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση $C_e = C_0 \cdot \exp(-K_T \cdot t)$.

- Για $T = 5^\circ\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C ₀ *Q/As	Q/As
0,5	166,797	118	2,778	75600,000	0,360
1	132,482	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	105,227	354	8,333	25200,000	0,120
2	83,578	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	66,384	590	13,889	15120,000	0,072
3	52,727	708	16,667	12600,000	0,060
3,5	41,879	826	19,444	10800,000	0,051
4	33,264	944	22,222	9450,000	0,045
4,5	26,420	1063	25,000	8400,000	0,040
5	20,985	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	16,668	1299	30,556	6872,727	0,033
6	13,239	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	10,515	1535	36,111	5815,385	0,028
7	8,352	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	6,634	1771	41,667	5040,000	0,024
8	5,269	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	4,185	2007	47,222	4447,059	0,021
9	3,324	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	166,797	850
1	132,482	850
1,5	105,227	850
2	83,578	850
2,5	66,384	850
3	52,727	850
3,5	41,879	850
4	33,264	944
4,5	26,420	1063
5	20,985	1181
5,5	16,668	1299
6	13,239	1417
6,5	10,515	1535
7	8,352	1653
7,5	6,634	1771
8	5,269	1889
8,5	5,000	1916
9	5,000	1916

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς. Η συγκέντρωση εκροής του BOD₅ δεν πρέπει να ξεπερνά τη συγκέντρωση υποβάθρου που ισούται με 5 mg/L. Έτσι για τις τιμές του υδραυλικού χρόνου παραμονής t που $C_e < 5 \text{ mg/L}$, διορθώνουμε τις τιμές, θεωρώντας $C_e < 5 \text{ mg/L}$. Επίσης όπου δεν τηρούνται τα όρια της απαιτούμενης έκτασης, διορθώνουμε τις τιμές του As, παίρνοντας ως ελάχιστο, την τιμή 850 m² και ως μέγιστο την τιμή 2975m².

■ Για $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	$C_o \cdot Q/\text{As}$	Q/As
0,5	154,296	118	2,778	75600,000	0,360
1	113,368	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	83,296	354	8,333	25200,000	0,120
2	61,202	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	44,967	590	13,889	15120,000	0,072
3	33,040	708	16,667	12600,000	0,060
3,5	24,276	826	19,444	10800,000	0,051
4	17,836	944	22,222	9450,000	0,045
4,5	13,105	1063	25,000	8400,000	0,040
5	9,629	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	7,075	1299	30,556	6872,727	0,033
6	5,198	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	3,819	1535	36,111	5815,385	0,028
7	2,806	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	2,062	1771	41,667	5040,000	0,024
8	1,515	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	1,113	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,818	2125	50,000	4200,000	0,020

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
0,5	154,296	850
1	113,368	850
1,5	83,296	850
2	61,202	850
2,5	44,967	850
3	33,040	850
3,5	24,276	850
4	17,836	944
4,5	13,105	1063
5	9,629	1181
5,5	7,075	1299
6	5,198	1417
6,5	5,000	1432
7	5,000	1432
7,5	5,000	1432
8	5,000	1432
8,5	5,000	1432
9	5,000	1432

602Pro PRINT PACK Trial

■ Για $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	$C_o \cdot Q/\text{As}$	Q/As
0,5	139,020	118	2,778	75600,000	0,360
1	92,032	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	60,925	354	8,333	25200,000	0,120
2	40,333	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	26,700	590	13,889	15120,000	0,072
3	17,676	708	16,667	12600,000	0,060
3,5	11,701	826	19,444	10800,000	0,051
4	7,746	944	22,222	9450,000	0,045
4,5	5,128	1063	25,000	8400,000	0,040
5	3,395	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	2,247	1299	30,556	6872,727	0,033
6	1,488	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	0,985	1535	36,111	5815,385	0,028
7	0,652	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	0,432	1771	41,667	5040,000	0,024
8	0,286	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	0,189	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,125	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
0,5	139,020	850
1	92,032	850
1,5	60,925	850
2	40,333	850
2,5	26,700	850
3	17,676	850
3,5	11,701	850
4	7,746	944
4,5	5,128	1063
5	5,000	1070
5,5	5,000	1070
6	5,000	1070
6,5	5,000	1070
7	5,000	1070
7,5	5,000	1070
8	5,000	1070
8,5	5,000	1070
9	5,000	1070

- Για $T = 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C _o *Q/As	Q/As
0,5	126,635	118	2,778	75600,000	0,360
1	76,363	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	46,049	354	8,333	25200,000	0,120
2	27,768	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	16,745	590	13,889	15120,000	0,072
3	10,098	708	16,667	12600,000	0,060
3,5	6,089	826	19,444	10800,000	0,051
3,6	5,503	850	20,000	10500,000	0,050
4	3,672	944	22,222	9450,000	0,045
5	1,335	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	0,805	1299	30,556	6872,727	0,033
6	0,486	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	0,293	1535	36,111	5815,385	0,028
7	0,177	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	0,106	1771	41,667	5040,000	0,024
8	0,064	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	0,039	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,023	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	126,635	850
1	76,363	850
1,5	46,049	850
2	27,768	850
2,5	16,745	850
3	10,098	850
3,5	6,089	850
3,6	5,503	850
4	5,000	872
5	5,000	872
5,5	5,000	872
6	5,000	872
6,5	5,000	872
7	5,000	872
7,5	5,000	872
8	5,000	872
8,5	5,000	872
9	5,000	872

602Pro PRINT PACK Trial

- Για $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C _o *Q/As	Q/As
0,5	126,635	118	2,778	75600,000	0,360
1	76,363	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	46,049	354	8,333	25200,000	0,120
2	27,768	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	16,745	590	13,889	15120,000	0,072
3	10,098	708	16,667	12600,000	0,060
3,1	9,126	732	17,222	12193,548	0,058
3,2	8,248	756	17,778	11812,500	0,056
3,3	7,454	779	18,333	11454,545	0,055
3,4	6,737	803	18,889	11117,647	0,053
5,5	0,805	1299	30,556	6872,727	0,033
6	0,486	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	0,293	1535	36,111	5815,385	0,028
7	0,177	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	0,106	1771	41,667	5040,000	0,024
8	0,064	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	0,039	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,023	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	126,635	850
1	76,363	850
1,5	46,049	850
2	27,768	850
2,5	16,745	850
3	10,098	850
3,1	9,126	850
3,2	8,248	850
3,3	7,454	850
3,4	5,000	850
5,5	5,000	850
6	5,000	850
6,5	5,000	850
7	5,000	850
7,5	5,000	850
8	5,000	850
8,5	5,000	850
9	5,000	850

- Για $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	C _o *Q/As	Q/As
0,5	120,917	118	2,778	75600,000	0,360
1	69,624	236	5,556	37800,000	0,180
1,5	40,089	354	8,333	25200,000	0,120
2	23,083	472	11,111	18900,000	0,090
2,5	13,291	590	13,889	15120,000	0,072
3	7,653	708	16,667	12600,000	0,060
3,35	5,200	791	18,611	11283,582	0,054
4	2,537	944	22,222	9450,000	0,045
4,5	1,461	1063	25,000	8400,000	0,040
5	0,841	1181	27,778	7560,000	0,036
5,5	0,484	1299	30,556	6872,727	0,033
6	0,279	1417	33,333	6300,000	0,030
6,5	0,161	1535	36,111	5815,385	0,028
7	0,092	1653	38,889	5400,000	0,026
7,5	0,053	1771	41,667	5040,000	0,024
8	0,031	1889	44,444	4725,000	0,023
8,5	0,018	2007	47,222	4447,059	0,021
9	0,010	2125	50,000	4200,000	0,020

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	120,917	850
1	69,624	850
1,5	40,089	850
2	23,083	850
2,5	13,291	850
3	5,000	850
3,35	5,000	850
4	5,000	850
4,5	5,000	850
5	5,000	850
5,5	5,000	850
6	5,000	850
6,5	5,000	850
7	5,000	850
7,5	5,000	850
8	5,000	850
8,5	5,000	850
9	5,000	850

Με βάση τις παραπάνω διορθωμένες τιμές, κατασκευάζουμε το Διάγραμμα 4-7 που απεικονίζει τη μεταβολή του As συναρτήσει του C_o για τις διάφορες θερμοκρασίες.

➤ Απομάκρυνση Αζώτου

Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$C_e = 0,193(C_0) + 1,55 \ln(HLR) - 1,75, \quad \text{όπου } C_0 = C_{e(\alpha\mu\mu\omega\nu\iota\alpha\varsigma)} + C_{e(\nu\iota\tau\rho\iota\kappa\acute{o}\nu)}$$

Για $T = 5^\circ\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
0,5	10,339	3377	79,462	0,013
1	10,208	3408	80,189	0,012
2	9,963	3467	81,567	0,012
3	9,740	3521	82,845	0,012
4	9,539	3571	84,029	0,012
5	9,356	3618	85,125	0,012
6	9,191	3661	86,137	0,012
7	9,041	3701	87,071	0,011
8	8,905	3737	87,931	0,011
9	8,781	3771	88,722	0,011
10	8,669	3802	89,449	0,011
11	8,568	3830	90,116	0,011
12	8,476	3856	90,727	0,011
13	8,393	3880	91,288	0,011
14	8,317	3902	91,801	0,011
15	8,248	3921	92,270	0,011
16	8,186	3940	92,698	0,011
17	8,130	3956	93,090	0,011
18	8,079	3972	93,447	0,011
19	8,033	3985	93,773	0,011
20	7,991	3998	94,070	0,011
21	7,953	4009	94,341	0,011
22	7,918	4020	94,588	0,011
23	7,887	4030	94,812	0,011
24	7,858	4038	95,016	0,011
25	7,833	4046	96,336	0,011

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	10,000	2975
1	10,000	2975
2	9,963	2975
3	9,740	2975
4	9,539	2975
5	9,356	2975
6	9,191	2975
7	9,041	2975
8	8,905	2975
9	8,781	2975
10	8,669	2975
11	8,568	2975
12	8,476	2975
13	8,393	2975
14	8,317	2975
15	8,248	2975
16	8,186	2975
17	8,130	2975
18	8,079	2975
19	8,033	2975
20	7,991	2975
21	7,953	2975
22	7,918	2975
23	7,887	2975
24	7,858	2975
25	7,833	2975

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς. Η συγκέντρωση εκροής του αζώτου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 mg/L. Έτσι για τις τιμές του υδραυλικού χρόνου παραμονής t που $C_e < 10\text{mg/L}$, διορθώνουμε τις τιμές, θεωρώντας $C_e < 10\text{ mg/L}$. Επίσης όπου δεν τηρούνται τα όρια της απαιτούμενης έκτασης, διορθώνουμε τις τιμές του As, παίρνοντας ως ελάχιστο, την τιμή 850 m² και ως μέγιστο την τιμή 2975m².

■ Για $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
0,5	10,205	1687	39,697	0,025
1	9,958	1716	40,385	0,025
2	9,531	1769	41,613	0,024
3	9,181	1813	42,663	0,023
4	8,894	1851	43,554	0,023
5	8,659	1883	44,308	0,023
6	8,465	1910	44,941	0,022
7	8,307	1933	45,471	0,022
8	8,177	1951	45,914	0,022
9	8,070	1967	46,282	0,022
10	7,983	1980	46,588	0,021
11	7,911	1991	46,842	0,021
12	7,852	2000	47,052	0,021
13	7,804	2007	47,225	0,021
14	7,764	2013	47,368	0,021
15	7,731	2018	47,485	0,021
16	7,705	2022	47,582	0,021
17	7,683	2026	47,662	0,021
18	7,665	2028	47,728	0,021
19	7,650	2031	47,782	0,021
20	7,638	2033	47,826	0,021
21	7,628	2034	47,863	0,021
22	7,620	2035	47,893	0,021
23	7,613	2036	47,917	0,021
24	7,608	2037	47,937	0,021
25	7,603	2038	48,525	0,021

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	10,000	1711
1	9,958	1716
2	9,531	1769
3	9,181	1813
4	8,894	1851
5	8,659	1883
6	8,465	1910
7	8,307	1933
8	8,177	1951
9	8,070	1967
10	7,983	1980
11	7,911	1991
12	7,852	2000
13	7,804	2007
14	7,764	2013
15	7,731	2018
16	7,705	2022
17	7,683	2026
18	7,665	2028
19	7,650	2031
20	7,638	2033
21	7,628	2034
22	7,620	2035
23	7,613	2036
24	7,608	2037
25	7,603	2038

■ Για $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
0,5	10,459	1313	30,893	0,032
1	10,159	1340	31,540	0,032
2	9,660	1388	32,659	0,031
3	9,272	1427	33,571	0,030
4	8,969	1458	34,308	0,029
5	8,734	1483	34,899	0,029
6	8,550	1503	35,371	0,028
7	8,407	1519	35,746	0,028
8	8,296	1532	36,042	0,028
9	8,210	1542	36,275	0,028
10	8,142	1549	36,458	0,027
11	8,089	1556	36,602	0,027
12	8,049	1560	36,715	0,027
13	8,017	1564	36,803	0,027
14	7,992	1567	36,872	0,027
15	7,972	1569	36,926	0,027
16	7,957	1571	36,968	0,027
17	7,946	1573	37,001	0,027
18	7,937	1574	37,026	0,027
19	7,929	1574	37,046	0,027
20	7,924	1575	37,062	0,027
21	7,920	1576	37,074	0,027
22	7,916	1576	37,083	0,027
23	7,914	1576	37,091	0,027
24	7,912	1577	37,097	0,027
25	7,910	1577	37,543	0,027

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	10,000	1355
1	10,000	1355
2	9,660	1388
3	9,272	1427
4	8,969	1458
5	8,734	1483
6	8,550	1503
7	8,407	1519
8	8,296	1532
9	8,210	1542
10	8,142	1549
11	8,089	1556
12	8,049	1560
13	8,017	1564
14	7,992	1567
15	7,972	1569
16	7,957	1571
17	7,946	1573
18	7,937	1574
19	7,929	1574
20	7,924	1575
21	7,920	1576
22	7,916	1576
23	7,914	1576
24	7,912	1577
25	7,910	1577

- Για $T = 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
0,5	11,723	1021	24,032	0,042
1	11,361	1046	24,623	0,041
2	10,788	1088	25,597	0,039
3	10,371	1119	26,340	0,038
4	10,067	1143	26,900	0,037
5	9,846	1161	27,319	0,037
6	9,685	1174	27,629	0,036
7	9,567	1184	27,859	0,036
8	9,482	1191	28,028	0,036
9	9,419	1196	28,152	0,036
10	9,374	1200	28,243	0,035
11	9,341	1203	28,310	0,035
12	9,317	1205	28,358	0,035
13	9,300	1207	28,394	0,035
14	9,287	1208	28,420	0,035
15	9,277	1209	28,438	0,035
16	9,271	1209	28,452	0,035
17	9,266	1210	28,462	0,035
18	9,262	1210	28,470	0,035
19	9,260	1210	28,475	0,035
20	9,258	1210	28,479	0,035
21	9,256	1210	28,482	0,035
22	9,255	1211	28,484	0,035
23	9,254	1211	28,485	0,035
24	9,254	1211	28,486	0,035
25	9,254	1211	28,826	0,035

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	10,000	1149
1	10,000	1149
2	10,000	1149
3	10,000	1149
4	9,738	1170
5	9,510	1189
6	9,341	1203
7	9,215	1214
8	9,121	1222
9	9,052	1228
10	9,000	1233
11	8,961	1236
12	8,932	1239
13	8,911	1241
14	8,895	1242
15	8,883	1243
16	8,874	1244
17	8,867	1245
18	8,862	1245
19	8,859	1246
20	8,856	1246
21	8,854	1246
22	8,852	1246
23	8,851	1246
24	8,851	1246
25	8,850	1246

■ Για $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
0,5	11,723	950	22,364	0,045
1	11,361	974	22,914	0,044
2	10,788	1012	23,821	0,042
3	10,371	1042	24,512	0,041
4	10,067	1064	25,033	0,040
5	9,846	1080	25,423	0,039
6	9,685	1093	25,712	0,039
7	9,567	1102	25,926	0,039
8	9,482	1109	26,083	0,038
9	9,419	1113	26,199	0,038
10	9,374	1117	26,283	0,038
11	9,341	1120	26,345	0,038
12	9,317	1122	26,390	0,038
13	9,300	1123	26,423	0,038
14	9,287	1124	26,447	0,038
15	9,277	1125	26,465	0,038
16	9,271	1125	26,478	0,038
17	9,266	1126	26,487	0,038
18	9,262	1126	26,494	0,038
19	9,260	1126	26,499	0,038
20	9,258	1126	26,502	0,038
21	9,256	1126	26,505	0,038
22	9,255	1127	26,507	0,038
23	9,254	1127	26,508	0,038
24	9,254	1127	26,509	0,038
25	9,254	1127	26,826	0,038

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	10,000	1069
1	10,000	1069
2	10,000	1069
3	10,000	1069
4	10,000	1069
5	9,846	1080
6	9,685	1093
7	9,567	1102
8	9,482	1109
9	9,419	1113
10	9,374	1117
11	9,341	1120
12	9,317	1122
13	9,300	1123
14	9,287	1124
15	9,277	1125
16	9,271	1125
17	9,266	1126
18	9,262	1126
19	9,260	1126
20	9,258	1126
21	9,256	1126
22	9,255	1127
23	9,254	1127
24	9,254	1127
25	9,254	1127

■ Για $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
0,5	11,895	745	17,522	0,057
1	11,465	766	18,033	0,055
2	10,825	800	18,830	0,053
3	10,397	824	19,392	0,052
4	10,109	841	19,781	0,051
5	9,916	852	20,048	0,050
6	9,787	860	20,230	0,049
7	9,701	865	20,354	0,049
8	9,643	869	20,437	0,049
9	9,604	871	20,493	0,049
10	9,578	873	20,531	0,049
11	9,560	874	20,556	0,049
12	9,548	874	20,573	0,049
13	9,541	875	20,585	0,049
14	9,535	875	20,593	0,049
15	9,532	875	20,598	0,049
16	9,529	876	20,601	0,049
17	9,528	876	20,603	0,049
18	9,527	876	20,605	0,049
19	9,526	876	20,606	0,049
20	9,526	876	20,607	0,049
21	9,525	876	20,607	0,049
22	9,525	876	20,608	0,049
23	9,525	876	20,608	0,049
24	9,525	876	20,608	0,049
25	9,525	876	20,853	0,049

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
0,5	10,000	850
1	10,000	850
2	10,000	850
3	10,000	850
4	10,000	850
5	9,916	852
6	9,787	860
7	9,701	865
8	9,643	869
9	9,604	871
10	9,578	873
11	9,560	874
12	9,548	874
13	9,541	875
14	9,535	875
15	9,532	875
16	9,529	876
17	9,528	876
18	9,527	876
19	9,526	876
20	9,526	876
21	9,525	876
22	9,525	876
23	9,525	876
24	9,525	876
25	9,525	876

Με βάση τις παραπάνω διορθωμένες τιμές, κατασκευάζουμε το Διάγραμμα 4-8 που απεικονίζει τη μεταβολή του As συναρτήσει του C_e, για τις διάφορες θερμοκρασίες.

➤ Απομάκρυνση Κολοβακτηριδίων

Η συγκέντρωση εκροής υπολογίζεται με βάση τη σχέση: $C_e = C_0 \cdot [1 / (1 + K_T (t/x))]^x$

▪ Για $T = 5^\circ\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	57897873,257	234	5,512	0,181
2	48029808,791	465	10,938	0,091
3	39957969,691	692	16,280	0,061
4	33335171,579	916	21,542	0,046
5	27885137,958	1136	26,726	0,037
6	23387262,743	1353	31,834	0,031
7	19664805,180	1567	36,868	0,027
8	16575709,329	1778	41,830	0,024
9	14005438,346	1986	46,723	0,021
10	11861361,410	2191	51,548	0,019
11	10068341,626	2393	56,307	0,018
12	8565256,232	2593	61,001	0,016
13	7302243,128	2789	65,634	0,015
14	6238515,155	2984	70,205	0,014
15	5340619,690	3176	74,718	0,013
20	2527333,281	4099	96,443	0,010
25	1249708,146	4968	116,893	0,009

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	57897873,257	850
2	48029808,791	850
3	39957969,691	850
4	33335171,579	916
5	27885137,958	1136
6	23387262,743	1353
7	19664805,180	1567
8	16575709,329	1778
9	14005438,346	1986
10	11861361,410	2191
11	10068341,626	2393
12	8565256,232	2593
13	7302243,128	2789
14	6238515,155	2975
15	5340619,690	2975
20	2527333,281	2975
25	1249708,146	2975

Με έντονο χρώμα φαίνονται οι τιμές που υπερβαίνουν τους περιορισμούς.

Η συγκέντρωση εκροής των κοπρωδών κολοβακτηριδίων δεν πρέπει να ξεπερνά τη συγκέντρωση υποβάθρου που ισούται με 2000 cfu/100mL. Έτσι για τις τιμές του υδραυλικού χρόνου παραμονής t που $C_e < 2000 \text{ cfu/100mL}$, διορθώνουμε τις τιμές, θεωρώντας $C_e = 2000 \text{ cfu/100mL}$. Επίσης όπου δεν τηρούνται τα όρια της απαιτούμενης έκτασης, διορθώνουμε τις τιμές του As, παίρνοντας ως ελάχιστο, την τιμή 850 m² και ως μέγιστο την τιμή 2975m²

■ Για $T = 10^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	Q/As
1	44719085,933	232	5,452	0,183
2	29033123,739	455	10,709	0,093
3	19134345,819	671	15,782	0,063
4	12788352,144	879	20,685	0,048
5	8659672,486	1081	25,429	0,039
6	5936307,299	1276	30,024	0,033
7	4116557,485	1465	34,478	0,029
8	2885749,655	1649	38,801	0,026
9	2043709,164	1827	42,999	0,023
10	1461394,666	2001	47,080	0,021
11	1054571,849	2170	51,050	0,020
12	767600,755	2334	54,915	0,018
13	563315,538	2494	58,680	0,017
14	416625,964	2650	62,350	0,016
15	310422,721	2802	65,931	0,015
20	78732,239	3512	82,624	0,012
25	22989,592	4148	97,603	0,010

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
1	44719085,933	850
2	29033123,739	850
3	19134345,819	850
4	12788352,144	879
5	8659672,486	1081
6	5936307,299	1276
7	4116557,485	1465
8	2885749,655	1649
9	2043709,164	1827
10	1461394,666	2001
11	1054571,849	2170
12	767600,755	2334
13	563315,538	2494
14	416625,964	2650
15	310422,721	2802
20	78732,239	2975
25	22989,592	2975

602Pro PRINT PACK Trial

■ Για $T = 15^{\circ}\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	Q/As
1	24670900,973	226	5,318	0,188
2	9451590,816	434	10,210	0,098
3	3887652,757	626	14,740	0,068
4	1700099,735	806	18,957	0,053
5	784209,586	973	22,903	0,044
6	379098,221	1131	26,609	0,038
7	191031,932	1279	30,104	0,033
8	99895,306	1420	33,410	0,030
9	54003,187	1553	36,546	0,027
10	30082,966	1680	39,529	0,025
11	17220,159	1801	42,374	0,024
12	10104,592	1916	45,092	0,022
13	6065,260	2027	47,695	0,021
14	3717,280	2133	50,191	0,020
15	2322,399	2235	52,590	0,019
20	281,661	2692	63,347	0,016
25	46,856	3081	72,493	0,014

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
1	24670900,973	850
2	9451590,816	850
3	3887652,757	850
4	1700099,735	806
5	784209,586	973
6	379098,221	1131
7	191031,932	1279
8	99895,306	1420
9	54003,187	1553
10	30082,966	1680
11	17220,159	1801
12	10104,592	1916
13	6065,260	2027
14	3717,280	2133
15	2322,399	2235
20	2000,000	2267
25	2000,000	2267

■ Για $T = 18,5^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	Q/As
1	10981661,725	218	5,138	0,195
2	2207818,991	407	9,588	0,104
3	536426,345	574	13,512	0,074
4	151328,870	723	17,022	0,059
5	48172,790	858	20,197	0,050
6	16943,350	982	23,096	0,043
7	6479,873	1095	25,762	0,039
8	2661,362	1200	28,230	0,035
9	1162,336	1297	30,528	0,033
10	535,550	1389	32,677	0,031
11	258,635	1475	34,696	0,029
12	130,214	1555	36,600	0,027
13	68,038	1632	38,400	0,026
14	36,755	1705	40,108	0,025
15	20,462	1774	41,733	0,024
20	1,576	2076	48,845	0,020
25	0,191	2325	54,701	0,018

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
1	10981661,725	850
2	2207818,991	850
3	536426,345	850
4	151328,870	850
5	48172,790	858
6	16943,350	982
7	6479,873	1095
8	2661,362	1200
9	2000,000	1233
10	2000,000	1233
11	2000,000	1233
12	2000,000	1233
13	2000,000	1233
14	2000,000	1233
15	2000,000	1233
20	2000,000	1233
25	2000,000	1233

602Pro PRINT PACK Trial

■ Για $T = 20^{\circ}\text{C}$

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)	As/Q	Q/As
1	6653324,769	214	5,029	0,199
2	930961,304	392	9,231	0,108
3	171905,871	546	12,840	0,078
4	39110,807	680	16,004	0,062
5	10471,114	800	18,820	0,053
6	3194,214	908	21,357	0,047
7	1084,400	1006	23,665	0,042
8	402,519	1096	25,783	0,039
9	161,151	1179	27,739	0,036
10	68,845	1256	29,556	0,034
11	31,114	1328	31,253	0,032
12	14,773	1396	32,844	0,030
13	7,326	1460	34,343	0,029
14	3,777	1520	35,759	0,028
15	2,016	1577	37,100	0,027
20	0,132	1824	42,922	0,023
25	0,014	2026	47,664	0,021

t (d)	Ce (mg/L)	As (m^2)
1	6653324,769	850
2	930961,304	850
3	171905,871	850
4	39110,807	850
5	10471,114	850
6	3194,214	908
7	2000,000	950
8	2000,000	950
9	2000,000	950
10	2000,000	950
11	2000,000	950
12	2000,000	950
13	2000,000	950
14	2000,000	950
15	2000,000	950
20	2000,000	950
25	2000,000	950

- Για $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)	As/Q	Q/As
1	471110,022	190	4,478	0,223
2	13952,911	324	7,629	0,131
3	921,101	428	10,063	0,099
4	100,586	512	12,046	0,083
5	15,521	583	13,719	0,073
6	3,082	645	15,167	0,066
7	0,742	699	16,442	0,061
8	0,208	747	17,582	0,057
9	0,066	791	18,613	0,054
10	0,023	831	19,553	0,051
11	0,009	868	20,418	0,049
12	0,004	902	21,218	0,047
13	0,002	933	21,963	0,046
14	0,001	963	22,659	0,044
15	0,000	991	23,313	0,043
20	0,000	1109	26,093	0,038
25	0,000	1203	28,299	0,035

Τιμές που τηρούν τους
περιορισμούς

t (d)	Ce (mg/L)	As (m ²)
1	471110,022	850
2	13952,911	850
3	2000,000	850
4	2000,000	850
5	2000,000	850
6	2000,000	850
7	2000,000	850
8	2000,000	850
9	2000,000	850
10	2000,000	850
11	2000,000	850
12	2000,000	850
13	2000,000	850
14	2000,000	850
15	2000,000	850
20	2000,000	850
25	2000,000	850

Με βάση τις παραπάνω διορθωμένες τιμές, κατασκευάζουμε το Διάγραμμα 4-9 που απεικονίζει τη μεταβολή του As συναρτήσει του Ce, για τις διάφορες θερμοκρασίες.

602Pro PRINT PACK Trial