



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών &
Επικίνδυνων Αποβλήτων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Περιβαλλοντική & Υγειονομική Μηχανική»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Σχεδιασμός & Εγκατάσταση Εργαστηριακής Μονάδας
Βιολογικής Αποδόμησης Αποβλήτων»**

ΜΑΚΡΥΠΟΔΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ

Μηχανικός Περιβάλλοντος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γιδαράκος

Χανιά

Ιανουάριος 2005

Ευχαριστίες

Κατ' αρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Γιδαράκο για το γεγονός ότι μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Η παρούσα διατριβή δεν θα έφτανε σε πέρας χωρίς την πολύτιμη βοήθεια κάποιων ανθρώπων που μοιράστηκαν τις γνώσεις τους, καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησής της.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην Βέτα Κουκουράκη και στην Έφη Τσολάκη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος. Χωρίς την υποστήριξη, την υπομονή και τη βοήθειά τους θα ήταν αδύνατη η διεξαγωγή των εργαστηριακών αναλύσεων.

Οφείλω επίσης τις θερμές ευχαριστίες μου στην Πόπη Αντέλλη του Εργαστηρίου Διαχείρισης Αερίων, Υγρών & Στερεών Αποβλήτων για τη συνεργασία και τη συμβολή κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καλούς μου φίλους Γενειατάκη Μανόλη και Γιαννή Απόστολο του Εργαστηρίου Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων για τη συμπαράσταση και βοήθειά τους.

Περίληψη

Στα πλαίσια της διερεύνησης των κρίσιμων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που ελέγχουν την αερόβια βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα αποδόμησης στερεών αποβλήτων. Ο κύριος στόχος στην τεχνολογία των βιοαντιδραστήρων είναι η λειτουργία τους με τρόπο που σαν συνέπεια θα έχει την επιτάχυνση της σταθεροποίησης των αποβλήτων. Η λειτουργία των βιοαντιδραστήρων περιλαμβάνει την ανακυκλοφορία στραγγισμάτων στα στερεά απόβλητα για να δημιουργηθεί ένα περιβάλλον ευνοϊκό για τους μικροοργανισμούς από τους οποίους πραγματοποιείται η βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων. Αυτή η προσέγγιση διαφέρει πολύ από την παραδοσιακή προσέγγιση των «ξηρών» ΧΥΤΑ που αποθαρρύνει την αποδόμηση των αποβλήτων με την ελαχιστοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας τους. Επίσης, κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής γίνεται εισαγωγή αέρα στο σύστημα καθώς όταν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες ο ρυθμός αποδόμησης του οργανικού κλάσματος είναι σχετικά μικρός ενώ παράλληλα παράγεται μεθάνιο που κατατάσσεται στα αέρια θερμοκηπίου. Τα απορρίμματα στο εσωτερικό του εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα υποβάλλονται σε διάφορους συνδυασμούς συνθηκών λειτουργίας που σχετίζονται με το ρυθμό εισαγωγής αέρα και διασταλαζόντων υγρών. Ο σκοπός λοιπόν του πειράματος μετά την κατανόηση των διεργασιών, προσανατολίζεται στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των αερόβιων συστημάτων.

Abstract

The purpose of this research is to determine the critical physical, chemical and biological processes that control aerobic landfill bioremediation. The Laboratory of Toxic & Hazardous Waste Management of the Department of Environmental Engineering at the Technical University of Crete awarded a grant to conduct the demonstration of lab-scale landfill bioreactor technology. The primary goal in pursuing landfill bioreactor technology is the operation of solid waste landfills in a manner resulting in accelerated stabilization of the waste. Landfill bioreactor operation includes the addition of moisture to the solid waste to create an environment favourable for the microorganisms responsible for waste decomposition. This approach differs greatly from the traditional approach of managing solid waste landfills in "dry tombs" that discourages waste decomposition by minimizing moisture entrance into the landfill. In aerobic biodegradation, air is injected into the waste, resulting in relatively fast aerobic biodegradation and no methane production, an important greenhouse gas. The waste in the lysimeter will be subjected to various combinations of leachate recirculation along with air injection. Our research is directed at understanding the process of aerobic landfill bioremediation so that optimal engineering designs can be developed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	i
Ευρετήριο Σχημάτων.....	5
Ευρετήριο Πινάκων	6
1.0 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2.0. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ.....	10
2.1 Εισαγωγικά	10
2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την βιοεξυγίανση.....	11
2.3 Μικροβιακοί πληθυσμοί στις διεργασίες βιοεξυγίανσης.....	12
2.4 Περιβαλλοντικοί παράγοντες	13
2.4.1 Θρεπτικά συστατικά	13
2.4.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες	14
2.5 Στρατηγικές βιοεξυγίανσης	15
2.5.1 In situ βιοεξυγίανση	15
2.5.2 Ex situ βιοεξυγίανση.....	17
2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιοεξυγίανσης.....	18
2.7 Φυτοεξυγίανση	21
3.0 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΒΙΟΑΕΡΙΣΜΟ ΕΔΑΦΩΝ.....	25
3.1 Μικροβιακές διεργασίες που επηρεάζουν τον βιοαερισμό.....	25
3.1.1 Μικροβιακή κινητική	25
3.2 Περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν τις μικροβιακές διεργασίες.....	27
3.2.1 Οι συνθήκες των δεκτών ηλεκτρονίων	28
3.2.2 Περιεχόμενη υγρασία.....	28
3.2.3 Το pH του εδάφους	29
3.2.4 Η θερμοκρασία του εδάφους.....	30
3.2.5 Τα θρεπτικά συστατικά	31
3.2.6 Η συγκέντρωση του ρύπου	33
3.2.7 Βιοδιαθεσιμότητα και σχετική βιοαποικοδομησιμότητα	33
3.3 Φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν τον βιοαερισμό.....	34
3.3.1 Διαπερατότητα του εδάφους	34
3.3.2 Κατανομή του ρύπου.....	35
3.3.3 Ακτίνα επίδρασης του οξυγόνου	39
4.0 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΑΕΡΙΣΜΟΥ.....	41
4.1 Βασικές αρχές της ροής αερίων σε πορώδη μέσα	41
4.1.1 Νόμος Darcy για τη ροή αερίου	41
4.1.2 Εξίσωση μερικού διαφορικού για τη ροή των αερίων	43
4.1.3 Ροή αερίου σε σταθερές συνθήκες (steady state)	44
4.1.4 Μεταβατική ροή αερίου	50
4.1.5 Συνθήκες ψευδο-μόνιμης κατάστασης.....	53
4.2 Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση συστήματος βιοαερισμού.....	54
4.2.1 Καθορισμός του τρόπου λειτουργίας του συστήματος.....	55
4.2.2 Καθορισμός της απαιτούμενης παροχής αέρα	57
4.2.3 Καθορισμός της διάταξης των φρεατίων	58
4.2.4 Καθορισμός της πτώσης πίεσης του συστήματος.....	61

4.2.5 Κατάλληλη επιλογή αντλίας (blower)	62
4.2.6 Σχεδιασμός των φρεατίων και των σωληνώσεων	64
4.2.7 Κατασκευή του φρεατίου	65
4.2.8 Καθορισμός των σημείων παρακολούθησης και σχεδιασμός τους...67	
5.0 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΣΜΟΥ - ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	71
5.1 Παρακολούθηση του εδαφικού αερίου.....	71
5.2 Πραγματοποίηση των in situ τεστ αναπνοής	71
5.3 Ποσοτικοποίηση της βιοαποικοδόμησης και της πτητικότητας	73
5.4 Δειγματοληψία των επιφανειακών εκπομπών	74
5.5 Προαιρετική παρακολούθηση βιοαποικοδόμησης: Ποσοτική εκτίμηση	75
5.6 Λειτουργία και συντήρηση.....	76
6.0 Ο ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	77
6.1 Εισαγωγή.....	77
6.2 Θεωρητικό υπόβαθρο	77
6.3 Διαφορές του ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρα με τον συμβατικό ΧΥΤΑ	78
6.4 Κατάταξη των βιοαντιδραστήρων στερεών αποβλήτων	80
6.5 Παραδείγματα ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρων	82
6.6 Πιθανά οφέλη από τη λειτουργία ενός βιοαντιδραστήρα.....	82
6.6.1 Οφέλη από την άμεση μετατροπή/σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος	82
6.6.2 Οφέλη από τη μεγιστοποίηση της δέσμευσης του βιοαερίου για ανάκτηση ενέργειας.....	83
6.6.3 Οφέλη από την αυξημένη χωρητικότητα του ΧΥΤΑ λόγω της ταχύτερης καθίζησης	83
6.6.4 Βελτίωση της επεξεργασίας και αποθήκευσης των στραγγισμάτων .84	
6.6.5 Μείωση της ανάγκης για αποκατάσταση, της συντήρησης και του κινδύνου	84
6.7 Θέματα που σχετίζονται με το ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρα	85
6.7.1 Σχεδιασμός.....	85
6.7.2 Λειτουργίες	89
6.7.3 Πρόγραμμα διαχείρισης βιοαντιδραστήρα	92
6.8 Πιθανοί φραγμοί.....	92
6.9 Φάσεις αποδόμησης των απορριμμάτων	93
6.10 Βιοαποικοδόμηση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων.....	95
6.11 Παράγοντες που επηρεάζουν την αποδόμηση των στερεών αποβλήτων	97
6.12 Τεχνικές σταθεροποίησης στερεών αποβλήτων	98
6.13 Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων	100
6.14 Καθίζηση των αστικών στερεών αποβλήτων	102
6.14.1 Μοντέλα μακροπρόθεσμης καθίζησης στερεών αποβλήτων	103
6.15 Μοντελοποίηση της βιοαποικοδόμησης των στερεών αποβλήτων	106
6.15.1 Εισαγωγικά	106
6.15.2 Χημικά συστατικά	107
6.15.3 Αντιδράσεις βιοαποικοδόμησης.....	107
6.15.4 Κινητική των αντιδράσεων βιοαποικοδόμησης.....	108
6.15.5 Παραγωγή και μεταφορά θερμότητας.....	109

6.15.6 Υπολογισμός του pH	110
6.15.7 Συμπίεση Απορριμμάτων	110
6.15.8 Παρατηρούμενες ιδιότητες	111
7.0 ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	112
7.1 Pohland (1975)	112
7.2 Leckie and Pacey (1979)	113
7.3 Tittlebaum (1982)	114
7.4 Robinson et al. (1982 – αναδημοσίευση από τον Coelho, 2003)	114
7.5 Hartz and Ham (1983)	115
7.6 Mata-Alvarez and Martinez-Viturtia (1986)	115
7.7 Stegmann and Spendlin (1986 – αναδημοσίευση από τον Coelho, 2003)	116
7.8 Kinman et al. (1987)	116
7.9 Barlaz et al. (1987)	116
7.10 Leuschner (1989)	117
7.11 Doedens and Cord-Landwehr (1989).....	118
7.12 Otieno (1989 – αναδημοσίευση από τον Coelho, 2003)	118
7.13 Pohland et al. (1992-αναδημοσίευση από Reinhart and Townsend, 1998)	119
7.14 Woelders et al. (1993 – αναδημοσίευση από τον Coelho, 2003)	120
7.15 Chugh (1996 – αναδημοσίευση από τον Yuen, 1999)	121
7.16 Karnchanawong and Noythachang (1996).....	121
7.17 Borglin et al. (2004)	122
8.0 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΤΑΣΗ	125
8.1 Εισαγωγή.....	125
8.2 Σκοποί και στόχοι	126
8.3 Περιγραφή του βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων	128
8.3.1 Επισκόπηση.....	128
8.3.2 Περίληψη των βασικών τμημάτων.....	128
8.3.3 Πλάνο διαχείρισης.....	130
8.3.4 Ερευνητικές δραστηριότητες	130
8.4 Μεθοδολογία για την επίτευξη των στόχων.....	133
8.5 Σχέδιο και κύρια σημεία	138
8.6 Διαχειριστικό σχέδιο.....	138
9.0 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	139
9.1 Εισαγωγικά	139
9.2 Προσέγγιση	139
9.3 Εξοπλισμός.....	143
9.3.1 Καταγραφική συσκευή υγρασίας-θερμοκρασίας.....	143
9.3.2 Αισθητήρας υγρασίας.....	145
9.3.3 Αισθητήρας θερμοκρασίας	147
9.3.4 Όργανο μέτρησης παροχής αέρα (ροόμετρο).....	147
9.3.5 Αναλυτής αερίου	148
9.4 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά κελιού	150
10.0 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	153
10.1 Προτεινόμενες Αναλύσεις	153

10.2 Πειραματικά αποτελέσματα	155
10.3 Καθημερινή παρακολούθηση.....	161
10.4 Αναμενόμενα αποτελέσματα λειτουργίας	169
10.5 Προτάσεις	172
Βιβλιογραφία.....	177
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	185
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	187

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 3-1: Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου και του εδαφικού pH.....	30
Σχήμα 3-2: Ισόθερμες ρόφησης (Πηγή: EPA, 1995).....	37
Σχήμα 4-1: Χρήση γραφημάτων απόστασης-πτώσης πίεσης για τον καθορισμό του r_e (Πηγή: USACE, 2002).....	47
Σχήμα 4-2: Κατανομή της πίεσης με εφαρμογή της προσέγγισης Cooper-Jacob ($\mu \leq 0.01$), (Πηγή: USACE, 2002).....	53
Σχήμα 4-3: Τυπική διάταξη συστήματος βιοαερισμού (Πηγή: Technical Memorandum, NFESC, 1996).....	56
Σχήμα 4-4: Σχηματική αναπαράσταση φρεατίου αερισμού (Πηγή: EPA, 1995)	67
Σχήμα 4-5: Τυπική διάταξη φρεατίου παρακολούθησης (Πηγή: Technical Memorandum, NFESC, 1996).....	70
Σχήμα 5-1: Σχηματική απεικόνιση συσκευής παρακολούθησης εκπομπών (Πηγή: EPA, 1995)	74
Σχήμα 6-1: Σχηματική απεικόνιση βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων	79
Σχήμα 6-2: Απεικόνιση αερόβιου βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων (Πηγή: Repa, 2003)	80
Σχήμα 6-3: Απεικόνιση αναερόβιου βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων(Πηγή: Repa, 2003)	81
Σχήμα 6-4: Απεικόνιση υβριδικού βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων (Πηγή: Repa, 2003)	82
Σχήμα 6-5: Θεωρητικές καμπύλες της εξέλιξης της σύστασης του βιοαερίου και των στραγγισμάτων (Πηγή: Yuen, 1999)	95
Σχήμα 6-6: Αερόβιοι κύκλοι αζώτου, άνθρακα και θείου (Peirce et al., 1997). 96	
Σχήμα 6-7: Αναερόβιοι κύκλοι αζώτου, άνθρακα και θείου (Peirce et al., 1997)	97
Σχήμα 6-8: Προβλεπόμενες εντάσεις από 4 μοντέλα, (Πηγή: Coelho, 2003)..	105
Σχήμα 9-1: Απεικόνιση του βιοαντιδραστήρα	140
Σχήμα 9-2: Ο εργαστηριακός βιοαντιδραστήρας. Διακρίνονται οι θύρες λειτουργίας.....	142
Σχήμα 9-3: Καταγραφική συσκευή υγρασίας και θερμοκρασίας.....	144
Σχήμα 9-4: Αισθητήρας υγρασίας τύπου “Watermark”	145
Σχήμα 9-5: Αισθητήρας θερμοκρασίας.....	147
Σχήμα 9-6: Μετρητής παροχής αέρα.....	148
Σχήμα 9-7: Ο αναλυτής αερίων BE – DGA 3.....	149
Σχήμα 9-8: Πρόσοψη της κατασκευής. Διακρίνονται οι 4 οπές διαμέτρου 12mm.	150
Σχήμα 9-9: Κάτοψη της κατασκευής. Διακρίνονται οι 5 οπές των 16mm και η οπή των 20mm.	151

Σχήμα 9-10: Ο ποθμένος της κατασκευής. Διακρίνονται οι οπές διαμέτρου 16mm.	152
Σχήμα 10-1: Καμπύλη βαθμονόμησης αμμωνιακού αζώτου.....	160
Σχήμα 10-2: Γραφικές παραστάσεις θερμοκρασιών.....	162
Σχήμα 10-3: Γραφική παράσταση σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος.....	163
Σχήμα 10-4: Γραφική παράσταση πίεσης στους αγωγούς.....	164
Σχήμα 10-5: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 1 ^η εβδομάδα καταγραφής.....	165
Σχήμα 10-6: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 2 ^η εβδομάδα καταγραφής.....	165
Σχήμα 10-7: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 3 ^η εβδομάδα καταγραφής.....	166
Σχήμα 10-8: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 4 ^η εβδομάδα καταγραφής.....	166
Σχήμα 10-9: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 5 ^η εβδομάδα καταγραφής.....	167
Σχήμα 10-10: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 6 ^η εβδομάδα καταγραφής.....	167
Σχήμα 10-11: Βιοαντιδραστήρας με εισαγωγή ατμού.....	176

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Βιοαποικοδομήσιμοι ρύποι (Πηγή: Vidalι, 2001)	11
Πίνακας 2.2: Σύσταση κυττάρου μικροοργανισμών (Πηγή: Vidalι, 2001)	13
Πίνακας 2.3: Βέλτιστες συνθήκες βιοαποικοδόμησης.....	14
Πίνακας 2.4: Συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων βιοεξυγίανσης.....	21
Πίνακας 4-1: Ενδεικτικές αποστάσεις των φρεατίων παρακολούθησης (Πηγή: EPA, 1995)	68
Πίνακας 6-1: Παράγοντες που επιδρούν στην βιοαποικοδόμηση των στερεών αποβλήτων	98
Πίνακας 6-2: Σύσταση των στραγγισμάτων αστικών στερεών αποβλήτων (Πηγή: Tchobanoglous et al., 1993)	101
Πίνακας 6-3: Σύσταση των στραγγισμάτων σε συνάρτηση με το βαθμό σταθεροποίησης του ΧΥΤΑ (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998).	101
Πίνακας 6-4: Σύσταση των στραγγισμάτων σε ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και χωρίς (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998).	101
Πίνακας 6-5: Σύσταση των στραγγισμάτων σαν συνάρτηση του βαθμό σταθεροποίησης του ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και χωρίς (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998).	102
Πίνακας 6-6: Φάσεις και συστατικά στο T2LBM (Πηγή: Oldenburg, 2001) ...	107
Πίνακας 7-1: Χαρακτηριστικά φόρτισης των στηλών (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998).....	120
Πίνακας 8-1: Περίληψη του εξοπλισμού	131
Πίνακας 8-2: Περίληψη των συστημάτων παρακολούθησης	132

Πίνακας 9-1: Σύσταση στερεών αποβλήτων στον αντιδραστήρα.....	141
Πίνακας 9-2: Συνθήκες λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.....	143
Πίνακας 9-3: Διαθέσιμοι εξωτερικοί αισθητήρες.....	144
Πίνακας 10-1: COD στραγγισμάτων	155
Πίνακας 10-2: BOD στραγγισμάτων	156
Πίνακας 10-3: Λόγος BOD/ COD	157
Πίνακας 10-4: pH και Redox στραγγισμάτων	157
Πίνακας 10-5: Αγωγιμότητα και αλατότητα στραγγισμάτων	158
Πίνακας 10-6: Συγκεντρώσεις ανιόντων στα στραγγίσματα.....	159
Πίνακας 10-7: Δεδομένα καμπύλης βαθμονόμησης	159
Πίνακας 10-8: Συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στα στραγγίσματα	160
Πίνακας 10-9: Συγκεντρώσεις μετάλλων στα στραγγίσματα	161
Πίνακας 10-10: Μέσες τιμές παραμέτρων λειτουργίας.....	164
Πίνακας 10-11: Μέσες τιμές δεδομένων ανακυκλοφορίας.....	168
Πίνακας 10-12: Σύσταση αερίου εξόδου	1688

1.0 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πολυπλοκότητα των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) καθώς και τα σχετιζόμενα πρακτικά ζητήματα υγείας απαιτούν μια ιδιαίτερη εργαστηριακή και μαθηματική προσέγγιση, σαν πρώτο στάδιο έρευνας. Οι προσεγγίσεις μέχρι σήμερα περιλαμβάνουν πολλές θεωρητικές βιβλιογραφικές αναφορές, εγχειρίδια σχεδιασμού και κατασκευής ενός χώρου διάθεσης στερεών αποβλήτων αλλά και τη μοντελοποίηση των βιολογικών διεργασιών με σκοπό την προσομοίωση με αριθμητικό τρόπο.

Σκοπός αυτής της έρευνας είναι η διερεύνηση των κρίσιμων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που ελέγχουν την αερόβια βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων. Οι συμβατικοί χώροι στους οποίους καταλήγουν τα απορρίμματα, θεωρούνται «στεγνά κελιά» λόγω της ύπαρξης αδιαπέρατου στρώματος στον πυθμένα και στην επιφάνειά τους. Όταν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες ο ρυθμός αποδόμησης του οργανικού κλάσματος είναι σχετικά μικρός ενώ παράλληλα παράγεται μεθάνιο που κατατάσσεται στα αέρια θερμοκηπίου. Μια εναλλακτική πρόταση που έχει αποδεδειγμένα θετικά αποτελέσματα στην επιτάχυνση του ρυθμού βιοαποδόμησης και την εξάλειψη του μεθανίου, αφορά την αερόβια αποδόμηση των απορριμμάτων. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής γίνεται εισαγωγή αέρα και τα παραγόμενα διασταλάζοντα υγρά ανακυκλοφορούν στο σύστημα. Ταυτόχρονα, ενισχύεται και η συμπίεση των απορριμμάτων. Ο σκοπός λοιπόν του πειράματος μετά την κατανόηση των διεργασιών, προσανατολίζεται στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των αερόβιων συστημάτων.

Σε αρκετά εργαστηριακά πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα, παρακολουθείται η βιοαποικοδόμηση διαφόρων μειγμάτων αστικών απορριμμάτων. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται ένας εργαστηριακός βιοαντιδραστήρας που δημιουργήθηκε από το Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Περιγράφονται αναλυτικά

βασικές έννοιες που έχουν άμεση σχέση με το θέμα όπως βιοεξυγίανση, βιοαερισμός και βιοαντιδραστήρας απορριμμάτων.

Τα απορρίμματα στο εσωτερικό του εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα υποβάλλονται σε διάφορους συνδυασμούς συνθηκών λειτουργίας που σχετίζονται με το ρυθμό εισαγωγής αέρα και διασταλαζόντων υγρών. Στο σύστημα αυτό έχει προσαρτηθεί εξοπλισμός για την μέτρηση και καταγραφή της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της παροχής αέρα, της σύστασης του παραγόμενου αερίου και της ποιότητας των διασταλαζόντων. Ταυτόχρονα, το σύστημα ελέγχεται και οπτικά κάτι που επιτρέπεται μέσω των τοιχωμάτων από plexiglas.

2.0. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

2.1 Εισαγωγικά

Η περιβαλλοντική βιοτεχνολογία δεν είναι ένα καινούριο πεδίο έρευνας. Η κομποστοποίηση και η επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι παραδείγματα παλαιότερων τεχνολογιών βιοεξυγίανσης. Παρόλα αυτά, οι πιο πρόσφατες μελέτες στη μοριακή βιολογία και οικολογία δημιουργούν μεγάλες ευκαιρίες για πιο αποδοτικές βιολογικές διεργασίες. Αξιοσημείωτα είναι τα αποτελέσματα που σχετίζονται με την εξυγίανση ρυπασμένων υδάτων και εδαφών.

Βιοεξυγίανση καλείται η μέθοδος επεξεργασίας που βασίζεται σε ένα σύνολο διεργασιών που επιτυγχάνουν τη βιολογική αποδόμηση οργανικών αποβλήτων σε ενώσεις μικρότερης επικινδυνότητας, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες ή σε συγκεντρώσεις κάτω από συγκεκριμένα όρια.

Εξ' ορισμού, στην βιοεξυγίανση γίνεται χρήση μικροοργανισμών που διασπούν τις μεγάλες οργανικές ενώσεις σε ενώσεις λιγότερο τοξικές. Οι μικροοργανισμοί αυτοί μπορεί να είναι βακτήρια ή μύκητες, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και φυτά. Οι μικροοργανισμοί μπορεί να είναι ενδογενείς ή μπορεί να αναπτύσσονται σε άλλο σημείο και να μεταφέρονται στη συνέχεια στην περιοχή εξυγίανσης. Οι ρύποι μετατρέπονται από τους ζώντες οργανισμούς μέσω κάποιων αντιδράσεων που πραγματοποιούνται κατά τη διεργασία του μεταβολισμού.

Για να είναι η βιοεξυγίανση επιτυχής, πρέπει οι μικροοργανισμοί να προσεγγίσουν με ενζυματικό τρόπο τους ρύπους. Επειδή η αποδοτική εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί περιβαλλοντικές συνθήκες που να επιτρέπουν την μικροβιακή ανάπτυξη και δραστηριότητα, γίνεται πολλές φορές έλεγχος των περιβαλλοντικών παραμέτρων με σκοπό την επιτάχυνση του ρυθμού αποδόμησης.

Όπως σε όλες τις τεχνολογίες έτσι και εδώ υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί. Ορισμένες ενώσεις όπως οι χλωριωμένες οργανικές και τα μεγάλα μόρια των αρωματικών υδρογονανθράκων δεν δύνανται να διασπαστούν ή διασπώνται με αργό ρυθμό. Δεν υπάρχουν οδηγίες για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου

ανεξαρτήτως πεδίου. Σαν λύση είναι γενικά πιο οικονομική από άλλες συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας, όπως η αποτέφρωση, ενώ το γεγονός ότι μπορεί να εφαρμοστεί in-situ μειώνει το ρίσκο της έκθεσης π.χ του προσωπικού σε έναν επικίνδυνο ρύπο. Επίσης, επειδή πλησιάζει κατά πολύ τον φυσικό τρόπο εξυγίανσης γίνεται και πιο εύκολα αποδεκτή (Πίνακας 2.1).

Class of contaminants	Specific examples	Aerobic	Anaerobic	More potential sources
Chlorinated solvents	Trichloroethylene Perchloroethylene		+	Drycleaners Chemical manufacture
Polychlorinated biphenyls	4-Chlorobiphenyl 4,4-Dichlorobiphenyl		+	Electrical manufacturing Power station Railway yards
Chlorinated phenol	Pentachlorophenol		+	Timber treatment Landfills
“BTEX”	Benzene Toluene Ethylbenzene Xylene	+	+	Oil production and storage Gas work sites Airports Paint manufacture Port facilities Railway yards Chemical manufacture
Polyaromatic hydrocarbons (PAHs)	Naphthalene Antracene Fluorene Pyrene Benzo(a)pyrene	+		Oil production and storage Gas work sites Coke plants Engine works Landfills Tar production and storage Boiler ash dump sites Power stations
Pesticides	Atrazine Carbaryl Carbofuran Coumpos Diazinon Glycophosphate Parathion Propham 2,4-D	+	+	Agriculture Timber treatment plants Pesticide manufacture Recreational areas Landfills

Πίνακας 2.1: Βιοαποικοδομήσιμοι ρύποι (Πηγή: Vidalí, 2001)

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την βιοεξυγίανση

Ο έλεγχος και η βελτιστοποίηση των διεργασιών της βιοεξυγίανσης είναι ένα πολύπλοκο σύστημα πολλών παραγόντων. Στους παράγοντες αυτούς περιλαμβάνονται η ύπαρξη μικροβιακού πληθυσμού με ικανότητα για αποδόμηση ρύπων, η βιοδιαθεσιμότητα των ρύπων στον μικροβιακό πληθυσμό και περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως ο τύπος του εδάφους, η

θερμοκρασία, το pH, η συγκέντρωση οξυγόνου ή άλλων δεκτών ηλεκτρονίων και τα θρεπτικά συστατικά.

2.3 Μικροβιακοί πληθυσμοί στις διεργασίες βιοεξυγίανσης

Οι μικροοργανισμοί μπορούν να απομονωθούν σχεδόν από όλες τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα μικρόβια μπορούν να αναπτυχθούν και να προσαρμοστούν ακόμη και σε θερμοκρασίες κάτω του μηδενός, όπως επίσης και σε υψηλές θερμοκρασίες, σε συνθήκες ερήμου, μέσα στο νερό, με περίσσεια οξυγόνου ή σε αναερόβιες συνθήκες, παρουσία τοξικών συστατικών κ.α. Οι κύριες απαιτήσεις είναι σε ενέργεια και σε άνθρακα. Οι μικροοργανισμοί μπορούν να καταταχθούν στις ακόλουθες ομάδες:

- *Αερόβιοι*, παρουσία οξυγόνου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μικροοργανισμών με αναγνωρισμένες δυνατότητες για αποδόμηση οργανικών ενώσεων είναι οι *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Sphingomonas*, *Rhodococcus* και *Mycobacterium*. Γί' αυτές τις ομάδες μικροβίων υπάρχουν πολλές αναφορές για διάσπαση μικροβιοκτόνων και υδρογονανθράκων, αλκανίων και πολυαρωματικών. Τα περισσότερα από αυτά τα βακτήρια χρησιμοποιούν τις ενώσεις σαν πηγή άνθρακα και ενέργειας.
- *Αναερόβιοι*, απουσία οξυγόνου. Τα αναερόβια βακτήρια δεν χρησιμοποιούνται το ίδιο συχνά με τα αερόβια. Υπάρχει όμως αυξητική τάση στην χρησιμοποίησή τους για διάσπαση των πολυχλωριωμένων διφαινυλίων (PCBs) στα ιζήματα ποταμών, για αποχλωρίωση του τριχλωροαιθυλενίου (TCE) και του χλωροφορμίου.
- *Ligninolytic fungi*. Μύκητες όπως ο *Phanaerochaete chrysosporium* έχουν την ιδιότητα να αποδομούν ένα μεγάλο εύρος ισχυρά τοξικών ρύπων. Τα πιο συνήθη υποστρώματα που χρησιμοποιούνται είναι το άχυρο και ο κώνος καλαμποκιού.
- *Μεθυλότροφοι μικροοργανισμοί*. Πρόκειται για αερόβια βακτήρια που αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας μεθάνιο σαν πηγή άνθρακα και ενέργειας. Το αρχικό ένζυμο στην πορεία για αερόβια αποικοδόμηση η μονοξυγενάση του μεθανίου, έχει μεγάλο εύρος υποστρωμάτων στα

οποία εμφανίζεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους ρύπους, μεταξύ των οποίων οι χλωριωμένοι αλιφατικοί υδρογονάνθρακες TCE και 1,2 DCE.

Για να πραγματοποιηθεί η βιοαποικοδόμηση πρέπει οι μικροοργανισμοί και ο ρύπος να έρθουν σε επαφή. Αυτό πολλές φορές δεν επιτυγχάνεται εύκολα διότι οι μικροοργανισμοί αλλά και ο ρύπος δεν βρίσκονται ομοιόμορφα κατανεμημένα στο έδαφος. Μερικά βακτήρια μπορούν να μετακινούνται και παρουσιάζουν μια συμπεριφορά χημικής φύσεως, καθώς «αισθάνονται» τον ρύπο και κινούνται προς αυτόν. Άλλοι μικροοργανισμοί όπως οι μύκητες, αναπτύσσονται σε νηματοειδή μορφή προς τον ρύπο. Είναι δυνατόν να παρατηρηθεί κινητοποίηση του ρύπου, με χρήση κάποιων συστατικών όπως το SDS (sodium dodecyl sulphate).

2.4 Περιβαλλοντικοί παράγοντες

2.4.1 Θρεπτικά συστατικά

Παρόλο που υπάρχουν γηγενείς μικροοργανισμοί στο ρυπασμένο έδαφος, δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται και στην απαιτούμενη ποσότητα για την εξυγίανση της περιοχής. Η ανάπτυξή τους αλλά και η δραστηριότητά τους πρέπει να αυξηθεί. Η βιοδιέγερση αυτή συνήθως πραγματοποιείται με προσθήκη θρεπτικών συστατικών και οξυγόνου. Τα συστατικά αυτά αποτελούν βασικά δομικά στοιχεία για τους μικροοργανισμούς και συντελούν στη δημιουργία των απαραίτητων ενζύμων που θα δράσουν κατά την διάσπαση των ρύπων. Απαιτούνται επομένως πρόσθετες ποσότητες αζώτου, φωσφόρου και άνθρακα (βλ. Πίνακα 2.2).

Element	Percentage	Element	Percentage
Carbon	50	Sodium	1
Nitrogen	14	Calcium	0,5
Oxygen	20	Magnesium	0,5
Hydrogen	8	Chloride	0,5
Phosphorous	3	Iron	0,2
Sulfur	1	All others	0,3
Potassium	1		

Πίνακας 2.2: Σύσταση κυττάρου μικροοργανισμών (Πηγή: Vidalι, 2001)

Ο άνθρακας είναι το πιο βασικό συστατικό της ζωής και απαιτείται σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες απ' ό,τι άλλα στοιχεία. Μαζί με το υδρογόνο, το οξυγόνο και το άζωτο αποτελούν το 95% του βάρους των κυττάρων. Το υπόλοιπο 5% αποτελείται κατά 70% από φώσφορο και θείο. Οι θρεπτικές απαιτήσεις του άνθρακα ως προς το άζωτο έχουν λόγο 10:1, ενώ του άνθρακα ως προς το φώσφορο είναι 30:1.

2.4.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Οι βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες για την βιοαποικοδόμηση των ρύπων αναφέρονται στον Πίνακα 2.3.

Παράμετροι	Συνθήκες μικροβιακής ανάπτυξης	Βέλτιστη τιμή για βιοαποικοδόμηση ελαίων
Υγρασία εδάφους	25-28% της δυνατότητας συγκράτησης	30 - 90%
Εδαφικό pH	5.5 - 8.8	6.5 - 8.0
Συγκέντρωση οξυγόνου	Αερόβιες, ελάχιστο κενό πορώδες: 10%	10 - 40%
Θρεπτικά συστατικά	N και P για την ανάπτυξη	C:N:P = 100:10:1
Θερμοκρασία (°C)	15 - 45	20 - 30
Ρύποι	Όχι πολύ τοξικοί	Υδρογονάνθρακες 5 - 10% σε ξηρή βάση
Βαρέα μέταλλα	Συνολική συγκέντρωση 2000 ppm	700 ppm
Τύπος εδάφους	Χωμάτινο ή βραχώδες	

Πίνακας 2.3: Βέλτιστες συνθήκες βιοαποικοδόμησης

Η μικροβιακή ανάπτυξη και δραστηριότητα επηρεάζονται από το pH, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Παρόλο που μπορούν να αναπτυχθούν σε ακραίες καταστάσεις, οι περισσότεροι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται με το βέλτιστο τρόπο σε ένα πολύ συγκεκριμένο πεδίο συνθηκών. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται πρακτικά να αναζητούνται οι βέλτιστες συνθήκες.

Αν στο έδαφος υπάρχει αρκετή ποσότητα οξέος, τότε προστίθεται ποσότητα ασβεστίου για την αύξηση του pH. Η θερμοκρασία επηρεάζει το ρυθμό των βιοχημικών αντιδράσεων. Συνήθως, ο ρυθμός διπλασιάζεται όταν η θερμοκρασία αυξηθεί κατά 10 °C. Πάνω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία οι μικροοργανισμοί πεθαίνουν. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν πλαστικά

καλύμματα για την ενίσχυση του θερμικού περιεχομένου κατά το τέλος της άνοιξης, του καλοκαιριού και του φθινοπώρου. Η υπάρχουσα ποσότητα νερού είναι απαραίτητη για τους οργανισμούς ενώ πολλές φορές απαιτείται πρόσθετη ποσότητα νερού για να διατηρηθούν οι βέλτιστες συνθήκες υγρασίας.

Η ποσότητα του διαθέσιμου οξυγόνου θα καθορίσει αν το σύστημα είναι αερόβιο ή αναερόβιο. Οι υδρογονάνθρακες αποδομούνται εύκολα κάτω από αερόβιες συνθήκες, ενώ οι χλωριωμένες ενώσεις σε αναερόβιες. Για την αύξηση του περιεχόμενου οξυγόνου στο έδαφος γίνεται εισαγωγή αέρα με ειδικές διατάξεις. Πολλές φορές εισάγεται υπεροξείδιο του υδρογόνου ή του μαγνησίου στην περιοχή της ρύπανσης.

Η αποδοτική διανομή του αέρα, του νερού και των θρεπτικών εξαρτάται από τη δομή του εδάφους. Για να βελτιωθεί η δομή του εδάφους πολλές φορές προστίθενται υλικά όπως ο γύψος ή οργανική ύλη. Η χαμηλή διαπερατότητα του εδάφους επηρεάζει αρνητικά την κίνηση του αέρα, του νερού και των θρεπτικών. Έτσι, σε εδάφη με αυτό το χαρακτηριστικό, δεν εφαρμόζονται τεχνικές *in-situ* εξυγίανσης.

2.5 Στρατηγικές βιοεξυγίανσης

Διάφορες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για την εξυγίανση μιας περιοχής, ανάλογα με το βαθμό κορεσμού και αερισμού της. *In situ* μέθοδοι καλούνται αυτές που εφαρμόζονται στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα της περιοχής επί τόπου με την ελάχιστη δυνατή όχληση. *Ex situ*, καλούνται οι μέθοδοι εξυγίανσης του εδάφους και του υπόγειου ύδατος μετά την απομάκρυνσή της ρυπασμένης ποσότητας μάζας μέσω εκσκαφής (για το έδαφος) ή άντλησης (για το νερό). Η μέθοδος της βιο-αύξησης περιλαμβάνει την προσθήκη μικροοργανισμών με την ικανότητα να αποδομούν τους ρύπους.

2.5.1 *In situ* βιοεξυγίανση

Αυτού του είδους η τεχνική είναι γενικά από τις πιο επιθυμητές λόγω του μικρού της κόστους και της μικρότερης όχλησης που δημιουργεί, επειδή η

επεξεργασία πραγματοποιείται επί τόπου χωρίς την εκσκαφή και μεταφορά του ρύπου σε άλλη περιοχή. Περιοριστικός παράγοντας αποτελεί το βάθος του εδάφους μέχρι το οποίο η επεξεργασία είναι αποδοτική. Σε πολλά εδάφη, το βάθος μέχρι το οποίο γίνεται η διάχυση του οξυγόνου π.χ είναι 30 cm, χωρίς αυτό βεβαίως να αποτελεί τον κανόνα αλλά την εξαίρεση. Οι πιο σημαντικές μέθοδοι επεξεργασίας του εδάφους είναι:

- Η μέθοδος του *Bioventing* (βιοφυσητική μέθοδος) είναι από τις πιο κοινές και περιλαμβάνει την εισαγωγή αέρα και θρεπτικών μέσω φρεατίων στο επιθυμητό βάθος, με σκοπό την διέγερση των μικροοργανισμών. Η παροχή αέρα είναι σε χαμηλά επίπεδα και παρέχεται μόνο η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου για βιοαποικοδόμηση. Παράλληλα, ελαχιστοποιείται η εξάτμιση και η απελευθέρωση των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Εφαρμόζεται αποδοτικά για απλούς υδρογονάνθρακες ενώ μπορεί να εφαρμοστεί εκεί που η ρύπανση είναι χαμηλά κάτω από την επιφάνεια.
- Η *in situ* βιοαποικοδόμηση περιλαμβάνει την παροχή οξυγόνου και θρεπτικών μέσω της κυκλοφορίας υδατικών διαλυμάτων στα ρυπασμένα εδάφη για την διέγερση των ενδογενών μικροοργανισμών. Σκοπός είναι η βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρύπων. Εφαρμόζεται τόσο στο έδαφος όσο και στο υπόγειο ύδωρ. Γενικά, αυτή η τεχνική πραγματοποιείται μέσω της διήθησης υδατικών διαλυμάτων με θρεπτικά και οξυγόνο ή άλλο δέκτη ηλεκτρονίων στα εδάφη.
- Η μέθοδος εισαγωγής αέρα στην κορεσμένη ζώνη (*Air Sparging - Biosparging*). Περιλαμβάνει την εισαγωγή αέρα υπό πίεση κάτω από τον υπόγειο ορίζοντα με σκοπό την αύξηση της συγκέντρωσης οξυγόνου και την ενίσχυση του ρυθμού βιοαποικοδόμησης των ρύπων από τους μικροοργανισμούς. Το biosparging αυξάνει την ανάμιξη στην κορεσμένη ζώνη και συνεπώς τον βαθμό επαφής μεταξύ του νερού και του εδάφους. Η ευκολία και το χαμηλό κόστος

εγκατάστασης φρεατίων μικρής διαμέτρου επιτρέπουν μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό και την κατασκευή του συστήματος.

- Η μέθοδος της *βιο-αύξησης* (bioaugmentation), περιλαμβάνει την προσθήκη ενδογενών ή μη μικροοργανισμών στη ρυπασμένη περιοχή. Δύο παράγοντες επηρεάζουν τη χρήση μικροοργανισμών σε μια υπό εξυγίανση περιοχή: 1) οι μη ενδογενείς μικροοργανισμοί σπάνια δρουν ανταγωνιστικά προς τους ενδογενείς με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η επαρκής ανάπτυξή τους και 2) τα περισσότερα εδάφη που υφίστανται μακροχρόνια επεξεργασία μέσω βιοεξυγίανσης, διαθέτουν ενδογενείς μικροοργανισμούς σε επαρκείς ποσότητες αν βεβαίως γίνεται σωστά η διαχείριση της ρυπασμένης περιοχής.

2.5.2 Ex situ βιοεξυγίανση

Αυτού του είδους οι μέθοδοι περιλαμβάνουν την εκσκαφή ή απομάκρυνση του ρυπασμένου εδάφους από την περιοχή ρύπανσης.

- Η μέθοδος του *Landfarming* είναι μια απλή τεχνική στην οποία αρχικά γίνεται εκσκαφή του ρυπασμένου εδάφους και στη συνέχεια η διασπορά του σε ειδικά χωροθετημένες κλίνες. Εκεί αναμιγνύεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα έως ότου οι ρύποι διασπαστούν. Στόχος είναι η διέγερση των ενδογενών μικροοργανισμών και η ενίσχυση της αερόβιας βιοαποικοδόμησης των ρύπων του εδάφους. Πρακτικά, η εξυγίανση πραγματοποιείται σε 10 – 35 cm εδάφους. Επειδή με το landfarming το κόστος παρακολούθησης και συντήρησης μειώνεται σημαντικά σε συνδυασμό με πολύ θετικά αποτελέσματα, η μέθοδος έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σαν εναλλακτική λύση.
- Η μέθοδος της *κομποστοποίησης* περιλαμβάνει το συνδυασμό ρυπασμένου εδάφους με μη επικίνδυνα υλικά όπως κοπριά ή υπολείμματα καλλιεργειών. Η παρουσία των οργανικών αυτών υποστρωμάτων επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλου μικροβιακού

πληθυσμού και αυξημένων θερμοκρασιών, χαρακτηριστικών της κομποστοποίησης.

- Η μέθοδος των *βιοσωρών (biopiles)* είναι ένα σύστημα στο οποίο συνδυάζεται το landfarming και η κομποστοποίηση. Στην ουσία πρόκειται για αεριζόμενους σωρούς ρυπασμένου εδάφους. Τυπικά χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία εδάφους που έχει υποστεί ρύπανση επιφανειακά με υδρογονάνθρακες πετρελαίου. Στους βιοσωρούς επικρατεί ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη και δράση των αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών.
- Η μέθοδος των *βιοαντιδραστήρων*, όπως οι υδατικοί ή οι αντιδραστήρες Slurry χρησιμοποιούνται για την ex situ επεξεργασία του ρυπασμένου εδάφους και υπόγειου ύδατος. Η βιοεξυγίανση σε αντιδραστήρα περιλαμβάνει ένα σύνολο από διεργασίες τις οποίες υφίσταται η ρυπασμένη ποσότητα ύδατος ή εδάφους μέσα σε ένα μηχανικό σύστημα. Ο βιοαντιδραστήρας slurry είναι μια συσκευή (δοχείο) που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μίγματος τριών φάσεων (στερεά, υγρή και αέρια) για την αύξηση του ρυθμού βιοδιάσπασης των ρύπων του εδάφους και αυτών της φάσης του νερού. Στην πράξη αποδεικνύεται ότι οι ρυθμοί αυτοί είναι υψηλότεροι από ότι στις μεθόδους in situ, επειδή οι συνθήκες είναι περισσότερο ελεγχόμενες και προβλεπόμενες. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και μειονεκτήματα όπως το γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται προεπεξεργασία του ρυπασμένου εδάφους, ή ο ρύπος πρέπει να απομακρυνθεί από το έδαφος μέσω έκπλυσης ή φυσικής εξαγωγής (εξαγωγή υπό κενό) προτού τοποθετηθεί στον βιοαντιδραστήρα.

2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιοεξυγίανσης

Στον Πίνακα 2.4 παραθέτονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της βιοεξυγίανσης.

Πλεονεκτήματα:

- Η βιοεξυγίανση είναι μια φυσική διεργασία και για το λόγο αυτό γίνεται πιο εύκολα αποδεκτή από το κοινό στις περιοχές ρύπανσης. Οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στην βιοεξυγίανση αυξάνονται για όσο διάστημα οι ρύποι είναι παρόντες. Όταν ο ρύπος αποδομηθεί τότε η ποσότητά του μειώνεται. Τα υπολείμματα της επεξεργασίας είναι διοξείδιο του άνθρακα, νερό και βιομάζα.
- Θεωρητικά, η μέθοδος είναι πολύ χρήσιμη στην αποδόμηση μεγάλου αριθμού οργανικών ενώσεων. Πολλά συστατικά που θεωρούνται αρχικά επικίνδυνα, στη συνέχεια μετατρέπονται σε ακίνδυνα. Το γεγονός αυτό εξαφανίζει την πιθανότητα για μελλοντική ευθύνη που σχετίζεται με τη διάθεση και επεξεργασία της ρυπασμένης ποσότητας.
- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς τη μεταφορά του ρύπου από ένα μέσο σε άλλο (π.χ από το έδαφος στο νερό ή τον αέρα) επειδή είναι δυνατή η πλήρης αποδόμηση το ρύπου.
- Η βιοαποκατάσταση μπορεί να πραγματοποιηθεί on site, χωρίς να παρεμποδίζονται άλλες δραστηριότητες στην περιοχή ρύπανσης. Το γεγονός αυτό μειώνει την πιθανότητα μεταφοράς του προβλήματος σε άλλη περιοχή άρα και τις επακόλουθες επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων.
- Η μέθοδος αποδεικνύεται μικρότερου κόστους από άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας.

Μειονεκτήματα:

- Η βιοεξυγίανση περιορίζεται από την ιδιότητα της βιοδιάσπασης των ρύπων. Δεν υφίστανται όλες οι οργανικές ενώσεις γρήγορη και αποδοτική διάσπαση.
- Υπάρχουν κάποιες αμφιβολίες όσον αφορά τα προϊόντα της βιοαποικοδόμησης. Ενδεχομένως, να παρουσιάζουν μεγαλύτερη τοξικότητα ή προσροφητική ικανότητα από την αρχική ένωση.

- Οι βιολογικές διεργασίες απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή ως προς τις συνθήκες λειτουργίας. Οι σημαντικοί παράμετροι που θα καθορίσουν την ποιότητα της βιοδιάσπασης είναι η ύπαρξη μικροβιακού πληθυσμού, οι καλές περιβαλλοντικές συνθήκες ανάπτυξης των μικροοργανισμών και τα κατάλληλα επίπεδα θρεπτικών αλλά και ρύπων.
- Είναι συνήθως δύσκολη η μετάβαση από εργαστηριακής και πιλοτικής κλίμακας πειράματα στην πλήρη κλίμακα του πεδίου ρύπανσης.
- Απαιτείται ακόμη αρκετή έρευνα στην ανάπτυξη τεχνολογιών βιοαποκατάστασης κατάλληλων για μίγματα ρύπων που δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στο περιβάλλον.
- Η βιοαποκατάσταση είναι πιο αργή διαδικασία από την εκσκαφή και απομάκρυνση του εδάφους ή την αποτέφρωση.
- Παραμένει η αβεβαιότητα ως προς τα επίπεδα απόδοσης της βιοεξυγίανσης. Δεν υπάρχει αποδεκτός ορισμός του «καθαρού», καθώς η εκτίμηση της απόδοσης είναι δύσκολη και δεν υπάρχουν αποδεκτά τελικά επίπεδα εξυγίανσης για τις τεχνολογίες βιοαποκατάστασης.

Μέθοδοι	Παραδείγματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Συνεκτιμώμενοι παράγοντες
In Situ	In-Situ βιοεξυγίανση Air Sparging Βιοαερισμός Βιοαύξηση	Μικρό κόστος Σχεδόν παθητική μέθοδος Για εδάφη και νερό	Περιβαλλοντικοί περιορισμοί Μεγάλος χρόνος επεξεργασίας Δύσκολη παρακολούθηση	Ικανότητα βιοαποικοδόμησης των μικροοργανισμών Παρουσία μετάλλων και άλλων ανόργανων Περιβαλλοντικές παράμετροι Βιοδιασπασιμότητα των ρύπων Διαλυτότητα Γεωλογικοί παράγοντες Κατανομή ρύπων
Ex Situ	Landfarming Κομποστοποίηση Βιοσωροί	Μικρό κόστος Καλή απόδοση Εφαρμόζονται και on site	Απαιτήσεις χώρου Μεγάλος χρόνος επεξεργασίας Προβλήματα μεταφοράς μάζας Περιορισμοί βιοδιαθεσιμότητας	Όμοια με πάνω
Βιοαντιδραστήρες	Slurry Υδατικοί	Αυξημένες ταχύτητες αποδόμησης Βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες Ενισχυμένη μεταφορά μάζας	Απαιτείται εκσκαφή εδάφους Υψηλό κόστος κεφαλαίου Υψηλό κόστος λειτουργίας	Βιοαύξηση Τοξικότητα

Πίνακας 2.4: Συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων βιοεξυγίανσης

2.7 Φυτοεξυγίανση

Με τον όρο φυτοεξυγίανση καθορίζουμε ένα σύνολο από τεχνολογίες στις οποίες χρησιμοποιούνται φυτά με σκοπό τον καθαρισμό περιοχών επιβεβαρυμένων με ρυπαντικό φορτίο. Η φυτοεξυγίανση αναφέρεται στις αλληλεπιδράσεις ρύπου-φυτού, ενώ πολλές τεχνικές σχετίζονται με την χρήση της ήδη υπάρχουσας γνώσης πολλών ετών γύρω από την γεωργία και την καλλιέργεια, σε περιβαλλοντικά προβλήματα.

Η φυτοεξυγίανση (“phytoremediation”, από το ελληνικό “phyto” και το “remediation” δηλ. θεραπεία) σαν όρος είναι σχετικά πρόσφατος που επινοήθηκε το 1991. Η βασική γνώση γύρω από την φυτοεξυγίανση προέρχεται από διάφορες περιοχές έρευνας όπως είναι οι τεχνητοί υδροβιότοποι, οι πετρελαιοκηλίδες και η συσσώρευση βαρέων μετάλλων στα φυτά. Οι προσπάθειες έρευνας της εξυγίανσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στην μελέτη των μηχανισμών και στην εκτίμηση των απαιτήσεων. Η έρευνα των μηχανισμών εστιάζεται στην εύρεση των θεωρητικών ορίων και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων από τα πειράματα πεδίου. Τα πειράματα αυτά σε πιλοτικές μονάδες, σε συνδυασμό με την εκτεταμένη εργαστηριακή έρευνα παρέχουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την αξία της μεθόδου. Η μακροχρόνια μελέτη της φυτοεξυγίανσης θα συντείνει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί, του πραγματικού κόστους της μεθόδου και του τρόπου με τον οποίο πρέπει να δημιουργηθούν τα μοντέλα που θα περιγράφουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του φυτού και του ρύπου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φυτοεξυγίανσης ανάλογα με την κατάληξη του ρύπου:

- *Φυτοεξαγωγή* (phytoextraction) λέγεται η διαδικασία κατά την οποία γίνεται η πρόσληψη ενώσεων από την ρίζα και στη συνέχεια η μεταφορά τους στα υπόλοιπα μέρη του φυτού. Η απομάκρυνση των ενώσεων γίνεται με την συγκομιδή των φυτών. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την συλλογή μικρότερης μάζας προς επεξεργασία, απ’ ότι η εκσκαφή του εδάφους. Εφαρμόζεται συνήθως σε εδάφη που περιέχουν μεγάλες ποσότητες μετάλλων. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κατά κανόνα στην επεξεργασία εδαφών, ιζημάτων και σε υγρά απόβλητα. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί για την επεξεργασία ρυπασμένου ύδατος αλλά όχι με καλή απόδοση.
- Η *φυτοαποικοδόμηση* (phytodegradation) ή αλλιώς φυτομετατροπή, είναι η διάσπαση ρύπων που προσλαμβάνονται από τα φυτά, μέσω των διεργασιών μεταβολισμού του φυτού, ή η διάσπαση των ρύπων εκτός του φυτού με την επίδραση συστατικών όπως τα ένζυμα που

εκκρίνονται από το φυτό. Ο κύριος μηχανισμός είναι η πρόσληψη από το φυτό και ο μεταβολισμός. Επίσης, η διάσπαση μπορεί να πραγματοποιηθεί έξω από το φυτό εξαιτίας της απελευθέρωσης ενώσεων από το φυτό. Η αποικοδόμηση που προκαλείται από τους μικροοργανισμούς στην ζώνη επίδρασης της ρίζας, καλείται ριζοαποικοδόμηση.

- Η *φυτοσταθεροποίηση* (phytostabilization), είναι ο μηχανισμός εκείνος στον οποίο παρεμποδίζεται ο ρύπος στο έδαφος καθώς απορροφάται και συσσωρεύεται από την ρίζα, προσροφάται πάνω στην ρίζα ή κατακρατείται στην ζώνη επίδρασης της ρίζας του φυτού. Στον ορισμό πρέπει να προστεθεί η χρήση των φυτών και των ριζών τους, στην παρεμπόδιση της μεταφοράς του ρύπου μέσω του αέρα και του νερού, της έκπλυσης και διασποράς του εδάφους. Η φυτοσταθεροποίηση βασίζεται στις μικροβιολογικές και χημικές ιδιότητες της ζώνης επίδρασης της ρίζας και στις μεταβολές των ιδιοτήτων του εδάφους και του ρύπου.
- *Ριζοαποικοδόμηση* (rhizodegradation) είναι η διάσπαση μιας οργανικής ένωσης του εδάφους εξαιτίας της ύπαρξης μικροβιακής δραστηριότητας, που ενισχύεται στην ζώνη επίδρασης της ρίζας. Στην βιβλιογραφία την συναντά κανείς και σαν αποικοδόμηση ή βιοαποικοδόμηση με χρήση φυτών (*in-situ*) και ενισχυμένη βιοαποικοδόμηση ριζόσφαιρας. Τα εκκρίματα του φυτού που απελευθερώνονται από την ρίζα, αποτελούνται από σάκχαρα, αμινοξέα, οργανικά οξέα, λίπη, στερόλες, νουκλεοτίδια, ένζυμα κ.α. Η παρουσία των ενώσεων αυτών αυξάνει τον μικροβιακό πληθυσμό και την δραστηριότητά τους και συνεπώς την βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρυπαντών του εδάφους. Επίσης, η επιφάνεια της ριζόσφαιρας αυξάνεται σταδιακά, με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα σημεία συγκέντρωσης των μικροβίων. Η αποικοδόμηση των εκκριμάτων οδηγεί σε συµµεταβολισµό των ρύπων στην ριζόσφαιρα. Οι ρίζες του φυτού συντελούν στην αύξηση του αερισµού του εδάφους

και στην μεταβολή της εδαφικής υγρασίας, δημιουργώντας έτσι συνθήκες κατάλληλες για την ανάπτυξη ενδογενών μικροοργανισμών.

- *Ριζοδιήθηση* (rhizofiltration) είναι η προσρόφηση ή η κατακράτηση πάνω στις ρίζες του φυτού των ενώσεων που βρίσκονται εν διαλύσει γύρω από την ζώνη επίδρασης της ρίζας, εξαιτίας βιοτικών ή αβιοτικών διεργασιών. Η πρόσληψη από το φυτό, η μεταφορά και η συσσώρευση των ενώσεων αυτών εξαρτάται από την φύση τους. Τα εκκρίματα του φυτού μπορούν να συντείνουν στην κατακράτηση μερικών μετάλλων. Κατά την ριζοδιήθηση, αρχικά πραγματοποιείται παρεμπόδιση του ρύπου όπου και ακινητοποιείται ή συσσωρεύεται πάνω ή μέσα στο φυτό. Η απομάκρυνση της ουσίας γίνεται με την φυσική απομάκρυνση του φυτού. Με την χρήση αυτής της μεθόδου είναι δυνατή η επεξεργασία υπογείων υδάτων, επιφανειακών υδάτων και υγρών αποβλήτων. Γενικά εφαρμόζεται σε περιοχές με μικρές συγκεντρώσεις της προς απομάκρυνση ουσίας και με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό. Δεν παρουσιάζει τόσο καλά αποτελέσματα στο έδαφος, σε ιζήματα και λάσπες γιατί ο ρύπος πρέπει να είναι εν διαλύσει έτσι ώστε να μπορεί να προσροφηθεί στο ριζικό σύστημα.

Η φυτοεξυγίανση είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε πολύ μεγάλα πεδία όπου άλλου είδους τεχνολογίες είναι ακριβές ή δεν δύνανται να εφαρμοστούν. Επίσης, σε περιοχές όπου δεν απαιτείται ιδιαίτερη αποκατάσταση για μεγάλα χρονικά διαστήματα ή σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες (π.χ όταν απαιτείται η δημιουργία ενός φυτικού καλύμματος σαν τελευταίο στάδιο). Στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνονται το μεγάλο χρονικό διάστημα αποκατάστασης, η μεταφορά του ρύπου στην τροφική αλυσίδα και η αδυναμία διατήρησης της φυτείας σε περιοχές υψηλής ρύπανσης.

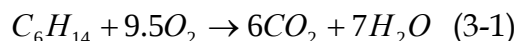
3.0 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΒΙΟΑΕΡΙΣΜΟ ΕΔΑΦΩΝ

Οι βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας εδαφών και υδάτων βασίζονται στην ικανότητα των μικροοργανισμών να καταστρέφουν τους ρύπους, ή να μειώνουν την τοξικότητά τους. Τα πλεονεκτήματα των χημικών και φυσικών μεθόδων επεξεργασίας αντισταθμίζονται από το γεγονός της μεταφοράς του προβλήματος σε άλλο μέσο (π.χ ενεργός άνθρακας) όπου και θα εξακολουθεί να υπάρχει το ζήτημα της επεξεργασίας. Αυτό είναι κάτι που δεν συμβαίνει στις βιολογικές διεργασίες. Επίσης, είναι δυνατή η επεξεργασία μεγάλων εκτάσεων με σχετικά χαμηλότερο κόστος και μικρότερη παρέμβαση στο περιβάλλον. Περιγράφεται στη συνέχεια η μικροβιακή κινητική και οι περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν τον βιοαερισμό.

3.1 Μικροβιακές διεργασίες που επηρεάζουν το βιοαερισμό

3.1.1 Μικροβιακή κινητική

Στις βιολογικές διεργασίες οι μικροοργανισμοί αποικοδομούν τις οργανικές ενώσεις είτε με άμεσο τρόπο για πρόσληψη άνθρακα και ενέργειας είτε τυχαία στις συµμεταβολικές διεργασίες χωρίς όφελος για αυτούς. Για παράδειγμα στην περίπτωση του βιοαερισμού των υδρογονάνθρακων πετρελαίου, οι μικροοργανισμοί διασπούν τις ενώσεις αντλώντας έτσι άνθρακα και ενέργεια. Επειδή οι μικροοργανισμοί διεγείρονται *in-situ*, βρίσκονται σε ισορροπία εξ' αρχής και χωρίς να αυξάνεται η βιομάζα κατά πολύ. Δηλαδή, ο ρυθμός θανάτωσης των μικροοργανισμών είναι περίπου ίσος με το ρυθμό ανάπτυξης της βιομάζας. Η στοιχειομετρική εξίσωση που περιγράφει για παράδειγμα τη βιοαποικοδόμηση του κανονικού εξανίου είναι:



Με βάση την εξίσωση (3-1), για κάθε mol υδρογονάνθρακα (εξανίου) που βιοαποικοδομείται, απαιτούνται 9.5 mol οξυγόνου ή αλλιώς 3.5 g οξυγόνου για κάθε 1 g υδρογονάνθρακα.

Για να γίνει η πρόβλεψη του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την αποκατάσταση μιας περιοχής, πρέπει να κατανοηθεί αρχικά η κινητική της

αντίδρασης κατανάλωσης του υποστρώματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κατανάλωση υποστρώματος συνδέεται άμεσα με τις ανάγκες για άνθρακα και ενέργεια των μικροοργανισμών. Παρόλα αυτά, πολλές φορές παρουσιάζονται και περιπτώσεις συμμεταβολισμού (π.χ ρύπανση από καύσιμα και TCE).

Η πρωτογενής κατανάλωση υποστρώματος περιγράφεται από την εμπειρική σχέση του Monod:

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \quad (3-2)$$

όπου: S = συγκέντρωση του υποστρώματος (g_s/l),

t = χρόνος (min),

k = μέγιστος ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος ($g_s/g_x \cdot \text{min}$),

X = συγκέντρωση των μικροοργανισμών (g_x/l) και

K_s = σταθερά ημίσεως ρυθμού του Monod (g_s/l).

Όταν η συγκέντρωση του υποστρώματος είναι υψηλή ($S \gg K_s$) τότε ο ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος είναι μέγιστος και περιορίζεται από κάποιους παράγοντες όπως το οξυγόνο, τα θρεπτικά ή τα χαρακτηριστικά των μικροοργανισμών. Στη φάση αυτή, ο ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος είναι πρώτης τάξεως ως προς τη συγκέντρωση της βιομάζας αλλά μηδενικής τάξεως ως προς τη συγκέντρωση του υποστρώματος. Αντίστροφα, όταν η συγκέντρωση υποστρώματος είναι χαμηλή ($S \ll K_s$), ο ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος είναι πρώτης τάξης τόσο ως προς τη συγκέντρωση της βιομάζας όσο και ως προς τη συγκέντρωση του υποστρώματος. Σε ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα βιοαερισμού, η εξίσωση κινητικής της κατανάλωσης οξυγόνου είναι μηδενικής τάξης.

Η κινητική Monod έχει εφαρμοστεί στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων όπου τα προς απομάκρυνση συστατικά είναι βιοδιαθέσιμα και βιοδιασπάσιμα. Ο μέγιστος ρυθμός βιοαποικοδόμησης (k) στον βιοαερισμό εδάφους είναι γενικά πολύ μικρότερος από αυτόν στα υγρά απόβλητα. Η κινητική του βιοαερισμού περιπλέκεται, καθώς έχει μεγάλο ρόλο η βιοδιαθεσιμότητα του ρύπου που εν μέρει καθορίζεται από την διαλυτότητα

του. Οι ρύποι που βρίσκονται στους υγρούς πόρους του εδάφους υφίστανται επεξεργασία καθώς εκεί αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί. Ενώ μπορεί λοιπόν η συγκέντρωση μιας ουσίας στο έδαφος να είναι υψηλή, η ποσότητα που βρίσκεται διαλυμένη στους πόρους μπορεί να είναι μικρή.

Στην πράξη, ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου μειώνεται σταδιακά καθώς προχωρά ο βιοαερισμός. Το γεγονός αυτό μπορεί να διαπιστωθεί σε διάστημα μικρότερο ακόμα και του ενός χρόνου, διότι ο ρυθμός επηρεάζεται από τις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους. Η μείωση αυτή ίσως να μην είναι ενδεικτική της κινητικής πρώτης τάξεως, αλλά αποτέλεσμα μιας επιλεκτικής απομάκρυνσης των ευκολότερα βιοδιασπάσιμων ενώσεων όπως για παράδειγμα του βενζολίου.

3.2 Περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν τις μικροβιακές διεργασίες

Η επιτυχία ενός συστήματος βιοαερισμού εξαρτάται από την ύπαρξη των βέλτιστων συνθηκών ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Αρκετοί παράγοντες επηρεάζουν την βιοαποικοδομητική ικανότητά τους, όπως:

- η διαθεσιμότητα και είδος των δεκτών ηλεκτρονίων,
- η περιεχόμενη υγρασία,
- το εδαφικό pH,
- η θερμοκρασία του εδάφους,
- η διαθεσιμότητα των θρεπτικών και
- η συγκέντρωση των ρύπων.

Κάθε μια από αυτές τις παραμέτρους επηρεάζει με ξεχωριστό τρόπο που όμως είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, καθώς λαμβάνουν χώρα συνεργιστικά φαινόμενα. Από τα τεστ αναπνοής μπορούν να υπολογιστούν κάποιες από αυτές τις παραμέτρους ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί η επίδραση στην μικροβιακή ανάπτυξη. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται η σπουδαιότητα κάθε μιας από τις παραμέτρους αυτές.

3.2.1 Οι συνθήκες των δεκτών ηλεκτρονίων

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν την ιδιότητα της βιοδιάσπασης μιας ένωσης είναι το είδος και η διαθεσιμότητα των δεκτών ηλεκτρονίων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση διαρροής στο έδαφος μιας ποσότητας υδρογονανθράκων, αποτέλεσμα της βιοαποικοδόμησής τους είναι οι αναερόβιες συνθήκες που θα επικρατήσουν. Αυτό θα συμβεί εξαιτίας της κατανάλωσης του οξυγόνου του εδάφους από τους μικροοργανισμούς. Παρόλο που η βιοαποικοδόμηση θα συνεχιστεί και υπό αναερόβιες συνθήκες, οι αερόβιες συνθήκες είναι αυτές που ευνοούν την ταχύτητα της αντίδρασης. Επομένως, η παροχή κάποιας ποσότητας οξυγόνου είναι κρίσιμη παράμετρος ως προς την επιτυχία του εγχειρήματος. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής του βιοαερισμού, το οξυγόνο θεωρείται ο κύριος περιοριστικός παράγοντας της μεθόδου με ελάχιστες εξαιρέσεις.

3.2.2 Περιεχόμενη υγρασία

Η περιεχόμενη υγρασία μπορεί να επηρεάσει το βιοαερισμό μέσω της επίδρασής της στους μικροοργανισμούς και στην διαπερατότητα του εδάφους. Οι μικροοργανισμοί χρειάζονται το νερό στις μεταβολικές τους διεργασίες και στην διάλυση των θρεπτικών. Αντίστροφα, η υγρασία στο έδαφος μειώνει την διαπερατότητά του και επομένως συντελεί στην κακή κατανομή του αέρα στην ρυπασμένη περιοχή. Στην πράξη, έχει αποδειχτεί ότι η χαμηλή υγρασία επηρεάζει την απόδοση του βιοαερισμού μόνο σε πολύ ξηρές περιοχές όπως για παράδειγμα σε μια έρημο.

Σε πολλές περιπτώσεις έχει διαπιστωθεί ότι ακόμα και στην περίπτωση που η υγρασία ήταν κοντά στο 2% κ.β, η βιοαποικοδόμηση των οργανικών ενώσεων συνεχίστηκε. Ως σήμερα, δεν έχει πραγματοποιηθεί μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της υγρασίας και του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου.

Σε μια περιοχή της Καλιφόρνια, η υγρασία του εδάφους φαινόταν ότι επηρέαζε αρνητικά την μικροβιακή δραστηριότητα. Η υγρασία ήταν μεταξύ 2 και 4% κ.β και παρόλο που η περιοχή ήταν ρυπασμένη με καύσιμο, δεν

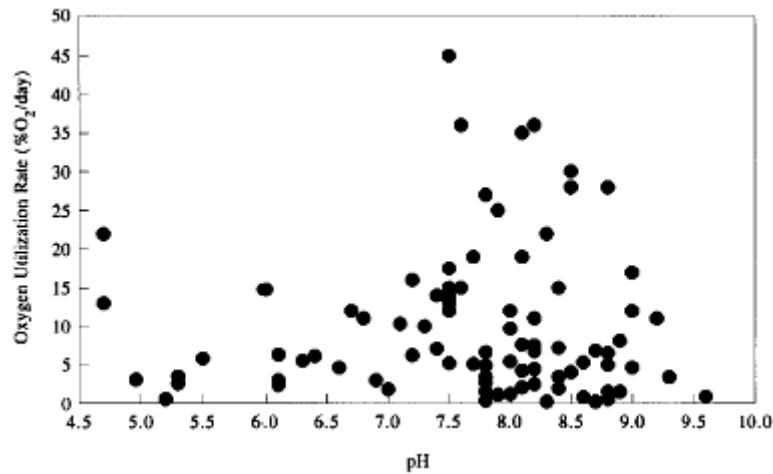
παρατηρήθηκε περιορισμός του οξυγόνου. Στην περιοχή είχε εγκατασταθεί ένα σύστημα άρδευσης σε μια προσπάθεια να ενισχυθεί η μικροβιακή δραστηριότητα. Η άρδευση κράτησε μία εβδομάδα και στη συνέχεια λειτούργησε το σύστημα του βιοαερισμού για ένα μήνα, προτού πραγματοποιηθεί το τεστ αναπνοής. Οι ρυθμοί αναπνοής που μετρήθηκαν μετά την άρδευση ήταν σημαντικά υψηλότεροι από αυτούς πριν την άρδευση. Επίσης, πριν την άρδευση δεν παρατηρούνταν κατανάλωση οξυγόνου όταν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου ήταν κάτω από το 17%. Μετά την άρδευση, η μικροβιακή δραστηριότητα συνεχίστηκε έως ότου η συγκέντρωση του οξυγόνου έφτασε το 1%. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι στις ακραίες συνθήκες, η αύξηση της υγρασίας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του βιοαερισμού μέσω της βελτίωσης της μικροβιακής δραστηριότητας.

Ένα ζήτημα που παρουσιάζεται συχνά, είναι μήπως ο αέρας που εισάγεται ξηράνει το έδαφος σε σημείο που θα είναι επιζήμιο για τους μικροοργανισμούς. Παρόλα αυτά, αποδεικνύεται ότι σε ένα χρονικό διάστημα 3 ετών, η απώλεια υγρασίας είναι ελάχιστη. Η ξηρασία και η απώλεια υγρασίας παρουσιάζονται κατά τον βιοαερισμό μόνο κοντά στο φρεάτιο ή αν η παροχή αέρα είναι πολύ μεγάλη. Εξάλλου, υπάρχουν μηχανισμοί όπως η βροχή, το χιόνι και το νερό που παράγεται σαν παραπροϊόν (βλ. εξίσωση 3-1), που διατηρούν σε καλά επίπεδα την υγρασία του εδάφους.

3.2.3 Το pH του εδάφους

Το pH του εδάφους είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την βιοαποκατάσταση, καθώς οι μικροοργανισμοί απαιτούν συγκεκριμένο εύρος pH για να επιζήσουν. Τα περισσότερα βακτήρια λειτουργούν καλύτερα σε pH μεταξύ 5 και 9 με την βέλτιστη τιμή ελαφρώς πάνω του 7. Μια αλλαγή στην τιμή του μπορεί να αλλάξει τη σύνθεση των μικροοργανισμών, επειδή κάθε είδος παρουσιάζει βέλτιστη ανάπτυξη σε συγκεκριμένο pH. Σε πολλές περιπτώσεις έχει αποδειχτεί ότι δεν επηρεάζει την *in situ* βιοαποκατάσταση,

παρά μόνο όταν η ρύπανση συντελεί στην μεταβολή του υπάρχοντος pH (βλ. Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-1: Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου και του εδαφικού pH

3.2.4 Η θερμοκρασία του εδάφους

Η μικροβιακή δραστηριότητα έχει διαπιστωθεί σε θερμοκρασίες από -12 ως 100 °C. Παρόλα αυτά, το βέλτιστο εύρος για την βιοαποικοδόμηση των περισσότερων ρύπων είναι στην πραγματικότητα πολύ μικρό και διαφορετικό για κάθε είδος. Για παράδειγμα, μπορεί οι μικροοργανισμοί σε ένα υποαρκτικό περιβάλλον να παρουσιάζουν βέλτιστη ανάπτυξη στους 10 °C, ενώ οι μικροοργανισμοί σε υποτροπικό περιβάλλον στους 30 °C.

Έχει παρατηρηθεί γενικά ότι ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης διπλασιάζεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 10 °C, μέχρι βεβαίως ένα απαγορευτικό σημείο. Η εξίσωση των van't Hoff-Arrhenius, εκφράζει τη σχέση αυτή ποσοτικά:

$$k_T = k_o \cdot e^{\frac{-E_a}{RT_{abs}}} \quad (3-3)$$

όπου: k_T = θερμοκρασιακά διορθωμένος ρυθμός βιοαποικοδόμησης (% O_2 /day),

k_o = βασικός ρυθμός βιοαποικοδόμησης ((% O_2 /day),

E_a = ενέργεια ενεργοποίησης (cal/mol),

R = παγκόσμια σταθερά των αερίων (1.987 cal/°K · mol) και

T_{abs} = απόλυτη θερμοκρασία (°K).

Ο Miller το 1990 υπολόγισε “ E_a ” ίσο με 8–13 kcal/mol για in situ βιοαποικοδόμηση καυσίμου. Στο διάστημα από 17–27 °C, η εξίσωση (3-3) προβλέπει με μεγάλη ακρίβεια τους ρυθμούς βιοαποικοδόμησης.

Η προσθήκη θερμότητας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση ενός συστήματος βιοαερισμού επειδή αυξάνεται η μικροβιακή δραστηριότητα. Για την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές όπως η χρήση ηλιακής θερμότητας, η εισαγωγή θερμού νερού και ο ενταφιασμός εναλλάκτη θερμότητας. Η επιλογή μιας τεχνικής θέρμανσης σχετίζεται με το πρόσθετο κόστος έναντι του οφέλους από την επιτάχυνση της διαδικασίας. Για παράδειγμα το θερμό νερό και ο εναλλάκτης ενισχύουν σημαντικά την βιοαποικοδόμηση, όμως αυξάνουν το κόστος σημαντικά. Η χρήση θερμού νερού, παρότι αποδοτική, περιορίζεται μόνο σε διαπερατά εδάφη για να εξασφαλιστεί ότι η υγρασία θα διοχετευθεί σε όλη την περιοχή. Ίσως η θέρμανση του εδάφους είναι αποδοτική οικονομικά μόνο σε πολύ κρύες περιοχές όπως η Αλάσκα.

3.2.5 Τα θρεπτικά συστατικά

Για να διατηρηθεί η μικροβιακή ανάπτυξη πρέπει να είναι διαθέσιμα κάποια βασικά συστατικά σε ορισμένες ποσότητες. Μερικά από αυτά είναι: το ασβέστιο, ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγνήσιο, το μαγγάνιο, το μολυβδαίνιο, το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, το νάτριο, το θείο και ο ψευδάργυρος. Το άζωτο και ο φώσφορος απαιτούνται σε μεγαλύτερες ποσότητες και το πιθανότερο είναι κάποιο από αυτά να υπάρχει μεν αλλά σε μικρή συγκέντρωση. Τα υπόλοιπα συστατικά καλούνται ιχνοστοιχεία διότι απαιτούνται σε πολύ μικρότερες ποσότητες.

Τα θρεπτικά στοιχεία είναι συστατικά της μικροβιακής βιομάζας. Η ανάγκη για αυτά είναι διαφορετική από την ανάγκη για άνθρακα ή ενέργεια. Τα θρεπτικά δεν καταστρέφονται αλλά ανακυκλώνονται στο οικοσύστημα. Επίσης, αντίθετα από το οξυγόνο, δεν απαιτείται σταθερή προσθήκη θρεπτικών στο έδαφος προκειμένου να λειτουργήσει η βιοαποικοδόμηση.

Μια προσέγγιση της απαίτησης σε θρεπτικά είναι και η ακόλουθη που βασίζεται στην μικροβιακή κινητική (U.S. EPA, 1995):

$$\frac{dX}{dt} = k_B \cdot Y - k_d \cdot X \quad (3-4)$$

όπου: X = βιομάζα (mg βιομάζας/kg εδάφους),

k_B = ρυθμός βιοαποικοδόμησης (mg υδρογονανθράκων/kg εδάφους · day),

Y = συντελεστής κυττάρων (mg βιομάζας/mg υδρογονανθράκων) και

k_d = ρυθμός ενδογενούς αναπνοής (day⁻¹).

Υποθέτοντας ότι η συγκέντρωση της βιομάζας φτάνει σε σταθερή κατάσταση (steady state), η (3-4) γίνεται:

$$\frac{dX}{dt} = 0 = k_B \cdot Y - k_d \cdot X \quad (3-5)$$

και με επίλυση:

$$X = \frac{k_B \cdot Y}{k_d} \quad (3-6)$$

Πολύ λίγα πράγματα είναι γνωστά για τους ρυθμούς ενδογενούς αναπνοής ή τους συντελεστές “ Y ”, όμως μπορούν να αντληθούν από τη διεθνή βιβλιογραφία (Metcalf and Eddy, 2003).

Στα περισσότερα εδάφη, τα θρεπτικά στοιχεία είναι σε περίσσεια και για το λόγο αυτό στις ως τώρα εφαρμογές πεδίου δεν έχει απαιτηθεί προσθήκη αυτών. Τα θρεπτικά συνήθως προστίθενται όταν είναι επιθυμητή η αύξηση του ρυθμού αποδόμησης, χωρίς να έχει εξακριβωθεί απόλυτα η σχέση αυτή. Έτσι, ακόμα και στην περίπτωση που οι λόγοι άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου δεν είναι στα βέλτιστα επίπεδα, ο ρυθμός αναπνοής διατηρήθηκε σε πολύ καλό βαθμό. Γενικά πάντως δεν υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού αποδόμησης και της συγκέντρωσης θρεπτικών, όταν το οξυγόνο (περιοριστικός παράγοντας) επαρκεί.

Στον υπολογισμό του ρυθμού αναπνοής υπάρχει το ενδεχόμενο σφάλματος στην περίπτωση όπου το έδαφος είναι πλούσιο σε σίδηρο. Αυτό συμβαίνει γιατί μια ποσότητα οξυγόνου δεσμεύεται από τον σίδηρο σχηματίζοντας οξείδια του σιδήρου.

3.2.6 Η συγκέντρωση του ρύπου

Η συγκέντρωση του ρύπου μπορεί να επηρεάσει την βιοαποικοδόμησή του. Υπερβολικές ποσότητες του ρύπου μπορούν να μειώσουν τον ρυθμό βιοαποικοδόμησης εξαιτίας της εμφάνισης φαινομένων τοξικότητας. Αντιστρόφως, αν η συγκέντρωση του ρύπου είναι χαμηλή τότε ο και ρυθμός θα είναι χαμηλός, επειδή η επαφή μεταξύ του ρύπου και των μικροοργανισμών είναι περιορισμένη και η συγκέντρωση του υποστρώματος είναι πιθανόν κάτω από S_{min} .

Στην πράξη, οι υδρογονάνθρακες πετρελαίου για παράδειγμα, δεν επιδρούν τοξικά στους μικροοργανισμούς, κάτι που δεν ισχύει σε ενώσεις λιγότερο διαλυτές και βιοδιασπάσιμες (όπως το TCE). Παρόλο που υπάρχει σχέση που να συνδέει το ρυθμό βιοαποικοδόμησης με τη συγκέντρωση της ουσίας, η σχέση αυτή είναι πολύπλοκη και όχι απόλυτα κατανοητή. Οι μεταβολές στον ρυθμό βιοαποικοδόμησης κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε πολλές περιοχές οφείλονται εν μέρει στο γεγονός της απομάκρυνσης των περισσότερο βιοδιασπάσιμων ενώσεων όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο, το αιθυλοβενζόλιο και το ξυλένιο.

3.2.7 Βιοδιαθεσιμότητα και σχετική βιοαποικοδομησιμότητα

Άλλη μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την βιοαποικοδόμηση είναι η βιοδιαθεσιμότητα του ρύπου. Η βιοδιαθεσιμότητα είναι μια γενικότερη έννοια που περιγράφει την προσβασιμότητα του ρύπου στον μικροβιακό πληθυσμό. Η βιοδιαθεσιμότητα περιέχει μια φυσική ερμηνεία που σχετίζεται με την κατανομή των φάσεων και τη μεταφορά μάζας και μια φυσιολογική ερμηνεία που σχετίζεται με την καταλληλότητα του ρύπου σαν υπόστρωμα. Οι ενώσεις που έχουν μεγάλη διαλυτότητα στο νερό και μικρή έλξη με τη φάση των NAPL ή μικρή τάση προσρόφησης στο έδαφος, είναι αυτές που μπορούν να είναι βιοδιαθέσιμες στους μικροοργανισμούς και ευκολότερα βιοαποικοδομήσιμες. Τα BTEX για παράδειγμα αποδομούνται ευκολότερα από άλλες ενώσεις των καυσίμων καθώς είναι περισσότερο διαλυτές στο νερό και επομένως βιοδιαθέσιμες.

3.3 Φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν τον βιοαερισμό

Τέσσερις είναι οι κύριες φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν τον βιοαερισμό. Αυτές είναι η διαπερατότητα του εδάφους, η διάχυση του ρύπου στο έδαφος, η κατανομή του ρύπου και η ακτίνα επίδρασης του οξυγόνου. Κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους παρουσιάζεται παρακάτω.

3.3.1 Διαπερατότητα του εδάφους

Υποθέτοντας ότι οι ρύποι είναι βιοδιαθέσιμοι, η γεωλογία της προς εξυγίανση περιοχής είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό για μια επιτυχή εφαρμογή του βιοαερισμού. Τα εδάφη πρέπει να είναι επαρκώς διαπερατά ώστε να επιτρέπεται η μεταφορά του εδαφικού αέρα στα σημεία της ρύπανσης. Σκοπός της μεταφοράς οξυγόνου είναι η ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης και η τάξη μεγέθους της μεταφοράς να είναι από $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ του όγκου των πόρων ανά ημέρα.

Η διαπερατότητα του εδάφους είναι συνάρτηση της δομής του εδάφους, του μεγέθους των σωματιδίων και της υγρασίας του. Τυπικά, διαπερατότητα πάνω από 0.1 Darcy είναι αρκετή για την επαρκή οξυγόνωση των εδαφών. Κάτω από αυτό το επίπεδο βεβαίως και μπορεί να εφαρμοστεί ο βιοαερισμός μόνο που θα πρέπει να διεξαχθούν πειράματα στο πεδίο προκειμένου να διασφαλιστεί η μεταφορά του αέρα. Όταν η διαπερατότητα του εδάφους είναι κάτω από 0.01 Darcy, τότε η ροή στο έδαφος πραγματοποιείται μόνο μέσω του δευτερεύοντος πορώδους είτε μέσω άλλων ρηγματώσεων του εδάφους. Για το λόγο αυτό, η επιτευξιμότητα του βιοαερισμού σε χαμηλής διαπερατότητας εδάφη είναι συνάρτηση της κατανομής των μονοπατιών ροής και της διάχυσης του αέρα από και προς τα μονοπάτια αυτά εντός της ρυπασμένης περιοχής. Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα επιτυχούς εφαρμογής της μεθόδου σε εδάφη μικρής διαπερατότητας (Αεροπορική Βάση Eielson, Alaska).

Σε εδάφη με καλή τιμή διαπερατότητας, ακόμα και στην περίπτωση που τα μονοπάτια ροής απέχουν 0.6–1.2 m από την ρυπασμένη περιοχή, μπορεί να

πραγματοποιηθεί η βιοαποικοδόμηση εξαιτίας της διάχυσης του οξυγόνου. Παρόλα αυτά, ο βαθμός επεξεργασίας είναι διαφορετικός σε κάθε περιοχή.

Το οξυγόνο γενικά κατανέμεται πολύ καλά σε περιοχές όπου η διαπερατότητα υπερβαίνει τα 0.1 Darcy. Ενδεχομένως η συγκέντρωσή του σε κάποια σημεία παρακολούθησης να είναι χαμηλή. Συνήθως όμως ο αριθμός των σημείων αυτών είναι μικρός. Από τους πιο σημαντικούς παράγοντες περιορισμού του βιοαερισμού είναι η υψηλή υγρασία. Ο συνδυασμός υψηλής υγρασίας και λεπτόκοκκου εδάφους πιθανόν να αποτελέσει πρόβλημα. Η ετερογενής φύση των περισσότερων εδαφών που περιέχουν φακούς και άλλες παρόμοιες δομές, συνεισφέρουν θετικά στην καλύτερη διανομή του αέρα.

3.3.2 Κατανομή του ρύπου

Επειδή ο βιοαερισμός είναι ουσιαστικά ένα σύστημα διανομής του αέρα σχεδιασμένο έτσι ώστε να παρέχει επαρκές οξυγόνο σε ρυπασμένες περιοχές, είναι σημαντικό να κατανοηθεί ο παράγοντας της κατανομής του ρύπου. Σε πολλές περιοχές στις οποίες έχει εφαρμοστεί ο βιοαερισμός, ο ρύπος μπορεί να βρίσκεται και στις τέσσερις φάσεις του γεωλογικού μέσου. Δηλαδή, μπορεί να είναι προσροφημένος στο έδαφος στην ακόρεστη ζώνη, στη φάση ατμών στην ακόρεστη ζώνη, σε ελεύθερη μορφή επιπλέοντας στον υδροφορέα σαν κατάλοιπο κορεσμού και στην υγρή φάση διαλυμένος στο νερό των πόρων ή στο υπόγειο ύδωρ.

Από τις περιπτώσεις αυτές, σημαντικότερη θεωρείται αυτή του υπόγειου ύδατος εξαιτίας του κινδύνου προσβολής της ανθρώπινης υγείας. Παρόλα αυτά, ο ρύπος στην ελεύθερη και στην προσροφημένη μορφή επιδρά στην ποιότητα των υπογείων υδάτων. Επομένως κάθε είδους τεχνική που χρησιμοποιείται στην εξυγίανση των υπογείων υδάτων πρέπει να προβλέπει αυτήν την αλληλεπίδραση. Δεδομένου ότι ο βιοαερισμός εφαρμόζεται μόνο στην ακόρεστη ζώνη, η ανάλυση θα περιοριστεί στα μη υδατικής φάσης υγρά μικρής πυκνότητας (LNAPLs).

Συνήθως, όταν μια ποσότητα εδάφους περιέχει κάποιο ρύπο, αυτός κατανέμεται μεταξύ των διαφόρων φάσεων. Τα ρευστά κινούνται στο έδαφος

μέσω διαφόρων μηχανισμών όπως η συμμεταφορά και η διάχυση. Τα LNAPLs κινούνται ομοιόμορφα ως τη ζώνη τριχοειδών φαινομένων. Στη συνέχεια διασπείρονται κατά μήκος της κορεσμένης ζώνης. Παρόλα αυτά, δεν θα περάσουν στην κορεσμένη ζώνη παρά μόνο αν υπερβούν μια κρίσιμη τιμή της πίεσης. Τα συστατικά αυτά βρίσκονται στην αέρια ή στην υγρή φάση, σαν ελεύθερο προϊόν και προσροφημένα στα σωματίδια του εδάφους. Τα συστατικά της αέριας φάσης υπόκεινται στις διεργασίες της συμμεταφοράς και της διάχυσης. Ο νόμος του Raoult χρησιμοποιείται για την περιγραφή της κατανομής μεταξύ της καθαρής φάσης και της υγρής φάσης:

$$C_V = \chi \cdot C_{vsat} \quad (3-7)$$

όπου: C_V = συγκέντρωση του ρύπου στην αέρια φάση (g/l),

χ = ποσοστό κατανομής του ρύπου (αδιάστατο μέγεθος) και

C_{vsat} = συγκέντρωση κορεσμού της αέριας φάσης (g/l).

Το C_{vsat} μπορεί καθοριστεί και από το νόμο των ιδανικών αερίων:

$$C_{vsat} = \frac{(MW_x) \cdot P_V}{RT_{abs}} \quad (3-8)$$

όπου: MW_x = μοριακό βάρος του ρύπου (g/mol),

P_V = πίεση της αέριας φάσης του ρύπου σε θερμοκρασία T (atm),

R = παγκόσμια σταθερά των αερίων $\left(\frac{l \cdot atm}{mol \cdot ^\circ K} \right)$,

T_{abs} = απόλυτη θερμοκρασία ($^\circ K$).

Το ελεύθερο προϊόν που έρχεται σε επαφή με το υπόγειο νερό μπορεί να μεταφερθεί σε αυτό ανάλογα με την διαλυτότητα των συστατικών του. Μόλις εισέλθουν οι ρύποι στο υπόγειο νερό μεταναστεύουν λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ των σημείων (δρώσα δύναμη). Η σχέση ισορροπίας μεταξύ της υγρής φάσης και της καθαρής φάσης είναι:

$$C_W = \chi \cdot s_x \quad (3-9)$$

όπου: C_W = συγκέντρωση του ρύπου στην υδατική φάση (g/l_{aqueous}),

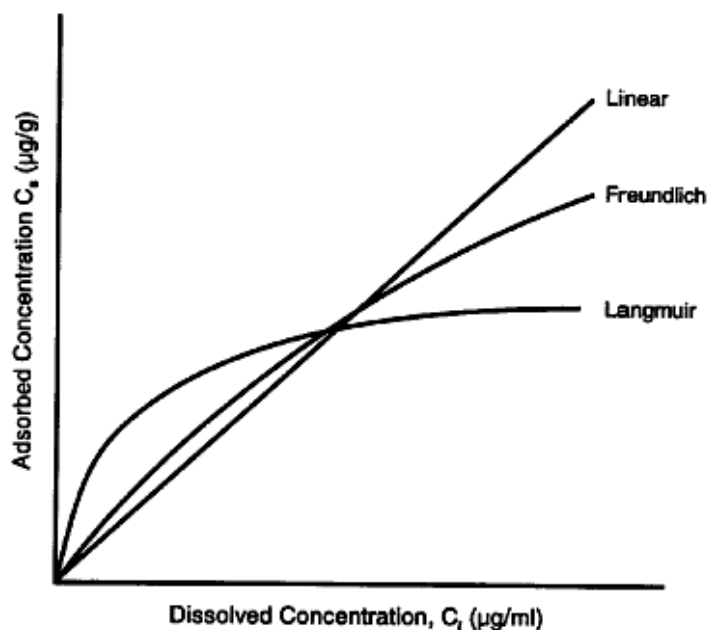
s_x = διαλυτότητα του καθαρού ρύπου στο νερό (g/l_{water}).

Η ρόφηση των ρύπων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει διάφορα φαινόμενα όπως τις δυνάμεις Coulomb, τις δυνάμεις Van der Waals,

τους δεσμούς υδρογόνου, τις δυνάμεις δίπολου-δίπολου και τις υδροφοβικές δυνάμεις. Για παράδειγμα, οι υδρογονάνθρακες λόγω της μη πολικής φύσης τους προσροφούνται εξαιτίας των δεσμών υδροφοβικού χαρακτήρα με την οργανική ύλη. Η υδροφοβικότητα είναι από τις κύριες ιδιότητες που επηρεάζουν την τύχη των οργανικών ενώσεων στο υπέδαφος. Ο βαθμός ρόφησης εξαρτάται από το οργανικό περιεχόμενο του εδάφους και από τον συντελεστή κατανομής οκτανόλης/νερού του συγκεκριμένου συστατικού.

Οι ισόθερμες ρόφησης είναι τριών ειδών: τύπου Langmuir, τύπου Freundlich ή γραμμικές (Σχήμα 3-2). Η ισόθερμη Langmuir περιγράφει την γραμμική αρχικά αύξηση της προσροφημένης ποσότητας του ρύπου ως προς τη συγκέντρωσή του, που

στη συνέχεια φτάνει σε ένα άνω όριο και τείνει προς την οριζόντια. Αυτό συμβαίνει λόγω της σταδιακής πλήρωσης των ελεύθερων θέσεων. Η ισόθερμη αυτή περιγράφει πλήρως την προσρόφηση στην περιοχή όπου η συγκέντρωση του ρύπου είναι υψηλή (π.χ στην πηγή



Σχήμα 3-2: Ισόθερμες ρόφησης (Πηγή: EPA, 1995)

της ρύπανσης). Στην ισόθερμη Freundlich υποτίθεται ότι τα σημεία πλήρωσης είναι άπειρα, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα σημεία που βρίσκονται μακριά από την πηγή όπου η συγκέντρωση είναι χαμηλή. Η μαθηματική έκφραση περιέχει έναν παράγοντα χημικά καθορισμένο που μεταβάλλει την γραμμικότητα της ισόθερμης. Η γραμμική ισόθερμη είναι σχετικά απλή και ισχύει στην περίπτωση διαλυμένων συστατικών κατά το μισό της διαλυτότητάς τους. Τυπικά ισχύει για την περιγραφή της ρόφησης των υδρογονανθράκων.

Η γραμμική ισόθερμη εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$C_s = K_d \cdot C_w \quad (3-10)$$

όπου: C_s = ποσότητα του ρύπου που είναι προσροφημένη στα σωματίδια του εδάφους (g/g_{soil}),

K_d = συντελεστής ρόφησης (l_{aqueous}/g_{soil}).

Ο συντελεστής ρόφησης μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά ή από βιβλιογραφικές πηγές ή με χρήση του συντελεστή κατανομής οκτανόλης/νερού (K_{ow}) και του ποσοστού οργανικού άνθρακα του εδάφους (f_{oc}). Ο συντελεστής ρόφησης υπολογίζεται λοιπόν από τη σχέση:

$$K_d = K_{ow} \cdot f_{oc} \quad (3-11)$$

Στην πράξη, στις συνθήκες ισορροπίας, η συγκέντρωση των περισσότερων πετρελαιοειδών στην υγρή ή την αέρια φάση καθορίζεται από την καθαρή φάση - αν υπάρχει - ή την προσροφημένη φάση (αν δεν υπάρχει η ελεύθερη). Αν δεν υπάρχει ελεύθερη φάση και δεν είναι όλες οι θέσεις προσρόφησης κατειλημμένες, τότε η συγκέντρωση της αέριας ή της υγρής φάσης είναι συνάρτηση της προσροφημένης ποσότητας.

Η σχέση αυτή ακολουθεί τυπικά μια καμπύλη τύπου Langmuir. Αν η συγκέντρωση στο έδαφος είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα που μπορεί να προσροφηθεί, τότε οι συγκεντρώσεις της υγρής και της αέριας φάσης καθορίζονται από το νόμο του Raoult και είναι ανεξάρτητες της συγκέντρωσης της ουσίας στο έδαφος. Για παράδειγμα, σε αμμόδες έδαφος το ελεύθερο προϊόν μπορεί να φτάσει και να υπερβεί μια συγκέντρωση 25000 mg/kg. Παρόλα αυτά, μια πιθανή αποκατάσταση κατά 99% δηλαδή 250 mg/kg δεν θα επηρεάσει τις συγκεντρώσεις ισορροπίας στο αέριο του εδάφους ή στο υπόγειο ύδωρ.

Οι δυσκολίες ως προς την εφαρμογή του βιοαερισμού παρουσιάζονται στην περίπτωση όπου υπάρχουν μεγάλες ποσότητες του ρύπου στην ζώνη τριχοειδών ή εντός του υδροφορέα, εξαιτίας των διακυμάνσεων της στάθμης του υπογείου ύδατος. Για την περίπτωση αυτή, προτείνεται προεπεξεργασία της ζώνης τριχοειδών φαινομένων και εγκατάσταση φίλτρων στα φρεάτια εντός του υδροφορέα. Η δυνατότητα της μεθόδου ως προς τον αερισμό αυτών

των ιδιαίτερων σημείων δεν έχει ακόμα επιβεβαιωθεί. Αναμένεται ελλιπής οξυγόνωση λόγω της μείωσης του όγκου των πόρων. Ενδεχομένως, πρέπει να εξεταστεί η άντληση του ρυπασμένου ύδατος κατά πρώτη φάση και η επεξεργασία του εδάφους με βιοαερισμό στη συνέχεια. Εναλλακτικά, μπορεί να εφαρμοστεί ένας συνδυασμός οξυγόνωσης της ακόρεστης (bioventing) και της κορεσμένης (air sparging) ζώνης.

3.3.3 Ακτίνα επίδρασης του οξυγόνου

Ο υπολογισμός της ακτίνας επίδρασης του οξυγόνου είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους στο σχεδιασμό ενός συστήματος βιοαερισμού σε πλήρη κλίμακα. Με το μέγεθος αυτό καθορίζεται η απόσταση μεταξύ των φρεατίων, το πλήθος των φρεατίων, η ισχύς του φυσητήρα (blower) ενώ ελέγχεται και η επαρκής οξυγόνωση της ρυπασμένης περιοχής.

Σαν ακτίνα επίδρασης του οξυγόνου ορίζεται η απόσταση μέχρι την οποία πρέπει να παρέχεται το οξυγόνο προκειμένου να διατηρηθούν οι βέλτιστες συνθήκες βιοαποικοδόμησης. Αυτός ο ορισμός διαφέρει από τον αντίστοιχο για τα συστήματα εξαγωγής αέρα εδάφους (Soil Vapor Extraction) στα οποία σαν ακτίνα επίδρασης θεωρείται η μέγιστη απόσταση από το φρεάτιο εξαγωγής που παρατηρείται μεταφορά του αέρα. Η ακτίνα επίδρασης είναι συνάρτηση της παροχής αέρα και του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου και επομένως εξαρτάται από τη γεωλογία της περιοχής, το σχεδιασμό του φρεατίου και τη μικροβιακή δραστηριότητα. Επηρεάζεται από τη στρωματοποίηση του εδάφους.

Σε εδάφη με φακούς μικρής διαπερατότητας πάνω από εδάφη μεγαλύτερης διαπερατότητας η ακτίνα αυξάνεται. Σε περιοχές όπου η ρύπανση είναι σε μικρά βάθη, η ακτίνα επίδρασης αυξάνεται όταν στην επιφάνεια υπάρχει άσφαλτος ή τσιμέντο. Στην περίπτωση όμως λιθόστρωτων δρόμων δεν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο.

Η μικροβιακή δραστηριότητα επηρεάζει την ακτίνα επιρροής. Καθώς αυξάνεται η μικροβιακή δραστηριότητα, μειώνεται η ακτίνα. Για το λόγο

αυτό, προτείνεται ο υπολογισμός της ακτίνας και ο σχεδιασμός του συστήματος σε περιόδους μέγιστης μικροβιακής δραστηριότητας.

4.0 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΑΕΡΙΣΜΟΥ

4.1 Βασικές αρχές της ροής αερίων σε πορώδη μέσα

Στις περιοχές στις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος του βιοαερισμού, μπορεί να εφαρμοστεί ένα μοντέλο για την προσέγγιση της απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος και για να ερευνηθούν σχεδιαστικές εναλλακτικές λύσεις. Στα μοντέλα εντούτοις, πραγματοποιούνται μερικές απλοποιημένες υποθέσεις για να αντιπροσωπευθεί η περιοχή από μαθηματική άποψη. Σε πολλές περιπτώσεις αυτές οι υποθέσεις δεν έχουν επιπτώσεις στο τελικό αποτέλεσμα, αλλά η δυνατότητα ότι θα μπορούσαν, πρέπει να ληφθεί υπόψη. Μερικές από αυτές τις υποθέσεις περιλαμβάνουν όρους (ή συνθήκες) ομοιογένειας ή ισοτροπίας, ενώ οι περιοχές είναι συνήθως ετερογενείς (π.χ στρωματώσεις εδάφους) και άμεσα εξαρτώμενες από τις ιδιότητές τους. Επιπλέον, τα πρότυπα μοντέλα εξαρτώνται πάντα από την αντιπροσωπευτικότητα των στοιχείων ως προς τις πραγματικές συνθήκες των περιοχών. Αυτές οι εκτιμήσεις είναι βασικές στην κατανόηση του βαθμού στον οποίο το μοντέλο είναι αναμενόμενο να προβλέψει ακριβώς την απόδοση.

4.1.1 Νόμος Darcy για τη ροή αερίου

Η γραμμική ροή σε πορώδη μέσα περιγράφεται γενικά από το νόμο Darcy, μια εμπειρική σχέση της μορφής:

$$q = \frac{k_i \cdot \rho \cdot g}{\mu} \nabla H \quad (4-1)$$

όπου: q = εκροή ανά μονάδα επιφάνειας [L/T],

k_i = εγγενής διαπερατότητα [L²],

ρ = πυκνότητα του ρευστού [M/L³],

g = επιτάχυνση της βαρύτητας [L/T²],

μ = δυναμικό ιξώδες του ρευστού [M/L-T],

∇ = τελεστής βαθμίδας [L⁻¹],

H = συνολικό ύψος [L]*.

* Σημειώνουμε ότι η πίεση υπολογίζεται αν πολλαπλασιαστεί το ύψος με ρg .

Η διαπερατότητα “k” είναι ιδιότητα του πορώδους μέσου. Η πυκνότητα “ρ” και το ιξώδες “μ” είναι ιδιότητες του συγκεκριμένου ρευστού. Η τιμή του ιξώδους του αέρα σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (Κ.Σ) είναι $1.83 \times 10^{-5} \text{ Newton}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$. Αυτό είναι ίσο με $1.83 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ και $1.83 \times 10^{-2} \text{ centipoise}$. Ομοίως, η τιμή της πυκνότητας του αέρα σε Κ.Σ είναι $1.20 \times 10^{-3} \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, ίσο με $1.20 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ και $7.49 \times 10^{-2} \text{ lb}\cdot\text{ft}^{-3}$. Οι κανονικές συνθήκες αναφέρονται σε θερμοκρασία 21.1 °C και πίεση 1 atm (101.35 kPa).

Το ύψος “H” (ενέργεια ανά μονάδα βάρους) [L] μπορεί να εκφραστεί σαν πίεση “P” (ενέργεια ανά μονάδα όγκου) [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$] και σαν δυναμικό “φ” (ενέργεια ανά μονάδα μάζας) [L^2T^{-2}]. Για να μετατραπεί το ύψος σε πίεση, πολλαπλασιάζεται με “ρg” όπου “ρ” η πυκνότητα του ρευστού και “g” η επιτάχυνση της βαρύτητας. Για να μετατραπεί το ύψος σε δυναμικό, πολλαπλασιάζεται με “g”. Τέλος, για να μετατραπεί η πίεση σε δυναμικό διαιρείται η πίεση με “ρ” (Hillel, 1980a).

Το συνολικό δυναμικό “φ” (μηχανική ενέργεια ανά μονάδα μάζας) [L^2T^{-2}], καθορίζεται από την εξίσωση του Bernoulli:

$$\phi = gz + \frac{v^2}{2} + \int_{P_0}^P \frac{1}{\rho} dP \quad (4-2)$$

όπου: z = ύψος από την επιφάνεια αναφοράς [L],

v = ταχύτητα του ρευστού [L/T],

P = απόλυτη πίεση [M/LT²].

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (4-2) αποτελεί το δυναμικό της βαρύτητας, ο δεύτερος όρος το δυναμικό αδράνειας και ο τρίτος όρος το δυναμικό της πίεσης. Όσον αφορά τη ροή των αερίων, η επίδραση της βαρύτητας είναι μικρή για να ληφθεί υπόψη. Ομοίως, η επίδραση της αδράνειας μπορεί να παραληφθεί, όσο η ροή είναι γραμμική. Επομένως, η βαθμίδα του συνολικού δυναμικού του αερίου μετατρέπεται ως εξής:

$$\nabla \phi = \frac{1}{\rho} \nabla P \quad (4-3)$$

και ο νόμος του Darcy για τη ροή των αερίων είναι:

$$q = \frac{k_a}{\mu} \nabla P \quad (4-4)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εγγενής διαπερατότητα “ k_i ” αντικαταστάθηκε από τη διαπερατότητα του αέρα “ k_a ” στην εξίσωση (4-4). Ενώ η εγγενής διαπερατότητα είναι ένα μέτρο της αντίστασης που συναντά η ροή κατά την κίνηση του αερίου στο σύνολο των πόρων, η διαπερατότητα του αέρα αναπαριστά την αντίσταση στη ροή, στους πόρους που περιέχουν μόνο αέρα (κενοί πόροι). Επειδή το κενό πορώδες αποκλίνει από το ολικό πορώδες κατά το ποσό εκείνο που εκφράζει την περιεχόμενη υγρασία, η διαπερατότητα του αέρα είναι μικρότερη από την εγγενή (φυσική) διαπερατότητα.

Ο Klinkenberg (1941) απέδειξε ότι σε πηλώδη εδάφη, παρατηρείται κάτι σαν «γλίστρημα» του αερίου, έτσι που η ταχύτητα ροής είναι αυξημένη σε σχέση με αυτήν που προκύπτει από το νόμο του Darcy. Η αύξηση της ταχύτητας, γνωστή και σαν φαινόμενο Klinkenberg, είναι αποτέλεσμα μη μηδενικών ταχυτήτων ροής διαμέσου των πόρων. Ο Massmann (1989), απέδειξε ότι για διάμετρο πόρων μεγαλύτερη από 10^{-3} mm περίπου, η μεταβολή αυτή στη ροή είναι μικρή σε σύγκριση με τη ροή σε ένα παχύρρευστο υγρό και μπορεί να αγνοηθεί. Όπως περιγράφεται παρακάτω, ο McWhorter (1990) βρήκε την ακριβή λύση για ακτινική ροή σε συνδυασμό με το φαινόμενο Klinkenberg.

4.1.2 Εξίσωση μερικού διαφορικού για τη ροή των αερίων

Η εξίσωση μερικού διαφορικού για τη ροή των αερίων προκύπτει από το συνδυασμό του νόμου Darcy με την αρχή διατήρησης της μάζας. Η αρχή διατήρησης της μάζας για συμπιεστό ρευστό είναι:

$$\nabla \cdot (\rho \cdot q) = \frac{\partial(\rho \cdot n_a)}{\partial t} \quad (4-5)$$

όπου: n_a = κενό πορώδες.

Αντικαθιστώντας το νόμο του Darcy στην εξίσωση (4-5) προκύπτει:

$$\nabla \cdot \left(\rho \frac{k_a}{\mu} \nabla P \right) = \frac{\partial(\rho \cdot n_a)}{\partial t} \quad (4-6)$$

Αν εκφράσουμε την πυκνότητα του αερίου με όρους πίεσης χρησιμοποιώντας το νόμο των ιδανικών αερίων και θεωρώντας ότι το πορώδες και το ιξώδες είναι σταθερά, η εξίσωση (4-6) μετατρέπεται ως εξής:

$$\nabla \bullet (k_a \nabla P^2) = 2 \cdot n_a \cdot \mu \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4-7)$$

Αυτή είναι μια μη γραμμική μερική διαφορική εξίσωση με λίγες ακριβείς λύσεις. Η κύρια πηγή μη γραμμικότητας στα συστήματα Soil Vapor Extraction/Bioventing είναι η εξάρτηση της πυκνότητας του αερίου από την πίεση (McWhorter, 1990). Άλλες πηγές μη γραμμικότητας είναι η σχέση της πίεσης με το ιξώδες, το φαινόμενο Klinkenberg και οι συνθήκες μη γραμμικής ροής. Η μη γραμμική ροή εμφανίζεται όταν η βαθμίδα της πίεσης είναι μεγάλη (όπως συμβαίνει στους ταμιευτήρες πετρελαίου), ενώ το “γλιστρημα” συμβαίνει σε πηλώδη εδάφη.

4.1.3 Ροή αερίου σε σταθερές συνθήκες (steady state)

Επειδή τα περισσότερα συστήματα Bioventing και Soil Vapor Extraction σχεδιάζονται έτσι ώστε να λειτουργούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, τα μοντέλα της ροής υπό σταθερή κατάσταση είναι τα πλέον κατάλληλα. Οι λύσεις των σταθερών συνθηκών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διεξαγωγή τεστ διαπερατότητας, δεδομένου ότι ο χρόνος αρκεί ώστε να επιτευχθούν οι σταθερές συνθήκες ροής. Για την περίπτωση της μονοδιάστατης ακτινικής ροής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση της σταθερής κατάστασης για να αναλυθούν τα δεδομένα μεταβολής διαπερατότητας, για μια κατάσταση γνωστή και σαν ψευδομόνιμη κατάσταση. Στη μέθοδο αυτή, συναρτάται η πυκνότητα με την πίεση, κάτι που δεν είναι δυνατό να γίνει με χρήση των συνήθων μεθόδων μεταβατικής ανάλυσης.

Η μερική διαφορική εξίσωση για τη ροή σε σταθερή κατάσταση προκύπτει από την εξίσωση (4-7) θέτοντας το δεξιό μέλος ίσο με μηδέν:

$$\nabla \bullet (k_a \nabla P^2) = 0 \quad (4-8)$$

Για ισοτροπικές συνθήκες, το “ k_a ” είναι ανεξάρτητο του $\nabla^2 P^2$ και επομένως:

$$\nabla^2 P^2 = 0 \quad (4-9)$$

Η εξίσωση (4-9) είναι ισοδύναμη με την εξίσωση του Laplace ως προς P^2 . Η εξίσωση Laplace είναι μια κλασική εξίσωση που χρησιμοποιείται στην επίλυση προβλημάτων που αφορούν την εν δυνάμει μεταφορά.

Η εξίσωση (4-9) μπορεί να λυθεί με αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους. Οι αναλυτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν την εύρεση ενός ορισμένου ολοκληρώματος που ικανοποιεί την (4-9). Οι αριθμητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη διακριτοποίηση της ροής σε ένα πλέγμα και επίλυση της (4-9) με χρήση επαναληπτικών μεθόδων. Οι αριθμητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση ετερογενών συστημάτων με ακανόνιστη γεωμετρία, ενώ οι αναλυτικές είναι πιο κατάλληλες σε ομογενή συστήματα κανονικής γεωμετρίας. Παρόλα αυτά, στα τεστ διαπερατότητας χρησιμοποιούνται αναλυτικές λύσεις. Και επειδή σε αυτές τις λύσεις αναδεικνύονται οι βασικές αρχές της ροής, το ακόλουθο ανάπτυγμα βασίζεται σε αναλυτικές μεθόδους.

Για γραμμική μονοδιάστατη ροή η εξίσωση (4-9) είναι:

$$\frac{d^2 P^2}{dx^2} = 0 \quad (4-10)$$

όπου x = διάσταση στο καρτεσιανό σύστημα [L].

Για οριζόντια ροή σε ένα μακρύ πλήρως διαπερατό φρεάτιο, όπου $P = P_{atm}$ σε μήκος $x = L$, η λύση της (4-10) είναι:

$$P^2 - P_{atm}^2 = \frac{2Q_1 P^* \mu}{bk_a} (L - x) \quad (4-11)$$

όπου: Q_1 = ογκομετρική παροχή ανά μονάδα μήκους του φρεατίου [L^2/T],

P^* = απόλυτη πίεση στο σημείο μέτρησης της ροής [M/LT^2],

b = πάχος της ακόρεστης ζώνης [L].

Αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της κατανομής της πίεσης κοντά σε ένα μακρύ φρεάτιο, σε μια ακόρεστη ζώνη με άνω και κάτω αδιαπέρατα όρια. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον καθορισμό της απαιτούμενης απόστασης μεταξύ των φρεατίων εξαγωγής και παθητικής εισροής, όπου “ L ” είναι η απόσταση μεταξύ των φρεατίων.

Για ακτινική ροή σε μια διάσταση, η εξίσωση (4-9) είναι:

$$\frac{d^2 P^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dP^2}{dr} = 0 \quad (4-12)$$

όπου r = μονοδιάστατη ακτινική συντεταγμένη (ίση με $[x^2 + y^2]^{1/2}$ στις καρτεσιανές συντεταγμένες).

Η λύση αυτής της εξίσωσης για οριζόντια ροή σε ένα σημείο $r = r_i$ με $P = P_i$ είναι:

$$P^2 - P_i^2 = \frac{Q_v P^* \mu}{\pi b k_a} \ln\left(\frac{r_i}{r}\right) \quad (4-13\alpha)$$

ή αν $Q_v > 0$ (αν π.χ ο ρυθμός εξαγωγής θεωρηθεί θετικός):

$$P^2 - P_i^2 = \frac{Q_v P^* \mu}{\pi b k_a} \ln\left(\frac{r}{r_i}\right) \quad (4-13\beta)$$

όπου: Q_v = ογκομετρική παροχή [L^3/T].

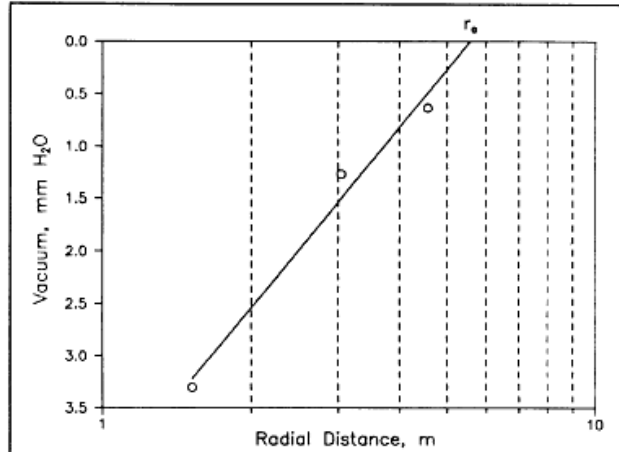
Η εξίσωση (4-13) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό του “ k_a ” με βάση τις μετρήσεις πεδίου, σε μια περιοχή πολύ ανισότροπη (η κατακόρυφη διαπερατότητα πολύ μικρότερη από την οριζόντια), μετρώντας την πίεση P_i ενώ αντλείται/εισάγεται αέρας με σταθερή παροχή Q_v . Αν το “ k_a ” είναι γνωστό σε μια περιοχή ανισότροπη, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (4-13) για τον υπολογισμό της κατανομής της πίεσης γύρω από ένα φρεάτιο, σε σταθερές συνθήκες.

Με εφαρμογή της εξίσωσης (4-13) ως την ακτίνα όπου $P = P_{atm}$, μπορεί να καθοριστεί η ακτίνα επιρροής της πίεσης (r_e). Πρακτικά, “ r_e ” είναι η απόσταση μέχρι την οποία παρατηρείται μεταβολή στην πίεση από ένα φρεάτιο άντλησης/εισαγωγής αέρα. Η ακτίνα επιρροής της πίεσης μπορεί να βρεθεί με τη συσχέτιση δεδομένων από πολλά σημεία, στην εξίσωση (4-13) ή μπορεί να προκύψει από ένα ημι-λογαριθμικό διάγραμμα της πίεσης ως προς την απόσταση (Σχήμα 4-1). Αυτός ο τύπος γραφήματος χρησιμοποιείται πολύ συχνά (Driscoll, 1986).

Το ισοζύγιο μάζας καθορίζει ότι για συνεχή εξαγωγή αέρα από ένα στρώμα, με αδιαπέρατα άνω και κάτω όρια, το “ r_e ” αυξάνεται με το χρόνο. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από αναλύσεις μεταβατικής, ακτινικής ροής,

που αποδεικνύουν ότι το “ r_e ” είναι ανάλογο με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου (McWhorter and Sunada, 1977; McWhorter, 1990).

Εντούτοις, η κοινή αποδοχή ενός καθορισμένου “ r_e ”, αντικατοπτρίζει την παρατήρηση ότι το όριο της επίδρασης της πίεσης μεταβάλλεται ελάχιστα με το χρόνο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να ερμηνευτεί από τη διαρροή του αέρα μέσω του ανώτερου και του κατώτερου ορίου, επιβεβαιώνοντας τη σπανιότητα της πραγματικής οριζόντιας ροής. Οι Beckett και Huntley (1994) συμπέραναν ότι



Σχήμα 4-1: Χρήση γραφημάτων απόστασης-πτώσης πίεσης για τον καθορισμό του r_e (Πηγή: USACE, 2002).

ακόμα και αν η επιφάνεια του εδάφους είναι στρωμένη (τοιμέντο, πλάκες κλπ.), η κατακόρυφη διαρροή είναι κανόνας παρά εξαίρεση. Η κατακόρυφη διαρροή είναι ζήτημα ακτινικής ροής σε δύο διαστάσεις.

Ιστορικά, το “ r_e ” έχει αποτελέσει τη βάση για το σχεδιασμό δικτύων φρεατίων. Οι σχεδιαστές έχουν αναγάγει την ακτίνα επίδρασης πίεσης γύρω από ένα φρεάτιο σε ζώνη δέσμευσης του φρεατίου. Με επιλογή συνεπώς ακτινικών αποστάσεων εντός της ζώνης επίδρασης της πίεσης, δημιουργούνται τα δίκτυα φρεατίων για εξαγωγή (SVE) ή εισαγωγή (Bioventing) αέρα. Δυστυχώς, αυτή είναι μια εσφαλμένη «ανάγνωση» του φαινομένου. Ο σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων πρέπει να βασίζεται στην ταχύτητα του αέρα εντός των πόρων, ή στο ρυθμό αλλαγής του περιεχόμενου σε έναν πόρο αέρα, τα οποία είναι συνάρτηση τόσο της κατανομής της πίεσης γύρω από το φρεάτιο, όσο και της συσχετιζόμενης διαπερατότητας του εδάφους. Γι’ αυτό λόγο, δεν είναι κατάλληλο να χρησιμοποιείται για σχεδιαστικούς σκοπούς το διάγραμμα του σχήματος 4-1 χωρίς να ακολουθηθεί η σωστή διαδικασία.

Μια αναλυτική λύση για δυσδιάστατη ροή σε φρεάτιο μπορεί να προκύψει με εναπόθεση μιας σημειακής λύσης σε όλο το μήκος του φίλτρου του φρεατίου. Η εξίσωση (4-9) για ακτινική ροή δύο διαστάσεων είναι:

$$\frac{\partial^2 P^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P^2}{\partial r} + \frac{\partial^2 P^2}{\partial z^2} = 0 \quad (4-14)$$

όπου: r = οριζόντια ακτινική συντεταγμένη (ίση με $[x^2 + y^2]^{1/2}$ σε καρτεσιανό σύστημα),

z = κατακόρυφη ακτινική συντεταγμένη (ισοδύναμη με την κατακόρυφη καρτεσιανή συντεταγμένη).

Η λύση αυτής της εξίσωσης σε ένα σημείο όπου $r = 0$, $z = z'$ σε άπειρο χώρο, είναι:

$$P^2 - P_{atm}^2 = \frac{Q_v P^* \mu}{2\pi k_a} \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z - z')^2}} \quad (4-15)$$

όπου: $z' = z$ -συντεταγμένη του σημείου.

Η σημειακή λύση μπορεί να ολοκληρωθεί ως προς το z για να προκύψει η γραμμική λύση σε άπειρο χώρο:

$$P^2 - P_{atm}^2 = \frac{Q_v P^* \mu}{2\pi k_a (L - l)} \ln \left[\frac{z - l + \sqrt{r^2 + (z - l)^2}}{z - L + \sqrt{r^2 + (z - L)^2}} \right] \quad (4-16)$$

όπου: $l = z$ -συντεταγμένη στην κορυφή του φίλτρου του φρεατίου,

$L = z$ -συντεταγμένη στο κατώτερο σημείο του φίλτρου του φρεατίου.

Ο περιοριστικός παράγοντας αυτής της αναλυτικής λύσης είναι το γεγονός ότι αν ληφθεί υπόψη η επίδραση των ατμοσφαιρικών και αδιαπέρατων ορίων, απαιτείται τυπικά ένας μεγάλος αριθμός επιπρόσθετων όρων. Υπάρχουν και γραφικές μέθοδοι για την πρόβλεψη της κατανομής της πίεσης γύρω από ένα φρεάτιο εισαγωγής ή εξαγωγής αέρα (Shan et al., 1992).

Ο χρόνος κίνησης είναι πολύ χρήσιμη παράμετρος κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος SVE/BV, προκειμένου να καθοριστεί η απαιτούμενη παροχή αέρα και οι μεταξύ των φρεατίων αποστάσεις για να επιτευχθεί ο κατάλληλος ρυθμός αλλαγής αέρα. Ο χρόνος κίνησης προκύπτει από την ολοκλήρωση του αντιστρόφου της ταχύτητας διήθησης κατά μήκος μιας οδού (μονοπάτι ροής):

$$t = \int \left(\frac{1}{q_s} \right) ds \quad (4-17)$$

όπου: s = μήκος του μονοπατιού ροής,

q_s = ταχύτητα διήθησης.

Η ταχύτητα διήθησης προκύπτει από το νόμο του Darcy:

$$q_s = \frac{k_a}{n_a \mu} \nabla P \quad (4-18)$$

ενώ για η βαθμίδα της πίεσης προκύπτει από την εξίσωση ροής σε σταθερή κατάσταση. Υποθέτοντας ασυμπίεστη ροή, η βαθμίδα της πίεσης για μονοδιάστατη ακτινική ροή είναι:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{Q_v \mu}{2\pi b k_a r} \quad (4-19)$$

η οποία με ολοκλήρωση και με χρήση της εξίσωσης (4-17) προκύπτει:

$$t = \frac{\pi \cdot r^2 b n_a}{Q_v} \quad (4-20)$$

Η εξίσωση (4-20) είναι ισοδύναμη με τον όγκο των πόρων ενός κυλίνδρου που περιβάλλει ένα φρεάτιο, διαιρεμένο με την παροχή του φρεατίου.

Όσον αφορά τη ροή συμπιεστού ρευστού, η ολοκλήρωση της εξίσωσης (4-17) απαιτεί γενικά αριθμητικές μεθόδους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοί αλγόριθμοι πεπερασμένων διαφορών στην περίπτωση γραμμικής ή ακτινικής μονοδιάστατης ροής, ενώ για δυσδιάστατη ή τριδιάστατη ροή χρησιμοποιούνται πιο εκλεπτυσμένες ρουτίνες. Οι Shan, Falta και Javandel (1992), παρέχουν χρόνους κίνησης του αέρα από τον πυθμένα της ακόρεστης ζώνης του εδάφους σε φρεάτιο εξαγωγής, για διάφορες θέσεις φίλτρου στην ακόρεστη ζώνη με άνω όριο την ατμόσφαιρα και κάτω όριο ένα αδιαπέρατο στρώμα. Οι χρόνοι αυτοί παρέχονται σε αδιάστατη μορφή, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα εφαρμογής σε οποιοδήποτε πεδίο μέσω μιας απλής διαδικασίας μεταβολής κλίμακας.

Ο King (1968) επίσης, παρέχει κατακόρυφους χρόνους κίνησης από ένα φρεάτιο εισαγωγής αέρα στον πυθμένα της ακόρεστη ζώνης του εδάφους, με οριακή άνω συνθήκη την ατμόσφαιρα και κάτω συνθήκη ένα αδιαπέρατο

στρώμα. Οι κατακόρυφοι χρόνοι παρέχονται σε αδιάστατη μορφή για ένα πλήθος θέσεων του φίλτρου.

4.1.4 Μεταβατική ροή αερίου

Η μερική διαφορική εξίσωση για τη μεταβατική ροή είναι:

$$\nabla \bullet (k_a \nabla P^2) = 2n_a \mu \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4-21)$$

Ο McWhorter (1990) ανέπτυξε μια ακριβή λύση σε μια πιο αυστηρή μορφή της εξίσωσης (4-7) υπολογίζοντας το «γλιστρήμα» του αέρα και την εξάρτηση της πίεσης με το ιξώδες. Η λύση του McWhorter ισχύει σε μονοδιάστατη ακτινική ροή με άνω και κάτω οριακές συνθήκες.

Οι Johnson, Kemblowski και Colthart (1990b), βασισμένοι στον Muscat (1931), πρότειναν την μετατροπή της εξίσωσης (4-7) σε γραμμική, εκφράζοντας το P^2 σαν προϊόν της ατμοσφαιρικής πίεσης P_{atm} προς P_r . Η εξίσωση που προκύπτει, εκφρασμένη σε ακτινικές συντεταγμένες μονοδιάστατης ροής είναι:

$$\nabla \bullet (\nabla P') = \frac{n_a \mu}{k_a P_{atm}} \frac{\partial P'}{\partial t} \quad (4-22)$$

Η εξίσωση (4-22) έχει την ίδια μορφή με τη γραμμική εξίσωση της προσέγγισης Boussinesq που χρησιμοποιείται στα υπόγεια ύδατα. Στην εξίσωση αυτή ο αέρας θεωρείται ασυμπίεστο ρευστό.

Ο Massmann (1989) απέδειξε ότι το σφάλμα που προκύπτει από την αντικατάσταση του P^2 το P είναι ασήμαντο για υποπίεσεις χαμηλότερες από 0.2 atm. Πρότεινε συνεπώς ότι τα μοντέλα υπογείων υδάτων που βασίζονται στη γραμμική προσέγγιση Boussinesq μπορούν να εφαρμοστούν στη ροή αερίων, με αντικατάσταση υδραυλικού ύψους με το μανομετρικό ύψος ($P/\rho g$) και της υδραυλικής αγωγιμότητας με αγωγιμότητα του εδαφικού αερίου. Οι υπολογισμοί αυτοί πρέπει να περιορίζονται σε υποπίεσεις κάτω των 0.2 atm, σε συμφωνία με την υπόθεση του ασυμπίεστου ρευστού.

Η εξίσωση (4-22) για μονοδιάστατη ακτινική ροή, γίνεται:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P'}{\partial r} \right) = \frac{n_a \mu}{k_a P_{atm}} \frac{\partial P'}{\partial t} \quad (4-23)$$

Η λύση αυτής της εξίσωσης για σταθερό σημείο στο $r = 0$, με $P = P_{atm}$ στο $r = 4$ είναι (Johnson et al., 1990b):

$$P - P_{atm} = \frac{Q_v \mu}{4\pi b k_a} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (4-24)$$

όπου: Q = ογκομετρική παροχή [$L^3 T^{-1}$],

b = το πάχος της ακόρεστης ζώνης ή του προς εξέταση στρώματος [L],

$$\text{και } u = \frac{r^2 n_a \mu}{4k_a P_{atm} t} \quad (4-25).$$

Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης (4-24) είναι γνωστό σαν συνάρτηση φρεατίων του Theis (Theis, 1935), όπου x μια τεχνητή μεταβλητή ολοκλήρωσης. Η συνάρτηση του Theis χρησιμοποιείται συνήθως για την ανάλυση δεδομένων άντλησης υπογείων υδάτων από περιορισμένους υδροφορείς. Έχουν όμως παρουσιαστεί και άλλες συναρτήσεις για μη περιορισμένη ακτινική ροή (Neuman, 1975) και για ακτινική ροή με διαρροή (Hantush and Jacob, 1955).

Η λύση του Theis προκύπτει με συνδυασμό της απόστασης και του χρόνου, στη μεταβλητή του Boltzmann “ u ”. Αν το “ u ” είναι μικρό, τότε το ολοκλήρωμα της εξίσωσης (4-24) μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας τους δύο πρώτους όρους του αναπτύγματος της σειράς Taylor. Η εξίσωση (4-24) γίνεται:

$$P - P_{atm} = \frac{Q_v \mu}{4\pi b k_a} \left(\ln \frac{4k_a P_{atm} t}{r^2 n_a \mu} - 0.5772 \right) \quad (4-26)$$

Η εξίσωση (4-26) είναι γνωστή σαν προσέγγιση Cooper-Jacob. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μείωση της πίεσης ($P - P_{atm}$) μεταβάλλεται γραμμικά με το $\ln(t)$. Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται για αναλύσεις διαπερατότητας αέρα σε μεταβατική ροή.

Οι εξισώσεις (4-24) έως (4-26) βασίζονται στην υπόθεση της οριζόντιας ακτινικής ροής, με άνω και κάτω οριακές συνθήκες αδιαπέρατες. Οι Becket και Huntley (1994) δηλώνουν ότι οι συνθήκες αυτές συμβαίνουν σπάνια, ακόμα και στην περίπτωση που στην επιφάνεια του εδάφους βρίσκεται

άσφαλτος ή τσιμέντο. Η επίδραση της κατακόρυφης ροής λόγω διαρροής σε επιφανειακό στρώμα, μπορεί να συμπεριληφθεί με την προσθήκη ενός όρου διαρροής στην μερική διαφορική εξίσωση της ακτινικής ροής:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{L\mu}{k_a \rho g b} = \frac{n_a \mu}{k_a P_{atm}} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4-27)$$

όπου L = ρυθμός διαρροής.

Για ασυμπίεστη ροή διαμέσου ενός επιφανειακού καλύμματος πάχους “ b_v ” και κατακόρυφης διαπερατότητας “ k_v ”, η διαρροή ανά μονάδα επιφάνειας είναι:

$$L = \frac{k_v \rho g}{\mu} \frac{(P - P_{atm})}{b_v} \quad (4-28)$$

Με αντικατάσταση του L στην εξίσωση (4-27) προκύπτει:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{k_v}{k_a} \frac{(P - P_{atm})}{b b_v} = \frac{n_a \mu}{k_a P_{atm}} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4-29)$$

Εισάγοντας έναν παράγοντα διαρροής “ B ”, που ορίζεται από τη σχέση:

$$B = \sqrt{\frac{k_a b_v b}{k_v}} \quad (4-30)$$

προκύπτει μια εξίσωση όμοια με αυτήν για υδροφορέα με διαρροή (McWhorter and Sunada, 1977):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{P - P_{atm}}{B^2} = \frac{n_a \mu}{k_a P_{atm}} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4-31)$$

Εισάγοντας την λύση των Hantush-Jacob για υδροφορέα με διαρροή που διατίθεται στα περισσότερα κείμενα υπογείων υδάτων, η λύση της εξίσωσης είναι:

$$P - P_{atm} = \frac{Q_v \mu}{4\pi b k_a} W\left(u, \frac{r}{B}\right) \quad (4-32)$$

όπου $W\left(u, \frac{r}{B}\right)$ είναι η συνάρτηση φρεατίου με διαρροή. Για ροή αερίου, η μεταβλητή του Boltzmann “ u ” καθορίζεται από την εξίσωση (4-25).

Οι Becket και Huntley (1994) επεσήμαναν την βεβαιότητα των αποτελεσμάτων της παραπάνω εξίσωσης, σε σύγκριση με την αντίστοιχη του Theis. Συμπέραναν ότι η κατακόρυφη διαρροή είναι ο κανόνας παρά η

εξαίρεση. Η συνάρτηση του Theis με την προσέγγιση των σειρών Taylor (εξίσωση 4-26), οδηγούν σε υπερεκτίμηση της διαπερατότητας και του επιτρεπόμενου ρυθμού εξαγωγής/εισαγωγής αέρα και υποεκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου για αποκατάσταση της περιοχής.

4.1.5 Συνθήκες ψευδο-μόνιμης κατάστασης

Για μονοδιάστατη ακτινική ροή, η προσέγγιση Cooper-Jacob (εξίσωση 4-26) προβλέπει ότι η διαφορά πίεσης μεταξύ δύο ακτινικών αποστάσεων (δεδομένου ότι $u \leq 0.01$) είναι:

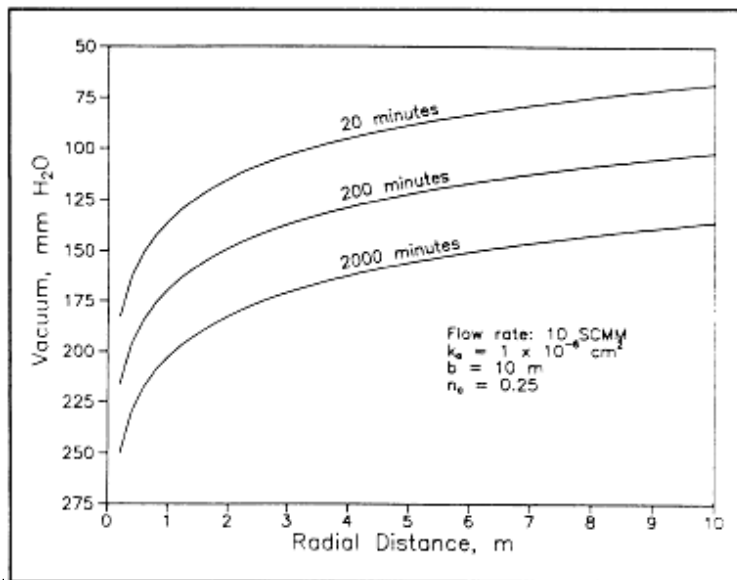
$$P_2 - P_1 = \frac{Q_v \mu}{4\pi b k_a} \left(\ln \frac{4k_a P_{atm} t}{r_1^2 n_a \mu} - \ln \frac{4k_a P_{atm} t}{r_2^2 n_a \mu} \right) \quad (4-33)$$

για $r_2 > r_1 > 0$ και $(P_2 - P_1) < P_1$.

Αν τα P_1 και P_2 μετρηθούν την ίδια στιγμή, τότε:

$$P_2 - P_1 = \frac{Q_v \mu}{4\pi b k_a} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (4-34)$$

Αυτή η εξίσωση είναι όμοια με την εξίσωση σταθερής κατάστασης για ακτινική ασυμπίεστη ροή. Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που η πίεση μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο, ο ρυθμός μεταβολής της είναι ανεξάρτητος του “r” (όσο το $u \leq 0.01$). Πρακτικά δηλαδή ενώ οι μετρήσεις της πίεσης μεταβάλλονται με το χρόνο, η διαφορά μεταξύ δύο οποιωνδήποτε σημείων παραμένει σταθερή (βλ. Σχήμα 4-2).



Σχήμα 4-2: Κατανομή της πίεσης με εφαρμογή της προσέγγισης Cooper-Jacob ($\mu \leq 0.01$), (Πηγή: USACE, 2002).

Στην περιγραφή που έγινε, αποδείχτηκε ότι τα δεδομένα πειραμάτων πεδίου από διάφορα σημεία παρατήρησης, μπορούν να αναλυθούν με χρησιμοποιώντας εξισώσεις ακτινικής ροής υπό σταθερές συνθήκες, δεδομένου ότι οι μετρήσεις στην πίεση γίνονται ταυτόχρονα.

Αυτό το είδος ανάλυσης αναφέρεται σαν ψευδομόνιμη κατάσταση. Όταν μάλιστα οι υποπώσεις που εφαρμόζονται ξεπερνούν τις 0.2 atm, η ανάλυση με αυτόν τον τρόπο είναι πιο ακριβής από τη μέθοδο του Theis ή των Cooper-Jacob, επειδή η επίδραση της εξαρτώμενης από την πίεση πυκνότητας, μπορεί να προσαρμοστεί με χρήση λύσεων σταθερών συνθηκών.

4.2 Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση συστήματος βιοαερισμού

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο σχεδιασμός και εγκατάσταση ενός συστήματος Bioventing σε πλήρη κλίμακα. Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις της βιοφυσητικής μεθόδου έχουν καθοριστεί μετά από μακροχρόνιας εφαρμογής διαπιστώσεις σε πιλοτικές και πλήρους κλίμακας μονάδες.

Ελάχιστα απαιτούμενα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά:

Τα κυριότερα βήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό ενός βιοφυσητικού συστήματος είναι:

- Καθορισμός του τρόπου λειτουργίας του συστήματος (εισαγωγή αέρα, άντληση αέρα ή και τα δύο).
- Καθορισμός της απαιτούμενης παροχής αέρα για την δεδομένη περιοχή.
- Καθορισμός της διάταξης των φρεατίων.
- Καθορισμός της πτώσης πίεσης του συστήματος.
- Κατάλληλη επιλογή του φυσητήρα (blower).
- Σχεδιασμός των φρεατίων και των σωληνώσεων.
- Καθορισμός των σημείων παρακολούθησης και σχεδιασμός τους.

4.2.1 Καθορισμός του τρόπου λειτουργίας του συστήματος

Γενικά, αν είναι ασφαλές και εφικτό, είναι προτιμότερη η εισαγωγή αέρα για βιοφυσητικά συστήματα πλήρους κλίμακας. Αν ο σχεδιασμός είναι σωστός, τότε με την εισαγωγή αέρα επιτυγχάνονται χαμηλότερα επίπεδα εκροών προς την ατμόσφαιρα πτητικών οργανικών ενώσεων. Επίσης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι χαμηλότερο από τα αντίστοιχα στα συστήματα άντλησης αέρα εδάφους (soil vapor extraction systems).

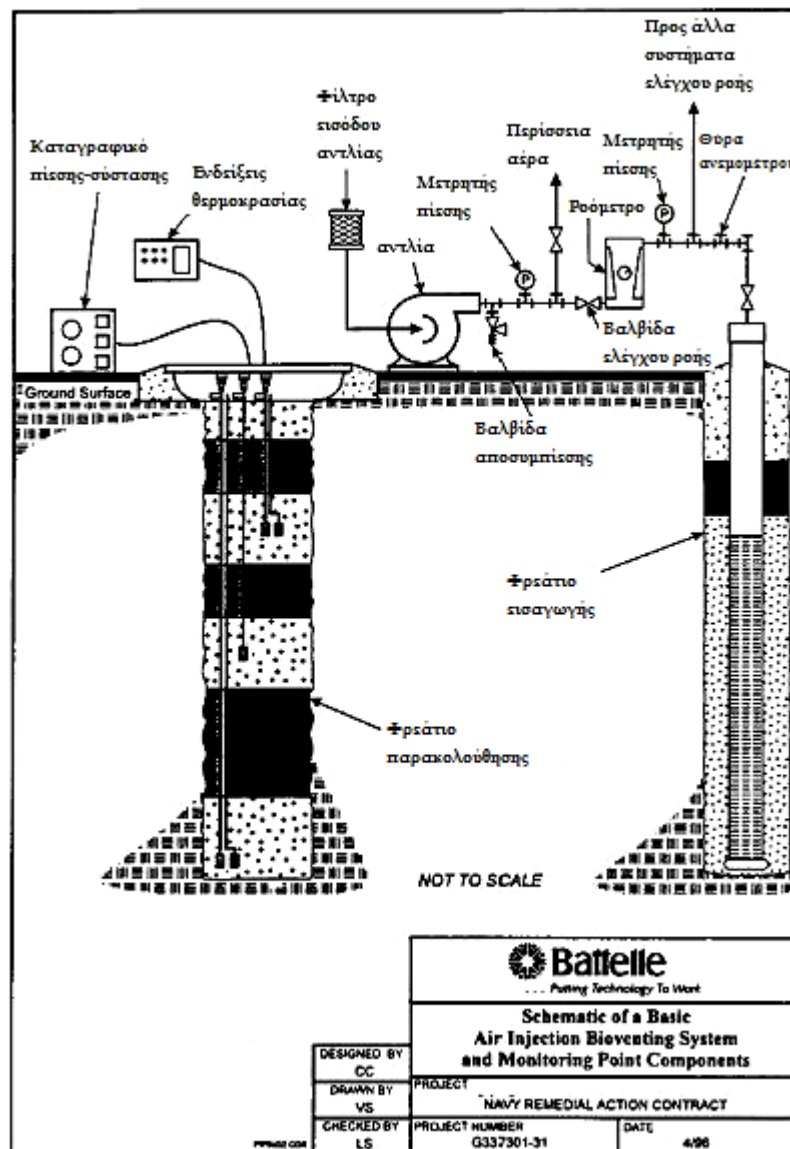
Η διοχέτευση οξυγόνου πραγματοποιείται με την εισαγωγή αέρα υπό πίεση εντός της ρυπασμένης ζώνης. Μερικές πτητικές οργανικές ενώσεις μεταφέρονται με το ρεύμα αέρα σε άλλα σημεία όπου και αποδομούνται. Με δεδομένη την επαρκή οξυγόνωση, οι πτητικοί υδρογονάνθρακες βιοδιασπώνται στα κοντινά μη ρυπασμένα εδάφη, αυξάνοντας έτσι το ποσοστό των ρύπων που έχουν αποικοδομηθεί εν συγκρίσει με το αντίστοιχο στην περίπτωση του συστήματος εξαγωγής αέρα (SVE).

Πέρα από το γεγονός ότι δημιουργείται ένας διευρυμένος αντιδραστήρας, με την εισαγωγή αέρα στην ακόρεστη ζώνη αυξάνεται η πίεση γύρω από το φρεάτιο επομένως αυξάνεται το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας και κάποια ποσότητα ρυπασμένου εδάφους στην ζώνη τριχοειδών φαινομένων εκτίθεται προς βιοεξυγίανση. Αυτό το γεγονός έχει πολλές επιπλοκές. Σε πολλές περιοχές, η ζώνη τριχοειδών φαινομένων είναι πολύ ρυπασμένη και η αύξηση του βάθους του υδροφόρου συντελεί στην βιοεξυγίανσή του. Το γεγονός επίσης της μείωσης της υγρασίας σε αυτή την περιοχή, δημιουργεί καλύτερες συνθήκες για διασπορά του αέρα καθώς αυξάνεται η διαπερατότητα των εδαφών και επομένως η ακτίνα επιρροής κάθε φρεατίου.

Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη ενός συστήματος “bioventing”. Είναι γενικά απλό, περιλαμβάνοντας έναν φυσητήρα (blower), ένα σύστημα διασποράς του αέρα, τα απαραίτητα όργανα μέτρησης-ελέγχου, τα φρεάτια εισαγωγής αέρα και τα σημεία δειγματοληψίας. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα “bioventing” δεν δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα

αερίων εκπομπών ενώ δεν απαιτείται επιφανειακός εξοπλισμός επεξεργασίας εκπομπών (U.S. EPA, 1995).

Πολλές φορές, μπορεί να χρειαστούν κάποια φρεάτια εξαγωγής αέρα. Αυτό γίνεται στην περίπτωση που η ακτίνα επίδρασης κάποιου φρεατίου φτάνει σε υπόγεια σπιτιών, επιφανειακών οικοδομημάτων κλπ. Το σύστημα εξαγωγής θα αποτρέψει την μεταφορά αερίων σε αυτά τα σημεία, καθώς πολλά από αυτά τα αέρια είναι εκρηκτικά ή τοξικά.



Σχήμα 4-3: Τοπική διάταξη συστήματος βιοαερισμού (Πηγή: Technical Memorandum, NFESC, 1996)

4.2.2 Καθορισμός της απαιτούμενης παροχής αέρα

Το σύστημα “bioventing” πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη ποσότητα αέρα στην ρυπασμένη περιοχή. Πολλά δεδομένα από διάφορες περιοχές έρευνας με διάφορους συνδυασμούς ρύπων φανερώνουν ότι η μικροβιακή δραστηριότητα δεν περιορίζεται από το οξυγόνο όταν η συγκέντρωσή του είναι 1-2%. Για να βεβαιωθούν τα απαιτούμενα επίπεδα οξυγόνου στον όγκο του ρυπασμένου εδάφους, το σύστημα “bioventing” πρέπει να σχεδιαστεί με ελάχιστο όριο οξυγόνου το 5% (U.S. EPA, 1995).

Η παροχή του οξυγόνου για το σύστημα μπορεί να υπολογιστεί από τις απαιτήσεις οξυγόνου των ενδογενών μικροοργανισμών. Η απαιτούμενη ποσότητα αέρα καθορίζεται από τη μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου που υπολογίζεται κατά την πραγματοποίηση των τεστ αναπνοής (respiration test). Με την εξίσωση (4-35) που ακολουθεί υπολογίζεται η παροχή αέρα:

$$Q_s = \frac{k_o \cdot V \cdot \theta_a}{(20.9\% - 5\%) \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}} \quad (4-35)$$

όπου: Q_s = παροχή αέρα για την περιοχή (m^3/min),

$(20.9\% - 5\%)$ = μεταβολή στη συγκέντρωση του οξυγόνου,

k_o = ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου ($\%/hr$),

V = όγκος του ρυπασμένου εδάφους (m^3) όπου περιοριστικός παράγοντας είναι το οξυγόνο,

θ_a = τμήμα του πορώδους που περιέχει αέρα (τυπικό εύρος 0.2-0.3).

Για έλεγχο των υπολογισμών, ο ρυθμός εισαγωγής αέρα υπολογίζεται σαν η παροχή που απαιτείται για την αντικατάσταση του όγκου του περιεχομένου των πόρων ($V\theta_a$) μια φορά την ημέρα. Αυτή η χονδρική εκτίμηση βασίζεται στην υπόθεση της συνεχούς ροής (plug flow) και σε ένα ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου της τάξης του $0.6625\%/hr$.

Η παροχή σχεδιασμού πρέπει να είναι τουλάχιστον 40% μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται από την Εξίσωση (4-35) για την περίπτωση της μη επαρκούς διανομής του αέρα και για τη ρύθμιση του ισοζυγίου αέρα σε κάθε φρεάτιο κατά το διάστημα έναρξης λειτουργίας του συστήματος.

4.2.3 Καθορισμός της διάταξης των φρεατίων

Ο αριθμός και η τοποθέτηση των φρεατίων πρέπει να καθοριστεί έτσι που να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη παροχή του αέρα και η διασπορά του με ομοιόμορφο τρόπο στον ρυπασμένο όγκο εδάφους. Η απόσταση των φρεατίων και επομένως ο αριθμός τους καθορίζεται από την ακτίνα επιρροής (R_i). Η ακτίνα αυτή μπορεί να υπολογιστεί με τρεις τρόπους:

- μετρώντας την πίεση σε σημεία παρακολούθησης κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης του τεστ διαπερατότητας εδάφους
- παρέχοντας αέρα σε φρεάτιο και μετρώντας την κατανάλωση οξυγόνου
- υπολογίζοντάς την εμπειρικά.

Η ακτίνα μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις μετρήσεις πίεσης κατά τη διάρκεια του τεστ διαπερατότητας. Αυτή είναι μια κοινή πρακτική στις μεθόδους αερισμού του εδάφους και είναι μια γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδος. Από την πίεση που υπολογίζεται “in situ” κατά τη διάρκεια της εισαγωγής του αέρα σε φρεάτιο δημιουργείται το διάγραμμα του λογάριθμου των πιέσεων ως προς την ακτινική απόσταση από το πηγάδι εισαγωγής. Η ακτίνα επιρροής είναι ίση με την απόσταση μέχρι την οποία η αύξηση της πίεσης λόγω της εισαγωγής αέρα παραμένει πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο. Χρησιμοποιώντας τις 0.1 inches H_2O (25 Pa) σαν όριο για την μετρούμενη αύξηση της πίεσης στο δεδομένο σημείο μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα επιρροής με συντηρητικό τρόπο και ικανοποιητικό αερισμό.

Καθορίζοντας την ακτίνα επιρροής μόνο με βάση την πίεση, περιορίζεται η ακρίβεια επειδή η πίεση είναι ο ένας από τους τρεις παράγοντες που επηρεάζουν την ακτίνα κατά την εφαρμογή του “bioventing”. Οι δύο άλλοι παράγοντες είναι η παροχή του αέρα και ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου. Σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας, μπορεί η επίδραση στην πίεση να γίνεται αντιληπτή σε ένα σημείο παρακολούθησης, αλλά η παροχή του αέρα σε αυτό το σημείο δεν αρκεί για τη σωστή οξυγόνωση της περιοχής. Αντίστροφα, σε εδάφη υψηλής διαπερατότητας μπορεί η παροχή του αέρα να αρκεί για τη

σωστή οξυγόνωση ακόμα και όταν η μεταβολή της πίεσης είναι πολύ μικρή ή μη μετρήσιμη.

Ο υπολογισμός της παροχής αέρα και του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου είναι μέρη μιας επαναληπτικής διαδικασίας για την κατάλληλη χωροθέτηση των φρεατίων. Η μέθοδος της μεταβολής της πίεσης απαιτείται για τον υπολογισμό μιας αρχικής ακτίνας επιρροής. Ο αριθμός των φρεατίων πρέπει να είναι τέτοιος που να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή του αέρα στην περιοχή ρύπανσης, με την απόσταση μεταξύ των φρεατίων να είναι ίση με 1.4 – 2 φορές της ακτίνας επιρροής. Η παροχή αέρα τότε για κάθε φρεάτιο (Q_w) υπολογίζεται διαιρώντας την συνολική παροχή (Q_s , βλ. εξίσωση 4-35) με τον αριθμό των φρεατίων. Με χρήση του " Q_w " και του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου, η εξίσωση (4-36) που ακολουθεί παρέχει την ακτίνα επιρροής. Υποθέτοντας ότι τα φρεάτια εγκαθίστανται κατακόρυφα έτσι που η ροή του αέρα να περιγράφεται με κυλινδρικές συντεταγμένες και ότι η ακτίνα επιρροής είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακτίνα του φρεατίου τότε η εξίσωση (4-36) χρησιμοποιείται ικανοποιητικά.

$$R_I = \sqrt{\frac{Q_w \cdot (20.9\% - 5\%) \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}}{\pi \cdot h \cdot k_o \cdot \theta_a}} \quad (4-36)$$

όπου: R_I = ακτίνα επιρροής (m)

Q_w = παροχή αέρα ανά φρεάτιο (m^3/min)

(20.9% - 5%) = μεταβολή στη συγκέντρωση του οξυγόνου (%)

k_o = ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου (%/hr)

θ_a = πορώδες με αέρα ($\text{cm}^3_{\text{air}}/\text{cm}^3_{\text{soil}}$)

h = πάχος αερισμού (m)

Ο αριθμός των φρεατίων ή η παροχή του αέρα είναι χαρακτηριστικά που ενδέχεται να πρέπει να αυξηθούν λαμβάνοντας υπόψη την ακτίνα που υπολογίζεται με τη μέθοδο της πτώσης πίεσης και την ακτίνα από την εξίσωση (4-36). Ο συνδυασμός αυτός ισχύει και για τους τρεις παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή του αέρα σε φρεάτιο: την πτώση πίεσης, την παροχή του αέρα και την κατανάλωση οξυγόνου. Πολλές φορές η ακτίνα

λαμβάνεται με εμπειρικό τρόπο. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες γενικές κατευθύνσεις. Στην απλούστερη περίπτωση, η ακτίνα που υπολογίζεται από την εξίσωση (4-36) θα διαφέρει κατά 25% περίπου από αυτήν που λαμβάνεται με τη μέθοδο της πτώσης πίεσης και δεν απαιτείται διόρθωση αυτής. Αν η ακτίνα της εξίσωσης (4-36) είναι μεγαλύτερη από αυτήν της μεθόδου της πίεσης πάλι δεν απαιτείται κάποια διόρθωση. Αν όμως ισχύει το αντίστροφο, τότε πρέπει να αυξηθεί η παροχή σχεδιασμού του αέρα. Αυτό μπορεί να γίνει είτε προσθέτοντας φρεάτια με παροχή " Q_w " για να καλυφθεί η προς εξυγίανση περιοχή είτε αυξάνοντας την παροχή ώστε να αυξηθεί η ακτίνα επιρροής και να πλησιάσει αυτήν που υπολογίζεται με τη μέθοδο της πτώσης πίεσης.

Μια πιλοτική εφαρμογή του βιοαερισμού πάντως, θα δώσει την καλύτερη προσέγγιση όσον αφορά την ακτίνα επιρροής. Η πιλοτική μονάδα απαιτεί την εγκατάσταση ενός φρεατίου, ενός φυσητήρα και σημείων παρακολούθησης και δειγματοληψίας. Ο φυσητήρας λειτουργεί με παροχή αέρα που υπολογίζεται με βάση την απαίτηση σε οξυγόνο και την ακτίνα επιρροής που καθορίζεται από τη μέτρηση της πίεσης. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα από τα σημεία δειγματοληψίας για τον καθορισμό του R_i .

Η πιλοτική εφαρμογή δεν ενδείκνυται σε πολλές περιπτώσεις. Είναι ακριβή μέθοδος, καθώς το πλήρες σύστημα βιοαερισμού πρέπει να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει ωσότου φτάσει σε σταθερές συνθήκες (steady state) προτού εκτελεστεί το πείραμα. Το χρονικό διάστημα αυτό μπορεί να είναι από μερικές μέρες ως και πάνω από 30. Σε πολλές περιοχές η αυξημένη ακρίβεια στον καθορισμό της απόστασης των φρεατίων δεν μειώνει το κόστος σε βαθμό που να αντισταθμίζεται το κόστος της πιλοτικής μονάδας. Οι πιλοτικές εφαρμογές παρέχουν θετικότερα αποτελέσματα σε περιοχές όπου οι γεωλογικές συνθήκες είναι δύσκολες και η φύση των ρύπων είναι ιδιότροπη.

Από τη στιγμή κατά την οποία καθορίζεται ο αριθμός των φρεατίων, πρέπει να οριστούν τα σημεία στα οποία θα διανοιχτούν τα φρεάτια. Αν ένα και μόνο φρεάτιο αρκεί για την οξυγόνωση όλης της ρυπασμένης περιοχής

τότε το φρεάτιο αυτό τοποθετείται στο κέντρο της ρυπασμένης περιοχής. Κάποιες φορές η γεωλογική δομή του εδάφους μπορεί να είναι τέτοια που το σημείο στο οποίο εγκαθίσταται το φρεάτιο να είναι διαφορετικό.

Όταν χρησιμοποιούνται πάνω από ένα φρεάτια, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση που ασκεί το κάθε ένα από αυτά στα γειτονικά του. Θεωρητικά, ο αέρας κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από τα φρεάτια με τον ίδιο τρόπο. Στην πράξη όμως, τα οριζόντια και κατακόρυφα μονοπάτια και οι διαφορές στους συντελεστές διάχυσης των διαφόρων σημείων μιας περιοχής δημιουργούν συνθήκες που αποκλίνουν από την θεωρία.

4.2.4 Καθορισμός της πτώσης πίεσης του συστήματος

Η πτώση πίεσης στο σύστημα των σωληνώσεων και των φρεατίων πρέπει να υπερκαλυφθεί προκειμένου να είναι δυνατή η παροχή της απαιτούμενης ποσότητας αέρα μέσω του “bioventing”. Η πτώση πίεσης είναι άθροισμα δύο παραμέτρων:

- της πτώσης πίεσης στις σωληνώσεις του συστήματος
- της πίεσης στα φρεάτια εισαγωγής αέρα ή του κενού στα φρεάτια εξαγωγής αέρα.

Η πτώση πίεσης στις σωληνώσεις μπορεί να υπολογιστεί με την εφαρμογή των σχέσεων που διέπουν την μεταφορά αερίων σε αγωγούς και συνδέσμους αυτών. Δυστυχώς όμως, η πτώση πίεσης στο φρεάτιο συνεισφέρει σημαντικά στις συνολικές απώλειες και είναι πιο δύσκολο να υπολογιστεί. Η πιο ακριβής μέθοδος είναι να πραγματοποιηθεί ένα πιλοτικό τεστ για τον υπολογισμό της πίεσης σαν συνάρτηση της παροχής αέρα, σε ένα φρεάτιο το οποίο είναι του ίδιου περίπου μεγέθους και σχεδιασμού με αυτό το οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί στο πλήρες σύστημα. Επειδή όμως τα πιλοτικά τεστ στοιχίζουν πολύ, η πτώση πίεσης μπορεί να υπολογιστεί με χρήση παρελθούσας εμπειρίας από τη βιβλιογραφία σε παρόμοιες συνθήκες εφαρμογής. Αν χρησιμοποιηθεί μια εσφαλμένη τιμή της πτώσης πίεσης, ενδέχεται να οδηγηθούμε σε υπερδιαστασιολόγηση του φυσητήρα (blower). Το κόστος αυτό της υπερδιαστασιολόγησης συνήθως είναι μικρότερο από το κόστος

διεξαγωγής ενός πιλοτικού τεστ. Η αυξημένη παροχή αέρα από ένα υπερδιαστασιολογημένο φυσητήρα μπορεί να αποφευχθεί με χρήση μιας βαλβίδας παράκαμψης στον καταθλιπτικό αγωγό του.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου του βιοαερισμού, χρησιμοποιούνται μικρές παροχές αέρα με αποτέλεσμα η πίεση σε ένα φρεάτιο να μην είναι περιοριστικός παράγοντας. Παρόλα αυτά, είναι καλό να ελέγχεται η απαιτούμενη πίεση στο φρεάτιο σε σχέση με το μήκος του αεροστεγούς φράγματος για να βεβαιώνεται ότι η πίεση στο φρεάτιο δεν υπερβαίνει τις δυνατότητες στεγανοποίησης του φρεατίου. Στην περίπτωση κατά την οποία η πίεση στο φρεάτιο είναι υψηλή τότε πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των φρεατίων οπότε και θα μειωθεί αναλόγως η παροχή ανά φρεάτιο.

4.2.5 Κατάλληλη επιλογή αντλίας (blower)

Η αντλία απαιτείται προκειμένου να προσδώσει στο σύστημα του βιοαερισμού την κατάλληλη ενέργεια για να κινηθεί ο αέρας μέσω των σωληνώσεων. Για την επιλογή του μεγέθους της πρέπει να ληφθεί υπόψη η απαιτούμενη παροχή αέρα και η συνολική πτώση πίεσης του συστήματος. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι “blower” είναι οι φυγοκεντρικοί.

Η κατάλληλη διαστασιολόγηση και επιλογή αντλίας βεβαιώνει ότι η μονάδα θα παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα αέρα στην σωστή πίεση και ότι λειτουργεί ομαλά. Η αντλία αυτή επιλέγεται μετά από σύγκριση της παροχής αέρα και της πτώσης πίεσης με τις καμπύλες απόδοσης του κατασκευαστή της. Η λανθασμένη διαστασιολόγηση του συστήματος θα οδηγήσει στην ανεπαρκή οξυγόνωση των ρυπασμένων περιοχών και στη μείωση του χρόνου ζωής της αντλίας. Το καλύτερο είναι να επιλέγεται η αντλία που θα λειτουργεί στο μέσον του εύρους απόδοσής της. Όταν η αντλία λειτουργεί στην μέγιστη πίεση τότε αποδίδει ανεπαρκώς και υπό συνθήκες έντασης, επομένως αυξάνεται το λειτουργικό κόστος και μειώνεται ο χρόνος ζωής της. Αντιθέτως, η υπερδιαστασιολόγηση μιας αντλίας μειώνει την απόδοση λειτουργίας και αυξάνει το κόστος κεφαλαίου, αλλά είναι λιγότερο επιζήμια από την υποδιαστασιολογημένη αντλία.

Σε συστήματα βιοαερισμού με εισαγωγή αέρα προτιμούνται οι αντλίες με προστασία από έκρηξη. Όταν στο φρεάτιο εισάγεται αέρας, η αντλία δεν έρχεται σε επαφή με τα αέρια του εδάφους. Παρόλα αυτά, ενδέχεται να υπάρχουν στη γύρω περιοχή εύφλεκτοι ατμοί, επομένως πρέπει να προβλέπεται η πιθανότητα έκρηξης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής του βιοαερισμού, οι αντλίες που παρέχουν την απαιτούμενη ποσότητα αέρα και πίεση είναι της τάξης των 2-10 hp. Αντλίες μέσης ικανότητας διατίθενται στα 210 ή 240 V (μονοφασικές) ή 480 V (τριφασικές). Για το εύρος των 1.5 – 5 hp προτιμούνται οι αντλίες των 210 ή 240 V. Οι αντλίες των 480 V χρησιμοποιούνται σε ισχύ άνω των 5 hp, εξαιτίας της βελτιωμένης τους απόδοσης. Παρόλα αυτά, οι αντλίες των 240 V μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όταν οι αντλίες των 480 V παρουσιάζουν δυσκολία στην εφαρμογή. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει αρχικά να γνωρίζει την ενεργειακή δυνατότητα της δεδομένης περιοχής προτού επιλέξει το μοτέρ της αντλίας.

Αν η παροχή σχεδιασμού και η αναμενόμενη πτώση πίεσης ικανοποιούνται από μια αντλία μεγαλύτερη των 2 hp, τότε ο σχεδιαστής πρέπει να χωρίσει το σύστημα σε διάφορες ομάδες φρεατίων. Στις ομάδες αυτές, ο σχεδιασμός επιτρέπει την χρήση αντλιών της τάξης των 1-2 hp, για την παροχή της κατάλληλης ποσότητας αέρα. Η ομαδοποίηση αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς ένα πρόβλημα στη λειτουργία της μιας ομάδας δεν επηρεάζει την λειτουργία των υπολοίπων. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται η ευκολία και η ελαστικότητα του συστήματος. Επίσης, οι μικρές μονάδες ηλεκτροδοτούνται από χαμηλότερες τάσεις.

Η αντλία πρέπει να προστατεύεται από την εισαγωγή σε αυτήν κάποιας «ξένης» ουσίας και του νερού. Στα συστήματα εισαγωγής αέρα χρησιμοποιείται ένα φίλτρο αέρα στα ανάντη της αντλίας. Στα συστήματα που λειτουργούν με εξαγωγή αέρα από το έδαφος, τοποθετείται ένας διαχωριστήρας υγρών/αερίων ή ένας κυκλώνας.

4.2.6 Σχεδιασμός των φρεατίων και των σωληνώσεων

Οι σωληνώσεις, οι βαλβίδες και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στο σύστημα του βιοαερισμού, πρέπει να σχεδιάζεται για να λειτουργεί κάτω από τις πιο δυσχερείς συνθήκες όσον αφορά την πίεση και την παροχή αέρα. Πάντα βέβαια χρησιμοποιείται και ένας συντελεστής ασφάλειας. Οι βαλβίδες συμπίεσης και αποσυμπίεσης χρησιμοποιούνται με σκοπό να διασφαλιστεί η κατάλληλη πίεση στο σύστημα για την βέλτιστη λειτουργία του. Στις περισσότερες εγκαταστάσεις θεωρούνται πιο κατάλληλοι σωλήνες από PVC, χλωριωμένο PVC (CPVC), πολυπροπυλένιο (PPE) ή φθοριούχο πολυβινυλοδιένιο (PVDF). Αν αναμένονται υψηλές συγκεντρώσεις αέριων διαλυμάτων (στην περίπτωση συστήματος εξαγωγής αέρα), τότε το σύστημα των σωληνώσεων πρέπει να είναι συμβατό με τα αέρια αυτά. Επίσης, οι πλαστικοί σωλήνες που εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να είναι ανθεκτικές στο υπεριώδες φως ή να χρησιμοποιείται προστατευτικό κάλυμμα.

Οι βαλβίδες χρησιμοποιούνται με σκοπό τον έλεγχο της πίεσης του συστήματος και το κλείσιμό του σε περίπτωση ανάγκης. Μια παρακαμπτήριος βαλβίδα τοποθετείται στην εκροή της αντλίας για να επιτρέπεται η έξοδος της περίσσειας του αέρα. Σε κάθε φρεάτιο τοποθετείται μια βαλβίδα ελέγχου ροής. Επειδή δεν υπάρχει μεγάλη ανάγκη για τακτική αναπροσαρμογή κάθε βαλβίδας, δεν είναι απαραίτητο να είναι αυτόματες. Οι βαλβίδες με σφαίρα (ball valves) είναι από τις πιο αξιόπιστες ως προς το κλείσιμο του συστήματος και την ρύθμιση της ροής σε αυτό. Άλλοι τύποι βαλβίδων όπως οι σφαιρικές ή οι βελονοειδείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μόνο που αυξάνουν το κόστος σημαντικά χωρίς να βελτιώνουν την απόδοση. Σε κάθε φρεάτιο τοποθετείται ανεμόμετρο για τη μέτρηση της ροής του αέρα.

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος των σωληνώσεων απαιτούνται τουλάχιστον τα παρακάτω:

- δυνατότητα μέτρησης της παροχής σε κάθε φρεάτιο
- σύστημα θερμικής προστασίας του μοτέρ της αντλίας
- βαλβίδα αποσυμπίεσης στον αγωγό εκροής της αντλίας

- σημεία δειγματοληψίας πριν και μετά τον εξοπλισμό επεξεργασίας αέρα (στο σύστημα εξαγωγής αέρα)
- μετρητής στάθμης νερού στην δεξαμενή νερού (στο σύστημα εξαγωγής αέρα)
- μετρητής πίεσης στο καταθλιπτικό τμήμα της αντλίας
- μετρητές πίεσης σε διάφορα σημεία των αγωγών του συστήματος
- βαλβίδα εκτόνωσης στην εκροή της αντλίας για προστασία από υπερθέρμανση
- υψηλής ακρίβειας βάνες και συναγερμοί για το συμπύκνωμα αερίων (στο σύστημα εξαγωγής αέρα)
- μετρητής έκρηξης (στο σύστημα εξαγωγής αέρα, στην περίπτωση κατά την οποία οι πρόσφατες μετρήσεις των συγκεντρώσεων των εύφλεκτων ατμών είναι υψηλότερες από το 10% του κατώτατου ορίου έκρηξης (LEL)).

4.2.7 Κατασκευή του φρεατίου

Για την κατασκευή του φρεατίου ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία. Αν στην περιοχή όπου πρόκειται να εφαρμοστεί ο βιοαερισμός υπάρχουν κάποια φρεάτια παρακολούθησης πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτά για την εισαγωγή του αέρα. Η επιλογή αυτή δεν παρουσιάζει μεγάλη επιτυχία στα συστήματα εξαγωγής αέρα, επειδή με την άντληση παρουσιάζεται ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα ως το φρεάτιο άντλησης.

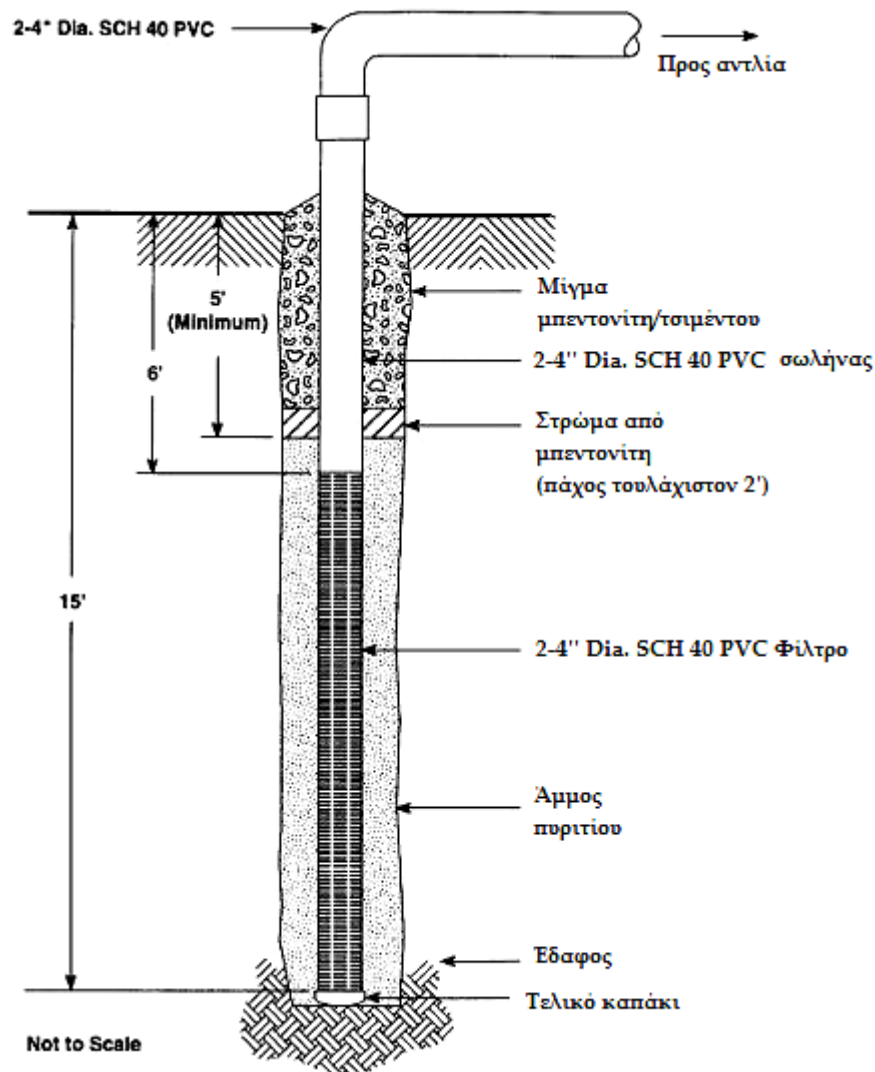
Η διάμετρος του φρεατίου είναι τυπικά μεταξύ 2 και 4 in (5.1–10 cm), παρόλο που κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί και μεγαλύτερες και μικρότερες διαμέτροι με επιτυχία. Η διάμετρος καθορίζεται με βάση το είδος του εδάφους, την ευκολία διάνοιξης, την έκταση και το βάθος της ρύπανσης. Στα περισσότερο ρηχά και αμμώδη εδάφη, μια διάμετρος 2 in (5.1 cm) θα είναι αρκετή για να παρέχεται επαρκής ποσότητα αέρα στην ρυπασμένη περιοχή. Στις περιοχές εκείνες όπου η ρύπανση εκτείνεται σε βάθη κάτω από τα 9 m ή σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας, προτείνεται η εγκατάσταση ενός

φρεατίου διαμέτρου 3–4 in (7.6 – 10 cm), καθώς με τον τρόπο αυτό επιτρέπεται ο αερισμός μεγαλύτερου όγκου εδάφους. Καθώς αυξάνεται το βάθος του φρεατίου μειώνεται σημαντικά το κόστος κατασκευής του ανά μέτρο.

Το υλικό κατασκευής του φρεατίου είναι PVC τύπου 40 και πρέπει να διαθέτει τέτοιες οπές (φίλτρο) ώστε να μεγιστοποιείται η ροή του αέρα στο έδαφος. Το φίλτρο πρέπει να εκτείνεται εντός της ζώνης ρύπανσης όσο το δυνατόν περισσότερο και το πέρας του πρέπει να φτάνει μέχρι το μικρότερο καταγεγραμμένο βάθος του υδροφορέα. Όταν ο σχεδιασμός αφορά φρεάτιο εξαγωγής, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα. Στην περίπτωση κατά την οποία η ανύψωση είναι τέτοια που αντλείται νερό, τότε μειώνεται η απόδοση του συστήματος.

Η πιο συνήθης μέθοδος διάνοιξης φρεατίου είναι η δημιουργία κατακόρυφης γεώτρησης με τρυπάνι τύπου κοχλία. Παρόλα αυτά, ένα τρυπάνι σωληνοειδούς τύπου θεωρείται πιο κατάλληλο σε συμπαγή εδάφη. Υπάρχουν βέβαια και άλλες τεχνικές, όπως στην περίπτωση όχι τόσο συμπαγούς εδάφους όπου το επιθυμητό βάθος διάνοιξης είναι μικρό. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και χειροκίνητο τρυπάνι. Όποτε είναι δυνατόν, πρέπει η διάμετρος της γεώτρησης να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα του φρεατίου. Το κενό διάστημα συμπληρώνεται με άμμο ή χαλίκι, ενώ το τμήμα πάνω από το φίλτρο καλύπτεται με τσιμέντο για να παρεμποδιστεί η διαφυγή του αέρα προς την επιφάνεια (βλ. Σχήμα 4-4).

Για να διατηρηθεί ακέραιο το φρεάτιο δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται υψηλές πιέσεις διότι υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του καλύμματος στεγανοποίησης. Αν η πίεση εισαγωγής υπερβαίνει την αντοχή του εδάφους, είναι πιθανό να παρουσιαστεί θραύση. Πρέπει επίσης να δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην κατασκευή ενός καλού καλύμματος. Για το λόγο αυτό στα φρεάτια εισαγωγής αέρα χρησιμοποιούνται τσιμεντοκονιάματα ή άλλα υγρά μέσα στεγανοποίησης. Τα ξηρά μέσα δεν παρέχουν επαρκή μόνωση, εκτός και αν κατά την εγκατάσταση του φρεατίου διατηρούνται υγρά.



Σχήμα 4-4: Σχηματική αναπαράσταση φρεατίου αερισμού (Πηγή: EPA, 1995)

4.2.8 Καθορισμός των σημείων παρακολούθησης και σχεδιασμός τους

Η κατάλληλη επιλογή των σημείων παρακολούθησης είναι μια σημαντική παράμετρος για το σωστό υπολογισμό της πίεσης και της σύστασης του αερίου *in situ*. Τυπικά χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του διοξειδίου του άνθρακα και του οξυγόνου στην κλίμακα 0-25% και της συγκέντρωσης των υδρογονανθράκων πάνω από 100 ppm (κατ' όγκο). Το υλικό κατασκευής πρέπει να είναι ανθεκτικό και αδρανές. Μεταξύ των πιο κατάλληλων περιλαμβάνεται το νάιλον και το Tygon. Η προσρόφηση και η αντίδραση των αερίων με το υλικό δεν δημιουργούν ιδιαίτερα προβλήματα. Παρόλα αυτά, αν είναι επιθυμητή η μέτρηση της συγκέντρωσης συγκεκριμένων οργανικών

στην χαμηλή κλίμακα (ppm, ppb), τότε είναι πιο κατάλληλο το “Teflon” και το ανοξείδωτο ατσάλι.

Τα σημεία δειγματοληψίας κατασκευάζονται με βάση δύο κριτήρια:

- την τοποθεσία της ρύπανσης
- τις παραμέτρους του εδάφους.

Όποτε είναι δυνατόν, τα σημεία δειγματοληψίας πρέπει να βρίσκονται σε εδάφη όπου η ρύπανση είναι μεγαλύτερη από 1000 mg (TPH)/kg εδάφους. Αν τα σημεία δεν είναι εντός της ρύπανσης τότε δεν είναι δυνατόν να συλλεχθούν αξιόπιστα στοιχεία σχετικά με τις συνθήκες του εδάφους. Κατά την επιλογή της θέσης των σημείων λαμβάνεται υπόψη η διαπερατότητα του εδάφους και η ακτίνα επιρροής. Τα σημεία πρέπει να βρίσκονται σε διάφορες αποστάσεις από το φρεάτιο εισαγωγής αέρα. Οι αποστάσεις αυτές ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και το βάθος του φρεατίου. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4-1) δίνεται με εμπειρικό τρόπο η απόσταση των σημείων παρακολούθησης. Επίσης, ένα σημείο δειγματοληψίας πρέπει να τοποθετηθεί κοντά στην ρυπασμένη περιοχή σε σημείο με παρόμοια γεωλογία αλλά με μηδενική ρύπανση.

Τύπος εδάφους	Βάθος από την κορυφή του φίλτρου (m)	Ακτινικές αποστάσεις των σημείων παρακολούθησης από φρεάτιο (m)
Χονδρόκοκκη άμμος	1.5	1.5 - 3 - 6
	3	3.0 - 9.0 - 15.0
	>4.5	6.0 - 9.0 - 21.0
Μεσαίου μεγέθους άμμος	1.5	3.0 - 9.0 - 15.0
	3	4.5 - 7.5 - 13.5
	>4.5	6.0 - 12.0 - 21.0
Λειπή άμμος	1.5	3.0 - 6.0 - 12.0
	3	4.5 - 9.0 - 15.0
	>4.5	6.0 - 12.0 - 18.0
Λαοπώδες	1.5	3.0 - 6.0 - 12.0
	3	4.5 - 9.0 - 15.0
	>4.5	6.0 - 12.0 - 18.0
Ελάχιστα διαπερατό	1.5	3.0 - 6.0 - 9.0
	3	3.0 - 6.0 - 12.0
	>4.5	3.0 - 7.5 - 15.0

Πίνακας 4-1: Ενδεικτικές αποστάσεις των φρεατίων παρακολούθησης (Πηγή: EPA, 1995)

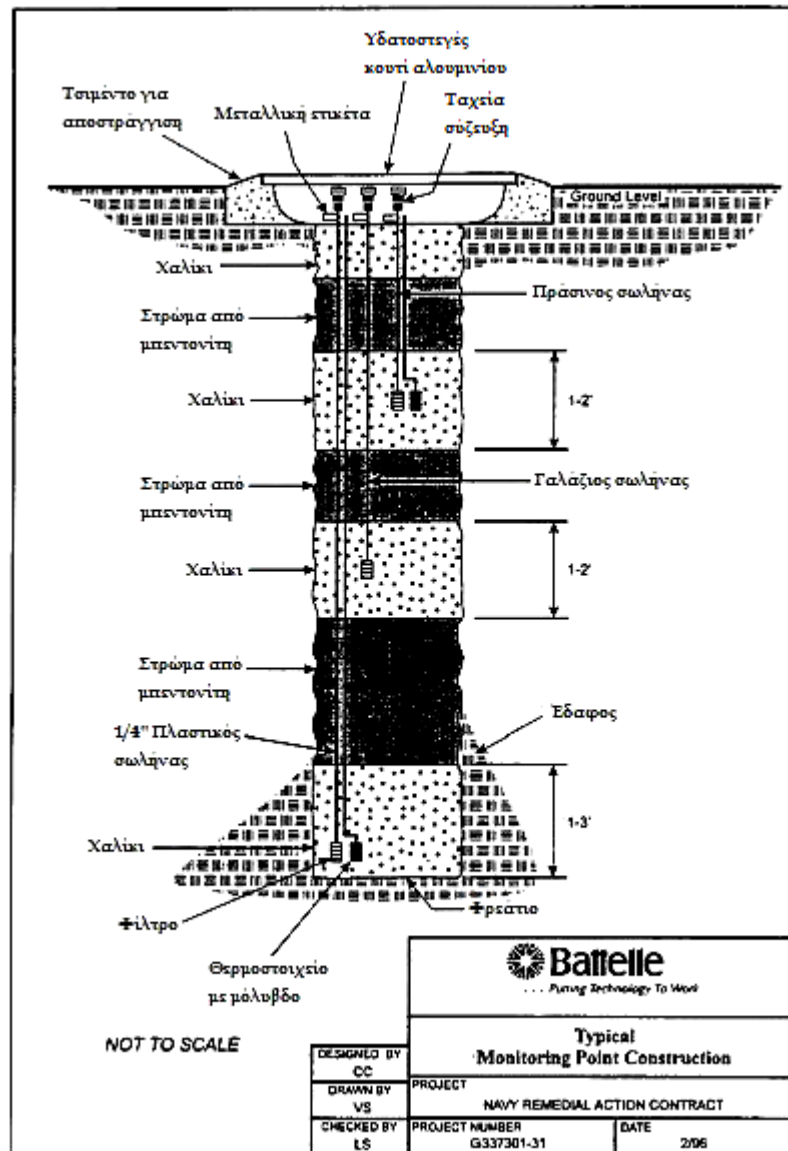
Κάθε σημείο παρακολούθησης είναι συνήθως μια συστοιχία από τρεις σωλήνες δειγματοληψίας, όπου σε κάθε έναν καταλήγει ένα φίλτρο. Το

φίλτρο αυτό επιτρέπει την είσοδο του εδαφικού αερίου στους σωλήνες αλλά όχι και των σωματιδίων του εδάφους. Κάθε φίλτρο είναι τοποθετημένο σε διαφορετικό βάθος μα διαφορετικού χρώματος σωληνώσεις που χρησιμοποιούνται για ένδειξη βάθους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κενό γύρω από τον σωλήνα δειγματοληψίας καλύπτεται από άμμο ενώ το διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων καλύπτεται από τσιμέντο. Για μερικά από τα σημεία παρακολούθησης, χρησιμοποιούνται καλώδια τύπου “J” ή “K” μαζί με τους σωλήνες δειγματοληψίας. Ο αισθητήρας που μετρά τη θερμοκρασία τοποθετείται στο επίπεδο του φίλτρου. Στο Σχήμα 4-5 παρουσιάζονται κάποιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες των φρεατίων παρακολούθησης.

Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για τη δειγματοληψία τοποθετούνται έτσι ώστε να καλύπτουν όλο το βάθος του σημείου παρακολούθησης. Προτού επιλεγεί το βάθος, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές του υδροφόρου ορίζοντα και το είδος του εδάφους. Το πιο βαθύ φίλτρο τοποθετείται κοντά στον πυθμένα της ρύπανσης, αν βέβαια η ρύπανση παύει να υφίσταται πριν τον υδροφορέα. Αν η ρύπανση βρίσκεται εντός του υδροφορέα τότε το βαθύτερο σημείο στο οποίο τοποθετείται το φίλτρο είναι τουλάχιστον 0.6–0.9 m πάνω από το υψηλότερο σημείο του υδροφορέα. Στα λιγότερο διαπερατά εδάφη, το φίλτρο τοποθετείται ακόμα υψηλότερα. Το μικρότερο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους στο οποίο τοποθετείται ένα φίλτρο είναι 0.9–1.5 m. Το ενδιάμεσο φίλτρο τοποθετείται περίπου σε κάποιο βάθος μεταξύ του κέντρου και του άνω $\frac{1}{4}$ του φίλτρου του φρεατίου. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι επιθυμητό να υπάρχουν πάνω από 3 σημεία δειγματοληψίας για πληρέστερη παρακολούθηση της ρυπασμένης ζώνης.

Στις περιοχές όπου υπάρχουν πάνω από ένα φρεάτια, δεν είναι αναγκαίο να δημιουργηθούν τρία σημεία δειγματοληψίας για κάθε φρεάτιο εισαγωγής αέρα. Ο επαρκής αριθμός σημείων είναι αυτός που εξασφαλίζει την ιδιότητα της αντιπροσωπευτικότητας των δειγμάτων. Ο λόγος του πλήθους των σημείων παρακολούθησης προς το πλήθος των φρεατίων εισαγωγής αέρα μειώνεται, όσο αυξάνεται το πλήθος των φρεατίων εισαγωγής αέρα. Παρόλα αυτά, προτείνεται τουλάχιστον ένας λόγος ενός σημείου παρακολούθησης

ανά φρεάτιο εισαγωγής. Ο πραγματικός αριθμός καθορίζεται από την ιδιαιτερότητα κάθε περιοχής, ως προς το μέγεθος της ρύπανσης και το κόστος εγκατάστασης πρόσθετων φρεατίων. Στη μέθοδο εισαγωγής αέρα, αρκετά σημεία παρακολούθησης πρέπει να τοποθετούνται μεταξύ των φρεατίων εισαγωγής και άλλων στοιχείων που βρίσκονται εντός της ακτίνας επιρροής. Τα σημεία παρακολούθησης τοποθετούνται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι τα κτήρια π.χ βρίσκονται εκτός της ακτίνας επιρροής ή οι υδρογονάνθρακες της αέριας φάσης του εδάφους βιοδιασπώνται προτού φτάσουν σε αυτά.



Σχήμα 4-5: Τυπική διάταξη φρεατίου παρακολούθησης (Πηγή: Technical Memorandum, NFESC, 1996)

5.0 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΣΜΟΥ - ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Στις παραγράφους που ακολουθούν, γίνονται κάποιες προτάσεις που σχετίζονται με την παρακολούθηση (έλεγχο) των συστημάτων βιοαερισμού για ένα χρονικό διάστημα. Οι μέθοδοι που αναλύονται περιλαμβάνουν τη δειγματοληψία εδαφικού αέρα, τη διενέργεια των *in situ* τεστ αναπνοής, την ποσοτικοποίηση της βιοαποικοδόμησης και της πτητικότητας, τον υπολογισμό των εκπομπών στην επιφάνεια, την προαιρετική παρακολούθηση και τη λειτουργία και συντήρηση ενός συστήματος βιοαερισμού.

5.1 Παρακολούθηση του εδαφικού αερίου

Η παρακολούθηση του εδαφικού αερίου πρέπει να πραγματοποιείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα για να επιβεβαιώνεται ότι γίνεται επαρκής οξυγόνωση της ρυπασμένης περιοχής. Αρχικά, ο εδαφικός αέρας πρέπει να παρακολουθείται σε εβδομαδιαία βάση έως ότου οξυγονωθεί πλήρως η περιοχή. Όταν επιτευχθεί ο πλήρης αερισμός, το σύστημα του βιοαερισμού μπορεί να βελτιστοποιηθεί. Μετά την αρχική αυτή περίοδο, η παρακολούθηση του αερίου γίνεται δύο φορές τον πρώτο χρόνο λειτουργίας κατά τους θερμότερους και ψυχρότερους μήνες του χρόνου και από εκεί και έπειτα μία φορά τον χρόνο. Αν δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση *in situ* τεστ αναπνοής σε διάφορες εποχές του χρόνου, τότε πρέπει να πραγματοποιούνται κάτω από παρόμοιες συνθήκες με το αρχικό τεστ. Εξαιτίας της απλότητας των περισσότερων συστημάτων βιοαερισμού, δεν είναι απαραίτητη η τακτική παρακολούθηση του εδαφικού αερίου προκειμένου να βεβαιωθεί ότι λειτουργούν σωστά.

5.2 Πραγματοποίηση των *in situ* τεστ αναπνοής

Τα τεστ αναπνοής πραγματοποιούνται με περιοδικό τρόπο σαν μέθοδος παρακολούθησης της αποκατάστασης της περιοχής. Καθώς προχωράει η αποκατάσταση της περιοχής και οι συγκεντρώσεις των ρύπων μειώνονται, οι ρυθμοί αναπνοής πλησιάζουν τους αντίστοιχους στη μη ρυπασμένη περιοχή. Τα τεστ αναπνοής δεν πραγματοποιούνται πολύ συχνά, συνήθως τέσσερις φορές τον πρώτο χρόνο και μια φορά κατόπιν.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, το τεστ αναπνοής γίνεται αρχικά με τη μέτρηση των συγκεντρώσεων του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα και ολικών υδρογονανθράκων. Μετά τη συγκέντρωση αυτών των πληροφοριών, το σύστημα του βιοαερισμού παύει να λειτουργεί και παρακολουθείται περιοδικά η μείωση του οξυγόνου και η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα στο εδαφικό αέριο. Σε αυτό το σημείο δεν προστίθεται αέριο-ιχνηθέτης επειδή από το αρχικό τεστ θα έχει καθοριστεί αν συμβαίνει διάχυση ή διαρροή του αερίου στο σημείο παρακολούθησης.

Τα *in situ* τεστ αναπνοής χρησιμοποιούνται σαν πρώτες ενδείξεις αποκατάστασης (και επομένως παύσης λειτουργίας του συστήματος) μιας περιοχής. Μια καλή ένδειξη ότι η περιοχή έχει πιθανόν αποκατασταθεί είναι το γεγονός ότι οι μετρήσεις του ρυθμού αναπνοής πλησιάζουν αυτές της μη ρυπασμένης περιοχής. Η μέθοδος αυτή είναι προτιμότερη οικονομικά, παρά της μεθόδου ανάλυσης δειγμάτων του εδάφους επειδή αποφεύγεται το επιπρόσθετο αυτό κόστος.

Οι ρυθμοί αναπνοής αναμένεται να μεταβάλλονται με το χρόνο. Ο πιο συνηθισμένος λόγος για αυτό είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας. Μετά το πέρας κάποιου χρονικού διαστήματος μετά τη μείωση της συγκέντρωσης του ρύπου, μειώνεται και ο ρυθμός αναπνοής. Τα NAPLs συνήθως κατανέμονται με ετερογενή τρόπο. Σε συνθήκες μη αερισμού, οι πτητικές ενώσεις μεταφέρονται στο εδαφικό αέριο δημιουργώντας περισσότερο ετερογενή ρύπανση. Παρόλα αυτά, το έδαφος στο οποίο παρουσιάζεται αυτό το φαινόμενο έχει μικρότερη ολική συγκέντρωση, επειδή η ποσότητα του ρύπου που είναι προσροφημένη στα σωματίδια του εδάφους είναι μικρότερη. Αν ένα σημείο παρακολούθησης είναι τοποθετημένο σε περιοχή όπου περιέχει μόνο προσροφημένη και αέρια φάση, τότε οι αρχικοί ρυθμοί αναπνοής θα είναι υψηλοί. Όμως, με το χρόνο θα μειώνονται οι ρυθμοί με συντελεστή της τάξης του 5–10 μέσα σε λίγους μόνο μήνες. Μια ένδειξη αυτού είναι η φαινόμενη πρώτης τάξης καμπύλη μείωσης του οξυγόνου, που δημιουργεί εσφαλμένα στοιχεία για το ρυθμό. Είναι δύσκολο να εξαλειφθεί αυτό το πρόβλημα, αλλά

ένας τρόπος είναι η εγκατάσταση του σημείου παρακολούθησης σε περιοχή υψηλής ρύπανσης.

5.3 Ποσοτικοποίηση της βιοαποικοδόμησης και της πτητικότητας

Η βιοαποικοδόμηση και η εξάτμιση των υδρογονανθράκων μπορεί να υπολογιστεί κατά την εφαρμογή του βιοαερισμού με εξαγωγή μέσω της άμεσης μέτρησης του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα στο αντλούμενο αέριο του εδάφους. Στα συστήματα εισαγωγής αέρα, προσωρινά αναστρέφεται η λειτουργία τους προκειμένου να υπολογιστούν τα μεγέθη αυτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτήν την περίπτωση οι τιμές που υπολογίζονται είναι αυξημένες επειδή το μέγεθος του βιοαντιδραστήρα μειώνεται.

Η μάζα των υδρογονανθράκων που εξατμίζονται υπολογίζεται από τη σχέση:

$$HC_{vol} = \frac{C_{V,HC}}{10^6} \cdot Q \cdot \rho_{hexane} \cdot MW_{hexane} \cdot \frac{kg}{1000g} \cdot \frac{1440 min}{day} \quad (5-1)$$

όπου: HC_{vol} = μάζα των υδρογονανθράκων που εξατμίστηκαν (kg/d),

$C_{V,HC}$ = συγκέντρωση των υδρογονανθράκων στο αέριο εξόδου (ppmv),

Q = παροχή αέρα (l/min),

ρ_{hexane} = πυκνότητα του εξανίου (mol/l) και

MW_{hexane} = μοριακό βάρος του εξανίου (g/mol).

Η μάζα των υδρογονανθράκων που βιοαποικοδομείται υπολογίζεται από τη σχέση:

$$HC_{bio} = \left(\frac{C_{V,bkgd} - C_{V,O_2}}{100} \right) \cdot Q \cdot C \cdot \rho_{O_2} \cdot MW_{O_2} \cdot \frac{kg}{1000g} \cdot \frac{1440 min}{day} \quad (5-2)$$

όπου: HC_{bio} = μάζα των υδρογονανθράκων που βιοαποικοδομείται (kg/d),

$C_{V,bkgd}$ = συγκέντρωση υποβάθρου του οξυγόνου στη μη ρυπασμένη περιοχή (%),

C_{V,O_2} = συγκέντρωση του οξυγόνου στο αέριο που εξάγεται (%) και

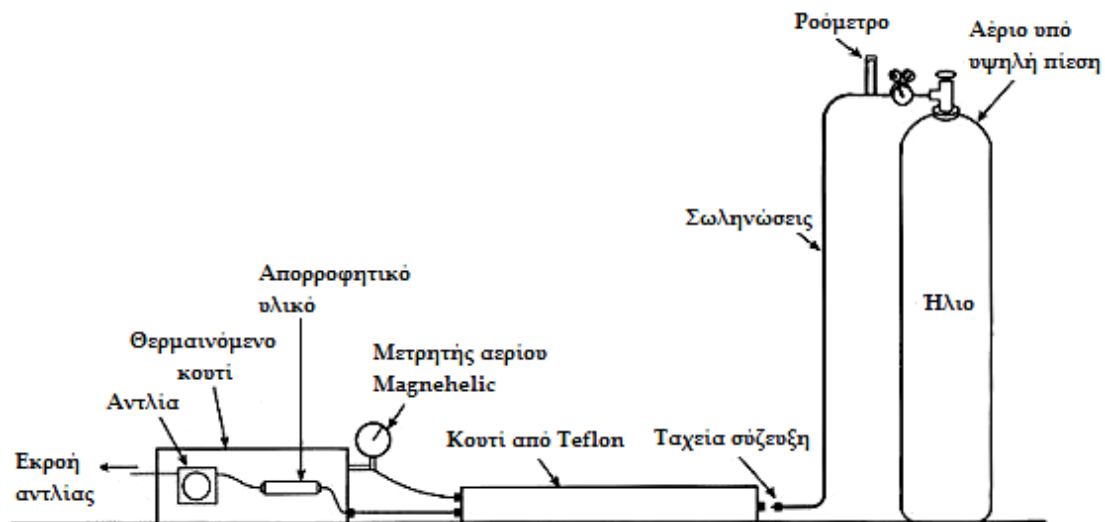
C = λόγος των μαζών υδρογονανθράκων-οξυγόνου με βάση τη στοιχειομετρία (1/3.5).

Στα συστήματα εισαγωγής αέρα οι τιμές βιοαποικοδόμησης θα είναι μεγαλύτερες. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ατμοί μεταφέρονται μέσω του αέρα εισαγωγής από τη ρυπασμένη περιοχή στη μη ρυπασμένη, επιτρέποντας έτσι μια επιπρόσθετη αποδόμηση. Παρόλα αυτά, στα συστήματα εξαγωγής, αρκετή ποσότητα των ατμών απομακρύνεται από το έδαφος προτού πραγματοποιηθεί η βιοαποικοδόμησή τους.

5.4 Δειγματοληψία των επιφανειακών εκπομπών

Στα περισσότερα συστήματα βιοαερισμού δεν είναι απαραίτητη η ανάλυση των εκπομπών στην επιφάνεια. Παρόλο όμως που οι εκπομπές είναι ελάχιστες, το ζήτημα αυτό απασχολεί κατά την εγκατάσταση κάθε συστήματος. Για το λόγο αυτό, ίσως χρειαστεί η ποσοτικοποίησή τους για την έκδοση της άδειας εγκατάστασης.

Μια σπάνια μέθοδος δειγματοληψίας των εκπομπών περιλαμβάνει την απομόνωση της ροής με χρήση ειδικού θαλάμου (βλ. Σχήμα 5-1).



Σχήμα 5-1: Σχηματική απεικόνιση συσκευής παρακολούθησης εκπομπών (Πηγή: EPA, 1995)

Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα κουτί από Teflon που καλύπτει μια περιοχή περίπου 0.45 m². Στο κουτί αυτό υπάρχουν προσαρτημένες θύρες εισόδου και εξόδου του αέρα. Μέσα στο κουτί υπάρχει ένας διαανομέας που κατανέμει το αέριο ομοιόμορφα στην επιφάνεια του εδάφους. Ο ίδιος τύπος

διανομέα υπάρχει και στην έξοδο του κουτιού. Η διάταξη αυτή μεταφέρει την ίδια ποσότητα αέρα στην επιφάνεια του εδάφους κάτω από το κουτί έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος.

Ο αέρας που εξέρχεται του κουτιού, κατευθύνεται σε ένα κουτί δειγματοληψίας που περιέχει απορροφητικό υλικό και μια αντλία. Υπάρχει επίσης και ένας σωλήνας που παρακάμπτει το απορροφητικό υλικό, ώστε να διαφεύγει από εκεί η περίσσεια αερίου. Χρησιμοποιείται και ένας μετρητής (Magnehelic™) που ελέγχει αν διατηρείται μηδενική πίεση σε όλο το σύστημα.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής των οργανικών ενώσεων από την επιφάνεια του εδάφους, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση (EPA, 1991a):

$$F = \frac{C_v \cdot V_r}{A} \quad (5-3)$$

όπου: F = ποσότητα ροής (flux) μάζας/(έκταση · χρόνος) (g/m² · min),

C_v = συγκέντρωση του αερίου σε μονάδες μάζας / όγκου (g/m³),

V_r = ογκομετρική παροχή του αερίου (m³/min) και

A = επιφάνεια του εδάφους που καλύπτεται από το σύστημα (m²).

Στις περιοχές εφαρμογής του βιοαερισμού, οι εκπομπές των BTEX και TPH είναι κάποιες τάξεις μεγέθους κάτω από τα νομοθετημένα όρια. Το γεγονός αυτό ενισχύει το επιχείρημα της λειτουργίας του βιοαερισμού με εισαγωγή αέρα.

5.5 Προαιρετική παρακολούθηση βιοαποικοδόμησης: Ποσοτική εκτίμηση

Η μέτρηση των αναλογιών των ισοτόπων του άνθρακα μπορεί να βοηθήσει στην επιβεβαίωση της βιοαποικοδόμησης. Το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από την αποδόμηση των υδρογονανθράκων μπορεί να διαχωριστεί από αυτό που παράγεται από άλλες διεργασίες με βάση τη σύσταση των ισοτόπων άνθρακα. Η σύσταση αυτή είναι χαρακτηριστικά για κάθε υλικό ή παράγωγο διεργασιών (μεταβολισμός). Η μέθοδος αυτή δεν απαιτείται καθώς η επιβεβαίωση της βιοαποικοδόμησης γίνεται συνήθως με

τα τεστ αναπνοής. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος χρησιμοποιείται μόνο αν επιβάλλεται από τους κανονισμούς.

5.6 Λειτουργία και συντήρηση

Τα συστήματα βιοαερισμού είναι πολύ απλά, με ελάχιστα μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά μέρη. Αν το σύστημα λειτουργεί με εισαγωγή αέρα, τότε το μόνο που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία του είναι ο έλεγχος της παροχής λειτουργίας της αντλίας, της πίεσης και της θερμοκρασίας. Οι έλεγχοι αυτοί πρέπει να γίνονται σε εβδομαδιαία βάση. Πραγματοποιούνται συνήθως από κάποιον εργαζόμενο επί τόπου, καθώς δεν απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις της διαδικασίας. Ενδεχομένως, να απαιτηθεί κάποια στιγμή αντικατάσταση ενός φίλτρου, ροόμετρου ή άλλου μετρητή.

Αν το σύστημα λειτουργεί με εξαγωγή αέρα, τότε απαιτείται πιο έντονη συντήρηση. Διαθέτουν δεξαμενές στις οποίες πραγματοποιείται ξήρανση και επεξεργασία του συμποκνώματος. Ενδέχεται επίσης να απαιτείται παρακολούθηση αν το εξαγόμενο αέριο τηρεί τα νομοθετημένα όρια. Επομένως και το σύστημα επεξεργασίας του αερίου θα απαιτεί μια επιπρόσθετη παρακολούθηση προκειμένου να λειτουργεί σωστά.

Οι φυσητήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα βιοαερισμού έχουν μια τυπική διάρκεια ζωής αρκετών χρόνων και επομένως δύσκολα θα απαιτηθεί η αντικατάστασή τους. Ελάχιστες είναι οι καταγεγραμμένες περιπτώσεις όπου χρειάστηκε να αντικατασταθεί η αντλία του συστήματος.

6.0 Ο ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Η υγειονομική ταφή σαν μέθοδος διαχείρισης των στερεών αποβλήτων έχει σημειώσει αλματώδη πρόοδο τα τελευταία χρόνια, καθώς έχει ξεφύγει από τη λογική των χώρων διάθεσης με ελάχιστο ή καθόλου έλεγχο. Πλέον, οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α) είναι πλήρως ελεγχόμενες περιοχές-εγκαταστάσεις με εκλεπτυσμένα συστήματα απόθεσης, περιβαλλοντικής παρακολούθησης, βελτιωμένων λειτουργικών πρακτικών και αυξημένων κανονισμών. Η μοντέρνα αυτή «έκδοση» των ΧΥΤΑ είναι πραγματικά ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στις σημερινές μεθόδους ολοκληρωμένης διαχείρισης στερεών αποβλήτων. Παρόλα αυτά, προκειμένου να υπάρξει εξέλιξη στο πεδίο της διαχείρισής τους, πρέπει να ελέγχονται συνεχώς οι νέοι τρόποι διαχείρισης. Μια ιδέα που έχει απασχολήσει ιδιαίτερος τα τελευταία χρόνια είναι αυτή του «βιοαντιδραστήρα ΧΥΤΑ». Η βασική σκέψη γύρω από αυτήν την έννοια είναι η αύξηση της αποσύνθεσης των απορριμμάτων, των ρυθμών μετατροπής και της απόδοσης της διεργασίας σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη ενός απλού ΧΥΤΑ. Μέσα στα πλεονεκτήματα του βιοαντιδραστήρα περιλαμβάνεται η μεγιστοποίηση της δέσμευσης του βιοαερίου με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας, η αύξηση της χωρητικότητας του ΧΥΤΑ, η βελτίωση των συνθηκών επεξεργασίας και αποθήκευσης των στραγγισμάτων, η μείωση των απαιτούμενων δραστηριοτήτων μετά το κλείσιμο του χώρου και η αποφυγή των αερίων θερμοκηπίου.

6.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η κυρίαρχουσα μέθοδος διαχείρισης των στερεών αποβλήτων σήμερα είναι η υγειονομική ταφή. Οι ΧΥΤΑ πρέπει να τηρούν κάποιες προδιαγραφές προκειμένου να γίνονται αποδεκτοί από την υπάρχουσα κρατική και διεθνή νομοθεσία. Η πιο βασική αρχή στην ταφή είναι η διατήρηση των αποβλήτων σε ξηρή βάση, ελαχιστοποιώντας επομένως την παραγωγή στραγγισμάτων και του βιοαερίου που αποτελούν δύο από τα κυριότερα παραπροϊόντα της αποδόμησης.

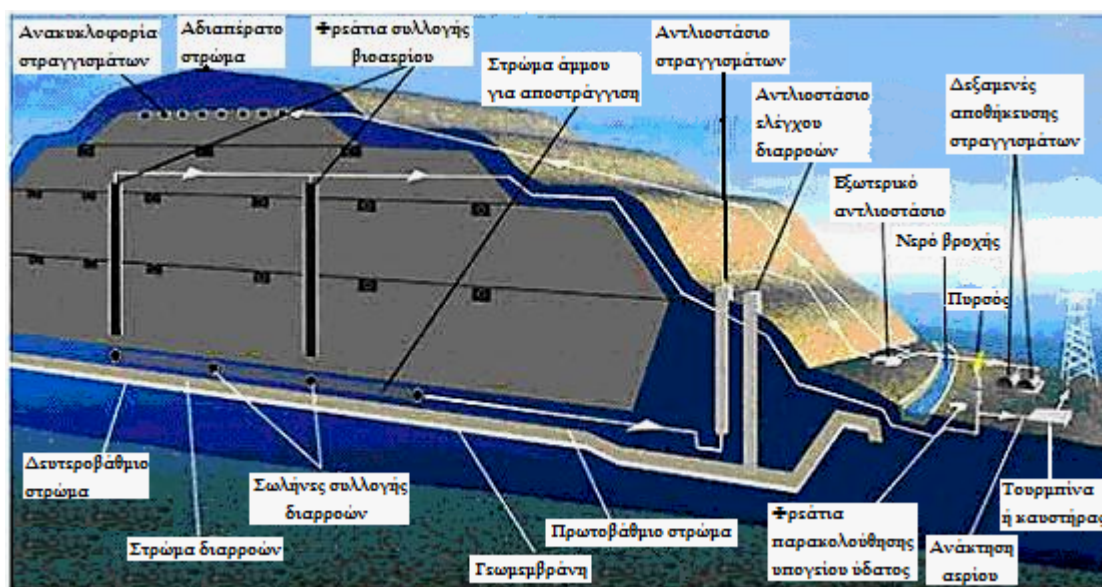
Η υπόθεση που γίνεται είναι ότι ένα διάστημα 30 χρόνων από την παύση της λειτουργίας του ΧΥΤΑ είναι το ελάχιστο απαιτούμενο για τον επαρκή έλεγχο των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των οργανικών ενώσεων, των αλάτων και των βαρέων μετάλλων που περιέχονται στους συμβατικούς «ξηρούς» χώρους ταφής απορριμμάτων. Ο περιορισμός που πραγματοποιείται σε αυτούς τους βιοαντιδραστήρες παρέχει αρχικά περιβαλλοντική προστασία. Παρόλα αυτά, μετά από το διάστημα των 30 χρόνων ενδεχόμενο είναι να υπάρξει αστοχία του συστήματος, ιδιαίτερα στο σύστημα στεγανοποίησης (μεμβράνες στο άνω μέρος και στον πυθμένα των αποβλήτων). Το πρωτεύον περιβαλλοντικό ζήτημα που σχετίζεται με την πιθανή αστοχία του συστήματος και της διήθησης του νερού είναι η ενδεχόμενη αύξηση της παραγωγής βιοαερίου και στραγγισμάτων και οι συνεπακόλουθες επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Η φύση και το εύρος των επιδράσεων αυτών σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα του οργανικού κλάσματος που δεν έχει ακόμη αποδομηθεί.

6.3 Διαφορές του ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρα με τον συμβατικό ΧΥΤΑ

Σύμφωνα με τον ορισμό του ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρα, πρόκειται για έναν χώρο διάθεσης στερεών αποβλήτων όπου χρησιμοποιούνται οι μικροβιολογικές διεργασίες για την μετατροπή και σταθεροποίηση των οργανικών ενώσεων που δύναται να αποδομηθούν εντός 5 ή 10 χρόνων από την έναρξη λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Με τον τρόπο αυτό λειτουργίας αυξάνεται σημαντικά η αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων, ο ρυθμός μετατροπής και η απόδοση της διεργασίας από τα αντίστοιχα μεγέθη ενός συμβατικού ΧΥΤΑ. Με τον όρο σταθεροποίηση εννοείται ότι οι περιβαλλοντικές παράμετροι απόδοσης (σύσταση και ρυθμός παραγωγής βιοαερίου, συγκεντρώσεις των συστατικών των στραγγισμάτων) παραμένουν σε σταθερά επίπεδα και δεν θα αυξηθούν στην περίπτωση αστοχίας του συστήματος περιορισμού σε διάστημα μεγαλύτερο των 5-10 χρόνων από την έναρξη του βιοαντιδραστήρα.

Στον βιοαντιδραστήρα απαιτείται η πραγματοποίηση συγκεκριμένων διαχειριστικών και λειτουργικών ενεργειών προκειμένου να ενισχυθούν οι διεργασίες βιοαποικοδόμησης. Η πιο σημαντική και οικονομική μέθοδος είναι η προσθήκη υγρασίας. Άλλες τεχνικές περιλαμβάνουν τον τεμαχισμό των αποβλήτων, τη ρύθμιση του pH, την προσθήκη θρεπτικών, την προεπεξεργασία και μετεπεξεργασία των αποβλήτων και τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Μια επιτυχημένη εφαρμογή απαιτεί επίσης την δημιουργία ενός πλήρους διαχειριστικού πλαισίου.

Στην ουσία, ο βιοαντιδραστήρας είναι μια επέκταση της τεχνικής ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων (βλ. Σχήμα 6-1). Παρόλα αυτά, στον βιοαντιδραστήρα απαιτείται προσθήκη αρκετής ποσότητας υγρασίας για να πλησιάσει τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Η ποσότητα των στραγγισμάτων δεν αρκεί συνήθως για τις διεργασίες του βιοαντιδραστήρα. Για το λόγο αυτό προστίθεται ποσότητα νερού ή άλλων μη τοξικών υγρών (ανάλογα πάντα με τις κλιματολογικές συνθήκες). Πολλές βέβαια περιοχές δεν έχουν εντάξει την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων στους ΧΥΤΑ, παρά μόνο επιτρέπουν την προσθήκη νερού σαν τεχνική ύγρανσης.



Σχήμα 6-1: Σχηματική απεικόνιση βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων

Λίγο μετά το κλείσιμο του βιοαντιδραστήρα, η παραγωγή του βιοαερίου είναι συνήθως μέγιστη. Γρήγορα στη συνέχεια θα μειωθεί τα επόμενα 5-10

χρόνια σε ένα σταθερό και χαμηλό ρυθμό. Όμοια, λίγο μετά το κλείσιμο, οι συγκεντρώσεις των συστατικών των στραγγισμάτων από τις αρχικά υψηλές τιμές θα μειωθούν σε σημαντικό βαθμό, χαρακτηριστικό της παρατεταμένης σταθεροποίησης. Η ποσότητα των στραγγισμάτων θα είναι υπολογίσιμη, έτσι που θα είναι δυνατή η επεξεργασία τους on site. Στην περίπτωση της αστοχίας του συστήματος περιορισμού, μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ, η ποιότητα των στραγγισμάτων εξαιτίας της διήθησης του νερού θα είναι καλύτερη από τους «ξηρούς» ΧΥΤΑ.

6.4 Κατάταξη των βιοαντιδραστήρων στερεών αποβλήτων

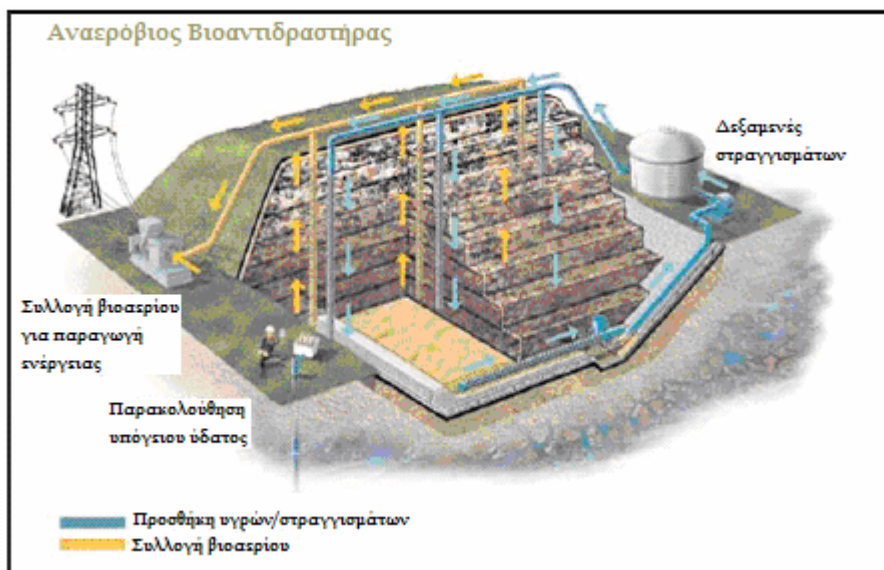
Οι βιοαντιδραστήρες στερεών αποβλήτων κατατάσσονται σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί (ΕΡΑ, 2002). Μπορεί να είναι αερόβιοι, αναερόβιοι ή υβριδικοί:

- Αερόβιοι: στους αερόβιους βιοαντιδραστήρες γίνεται εισαγωγή οξυγόνου (ή αέρα) στη μάζα των απορριμμάτων, μέσω οριζόντιων ή κατακόρυφων φρεατίων (βλ. Σχήμα 6-2). Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται η αερόβια δραστηριότητα και επιταχύνεται η σταθεροποίηση των αποβλήτων. Τα στραγγίσματα οδηγούνται σε δεξαμενές αποθήκευσης και ανακυκλοφορούν στον ΧΥΤΑ με ελεγχόμενο τρόπο.



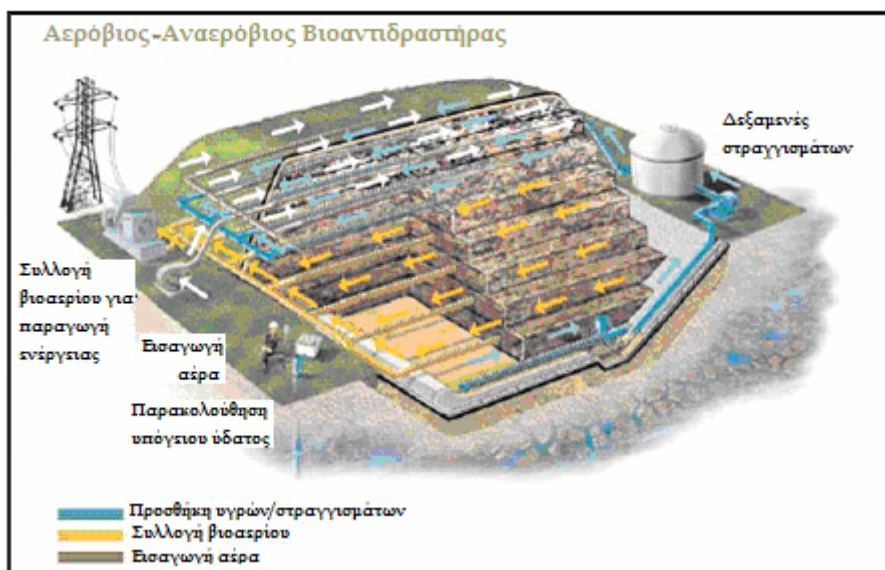
Σχήμα 6-2: Απεικόνιση αερόβιου βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων (Πηγή: Ρερα, 2003)

- Αναερόβιοι: σε έναν αναερόβιο αντιδραστήρα (βλ. Σχήμα 6-3), προστίθεται υγρασία είτε με την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων είτε με κάποιο άλλο τρόπο, με σκοπό την βελτιστοποίηση της υγρασίας. Η βιοαποικοδόμηση συμβαίνει απουσία οξυγόνου (αναερόβια) και παράγεται βιοαέριο. Το βιοαέριο που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, μπορεί να ανακτάται για ενεργειακό λόγο αλλά και για έλεγχο των αέριων εκπομπών.



Σχήμα 6-3: Απεικόνιση αναερόβιου βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων (Πηγή: Rera, 2003)

- Υβριδικοί: σε έναν υβριδικό αντιδραστήρα στερεών αποβλήτων, η επιτάχυνση της σταθεροποίησης πραγματοποιείται με έλεγχο του αζώτου. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται η απομάκρυνση της αμμωνίας από τα στραγγίσματα, μέσω της αερόβιας επεξεργασίας για την μετατροπή της σε νιτρικά ιόντα (διαδικασία νιτροποίησης), ακολουθούμενη από την διαδικασία της απονιτροποίησης (μετατροπή των νιτρικών σε ακίνδυνο άζωτο). Τα στραγγίσματα που έχουν υποστεί τη νιτροποίηση, ανακυκλοφορούν στην κυρίως μάζα των αποβλήτων και με την παρουσία του άνθρακα γίνεται η μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο (βλ. Σχήμα 6-4).



Σχήμα 6-4: Απεικόνιση υβριδικού βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων (Πηγή: Reza, 2003)

6.5 Παραδείγματα ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρων

1. Καλιφόρνια: Επί τρία χρόνια λειτουργεί στην περιφέρεια Yolo ένα κελί του ΧΥΤΑ σαν βιοαντιδραστήρας που περιέχει 9000 tn αποβλήτων. Αυτήν την περίοδο γίνονται διαπραγματεύσεις για την λειτουργία άλλου ενός κελιού με έκταση 15 acre (40 στρέμματα).

2. Φλόριντα: Πρόσφατα η πολιτεία ενέκρινε 3.2 εκ. \$ για την εγκατάσταση ενός βιοαντιδραστήρα.

3. Νέα Υόρκη: Ένας αναερόβιος αντιδραστήρας λειτουργεί στον ΧΥΤΑ του “Mill Seat” ενώ ένας αερόβιος λειτουργεί στην περιοχή “Elmira”.

6.6 Πιθανά οφέλη από τη λειτουργία ενός βιοαντιδραστήρα

Πολλά είναι τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από τη λειτουργία ενός ΧΥΤΑ σαν βιοαντιδραστήρα. Μπορούν να ταξινομηθούν σε περιβαλλοντικά, νομοθετικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη.

6.6.1 Οφέλη από την άμεση μετατροπή/σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος

- Γρήγορη αποκατάσταση-μείωση του όγκου και σταθεροποίηση σε 5-10 χρόνια από τη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα.

- Αυξημένος μοναδιαίος, ολικός συντελεστής βιοαερίου και παροχή βιοαερίου–το μεγαλύτερο μέρος του εύκολα βιοαποικοδομήσιμου οργανικού κλάσματος βιοδιασπάται σε 5–10 χρόνια μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ.
- Αυξημένη ποιότητα στραγγισμάτων–σταθεροποιείται μέσα σε 3–10 χρόνια από το κλείσιμο.
- Οικονομία χρόνου ως προς τη χρήση της έκτασης του αντιδραστήρα για άλλες δραστηριότητες.

6.6.2 Οφέλη από τη μεγιστοποίηση της δέσμευσης του βιοαερίου για ανάκτηση ενέργειας

- Σημαντική αύξηση της διαθέσιμης ποσότητας του βιοαερίου σαν πηγή ενέργειας, κάτι που δημιουργεί επιχειρηματικές δραστηριότητες.
- Πιθανή αύξηση στην απόδοση άντλησης του βιοαερίου (σε μικρότερο χρονικό διάστημα).
- Μεγάλη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- Αυξημένο κέρδος από την πώληση του βιοαερίου έναντι των ορυκτών καυσίμων.
- Οφέλη από την απόσβεση του περιβαλλοντικού κόστους λόγω της χρήσης του βιοαερίου.
- Σημαντικό πλεονέκτημα στην οικονομία κλίμακας εξαιτίας της αύξησης του ρυθμού παραγωγής αερίου σε σχετικά μικρότερο χρόνο.

6.6.3 Οφέλη από την αυξημένη χωρητικότητα του ΧΥΤΑ λόγω της ταχύτερης καθίζησης

- Αύξηση στην ποσότητα των στερεών αποβλήτων που δύναται να διατεθούν στον ΧΥΤΑ (αύξηση της πυκνότητας).
- Αύξηση του χρόνου ζωής του ΧΥΤΑ μέσω της επιπρόσθετης εναπόθεσης απορριμμάτων.

- Η αύξηση της ποσότητας των απορριμμάτων δημιουργεί οικονομικό όφελος που προκύπτει από τη διαφορά του κόστους κεφαλαίου που απαιτείται για τη χωροθέτηση, αδειοδότηση και κατασκευή ενός νέου ΧΥΤΑ.
- Αυξημένα δημόσια έσοδα από την παράταση της ζωής του ΧΥΤΑ.

6.6.4 Βελτίωση της επεξεργασίας και αποθήκευσης των στραγγισμάτων

- Χαμηλού κόστους επεξεργασία μερική ή πλήρης, σημαντική βιολογική και χημική μετατροπή τόσο του οργανικού όσο και του ανόργανου κλάσματος.
- Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων τόσο κατά τη διάρκεια λειτουργίας αλλά και μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ μειώνει σημαντικά το κόστος διάθεσής τους.
- Απορρόφηση των στραγγισμάτων εντός του αντιδραστήρα μέχρι την πλήρωση της χωρητικότητας του πεδίου.

6.6.5 Μείωση της ανάγκης για αποκατάσταση, της συντήρησης και του κινδύνου

- Το γεγονός της ταχύτερης σταθεροποίησης των αποβλήτων (μέσα σε 5–10 χρόνια) ελαχιστοποιεί τον περιβαλλοντικό κίνδυνο και τα άλλα μειονεκτήματα που σχετίζονται με την καθίζηση, τα στραγγίσματα και το βιοαέριο.
- Οι λειτουργικές δραστηριότητες και η συντήρηση του ΧΥΤΑ μειώνονται σε μεγάλο βαθμό.
- Μειώνονται οι δραστηριότητες που σχετίζονται με την παρακολούθηση του συστήματος.
- Μείωση των οικονομικών απαιτήσεων του συστήματος.
- Στο ενδεχόμενο αστοχίας του συστήματος περιορισμού, δεν υπάρχει ο κίνδυνος της αυξημένης παραγωγής μεθανίου, της μείωσης της ποιότητας των στραγγισμάτων και του αυξημένου ρυθμού καθίζησης.

Ένα άλλο πλεονέκτημα των βιοαντιδραστήρων προκύπτει από την εξάλειψη των αερίων του θερμοκηπίου. Στους βιοαντιδραστήρες μπορεί γενικά να γίνει πλήρης παραγωγή μεθανίου με μέγιστο ρυθμό. Αυτό μπορεί να συνδυαστεί με την σχεδόν πλήρη δέσμευσή του και την ανάκτηση της ενέργειας που περιέχει μέσω ενός ενεργειακού προγράμματος. Με τον υψηλό ρυθμό παραγωγής και την υψηλή απόδοση της δέσμευσης του βιοαερίου ελαχιστοποιείται το ενδεχόμενο διαρροής αερίου του θερμοκηπίου.

Κάποιοι επιπλέον στόχοι και οφέλη περιλαμβάνουν: 1) τη βιοαποικοδόμηση συγκεκριμένων ανθεκτικών οργανικών ενώσεων (αφαλογόνωση) και την απομόνωση κάποιων ανόργανων (καθίζηση) και 2) την ενίσχυση κάποιων διεργασιών όπως της διήθησης, της ρόφησης του περιορισμού και άλλων μέσω της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων.

6.7 Θέματα που σχετίζονται με το ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρα

6.7.1 Σχεδιασμός

Όσον αφορά το σχεδιασμό ενός βιοαντιδραστήρα, υπάρχουν συγκεκριμένοι πολιτειακοί και κοινοτικοί κανόνες που καθορίζουν τις βασικές παραμέτρους. Στα βασικά σχεδιαστικά μέρη περιλαμβάνεται η γεωμεμβράνη περιορισμού, οι εγκαταστάσεις συλλογής των στραγγισμάτων και βιοαερίου και το τελικό κάλυμμα. Είναι οι ίδιες περίπου απαιτήσεις σχεδιασμού με αυτές που ισχύουν για κάθε μοντέρνο ΧΥΤΑ. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται τα βασικά θέματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό των βιοαντιδραστήρων.

Μέγεθος του κελιού

Για οικονομικούς και θεσμικούς λόγους, μια νέα τάση που σχετίζεται με το σχεδιασμό ενός ΧΥΤΑ είναι η δημιουργία βαθιών κελιών (ή φάσεων) που ολοκληρώνονται μέσα σε 2-5 χρόνια. Αυτή η τάση αποτελεί μια δυναμική τεχνική για τον αντιδραστήρα. Η δομή αυτή εξυπηρετεί καλύτερα καθώς μπορεί να την εκμεταλλευτεί ο φορέας ταχύτερα, παρά να χαθεί πολύτιμος χρόνος σε κάποιο άλλο σχεδιασμό που ενδεχόμενα θα αποδειχτεί ανεπαρκής.

Μόλις ολοκληρωθεί το κελί, οι συνθήκες μεθανογένεσης βελτιστοποιούνται και ευκολύνεται η παραγωγή και άντληση του βιοαερίου. Παρόλα αυτά, οι βαθιοί ΧΥΤΑ μπορεί να έχουν τόσο μεγάλη πυκνότητα στα χαμηλότερα στρώματα που παρεμποδίζεται η ροή των στραγγισμάτων από την πολύ μικρή διαπερατότητα. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να περιοριστεί η προσθήκη απορριμμάτων και να μειωθεί η ανακυκλοφορία στα ανώτερα στρώματα ή να βελτιωθεί το σύστημα αποστράγγισης.

Μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος στραγγισμάτων στη μεμβράνη του πυθμένα

Στους κανονισμούς καθορίζεται σαν μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος στραγγισμάτων το 1 ft (0.3 m) από τη μεμβράνη του πυθμένα. Το κριτήριο αυτό μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με κατάλληλο σχεδιασμό και καθορισμό της κλίσης της μεμβράνης, της απόστασης του τμήματος αποστράγγισης και της υδραυλικής αγωγιμότητας του στρώματος αποστράγγισης. Για το σχεδιασμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαθηματικά μοντέλα όπως το HELP3 (U.S Corps of Engineers). Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα, ίσως πρέπει ο φορέας να απαιτήσει και την παρακολούθηση προς επιβεβαίωση των προβλέψεων.

Διαχείριση των υγρών

Για το σύστημα διαχείρισης των στραγγισμάτων πρέπει να γίνει ένας υπολογισμός της προβλεπόμενης παροχής και να δημιουργηθούν οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης και οι συμπληρωματικές τους. Οι αποθηκευτικοί χώροι πρέπει να είναι επαρκείς για την περίπτωση μιας υπερβολικά υψηλής παραγωγής στραγγισμάτων. Επίσης, πρέπει στο σχεδιασμό να προβλέπεται η προσθήκη νερού, άλλων υγρών ή ιλύος που μπορεί να απαιτηθεί για την επίτευξη του στόχου αποκατάστασης. Η ποσότητα των υγρών που απαιτείται για την κάλυψη της χωρητικότητας του πεδίου μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη διεθνή εμπειρία, τις προβλέψεις μοντέλων ή κάποια μέτρηση στο συγκεκριμένο πεδίο. Εκφρασμένη σε μονάδες όγκου ανά μονάδα μάζας στερεών αποβλήτων, η ποσότητα των υγρών που προστίθεται ως τον πλήρη

κορεσμό του πεδίου είναι μεταξύ 95–190 m³ ανά 1000 tons στερεών αποβλήτων (Reinhardt and Ham, 1974).

Η προσθήκη των υγρών γίνεται με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, κάποιες φορές η προσθήκη γίνεται με άμεσο τρόπο, κατά τη διάρκεια της ταφής των απορριμμάτων έως ότου η υγρασία φτάσει τα επιθυμητά επίπεδα. Στην περίπτωση όμως αυτή πρέπει οι διαχειριστές να είναι προετοιμασμένοι για μεγάλη αύξηση του βιοαερίου σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Μια άλλη επιλογή είναι η προσθήκη υγρασίας μετά την ταφή των απορριμμάτων, έτσι ώστε να ελέγχεται η παραγωγή του βιοαερίου. Η μέθοδος αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση επιφανειακών συστημάτων άρδευσης, με τη δημιουργία μικρών λιμνών εκμεταλλευόμενοι την διήθηση, με φρεάτια εισαγωγής νερού και άλλες. Κατά την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι κλιματικές παράμετροι, οι ανεπιθύμητες οσμές, ο βαθμός έκθεσης των εργαζομένων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι απώλειες εξάτμισης, η αξιοπιστία της μεθόδου, η ομοιομορφία της ύγρανσης και η αισθητική. Τα κατακόρυφα φρεάτια και οι τάφροι προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως τα μειωμένα μονοπάτια έκθεσης, την καλή απόδοση ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και την καλή αισθητική.

Η πυκνότητα των στερεών αποβλήτων

Η προσθήκη υγρών στα στερεά απόβλητα αυξάνει την πυκνότητά τους, κάτι που είναι μεγάλης σημασίας στο σχεδιασμό των δομικών στοιχείων που θα φέρουν το βάρος αυτό. Επίσης, τα συστήματα συλλογής στραγγισμάτων και βιοαερίου πρέπει να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να μπορούν να υποστούν μια μεγάλη φόρτιση που μπορεί να είναι αυξημένη ακόμη και κατά 30%. Η διαδικασία καθορισμού της δυνατότητας φόρτισης του σωλήνα συλλογής στραγγισμάτων περιγράφεται από τους Harrison και Watkins (1996).

Σύστημα ελέγχου του βιοαερίου

Ένας βιοαντιδραστήρας παράγει περισσότερο βιοαέριο σε πολύ λιγότερο χρόνο από έναν «ξηρό» βιοαντιδραστήρα. Για να αποφευχθούν τα προβλήματα οσμών και για να ελεγχθεί επαρκώς το αέριο απαιτείται η εγκατάσταση μεγαλύτερων σωλήνων, αντλιών και όποιου άλλου εξοπλισμού, σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Για την εξαγωγή του αερίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οριζόντιοι τάφροι, κατακόρυφα φρεάτια, επιφανειακοί συλλέκτες ή υβριδικά συστήματα. Η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη παροχή αερίου επιτυγχάνεται με την αύξηση της διαμέτρου των σωληνώσεων, καθώς η χωρητικότητα αυξάνει με το τετράγωνο της διαμέτρου. Τα συστήματα προσθήκης υγρασίας πρέπει να είναι διαφορετικά από αυτά του αερίου για την αποφυγή επιπλοκών στη ροή. Το σύστημα συλλογής υγρών κάτω από τα απορρίμματα πρέπει να ενοποιηθεί με το σύστημα εξαγωγής αερίου.

Είναι ενδεχόμενο η αυξημένη παραγωγή αερίου να επηρεάσει αρνητικά τις κλίσεις των πρανών και το κάλυμμα. Αυτό μπορεί να συμβεί στην περίπτωση κατά την οποία δεν έχει εγκατασταθεί σωστά το σύστημα συλλογής αερίου στην ενεργή φάση του ΧΥΤΑ. Η πίεση που ασκεί το αέριο κατά την άνοδό του στην ατμόσφαιρα αναστηκώνει τη γεωμεμβράνη κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και δημιουργεί τοπική αστάθεια και εδαφική απώλεια από τα πρανή. Η προσωρινή λειτουργία του αερισμού μέσω των φρεατίων και η «βίαιη» εξαγωγή του αερίου κατά την εγκατάσταση του καλύμματος, μπορούν να συντείνουν στην τοποθέτηση του καλύμματος. Μόλις γίνει η εγκατάσταση του τελικού καλύμματος, ο αέρας που εισάγεται πρέπει να είναι επαρκής ώστε να δημιουργεί αντίσταση στην συνεχώς αυξανόμενη πίεση του συσσωρευόμενου αερίου. Ο σχεδιαστής της εγκατάστασης πρέπει να συμπεριλάβει στο σχεδιασμό του την επίδραση της συσσωρευμένης πίεσης στην σταθερότητα για την περίπτωση που το σύστημα συλλογής πάψει να λειτουργεί για κάποιο διάστημα.

Σταθερότητα του ΧΥΤΑ

Η προσθήκη υγρασίας στα απορρίμματα προς ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας, αυξάνει το συνολικό βάρος τους επομένως και την πίεση στους πόρους. Το ζήτημα αυτό μπορεί να εκτιμηθεί και να επιλυθεί εύκολα με χρήση κάποιων στάνταρ γεωτεχνικών αναλύσεων (Maier, 1998). Στις αναλύσεις αυτές πρέπει να συμπεριλαμβάνονται και σεισμικές μελέτες.

Καθίζηση του ΧΥΤΑ

Ο ΧΥΤΑ που λειτουργεί σαν βιοαντιδραστήρας υφίσταται πιο άμεση και ολοκληρωτική καθίζηση απ' ότι ένας «ξηρός» αντιδραστήρας. Ο αυξημένος ρυθμός καθίζησης οφείλεται τόσο στον αυξημένο ρυθμό βιοαποικοδόμησης των στερεών αποβλήτων όσο και στην αυξημένη συμπίεση λόγω του μεγαλύτερου ειδικού βάρους των απορριμμάτων. Το φαινόμενο της καθίζησης, κατά το διάστημα λειτουργίας του ΧΥΤΑ μπορεί να επηρεάσει την επιφανειακή παροχέτευση, τους δρόμους, το σύστημα των σωλήνων συλλογής αερίου και το σύστημα ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων. Εξαιτίας του αυξημένου ρυθμού καθίζησης, μπορεί ο φορέας διαχείρισης να επωφεληθεί του κερδισμένου χώρου προτού τοποθετηθεί το τελικό κάλυμμα. Εναλλακτικά, σημαντικό όφελος μπορεί να προκύψει και από την καθυστέρηση της τοποθέτησης του τελικού καλύμματος και των εγκαταστάσεων βελτίωσης-αξιοποίησης του ΧΥΤΑ, καθώς η γρήγορη καθίζηση συντελεί στην ανάκτηση πολύτιμου χώρου. Επειδή η καθίζηση θα είναι πλήρης λίγο διάστημα μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ, αποφεύγεται το μακροχρόνιο κόστος συντήρησης και η πιθανότητα αέριων εκπομπών στο περιβάλλον.

6.7.2 Λειτουργίες

Ο ΧΥΤΑ-βιοαντιδραστήρας είναι ένα σύστημα επεξεργασίας αποβλήτων. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του απαιτείται περισσότερος έλεγχος της απόδοσής του απ' ότι σε ένα «ξηρό» ΧΥΤΑ. Η επιτυχής λειτουργία του βιοαντιδραστήρα εξαρτάται από τον έλεγχο και την παρακολούθηση των

βιολογικών, χημικών και υδρολογικών διεργασιών που πραγματοποιούνται στον ΧΥΤΑ. Τα προγράμματα διαχείρισης και συντήρησης που αφορούν την καθίζηση, το βιοαέριο και τα διασταλάζοντα υγρά μπορούν να μειωθούν στο ελάχιστο μετά το πέρας της λειτουργίας του ΧΥΤΑ, όπου τα απόβλητα θα έχουν πλέον σταθεροποιηθεί σε μεγάλο βαθμό.

Προεπεξεργασία ή διαχωρισμός απορριμμάτων

Οι διεργασίες στον αντιδραστήρα είναι πιο αποδοτικές όταν τα απορρίμματα περιέχουν μεγάλο ποσοστό οργανικών και μεγάλη ειδική επιφάνεια έκθεσης. Για το λόγο αυτό, οι λειτουργίες του βιοαντιδραστήρα επικεντρώνονται στον διαχωρισμό των αποβλήτων με σκοπό την αύξηση του οργανικού περιεχομένου και στον τεμαχισμό ή θρυμματισμό τους με σκοπό την αύξηση της ειδικής επιφάνειας έκθεσής τους. Ο διαχωρισμός μπορεί να περιλαμβάνει για παράδειγμα την απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων από τα αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ). Κάποιος υποτυπώδης τεμαχισμός μπορεί να επιτευχθεί με χρήση του εξοπλισμού του ΧΥΤΑ για το σκίσιμο των πλαστικών σάκων. Η μέθοδος του μηχανικού τεμαχισμού είναι αποδοτική στη μείωση του μεγέθους και στη διάνοιξη των σάκων, παρόλο που είναι μια έντονη, με μεγάλο βαθμό συντήρησης και υψηλού κόστους δραστηριότητα. Επίσης, με τον τεμαχισμό προκαλείται αύξηση της πυκνότητας μετά την εναπόθεσή τους στον ΧΥΤΑ και επομένως δυσχεραίνεται η μεταφορά της υγρασίας.

Διαρροή στραγγισμάτων

Η προσθήκη υγρών στα στερεά απόβλητα αυξάνει την πιθανότητα διαρροών, κάτι που πρέπει να αντιμετωπίζεται άμεσα. Τα στραγγίσματα δεν πρέπει να ρυπαίνουν τις επιφανειακές απορροές του ΧΥΤΑ. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται η παρακολούθηση του ΧΥΤΑ προς αποφυγή των διαρροών ή έλεγχό τους κατά την περίπτωση εμφάνισής τους. Κάποια μέτρα που μπορούν να ληφθούν είναι τα χαντάκια στα πρανή, οι επιφανειακοί αναβαθμοί και οι στεγανές αυλακώσεις που μειώνουν την διήθηση του νερού από την

επιφάνεια. Οι διαρροές μπορούν επίσης να περιοριστούν με τη σωστή διαχείριση του ρυθμού ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων, της ποσότητάς τους και του σημείου εφαρμογής τους.

Ημερήσιο και ενδιάμεσο κάλυμμα

Η χρήση του εδαφικού καλύμματος σε έναν βιοαντιδραστήρα απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Όταν για παράδειγμα είναι πιο διαπερατό απ' ό τι τα απόβλητα, τότε μπορεί να υπάρξουν διαρροές προς τα πρηνή εκεί όπου τα στραγγίσματα πρέπει να συλλέγονται. Αντιθέτως, ένα χαμηλής διαπερατότητας ημερήσιο κάλυμμα μπορεί να εμποδίσει την ενεργή διήθηση μεταξύ νερού και στραγγισμάτων. Μπορεί επίσης να εμποδίσει τη διανομή των στραγγισμάτων και τη ροή του αερίου προς τα συστήματα συλλογής. Κατά τη χρήση εδάφους χαμηλής διαπερατότητας, επιδιώκεται η μείωση της ικανότητάς του σαν φράγμα με τη δημιουργία τομών ή με μερική απομάκρυνσή του, πριν από την τοποθέτηση στερεών αποβλήτων πάνω από αυτό. Στο έδαφος χαμηλής διαπερατότητας που τοποθετείται εντός 15 m από τα πρηνή, πρέπει να δημιουργούνται αναβαθμοί ώστε τα στραγγίσματα να επιστρέφουν προς το κύριο τμήμα του αντιδραστήρα. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται οι διαρροές των διασταλαζόντων υγρών προς τα πρηνή. Υπάρχουν βέβαια και εναλλακτικού τύπου καλύμματα που δημιουργούν όφελος σε σύγκριση με το έδαφος.

Χρήση θρεπτικών και άλλων συστατικών

Οι απαιτήσεις σε θρεπτικά συνήθως καλύπτονται από τα συστατικά των απορριμμάτων (Barlaz et al, 1990), ενώ οι ερευνητές τονίζουν ότι η προσθήκη θρεπτικών και άλλων χημικών και βιολογικών πρόσθετων ενισχύουν την μικροβιακή δραστηριότητα. Η προσθήκη τέτοιων ουσιών δεν έχει επιχειρηθεί ακόμα στο πεδίο.

Το βέλτιστο pH για τους μεθανογενείς μικροοργανισμούς είναι περίπου από 6.8 - 7.4. Σε εργαστηριακά πειράματα έχει αποδειχτεί ότι η εξουδετέρωση των στραγγισμάτων με σκοπό τη διατήρηση του pH σε αυτό το εύρος,

βελτιώνει την παραγωγή του αερίου. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην τιμή του pH κατά τα πρώτα στάδια της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων. Η προσεκτική λειτουργία του βιοαντιδραστήρα αρχικά, μέσω της αργής εισαγωγής των υγρών ελαχιστοποιεί την ανάγκη για εξουδετέρωση.

6.7.3 Πρόγραμμα διαχείρισης βιοαντιδραστήρα

Είναι πολύ σημαντικό, οι διαχειριστές του βιοαντιδραστήρα να αναπτύξουν ένα λεπτομερές διαχειριστικό πλαίσιο που καθορίζει τους στόχους του εγχειρήματος. Οι στόχοι αυτοί αφορούν το σχεδιασμό, τη λειτουργία, τη συντήρηση, την εκπαίδευση του προσωπικού, την παρακολούθηση, τα πιθανά προβλήματα και άλλα. Όλα αυτά τα θέματα, πρέπει να αναλύονται πλήρως, προς ικανοποίηση των αρχών και του κοινού. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ο βιοαντιδραστήρας απορριμμάτων μπορεί να είναι μια βιώσιμη τεχνική λύση για τη διαχείριση των ΧΥΤΑ.

6.8 Πιθανοί φραγμοί

Η έρευνα ως τώρα και η περιορισμένη εμπειρία από την εφαρμογή του βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων παρέχουν βάσιμες αποδείξεις για την καλή απόδοσή του. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποια μη-τεχνικής φύσεως εμπόδια ως προς την εφαρμογή ενός τέτοιου σχεδίου. Τα κυριότερα είναι:

- Περιορισμένη ενημέρωση και αρνητική προκατάληψη.
- Έλλειψη δεδομένων απόδοσης.
- Περιορισμένη διαθεσιμότητα στοιχείων οικονομικής ανάλυσης συγκεκριμένων εφαρμογών.
- Ανεπαρκής εμπειρία ως προς τη βιωσιμότητα.
- Έλλειψη χρηματοδοτικής εμπειρίας.
- Εκτεταμένες απαιτήσεις χρόνου για την αδειοδότηση ενός σχεδίου.
- Αυξημένοι κανόνες, διατάξεις και περιορισμοί.

Είναι σαφές ότι η βελτίωση της τεχνικής γνώσης γύρω από τον βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων, μπορεί να οδηγήσει σε επίλυση πολλών θεμάτων μη-τεχνικής φύσεως.

Αυτή η μέθοδος διαχείρισης απορριμμάτων μπορεί να αποδώσει βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα οφέλη στο κοινωνικό σύνολο στον περιβαλλοντικό, θεσμικό, οικονομικό και κοινωνικό τομέα. Η επιλογή αυτή είναι άμεσο αποτέλεσμα της περιβαλλοντικής μηχανικής ως προς τη δημιουργία ενός ασφαλούς χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Παράλληλα, ενισχύει την σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων. Αποτελεί επομένως μια νέα δραστική λύση στη διαχείριση των στερεών αποβλήτων.

6.9 Φάσεις αποδόμησης των απορριμμάτων

Σε συμβατικούς ΧΥΤΑ, η βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων συμβαίνει σε πέντε χρονολογικές φάσεις (EPA, 2000; Waste Management, 2002):

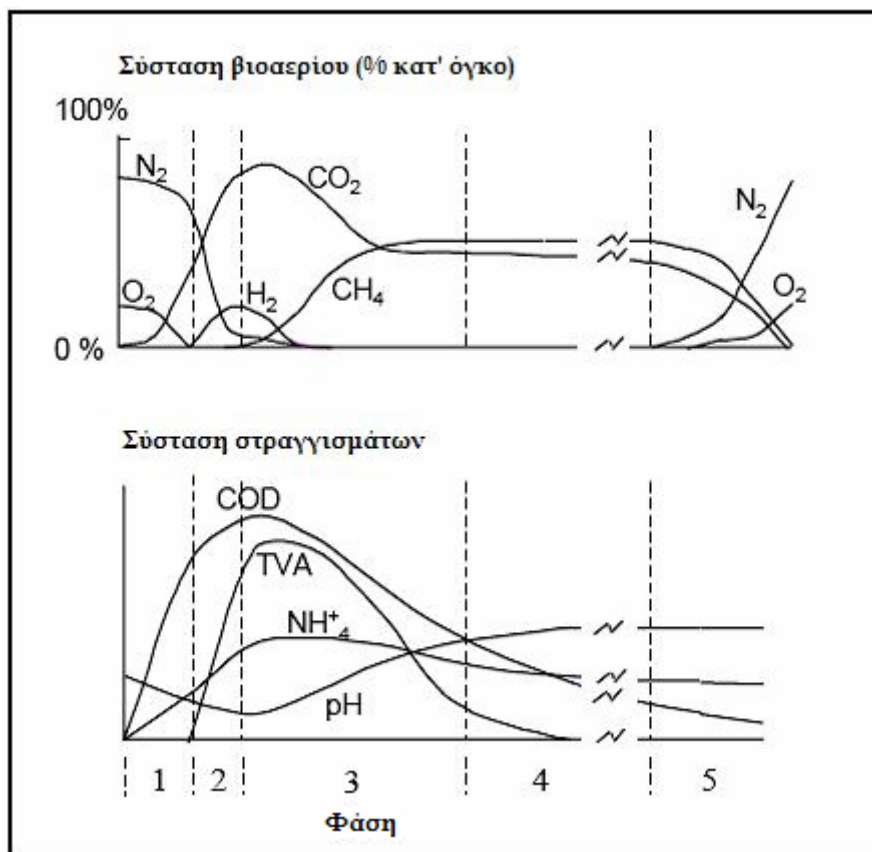
- Φάση I (αερόβιας αποδόμησης): εμφανίζεται αμέσως μετά την διάθεση των απορριμμάτων και με την παρουσία του οξυγόνου, όπου οι μικροοργανισμοί αποδομούν την οργανική ύλη σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και άλλα οργανικά προϊόντα μερικής διάσπασης. Η θερμοκρασία της μάζας των αποβλήτων αυξάνει εξαιτίας της βιολογικής δραστηριότητας (παραγωγή θερμότητας) και τα υψηλά επίπεδα CO₂ κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Η φάση της αερόβιας αποδόμησης διαρκεί από μερικές ώρες ως και μία εβδομάδα στους συμβατικούς ΧΥΤΑ.
- Φάση II (μεταβατική ή υδρολυτική φάση): αποτελεί το μεταβατικό στάδιο της αερόβιας προς την αναερόβια φάση. Καθώς το οξυγόνο εξαντλείται, αρχίζει να ενισχύεται η αναερόβια αποδόμηση των απορριμμάτων και να κυριαρχεί (Qasim and Chiang, 1994). Η αντίδραση μεταξύ του νερού και του διοξειδίου που παράγονται από την προηγούμενη φάση δημιουργεί μεγάλες ποσότητες πτητικών λιπιδίων οξέων όπως το οξικό οξύ. Τα οξέα αυτά μειώνουν το pH, κάτι

που ενισχύει την διάλυση ανόργανων ουσιών, που μαζί με τις υψηλές συγκεντρώσεις πτητικών οξέων δημιουργούν μεγάλη ιοντική ισχύ. Τα υψηλά επίπεδα των πτητικών οξέων συντελούν επίσης στην αύξηση του χημικώς απαιτούμενου οξυγόνου (COD) που συναντάται συνήθως σε αυτήν την φάση. Επίσης, το αέριο άζωτο μειώνεται, η κυτταρίνη αρχίζει να διασπάται, εμφανίζεται το μεθάνιο (CH_4) και τα επίπεδα του διοξειδίου του άνθρακα μειώνονται. Σε αυτό το στάδιο δημιουργούνται γενικά στραγγίσματα υψηλής ισχύος.

- Φάση III (όξινη αναερόβια φάση ή οξυγενής φάση): στη φάση αυτή δρουν οι μικροοργανισμοί που δραστηριοποιήθηκαν μετά την κατανάλωση του οξυγόνου. Παράγονται οργανικά οξέα σε μεγάλες συγκεντρώσεις, αμμωνία, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα ενώ ταυτόχρονα παράγεται θερμότητα. Το pH μειώνεται εξαιτίας του πολλαπλασιασμού των οξυγενών μικροοργανισμών. Σε μερικές περιπτώσεις, το χαμηλό pH του περιβάλλοντος κινητοποιεί κάποια μέταλλα από τα απορρίμματα προς τα στραγγίσματα. Η δεύτερη και τρίτη φάση διαρκούν από έναν έως έξι μήνες στους συμβατικούς ΧΥΤΑ.
- Φάση IV (αναερόβια φάση μεθανογένεσης): σε αυτό το στάδιο, ο πληθυσμός των μεθανογενών βακτηρίων αυξάνεται και κυριαρχεί. Εξαιτίας αυτού, όλο και περισσότερο οξικό οξύ μετατρέπεται σε μεθάνιο, αυξάνοντας το pH (τα μεθανογενή βακτήρια είναι αυστηρά αναερόβια και αναπτύσσονται σε ουδέτερο pH (6.6 – 7.3) (Qasim and Chiang, 1994). Το δυναμικό οξειδοαναγωγής μειώνεται και τα νιτρικά ανάγονται σε αμμωνία. Η συγκέντρωση του μεθανίου είναι περίπου 50-60% κατ' όγκο και το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται επίσης σε μεγάλες ποσότητες. Η φάση αυτή διαρκεί από 8 έως 40 και άνω χρόνια στους συμβατικούς ΧΥΤΑ.
- Φάση V (μετα-μεθανογενής φάση): στη φάση αυτή μειώνεται η παραγωγή του μεθανίου και των άλλων αερίων του ΧΥΤΑ, σταθεροποιούνται οι συγκεντρώσεις των συστατικών των

στραγγισμάτων, ενώ η βιοαποικοδόμηση των εναπομεινάντων υλικών είναι πολύ αργή.

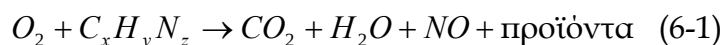
Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ΧΥΤΑ όσον αφορά τη σύσταση των στραγγισμάτων και του βιοαερίου, σύμφωνα με τον Yuen (1999).



Σχήμα 6-5: Θεωρητικές καμπύλες της εξέλιξης της σύστασης του βιοαερίου και των στραγγισμάτων (Πηγή: Yuen, 1999)

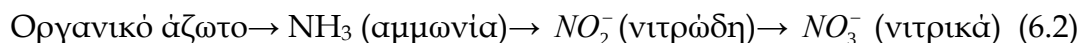
6.10 Βιοαποικοδόμηση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Η βιοαποικοδόμηση των αστικών στερεών απορριμμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε κάτω από αερόβιες (παρουσία ελεύθερου οξυγόνου) είτε κάτω από αναερόβιες (απουσία ελεύθερου οξυγόνου) συνθήκες. Η βασική εξίσωση αερόβιας αποδόμησης σύνθετων οργανικών ενώσεων της μορφής $C_xH_yN_z$ είναι (Peirce et al., 1997):

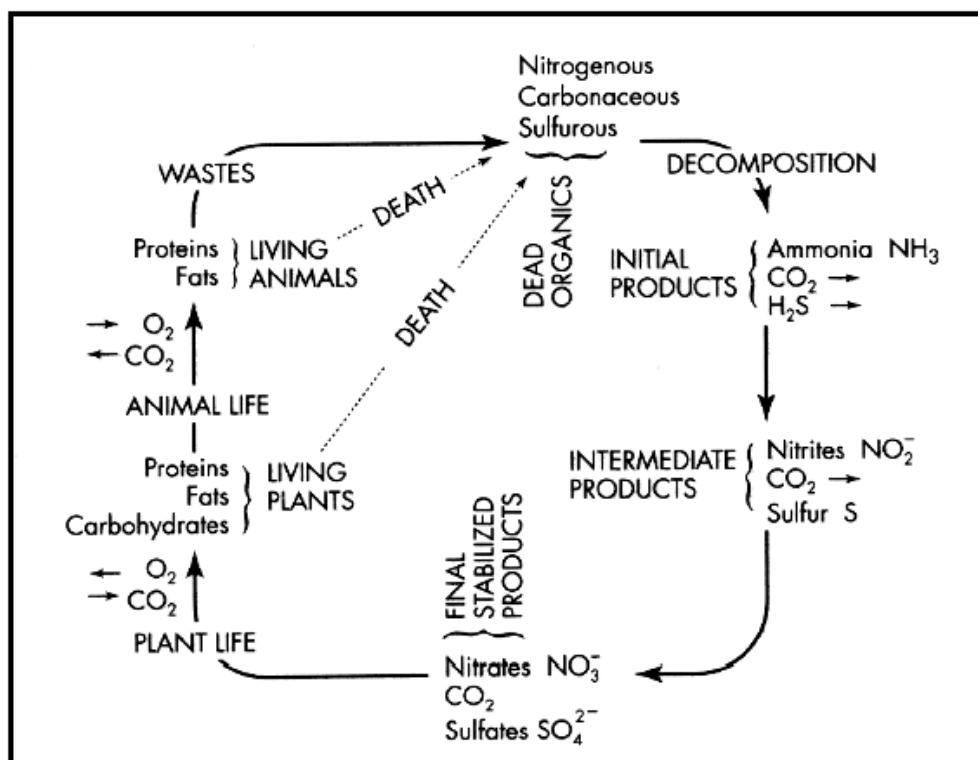


Όπως φαίνεται από την εξίσωση (6-1) το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό είναι δύο από τα τελικά προϊόντα της αερόβιας αποδόμησης. Και τα δύο είναι σταθερά, χαμηλής ενέργειας και χρησιμοποιούνται από τα φυτά στην

φωτοσύνθεση. Το οργανικό άζωτο οξειδώνεται τελικά σε νιτρικά ιόντα, όπως φαίνεται στην εξίσωση (6-2):



Εξαιτίας αυτής της διαδοχής, το άζωτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης ποιότητας νερών. Στο Σχήμα 6-6 παρουσιάζονται οι αερόβιοι κύκλοι του αζώτου, του άνθρακα και του θείου.



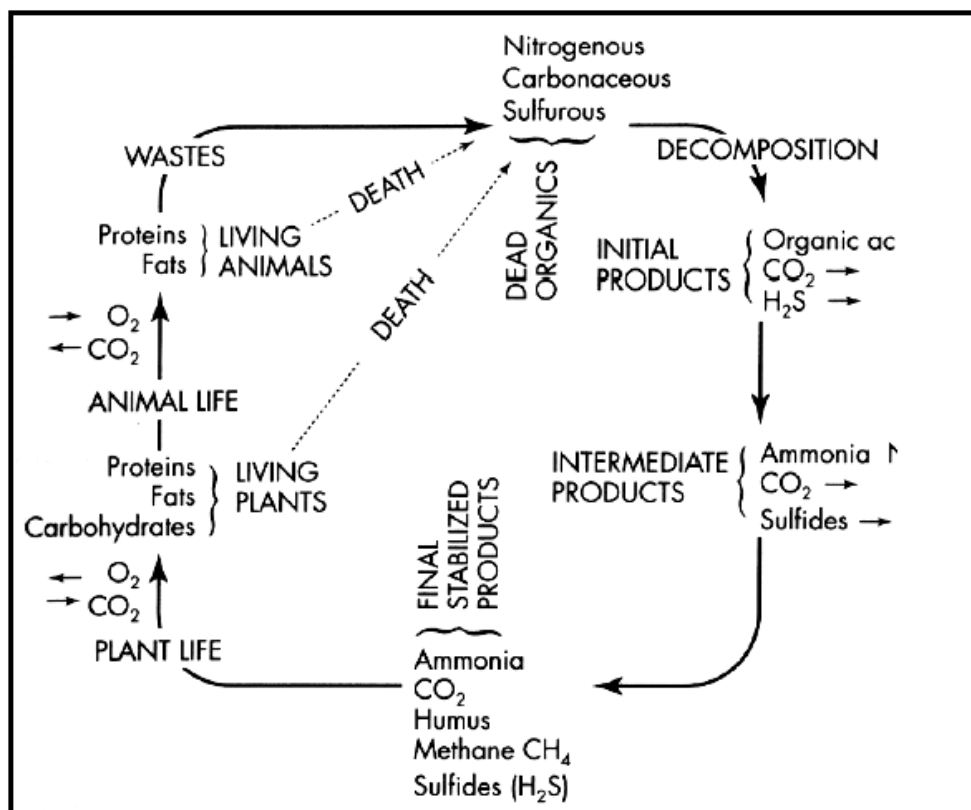
Σχήμα 6-6: Αερόβιοι κύκλοι αζώτου, άνθρακα και θείου (Peirce et al., 1997)

Η αναερόβια αποδόμηση πραγματοποιείται από διαφορετικό είδος μικροοργανισμών για τους οποίους το οξυγόνο είναι τοξικό. Η βασική εξίσωση της αναερόβιας αποδόμησης είναι:



Πολλά από τα τελικά προϊόντα της αναερόβιας αποδόμησης είναι βιολογικά ασταθή. Για παράδειγμα, το μεθάνιο, ένα υψηλής ενέργειας αέριο, είναι σταθερό μεν, αλλά βιοαποικοδομείται εύκολα. Η αμμωνία οξειδώνεται, ενώ το θείο διασπάται αναερόβια σε υδρόθειο (H_2S). Στο Σχήμα 6-7

παριστάνεται η αναερόβια αποδόμηση. Σημειώνεται ότι, το αριστερό μέρος του κύκλου, αυτό της φωτοσύνθεσης, είναι όμοιο με αυτό στον αερόβιο κύκλο.



Σχήμα 6-7: Αναερόβιοι κύκλοι αζώτου, άνθρακα και θείου (Peirce et al., 1997)

6.11 Παράγοντες που επηρεάζουν την αποδόμηση των στερεών αποβλήτων

Σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την βιοαποικοδόμηση των στερεών αποβλήτων, αρκετές έρευνες παρουσιάζουν τις βέλτιστες συνθήκες αλλά και τα προβλήματα που ενδέχεται να παρουσιαστούν. Στον Πίνακα 6-1 που ακολουθεί, παρατίθεται μια περίληψη των παραγόντων αυτών (Yuen, 2001).

Παράγοντες επιρροής	Κριτήρια/Σχόλια
Υγρασία	Βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία: 60% και άνω (σε υγρή βάση)
Οξυγόνο	Ενισχύει την δραστηριότητα των αερόβιων βακτηρίων, εμποδίζει των αναερόβιων
pH	Βέλτιστο pH για μεθανογένεση: 6-8
Αλκαλικότητα	Βέλτιστη αλκαλικότητα για μεθανογένεση: 2000 mg/l
	Μέγιστη συγκέντρωση οργανικών οξέων για μεθανογένεση: 3000 mg/l
	Μέγιστος λόγος οξικού οξέως/αλκαλικότητας για μεθανογένεση: 0.8
Θερμοκρασία	Βέλτιστη θερμοκρασία για μεθανογένεση: 34-41 °C
Υδρογόνο	Μερική πίεση οξυγόνου για οξυγένεση: κάτω από 10^{-6} atm
Θρεπτικά	Γενικά αρκούν στους περισσότερους ΧΥΤΑ
Θειικά άλατα	Η αύξησή τους συντελεί στην μείωση της μεθανογένεσης
Περιοριστικοί παράγοντες	Συγκεντρώσεις κατιόντων που λειτουργούν περιοριστικά (mg/l):
	Νάτριο: 3500-5500
	Κάλιο: 2500-4500
	Ασβέστιο: 2500-4500
	Μαγνήσιο: 1000-1500
	Αμμωνία: 1500-3000
	Βαρέα μέταλλα: Καμία σημαντική επίδραση
	Οργανικές ενώσεις: Μόνο σε μεγάλες συγκεντρώσεις

Πίνακας 6-1: Παράγοντες που επιδρούν στην βιοαποικοδόμηση των στερεών αποβλήτων

6.12 Τεχνικές σταθεροποίησης στερεών αποβλήτων

Μιας άλλης μορφής ταξινόμηση μπορεί να γίνει με βάση τη διεργασία που χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση των απορριμμάτων (Yuen, 2001). Οι τεχνικές αυτές κατατάσσονται ως εξής:

- Τεμαχισμός των αποβλήτων: Ο τεμαχισμός των αποβλήτων θεωρητικά μπορεί να συντελέσει στην ομογενοποίηση λόγω της μείωσης του μεγέθους και της ανάμιξης, λόγω της αύξησης της ειδικής επιφάνειας των αποβλήτων και λόγω της αύξησης της διαπερατότητάς τους. Αντιθέτως, ο τεμαχισμός μπορεί να επιδράσει αρνητικά μέσω της ενίσχυσης της υδρόλυσης και του σχηματισμού οξέων. Με τον τρόπο

αυτό εμποδίζεται η μεθανογένεση. Ο τεμαχισμός είναι ευεργετικός μόνο με ταυτόχρονο έλεγχο του pH.

- Έλεγχος του pH: Όποτε το pH στα απόβλητα γίνεται μικρό εξαιτίας της παραγωγής οξέων, εμποδίζεται η ανάπτυξη των μεθανογενών βακτηρίων. Οι έρευνες αποδεικνύουν πάντως πως η προσθήκη ενός μέσου εξουδετέρωσης έχει θετική επίδραση στη διαδικασία της σταθεροποίησης των αποβλήτων.
- Προσθήκη λάσπης (ενεργού ιλύος): Θεωρητικά, η προσθήκη λάσπης μπορεί να ενισχύσει την δυνατότητα βιοαποικοδόμησης με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας, των θρεπτικών και των μικροοργανισμών στη μάζα των αποβλήτων. Παρόλα αυτά, οι έρευνες έχουν δείξει ότι η προσθήκη λάσπης κατά την περίοδο της μεθανογένεσης δεν έχει κανένα όφελος και πολλές φορές επιδρά και αρνητικά, όταν το pH της είναι χαμηλό (Leckie and Pacey, 1979).
- Προσθήκη ενζύμων: Η προσθήκη ενζύμων που παράγονται από βακτήρια ζύμωσης μπορεί να ελέγξει την διεργασία της υδρόλυσης σε ΧΥΤΑ που λειτουργούν υπό αναερόβιες συνθήκες. Αρκετοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι η προσθήκη ενζύμων εντείνει τις συνθήκες μεθανογένεσης και οξυγένησης.
- Εισαγωγή αέρα/οξυγόνου: Η διεργασία αυτή περιλαμβάνει την ελεγχόμενη προσθήκη υγρασίας και αέρα εντός της μάζας των αποβλήτων μέσω ενός δικτύου οριζόντιων και κατακόρυφων φρεατίων. Η διαδικασία είναι λίγο σχετική με την υγρή κομποστοποίηση στην οποία τα συστατικά διασπώνται με τη χρήση αέρα, υγρασίας και της αυξημένης θερμοκρασίας που δημιουργείται από τη βιοαποικοδόμηση.
- Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων: Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μέθοδο σταθεροποίησης των στερεών αποβλήτων. Η ανακυκλοφορία αφορά επεξεργασμένα και μη απόβλητα. Η μέθοδος αυτή ενισχύει την βιοαποικοδόμηση μέσω της δημιουργίας βέλτιστων συνθηκών υγρασίας ενώ αποτελεί και έναν αποδοτικό μηχανισμό μεταφοράς

μικροβίων, υποστρώματος και θρεπτικών. Επίσης, πραγματοποιείται αραίωση της συγκέντρωσης των περιοριστικών παραγόντων.

6.13 Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων

Τα αστικά απορρίμματα περιέχουν βιολογικά υλικά και χημικά συστατικά εν διαλύσει. Τα στραγγίσματα που δημιουργούνται από αυτά χαρακτηρίζονται από μεγάλες συγκεντρώσεις ρύπων σε σύγκριση με αστικά υγρά απόβλητα ή πολλά βιομηχανικά απόβλητα. Αρχικά, δεν θεωρούνταν επικίνδυνα, διότι ήταν λίγες οι περιπτώσεις στις οποίες είχαν διαπιστωθεί προβλήματα ρύπανσης εδάφους ή υπογείων υδάτων. Σήμερα βέβαια, η άποψη αυτή έχει αλλάξει.

Επειδή η αποδέσμευση των ρύπων από τα απορρίμματα σχετίζεται με τις διεργασίες αποδόμησης, τα στραγγίσματα αποτελούν έναν καλό δείκτη του βαθμού σταθεροποίησης των στερεών αποβλήτων. Τα χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων ποικίλουν, ενώ οι παράγοντες που επιδρούν στην ποιότητά τους είναι: η σύσταση, το βάθος, ο βαθμός συμπίεσης, η ηλικία του ΧΥΤΑ, ο βαθμός σταθεροποίησης, ο ρυθμός διήθησης, η περιεχόμενη υγρασία, η θερμοκρασία και ο σχεδιασμός και λειτουργία του ΧΥΤΑ.

Στον Πίνακα 6-2 παρουσιάζονται κάποιες παράμετροι σύστασης των στραγγισμάτων ΑΣΑ (Tchobanoglous et al., 1993). Στον Πίνακα 6-3 παρουσιάζεται η σύσταση των στραγγισμάτων σαν συνάρτηση του βαθμού σταθεροποίησης, ενώ στον Πίνακα 6-4 η σύσταση για συμβατικούς ΧΥΤΑ και για ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων (Reinhart and Townsend, 1998). Στον Πίνακα 6-5 παρουσιάζεται η σύσταση σαν συνάρτηση του βαθμού σταθεροποίησης των απορριμμάτων για συμβατικούς ΧΥΤΑ και για ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων (Reinhart and Townsend, 1998).

Parameter	Value (mg/L) ^(a)		
	New landfill (less than 2 years)		Mature landfill (greater than 10 years)
	Range ^(b)	Typical ^(c)	Range ^(b)
BOD ₅ (5-day biochemical oxygen demand)	2,000 – 30,000	10,000	100-200
TOC (total organic carbon)	1,500 – 20,000	6,000	80 – 160
COD (chemical oxygen demand)	3,000 – 60,000	18,000	100 – 500
TSS (total suspended solids)	200 – 2,000	500	100 – 400
Organic nitrogen	10 – 800	200	80 – 120
Ammonia nitrogen	10 – 800	200	20 – 40
Nitrate	5 – 40	25	5 – 10
Total phosphorus	5 – 100	30	5 – 10
Ortho phosphorus	4 – 80	20	4 – 8
Alkalinity as CaCO ₃	1,000 – 10,000	3,000	200 – 1,000
pH	4.5 – 7.5	6	6.6 – 7.5
Total hardness as CaCO ₃	300 – 10,000	3,500	200 – 500
Calcium	200 – 3,000	1,000	100 – 400
Magnesium	50 – 1,500	250	50 – 200
Potassium	200 – 1,000	300	50 – 400
Sodium	200 – 2,500	500	100 – 200
Chloride	200 – 3,000	500	100 – 400
Sulfate	50 – 1,000	300	20 – 50
Total iron	50 – 1,200	60	20 – 200

Πίνακας 6-2: Σύσταση των στραγγισμάτων αστικών στερεών αποβλήτων (Πηγή: Tchobanoglous et al., 1993)

Parameter	Phase II Transition	Phase III Acid Anaerobic	Phase IV Methanogenic Anaerobic	Phase V Post-Methanogenic
BOD (mg/L)	100 – 10,000	1,000 – 57,000	600 – 3,400	4 – 120
COD (mg/L)	480 – 18,000	1,500 – 71,000	580 – 9,760	31 – 900
TVA (mg/L)	100 – 3,000	3,000 – 18,800	250 – 4,000	0
BOD/COD	0.23 – 0.87	0.4 – 0.8	0.17 – 0.64	0.02 – 0.13
Ammonia Nitrogen (mg/L)	120 – 125	2 – 1,030	6 – 430	6 – 430
pH	6.7	4.7 – 7.7	6.3 – 8.8	7.1 – 8.8
Conductivity ($\mu\Omega/\text{cm}$)	2,450 – 3,310	1,600 -17,100	2,900 – 7,700	1,400 – 4,500

Πίνακας 6-3: Σύσταση των στραγγισμάτων σε συνάρτηση με το βαθμό σταθεροποίησης του ΧΥΤΑ (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998).

Parameter	Conventional Landfill	Landfill with Leachate Recirculation
BOD (mg/L)	20 – 40,000	12 – 28,000
COD (mg/L)	500 – 60,000	20 – 34,560
Iron (mg/L)	20 – 2,100	4 – 1,095
Ammonia (mg/L)	30 – 3,000	6 – 1,850
Chloride (mg/L)	100 – 5,000	9 – 1,884
Zinc (mg/L)	6 – 370	0.1 – 66

Πίνακας 6-4: Σύσταση των στραγγισμάτων σε ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και χωρίς (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998).

Parameter	Phase II Transition		Phase III Acid Anaerobic		Phase IV Methanogenic Anaerobic		Phase V Post-Methanogenic	
	Conventional	With leachate recirculation	Conventional	With leachate recirculation	Conventional	With leachate recirculation	Conventional	With leachate recirculation
BOD (mg/L)	100-10,000	0-6,893	1,000-57,000	0-28,000	600-3,400	100-10,000	4-120	100
COD (mg/L)	480-18,000	20-20,000	1,500-71,000	11,600-34,550	580-9,760	1,800-17,000	31-900	770-1,000
TVA (mg/L)	100-3,000	200-2,700	3,000-18,800	1,-30,730	250-4,000	0-3,900	0	-
BOD/COD	0.23-0.87	0.1-0.98	0.4-0.8	0.45-0.95	0.17-0.64	0.05-0.8	0.02-0.13	0.05-0.08
Ammonia Nitrogen (mg/L)	120-125	76-125	2-1,030	0-1,800	6-430	32-1,850	6-430	420-580
pH	6.7	5.4-8.1	4.7-7.7	5.7-7.4	6.3-8.8	5.9-8.6	7.1-8.8	7.4-8.3
Conductivity ($\mu\Omega/\text{cm}$)	2,450-3,310	2,200-8,000	1,600-17,100	10,000-18,000	2,900-7,700	4,200-16,000	1,400-4,500	-

Πίνακας 6-5: Σύσταση των στραγγισμάτων σαν συνάρτηση του βαθμού σταθεροποίησης του ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και χωρίς (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998).

6.14 Καθίζηση των αστικών στερεών αποβλήτων

Η καθίζηση των αστικών στερεών αποβλήτων πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Αυτά είναι: το στάδιο της αρχικής συμπίεσης, της κύριας συμπίεσης και της δευτερεύουσας συμπίεσης (Morris and Woods, 1990). Η αρχική συμπίεση συμβαίνει με την εκφόρτωση των απορριμμάτων στον χώρο διάθεσης. Αυτό συντελεί σε μια αρχική συμπίεση των κενών διαστημάτων και προκαλεί μια παραμόρφωση ως ένα βαθμό. Ο Bowels (1998) πρότείνει μια σχέση για την ελαστικότητα των απορριμμάτων: $E_s = \frac{\Delta q \cdot H_0}{S_i}$ όπου E_s είναι ο συντελεστής ελαστικότητας, Δq η εφαρμοζόμενη πίεση, H_0 το αρχικό ύψος των απορριμμάτων και S_i το ύψος των απορριμμάτων κάθε στιγμή. Η κύρια συμπίεση είναι μεγάλη ένα μήνα περίπου μετά την τοποθέτηση του φορτίου στον χώρο διάθεσης. Αμέσως μετά, η επίδραση της δευτερεύουσας συμπίεσης αυξάνεται και πλησιάζει την επίδραση της κύριας. Η δευτερεύουσα συμπίεση είναι αποτέλεσμα της βιολογικής αποδόμησης, αλλά ανεξάρτητη της εφαρμοζόμενης πίεσης στα απόβλητα. Συμβάλει κατά 25% περίπου στο φαινόμενο της καθίζησης των απορριμμάτων.

Στους βιοαντιδραστήρες απορριμμάτων έχει αναφερθεί ότι η συνολική καθίζηση είναι της τάξης του 30%, πιθανόν και 50% σε διάστημα 2-7 χρόνια,

συντελώντας έτσι σε μια σημαντική μείωση του κόστους και αύξηση της χωρητικότητας του χώρου διάθεσης.

6.14.1 Μοντέλα μακροπρόθεσμης καθίζησης στερεών αποβλήτων

Η δευτερεύουσα καθίζηση είναι αποτέλεσμα της φυσικής παραμόρφωσης και των βιολογικών διεργασιών των απορριμμάτων. Ο Sowers (1973) ήταν ο πρώτος που μοντελοποίησε την δευτερεύουσα συμπίεση, χρησιμοποιώντας μια παραλλαγή της θεωρίας του Buisman για τη συμπίεση του εδάφους. Γίνεται η υπόθεση ότι η δευτερεύουσα συμπίεση είναι γραμμική συνάρτηση του λογαρίθμου του χρόνου, που έχει προσδιοριστεί από μετρήσεις πεδίου. Ως σήμερα υπάρχουν τέσσερα μοντέλα πρόβλεψης της καθίζησης των αστικών απορριμμάτων.

α) Λογαριθμικό μοντέλο (Yen and Scanlon, 1975): Ο βαθμός συμπίεσης (m) εκφράζεται σαν συνάρτηση των παραμέτρων συμπίεσης.

$$m = \frac{1}{H_0} \frac{dS}{dt} = c - d \log t \quad (6-4)$$

όπου m είναι ο βαθμός συμπίεσης (T^{-1}), S η καθίζηση (L), H_0 το αρχικό ύψος του ΧΥΤΑ, c και d οι παράμετροι συμπίεσης (T^{-1}). Οι Sohn και Lee (1994) ολοκλήρωσαν τη σχέση αυτή δίνοντας την καθίζηση με το χρόνο:

$$S = H_0 \int m \cdot dt = H_0 \left(ct - \frac{d}{\ln 10} (t \ln t - t) \right)_{t_0}^{t_1} \quad (6-5), \quad \text{όπου } t_0 \text{ η ηλικία των}$$

απορριμμάτων στην αρχή του διαστήματος προσομοίωσης και t_1 η ηλικία τους στο τέλος αυτής της περιόδου. Για να προκύψει όμως θετική τιμή καθίζησης πρέπει $t_1 \leq 10^{c/d}$. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το γεγονός της δύσκολης απεικόνισης των αποτελεσμάτων σε γράφημα.

β) Ρεολογικό μοντέλο (Edil, 1990): Πρόκειται για το ρεολογικό μοντέλο των Gibson και Lo (1961) για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης καθίζησης:

$$\frac{S}{H_0} = \varepsilon(t) = \Delta\sigma \left(a + b \left(1 - e^{-(\lambda/b)t} \right) \right) \quad (6-6), \text{ όπου } \varepsilon(t): \text{ η ένταση, } \Delta\sigma: \text{ η τάση}$$

συμπίεσης (L^2M), a : η παράμετρος της κύριας συμπίεσης (L^2M^{-1}), λ/b : ο βαθμός δευτεροβάθμιας συμπίεσης (T^{-1}). Κάνοντας τη γραφική παράσταση του $\log_{10}(\Delta\varepsilon(t)/\Delta t)$ ως προς $\log_{10}(t)$ παίρνουμε την κλίση της γραμμής που είναι ίση με $-0.434(\lambda/b)$ και το σημείο τομής $\log_{10}(\Delta\sigma)$. Θεωρώντας σαν t_k το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης της κύριας συμπίεσης παίρνουμε:

$$a = \frac{\varepsilon(t_k)}{\Delta\sigma} - b \left(1 - e^{-(\lambda/b)t_k} \right) \quad (6-7). \text{ Το μοντέλο υποθέτει ότι η δευτερεύουσα}$$

καθίζηση είναι γραμμική συνάρτηση του λογαρίθμου του χρόνου. Ο υπολογισμός του χρονικού διαστήματος της κύριας συμπίεσης (t_k) είναι δύσκολος, καθώς συμβαίνει ταυτόχρονα με τη δευτερεύουσα συμπίεση. Πρέπει επίσης να ελεγχθεί η ευαισθησία του μοντέλου ως προς την παράμετρο t_k .

γ) Μοντέλο ενισχυμένης μεταβολής (Edil, 1990): Ο νόμος της ενισχυμένης μεταβολής εφαρμόζεται ως εξής:

$$\frac{S}{H_0} = \varepsilon(t) = \Delta\sigma m \left(t / t_r \right)^n \quad (6-8), \text{ όπου } m: \text{ συμπιεστότητα (από βιβλιογραφία) σε}$$

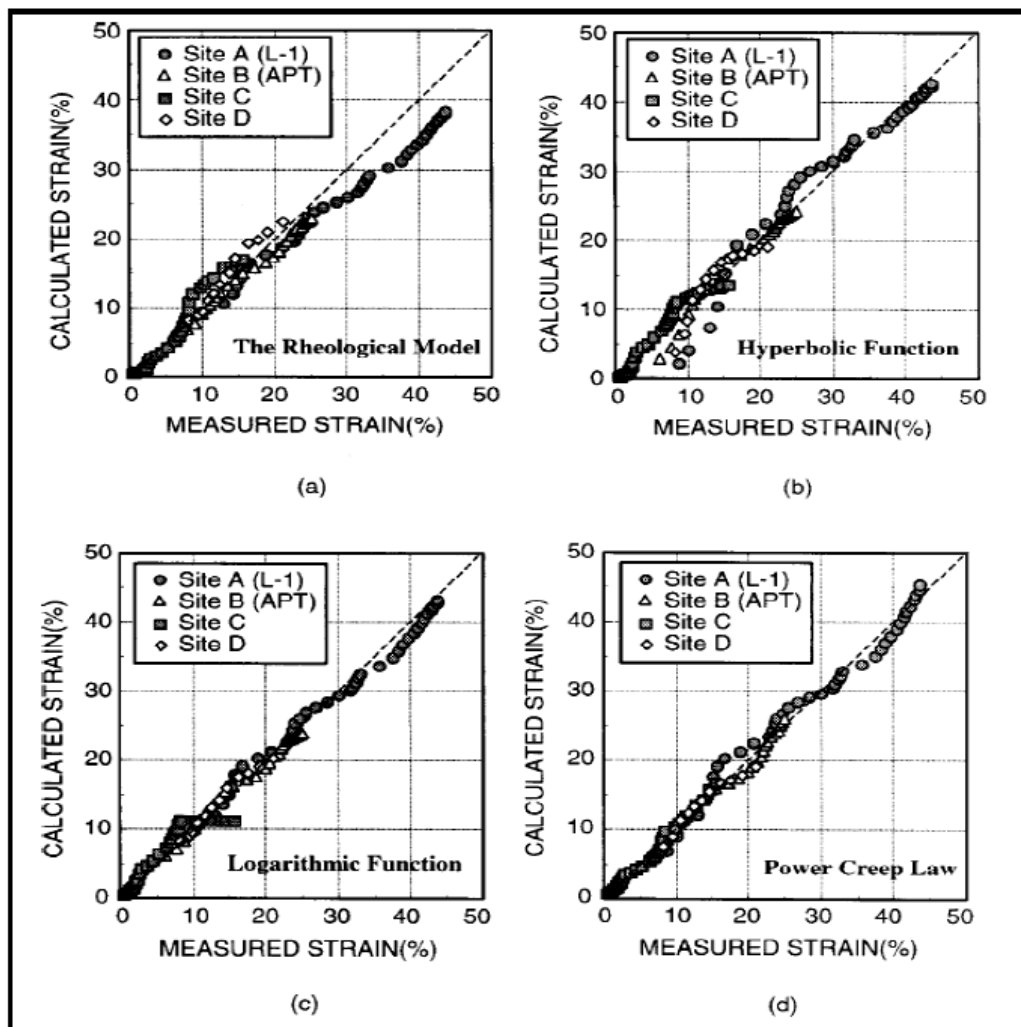
μονάδες (L^2M^{-1}), n : ο βαθμός συμπίεσης. Η συνάρτηση ενισχυμένης μεταβολής έχει βρεθεί ότι προσεγγίζει τα παρατηρούμενα δεδομένα σε 35 ανεξάρτητα σημεία ελέγχου σε 7 ΧΥΤΑ. Στη μελέτη αυτή συνδυάστηκαν επίσης τα δεδομένα με σκοπό την ανάπτυξη ενός μοντέλου χρονοσειρών που να ταιριάζει με όλες τις παρατηρήσεις που έγιναν στο πεδίο. Αποδείχτηκε ότι το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της καθίζησης σε έναν ΧΥΤΑ, με χρήση δεδομένων από μια άλλη περιοχή με παρόμοια χαρακτηριστικά καθίζησης.

δ) Μοντέλο υπερβολικής συνάρτησης: Χρησιμοποιήθηκε πρώτα από τον Ling

et al. (1998): $\frac{S}{H_0} = \varepsilon(t) = \frac{t}{\frac{H_0}{\rho_0} + \frac{H_0}{S_{ult}} t}$ και συνεπώς: $\frac{t}{\varepsilon(t)} = \frac{H_0}{\rho_0} + \frac{H_0}{S_{ult}} t$ (6-9), όπου

S_{ult} : η μέγιστη καθίζηση σε άπειρο χρόνο. Το κυριότερο μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι για μικρά χρονικά διαστήματα οι τιμές που δίνει είναι αρνητικές.

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε χρησιμοποιώντας αυτά τα μοντέλα φαίνονται στο Σχήμα 6-8 που ακολουθεί. Είναι εύκολο να διακρίνει κανείς ότι μόνο το ρεολογικό μοντέλο φαίνεται να υπο-προβλέπει την καθίζηση στους ΧΥΤΑ, ενώ τα υπόλοιπα τρία (λογαριθμικό, ενισχυμένης μεταβολής και υπερβολικό) παράγουν αρκετά καλές προσεγγίσεις.



Σχήμα 6-8: Προβλεπόμενες εντάσεις από 4 μοντέλα, (Πηγή: Coelho, 2003).

6.15 Μοντελοποίηση της βιοαποικοδόμησης των στερεών αποβλήτων

Όσον αφορά τη μαθηματική προσομοίωση της βιοαποικοδόμησης των στερεών αποβλήτων, ένα από τα καλύτερα μοντέλα που υπάρχουν είναι το TOUGH2. Στις παραγράφους που ακολουθούν, δίνονται με σύντομο τρόπο και για καθαρά εκπαιδευτικούς σκοπούς (χωρίς να γίνει εφαρμογή του μοντέλου στην παρούσα μελέτη), οι βασικές αρχές της μοντελοποίησης ενός ΧΥΤΑ βασιζόμενοι στην βιβλιογραφία του TOUGH2.

6.15.1 Εισαγωγικά

Η βιοαποικοδόμηση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) είναι μια πολύπλοκη και ευμετάβλητη διεργασία. Προκειμένου να μπορέσει αυτή η διεργασία να μοντελοποιηθεί και να προσομοιωθεί σε κάποιο λογισμικό πακέτο, πρέπει να γίνουν κάποιες απλουστεύσεις. Όσον αφορά την προσέγγιση που γίνεται στο μοντέλο T2LBM, περιλαμβάνεται λεπτομερής μοντελοποίηση της ροής και της μεταφοράς των αέριων και υγρών φάσεων και απλούστευση στην περιγραφή της διεργασίας της βιοαποικοδόμησης και της παραγωγής αερίου. Συγκεκριμένα, το T2LBM περιγράφει την αποικοδόμηση ενός μόνο υποστρώματος (οξικό οξύ, CH_3COOH) σαν αντιπροσωπευτικό όλων των βιοαποικοδομήσιμων κλασμάτων των ΑΣΑ και ιδίως των σακχάρων, των λιπιδίων οξέων, των λιπιδίων και των πρωτεϊνών. Η προσέγγιση αυτή γίνεται καθώς υποτίθεται ότι από τις αντιδράσεις υδρόλυσης που συμβαίνουν παράγεται οξικό οξύ. Με τον τρόπο αυτό, το βάρος του μοντέλου πέφτει στο τελευταίο τμήμα της βιοαποικοδόμησης, την παραγωγή αερίου. Τα πρώτα στάδια της διεργασίας που περιλαμβάνουν τη δημιουργία του οξικού οξέως μπορούν φαινομενικά να μοντελοποιηθούν από τον ίδιο το χρήστη μέσω του καθορισμού διαφόρων αρχικών συγκεντρώσεων και ρυθμών παραγωγής του οξικού οξέως. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που περιλαμβάνονται στο T2LBM. Το μοντέλο αυτό δεν έχει εφαρμοστεί κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής αλλά παρουσιάζεται για εκπαιδευτικούς λόγους.

6.15.2 Χημικά συστατικά

Το T2LBM περιλαμβάνει έξι χημικά συστατικά που κατανέμονται μεταξύ δύο φάσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 6-6. Το νερό με ή χωρίς διαλυμένο οξικό οξύ (HAc) είναι το κύριο συστατικό της υδατικής φάσης, με ελάχιστες ποσότητες των αέριων συστατικών διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), μεθανίου (CH₄), οξυγόνου (O₂) και αζώτου (N₂). Η ποσότητα των αερίων ελέγχεται από τη διαλυτότητα που καθορίζεται από το νόμο του Henry. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα συστατικά είναι παρόντα στην αέρια φάση εκτός από το οξικό οξύ, πάλι εξαιτίας της διαλυτότητας.

Το άζωτο και το οξυγόνο μαζί δημιουργούν τον ξηρό αέρα στο μοντέλο. Παρόλα αυτά, τα δύο αυτά συστατικά λαμβάνονται χωριστά έτσι ώστε να μπορεί να μοντελοποιηθεί η συγκέντρωση του οξυγόνου, καθώς η τιμή της στο υγρό διάλυμα καθορίζει αν οι συνθήκες είναι αερόβιες ή αναερόβιες. Με αυτόν τον τρόπο, το οξυγόνο μπορεί να καταναλωθεί στις αερόβιες διεργασίες ή να εισαχθεί μαζί με το άζωτο στον αντιδραστήρα με το ρεύμα αέρα προσομοιώνοντας έτσι τη διατήρηση των αερόβιων συνθηκών.

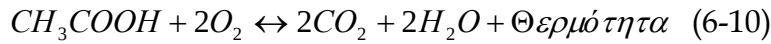
Η αέρια φάση αποτελείται από οξυγόνο, άζωτο, υδρατμούς, CO₂ και μεθάνιο αν έχουν πραγματοποιηθεί αντιδράσεις βιοαποικοδόμησης. Εκτός από τα ισοζύγια μάζας που πρέπει να λυθούν και για τα έξι συστατικά, υπάρχει μια εξίσωση ενέργειας που λύνεται για τη μελέτη της θερμικής επίδρασης των εξώθερμων αντιδράσεων βιοαποικοδόμησης.

Phases (β)	Components (κ)					
1 – gas (g)	1 – H ₂ O	2 –	3 –CO ₂	4 –CH ₄	5 –O ₂	6 –N ₂
2 – aqueous (w)	1 – H ₂ O	2 – HAc	3 –CO ₂	4 –CH ₄	5 –O ₂	6 – N ₂

Πίνακας 6-6: Φάσεις και συστατικά στο T2LBM (Πηγή: Oldenburg, 2001)

6.15.3 Αντιδράσεις βιοαποικοδόμησης

Κάτω από αερόβιες συνθήκες το οξικό οξύ (HAc) δρα σαν υπόστρωμα στην υδατική φάση σε μια αντίδραση όπου το οξυγόνο καταναλώνεται για να παραχθεί διοξείδιο του άνθρακα, νερό και θερμότητα σύμφωνα με την εξίσωση:



(Jacobsen, 1992). Επακόλουθο αυτής της αντίδρασης είναι ο σχηματισμός της αερόβιας βιομάζας (ΒΑ) καθώς συνεχίζεται η αντίδραση. Η εξίσωση (6-10) περιγράφει την αντίδραση που καθορίζει το ρυθμό της οξείδωσης στο T2LBM υποθέτοντας ότι τα θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο και ο φώσφορος βρίσκονται σε περίσσεια και δεν περιορίζουν την αποδόμηση του υποστρώματος. Παρόλα αυτά, εκτός από τη συγκέντρωση του υποστρώματος και του οξυγόνου, πολλοί είναι εκείνοι οι παράγοντες που ελέγχουν το ρυθμό της αντίδρασης όπως η θερμοκρασία, η ποσότητα της βιομάζας και η απομάκρυνση του CO₂. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνονται στο μοντέλο.

Κάτω από αναερόβιες συνθήκες το οξικό οξύ βιοδιασπάται σε διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και θερμότητα σύμφωνα με την αντίδραση:



(Poron and Power, 1999). Όπως και πριν, επακόλουθο αυτής της αντίδρασης (6-11) είναι η παραγωγή αναερόβιας βιομάζας (ΒΝ). Πολλοί επίσης είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό της αναερόβιας αποδόμησης.

6.15.4 Κινητική των αντιδράσεων βιοαποικοδόμησης

Γενικά, ο ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος από τους μικροοργανισμούς μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση κινητικής του Monod ως εξής:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \left(\frac{dB}{dt} + \delta \cdot B \right) = -\frac{1}{Y} (\mu_B B + \delta \cdot B) \quad (6-12)$$

με:

$$\mu_B = \mu_{\max, B} f_B^T \frac{S}{K_{S, B} + S} - \delta \quad (6-13)$$

όπου: S = συγκέντρωση υποστρώματος (οξικού οξέως), (kg υποστρ./kg υδατικής φάσης),

Y = συντελεστής απόδοσης (kg μικροοργανισμών/kg υποστρώματος),

B = συγκέντρωση μικροοργανισμών (kg μικροοργ./kg υδατικής φάσης),

δ = ρυθμός θανάτου μικροοργανισμών (s⁻¹),

μ_B = ρυθμός ανάπτυξης μικροοργανισμών (s^{-1}),

$\mu_{\max,B}$ = μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης μικροοργανισμών (s^{-1}),

f_B^T = συντελεστής ανάπτυξης εξαρτώμενος από θερμοκρασία T
(αδιάστατος),

$K_{S,B}$ = σταθερά κορεσμού (kg υποστρ./ kg υδατικής φάσης)

(Kaiser, 1996; Poron and Power, 1999). Η εξίσωση Monod είναι ανάλογη με τη σχέση Michaelis-Menden και εκφράζει το γεγονός ότι ο ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος ελέγχεται από τη συγκέντρωση του υποστρώματος, τη συγκέντρωση των μικροοργανισμών και τη θερμοκρασία μέσω της συνάρτησης f_B^T , του συντελεστή Y και του ρυθμού θανάτου των μικροοργανισμών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η συνολική μεταβολή στη βιομάζα οφείλεται τόσο στην κατανάλωση υποστρώματος όσο και στο ρυθμό θανάτου. Παρά το θετικό πρόσημο στην εξίσωση (6-12), ο ρυθμός θανάτου (δ_B) χρησιμοποιείται για την αποφυγή των επιδράσεων της θνησιμότητας στο ρυθμό μεταβολής της βιομάζας. Στόχος είναι η άμεση συσχέτιση της μεταβολής της βιομάζας μόνο με τη μεταβολή της μάζας του υποστρώματος. Η εξίσωση αυτή κινητικής θεωρείται σαν κύρια εξίσωση του μοντέλου T2LBM που περιγράφει την βιοαποικοδόμηση (βλ. εξισώσεις 6-10 και 6-11). Η βιομάζα παρακολουθείται στο T2LBM, αλλά δεν αποτελεί μέρος των ισοζυγίων μάζας που επιλύονται για κάθε κύριο συστατικό του Πίνακα 6-6.

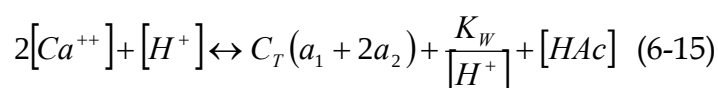
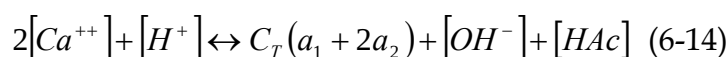
6.15.5 Παραγωγή και μεταφορά θερμότητας

Οι αντιδράσεις βιοαποικοδόμησης (εξισώσεις 6-10 και 6-11) είναι εξώθερμες. Η καθαρή ποσότητα θερμότητας που παράγεται από αυτές τις αντιδράσεις έχει υπολογιστεί και είναι της τάξης των $7.0 \cdot 10^6 \frac{J}{kgHAc}$ για τις αερόβιες συνθήκες (Kaiser, 1996) και $2.7 \cdot 10^5 \frac{J}{kgHAc}$ για τις αναερόβιες (Poron and Power, 1999). Να σημειωθεί ότι η αναερόβια αντίδραση είναι λιγότερο εξώθερμη από την αερόβια η οποία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά

τη θερμοκρασία του συστήματος. Πέρα από το να συμπεριληφθούν αυτά τα στοιχεία στο ισοζύγιο ενέργειας, δεν προστέθηκαν άλλες διεργασίες θερμικής μεταφοράς καθώς ο αλγόριθμος TOUGH2 μοντελοποιεί τη συμμεταφορά αέριων και υγρών φάσεων καθώς και τις μεταβολές της ενθαλπίας που σχετίζονται με την συμπύκνωση του νερού και την εξάτμιση.

6.15.6 Υπολογισμός του pH

Το pH της υδατικής φάσης υπολογίζεται υποθέτοντας ότι εντός των ΑΣΑ υπάρχει ρυθμιστική ουσία όπως το ανθρακικό ασβέστιο (Stumm και Morgan, 1996). Σε αυτήν την περίπτωση η αντίδραση διαχωρισμού είναι :



όπου το μόνο άγνωστο μέγεθος είναι το $[H^+]$ σε μονάδες mol/l και η επίλυσή της γίνεται με τη μέθοδο Newton-Raphson.

6.15.7 Συμπίεση Απορριμμάτων

Καθώς τα ΑΣΑ βιοδιασπώνται στους ΧΥΤΑ πραγματοποιείται μια συμπίεση εξαιτίας του επιπρόσθετου φορτίου που τοποθετείται στο πάνω μέρος τους, της μείωσης της αντίστασης των κλασμάτων εξαιτίας της ύγρανσης και της βιοαποικοδόμησης και της απώλειας μάζας λόγω αποδόμησης και διασταλαζόντων υγρών. Η συμπίεση είναι μεγάλου ενδιαφέροντος στους διαχειριστές των ΧΥΤΑ επειδή δίνεται η δυνατότητα της επιπλέον εναπόθεσης απορριμμάτων σε έναν δεδομένο όγκο.

Παρόλα αυτά, η συμπίεση μειώνει την διαπερατότητα των εδαφών και επομένως εμποδίζει την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων και την παραγωγή και μεταφορά αερίου. Για λόγους απλότητας, στο T2LBM χρησιμοποιείται ένα απλό μοντέλο για τη συμπίεση θεωρώντας ότι ακολουθεί μια γραμμική συνάρτηση του χρόνου και συμβαίνει ομοιόμορφα στην

κατακόρυφη διεύθυνση (z). Ο συνολικός λόγος συμπίκνωσης κατά το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης καθορίζεται από τον χρήστη. Μοντελοποιείται επίσης και η μείωση του πορώδους ενώ η μείωση της διαπερατότητας είναι προαιρετική για το χρήστη.

6.15.8 Παρατηρούμενες ιδιότητες

Οι διεργασίες που παρουσιάστηκαν προκαλούν μεταβολές που είναι αντιληπτές. Για παράδειγμα, οι αντιδράσεις παραγωγής αερίου περιλαμβάνουν μεταφορά μάζας από τα απορρίμματα στην αέρια φάση που μεταφράζεται σε αύξηση της παραγωγής CH_4 και CO_2 και μείωση της μάζας των ΑΣΑ. Επίσης, ο όγκος των απορριμμάτων μειώνεται λόγω της συμπίεσης. Σε ιδιότητες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, το pH και η σύσταση του αερίου και των στραγγισμάτων παρατηρείται επίσης μεταβολή εξαιτίας της βιοαποικοδόμησης.

7.0 ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

Μέχρι σήμερα, έχουν γίνει αρκετές έρευνες σε εργαστηριακή κλίμακα στις οποίες μελετάται η επίδραση των βιοαντιδραστήρων στην ποιότητα των στραγγισμάτων, στη σταθεροποίηση των αποβλήτων και στην παραγωγή βιοαερίου. Κάποιες από τις παραμέτρους που έχουν αποδεδειγμένη επίδραση στην σταθεροποίηση των απορριμμάτων και είναι ευκολότερος ο χειρισμός τους σε εργαστηριακή κλίμακα είναι η υγρασία, το pH, η θερμοκρασία, τα θρεπτικά συστατικά και η παρουσία των μικροοργανισμών. Μερικές από αυτές τις έρευνες παρατίθενται στις παραγράφους που ακολουθούν με χρονολογική σειρά.

7.1 Pohland (1975)

Ο Pohland μελέτησε την επίδραση της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων στην σταθεροποίηση των αποβλήτων, χρησιμοποιώντας τέσσερις στήλες διαμέτρου 0.9 m, που περιείχαν 3 m συμπιεσμένων αστικών στερεών αποβλήτων. Η πρώτη ήταν η στήλη ελέγχου (χωρίς ανακυκλοφορία). Στη δεύτερη γίνονταν απλά ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Στην τρίτη στήλη γίνονταν ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και έλεγχος του pH με χρήση NaOH (διατήρηση του pH κοντά στο 7). Στην τέταρτη στήλη γίνονταν ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, προσθήκη NaOH και προσθήκη λάσπης (μικροοργανισμοί). Εξ' αρχής, προστέθηκε νερό για να παραχθούν διασταλάζοντα υγρά. Το πείραμα είχε διάρκεια 1100 ημέρες και οι αναλύσεις γίνονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Στη στήλη ελέγχου, το COD αυξήθηκε πολύ γρήγορα στα 19000 mg/l σε 200 μέρες και σταδιακά μειώθηκε στα 4000 mg/l μετά από 1000 μέρες. Τα πτητικά οξέα (Total Volatile Acids) σε περίπου 200 μέρες πήραν τη μέγιστη τιμή (10000 mg/l) και στη συνέχεια η συγκέντρωσή τους έπεσε στα 2000 mg/l. Το pH κυμαίνονταν μεταξύ 5.0 – 6.5 καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Στη δεύτερη στήλη, το COD έφτασε τα 11000 mg/l πιο νωρίς (100 days), στη συνέχεια ακολούθησε σταδιακή μείωση μέχρι τα 250 mg/l (500^η ημέρα) όπου και παρέμεινε σταθερή. Τα πτητικά οξέα σε 200 μέρες έφτασαν στη

μέγιστή τους συγκέντρωση τα 6000 mg/l. Στη συνέχεια ακολούθησε μείωση μέχρι τα 200 mg/l την 700^η ημέρα του πειράματος. Το pH ήταν κοντά στο 5 τις πρώτες 200 μέρες ενώ αυξήθηκε στο 7 περίπου μετά από 500 μέρες.

Η τρίτη στήλη παρουσίασε ακρότατα στη συγκέντρωση του COD και των πτητικών οξέων με τιμές 10000 mg/l και 5000 mg/l αντίστοιχα, μετά από 150 μέρες. Στη συνέχεια, ακολούθησε μείωση των τιμών πιο γρήγορα απ' ό,τι στην δεύτερη στήλη, στα 500 mg/l για το COD και 250 mg/l για τα πτητικά οξέα μετά από 200 μέρες. Το pH διατηρήθηκε ουδέτερο, καθώς προσθέτονταν ρυθμιστικό διάλυμα. Στην τέταρτη στήλη δεν παρατηρήθηκε επιτάχυνση στο ρυθμό αποδόμησης λόγω της προσθήκης της λάσπης. Τα αποτελέσματα ήταν ίδια με αυτά της τρίτης στήλης.

Αυτό ήταν από τα πρώτα πειράματα που έγιναν στο οποίο αποδείχτηκε ότι η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων επιταχύνει την διεργασία της αποδόμησης, καθώς τα επίπεδα του COD και των πτητικών οξέων μειώθηκαν ταχύτερα απ' ό,τι στο «ξηρό κελί».

7.2 Leckie and Pacey (1979)

Οι Leckie and Pacey μελέτησαν την ποιότητα των στραγγισμάτων σε τρεις διαφορετικές πειραματικές συνθήκες που περιελάμβαναν την ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, την συνεχή ροή νερού και την προσθήκη λάσπης από μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Η έρευνα έδειξε ότι η εφαρμογή της μεθόδου της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων και της συνεχούς έκπλυσης των στερεών αποβλήτων με νερό, επιτάχυναν την διεργασία της βιοαποικοδόμησης. Παρόλα αυτά, οι συγγραφείς απέκλεισαν αυτήν την τεχνική από την εφαρμογή της σε πλήρη κλίμακα, καθώς η συνεχής έκπλυση των αποβλήτων με νερό δημιουργούσε μεγάλες ποσότητες στραγγισμάτων.

Η προσθήκη λάσπης δεν είχε καμία θετική επίδραση στον ρυθμό αποδόμησης των απορριμμάτων, ενώ παρουσιάστηκε αρνητική επίδραση στην ανάπτυξη της μεθανογενούς φάσης. Η προστιθέμενη λάσπη είχε χαμηλό

pH, καταστέλλοντας έτσι τις δυνατότητες ουδετεροποίησης του συστήματος, εξαιτίας της επιτάχυνσης των όξινων φάσεων.

7.3 Tittlebaum (1982)

Η έρευνα του Tittlebaum πραγματοποιήθηκε με χρήση τεσσάρων κελιών διαμέτρου 0.9 m στα οποία περιέχονταν 2.4 m συμπιεσμένων απορριμμάτων. Το πρώτο κελί ήταν το κελί ελέγχου με ατεμάχιστα απόβλητα. Στο δεύτερο κελί περιέχονταν τεμαχισμένα απόβλητα με ταυτόχρονο έλεγχο του pH (με χρήση NaOH). Το τρίτο κελί λειτουργούσε με όμοιο τρόπο, αλλά με ατεμάχιστα απόβλητα. Το τέταρτο κελί ήταν όμοιο με το τρίτο, αλλά με έλεγχο των θρεπτικών (προσθήκη αζώτου και φωσφόρου). Σε όλα τα κελιά εκτός από το πρώτο, προσθέτονταν νερό για τη γρήγορη δημιουργία διασταλαζόντων υγρών και με ρυθμό που αντιστοιχούσε στο ημερήσιο ποσοστό βροχόπτωσης. Τα στραγγίσματα αναλύονταν τακτικά για περίπου 500 ημέρες.

Στην έρευνα αποδείχτηκε ότι ο τεμαχισμός των απορριμμάτων και ο έλεγχος των θρεπτικών συστατικών δεν συνέτειναν στην επιτάχυνση της βιοαποικοδόμησης. Επίσης, στο σύστημα της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων με ταυτόχρονο έλεγχο του pH μειώθηκε σημαντικά το COD, το BOD και ο ολικός οργανικός άνθρακας, ενώ αυξήθηκε σημαντικά ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης.

7.4 Robinson et al. (1982 – αναδημοσίευση από τον Coelho, 2003)

Στην έρευνα που πραγματοποίησε ο Robinson, χρησιμοποίησε την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων σε δύο κελιά που λειτουργούσαν υπό διαφορετικές συνθήκες. Στο πρώτο κελί γίνονταν μόνο ανακυκλοφορία των διασταλαζόντων. Στο δεύτερο κελί, γινόταν αερισμός στα στραγγίσματα προτού αυτά ανακυκλοφορήσουν στο σύστημα και προσθέτονταν φωσφόρος σαν θρεπτικό συστατικό.

Στην έρευνα αποδείχτηκε ότι στο πρώτο κελί, το COD, η αμμωνία και οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων ήταν υψηλές αρχικά αλλά στην συνέχεια σταθεροποιήθηκαν σε λογικά επίπεδα εντός 12 μηνών. Στο δεύτερο κελί, οι

συγκεντρώσεις ήταν γενικά χαμηλότερες αλλά παρουσίαζαν μεγάλες διακυμάνσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα.

7.5 Hartz and Ham (1983)

Οι Hartz και Ham μελέτησαν το ρυθμό παραγωγής μεθανίου σαν συνάρτηση της περιεχόμενης υγρασίας. Αποδείχτηκε ότι για τιμές υγρασίας κάτω από 10%, δεν παράγονταν μεθάνιο. Η χωρητικότητα του πεδίου ως προς την περιεχόμενη υγρασία, έφτασε το 40%, ενώ σε επίπεδα χαμηλότερα από αυτό δεν ήταν δυνατή η δημιουργία ελεύθερης υγρασίας προς ανακυκλοφορία. Στην έρευνα επίσης αποδείχτηκε ότι η συνεχής ροή υγρασίας στο σύστημα δημιουργεί περίπου 10 φορές υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής μεθανίου απ' ό τι σε συνθήκες αδράνειας.

7.6 Mata-Alvarez and Martinez-Viturtia (1986)

Στην έρευνα αυτή, καταγράφηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στην βιοαποικοδόμηση των στερεών αποβλήτων, με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, τεμαχισμό των αποβλήτων και έλεγχο του pH. Πραγματοποιήθηκαν πέντε τεστ, με τη θερμοκρασία να κυμαίνεται μεταξύ 30 και 46 °C. Μερικά από τα συμπεράσματα της έρευνας ήταν:

- Οι βέλτιστες θερμοκρασίες για το μέγιστο ρυθμό αποδόμησης των αποβλήτων ήταν από 34-38 °C.
- Οι μέγιστοι ρυθμοί παραγωγής αερίου παρατηρήθηκαν σε pH 7.5.
- Η ρύθμιση του pH ήταν πολύ σημαντική στην έναρξη της μεθανογενούς διεργασίας.
- Οι συγγραφείς λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του πειράματος και παραβάλλοντάς τις με τις πραγματικές, εκτίμησαν ότι η βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων σε έναν ΧΥΤΑ διαρκεί περίπου δύο χρόνια.

7.7 Stegmann and Spendlin (1986 – αναδημοσίευση από τον Coelho, 2003)

Οι Stegmann και Spendlin παρουσίασαν την χρησιμότητα των τεστ σε λυσιμέτρα στην έρευνα του οφέλους από την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, της ανακυκλοφορίας με ταυτόχρονο έλεγχο του pH, της ανάμιξης των αποβλήτων με κομπόστ πριν την τελική τους διάθεση και την προσθήκη λάσπης από μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Στην έρευνα αυτή αποδείχτηκε η θετική επίδραση της ανάμιξης των αποβλήτων με κομπόστ, στην μείωση του δυναμικού των στραγγισμάτων.

7.8 Kinman et al. (1987)

Στην έρευνα αυτή, δημιουργήθηκαν δεκαέξι κελιά που λειτουργούσαν υπό διαφορετικές συνθήκες, με σκοπό την παρακολούθηση της παραγωγής αερίου. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν: η ροή της υγρασίας, η περιεχόμενη υγρασία, η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, η προσθήκη ρυθμιστικού διαλύματος, η προσθήκη θρεπτικών, η προσθήκη λάσπης από αναερόβια χώνευση και η θερμοκρασία.

Ένα από τα πιο σημαντικά συμπεράσματα είναι ότι η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων από μόνη της πολλές φορές αρκεί για την υπέρ της δέουσας ενίσχυση της όξινης φάσης, επηρεάζοντας αρνητικά τη φάση μεθανογένεσης. Ρυθμίζοντας το pH και φέρνοντας το κελί σε πιο ουδέτερες συνθήκες, ενισχύεται η παραγωγή του μεθανίου με ταυτόχρονη μείωση του δυναμικού των στραγγισμάτων, σύμφωνα με τους συγγραφείς.

7.9 Barlaz et al. (1987)

Στο συγκεκριμένο πείραμα, μελετήθηκε η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων ταυτόχρονα με: έλεγχο του pH, προσθήκη οξικού άλατος, προσθήκη παλιών αποδομημένων αποβλήτων, προσθήκη αερόβια χωνευμένης λάσπης και χρήση εδαφικού καλύμματος.

Κατά την εφαρμογή της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων με ταυτόχρονο έλεγχο του pH, παράχθηκε μεγάλη ποσότητα μεθανίου σε σύγκριση με τις άλλες συνθήκες του πειράματος. Αντιθέτως, δεν

παρατηρήθηκε καμία θετική επίδραση στα κελιά που προστέθηκε το οξικό άλας και σε αυτά που προστέθηκε η λάσπη.

Η χρήση των παλαιών αποδομημένων αποβλήτων ενίσχυσε την παραγωγή του μεθανίου. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, τα παλιά απόβλητα λειτουργούν σαν καλό έδαφος ανάπτυξης των αναερόβιων βακτηρίων.

Η χρήση του εδαφικού καλύμματος δεν ανέστειλε την παραγωγή του μεθανίου. Εδώ, υπονοείται ότι το εδαφικό κάλυμμα δεν είναι η μόνη πηγή των μεθανογενών βακτηρίων όπως πίστευαν μέχρι τότε οι ερευνητές.

7.10 Leuschner (1989)

Στην έρευνα αυτή, μελετήθηκαν τα οφέλη από την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων με χρήση έξι λυσίμετρων που λειτουργούσαν υπό διαφορετικές συνθήκες: 1) χωρίς ανακυκλοφορία, 2) μόνο ανακυκλοφορία, 3) ανακυκλοφορία με έλεγχο του pH, 4) ανακυκλοφορία με έλεγχο pH και προσθήκη θρεπτικών, 5) ανακυκλοφορία με έλεγχο του pH, προσθήκη θρεπτικών και αναερόβια χωνευμένης λάσπης και 6) ανακυκλοφορία με έλεγχο του pH, προσθήκη θρεπτικών και λάσπης από σιπτική δεξαμενή.

Στην μελέτη έγινε σύγκριση μεταξύ των λυσίμετρων με ανακυκλοφορία και χωρίς ανακυκλοφορία. Αποδείχτηκε ότι με την ανακυκλοφορία ενισχύθηκε η υδρόλυση και η ζύμωση των οξέων, αλλά όχι και η μεθανογένεση. Ο συγγραφέας επεσήμανε ότι με τη φυσική χωρητική ικανότητα των αποβλήτων ήταν αδύνατο να αντιμετωπιστεί η πτώση του pH. Εφαρμόστηκε και ένα μαθηματικό μοντέλο που προέβλεπε ότι στο κελί ελέγχου απαιτούνταν 19.3 χρόνια για την σταθεροποίηση των απορριμμάτων κατά 80%. Στα κελιά με ανακυκλοφορία ο αντίστοιχος χρόνος ήταν 10.2 χρόνια.

Στο λυσίμετρο με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και έλεγχο του pH, παρουσιάστηκε ταχύτατη παραγωγή μεθανίου. Το χρονικό διάστημα που υπολογίστηκε για βιοαποικοδόμηση κατά 80% ήταν 4.2 χρόνια.

Επίσης, στα λυσίμετρα με προσθήκη θρεπτικών αλλά και σε αυτά με προσθήκη θρεπτικών και αναερόβια χωνευμένης λάσπης, παρουσιάστηκαν πολύ καλά αποτελέσματα ως προς την επιτάχυνση της αποδόμησης των

απορριμμάτων. Συγκεκριμένα, το 80% της βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων υπολογίστηκε στα 7.8 χρόνια και 3.2 χρόνια αντίστοιχα.

Το λυσίμετρο στο οποίο προστέθηκε λάσπη από σηπτική δεξαμενή είχε πολύ χαμηλή απόδοση, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι αυτή η τεχνική δεν είναι κατάλληλη για την ενίσχυση της αποδόμησης των απορριμμάτων εξαιτίας του χαμηλού pH.

7.11 Doedens and Cord-Landwehr (1989)

Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα δοκιμαστικά κυλινδρικά κελιά, διαμέτρου 1.5 m που περιείχαν 1.35 m συμπιεσμένων και τεμαχισμένων στερεών αποβλήτων. Η αρχική περιεχόμενη υγρασία ήταν 24-31%, ενώ όλα τα κελιά ήταν αεροστεγή, ελεγχόμενης θερμοκρασίας (35 °C) και με σύστημα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων.

Στο πρώτο κελί εισάγονταν νερό βροχής με ρυθμό 660 mm/yr και σε όλα τα υπόλοιπα 330 mm/yr. Στο πρώτο κελί γίνονταν ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, το δεύτερο ήταν το κελί ελέγχου (χωρίς ανακυκλοφορία), στο τρίτο γίνονταν ανακυκλοφορία αλλά με το μισό ρυθμό και το τέταρτο αρχικά έφτασε στο όριο της χωρητικής του ικανότητας με στραγγίσματα από σταθεροποιημένο ΧΥΤΑ και στη συνέχεια ανακυκλοφόρησε νερό βροχής και τα παραγόμενα στραγγίσματα.

Το πρώτο κελί παρουσίασε ταχεία πτώση των τιμών του COD και τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις από οποιοδήποτε άλλο κελί. Το δεύτερο κελί (κελί ελέγχου) χρειάστηκε το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την πτώση των τιμών και είχε τις υψηλότερες συγκεντρώσεις COD. Στο τρίτο και τέταρτο κελί, οι τελικές συγκεντρώσεις του COD ήταν ίδιες μεταξύ τους, ενώ ήταν πιο υψηλές από αυτές στο πρώτο κελί και πιο χαμηλές από του δεύτερου.

7.12 Otieno (1989 – αναδημοσίευση από τον Coelho, 2003)

Η έρευνα του Otieno επικεντρώθηκε στην επίδραση της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων για διαφορετικού είδους απορρίμματα και υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα λυσίμετρα,

διαμέτρου 0.5 m στα οποία τοποθετήθηκαν διαφορετικοί τύποι αποβλήτων με διαφορετικές πυκνότητες.

Στο πρώτο λυσίμετρο τοποθετήθηκαν φρέσκα απορρίμματα με περιεχόμενη υγρασία 61% και πυκνότητα 383 kg/m³. Στο δεύτερο λυσίμετρο τοποθετήθηκαν ίδιου τύπου απορρίμματα και ίδιας υγρασίας με του πρώτου, αλλά με πυκνότητα 418 kg/m³ που λειτουργούσε υπό συνθήκες κορεσμού. Στο τρίτο λυσίμετρο τοποθετήθηκαν τεμαχισμένα απόβλητα με υγρασία στο 44% και πυκνότητα στα 306 kg/m³. Στο τέταρτο κελί τοποθετήθηκαν παλαιά απορρίμματα υγρασίας 85% και πυκνότητας 550 kg/m³.

Τα κυριότερα συμπεράσματα ήταν: 1) με τον τεμαχισμό αυξάνεται ο ρυθμός αποδόμησης, 2) η χαμηλή πυκνότητα επιδρά θετικά στον ρυθμό αποδόμησης και 3) οι συνθήκες κορεσμού δεν επιδρούν θετικά στην αποδόμηση των αποβλήτων ενώ αυξάνουν και την ισχύ τους.

7.13 Pohland et al. (1992-αναδημοσίευση από Reinhart and Townsend, 1998)

Στην έρευνα αυτή, εξετάστηκε η επίδραση της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων αλλά και της απλής διοχέτευσής τους σε μερικούς ανόργανους και οργανικούς ρύπους που διατίθενται μαζί με τεμαχισμένα απορρίμματα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν 10 στήλες διαμέτρου 0.9 m και ύψους 3 m. Τα χαρακτηριστικά κάθε στήλης φαίνονται στον Πίνακα 7-

1. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από το πείραμα αυτό είναι:

- Οι οργανικοί ρύποι επηρέασαν αρνητικά την διαδικασία σταθεροποίησης των αποβλήτων στις στήλες με ανακυκλοφορία και την παρεμπόδισαν πλήρως στις στήλες απλής διοχέτευσης (μονού περάσματος).
- Σε όλες τις στήλες υπήρχε η δυνατότητα της βιοαποικοδόμησης ακόμα και υπό την παρουσία βαρέων μετάλλων. Παρόλα αυτά, οι στήλες με ανακυκλοφορία παρουσίασαν καλύτερη χωρητικότητα.
- Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων συνέτεινε στην επαρκή μετατροπή πολλών οργανικών συστατικών σε αέριο, που σε άλλες συνθήκες θα είχαν εκπλυθεί.

Column	Operation	Initial Loading Height (cm)	Compact Density (kg/m ³)	Inorganic Pollutant Added ^(a)	Organic Pollutant Added ^(b)
1	Recirculation	29	313	None	None
2	Single pass	30	301	None	None
3	Single pass	29	309	None	Yes
4	Single pass	28	327	Low	Yes
5	Single pass	30	305	Medium	Yes
6	Recirculation	28	317	None	Yes
7	Recirculation	29	309	Low	Yes
8	Single pass	30	305	High	Yes
9	Recirculation	29	313	Medium	Yes
10	Recirculation	31	293	High	Yes

Πίνακας 7-1: Χαρακτηριστικά φόρτισης των στηλών (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998)

7.14 Woelders et al. (1993 – αναδημοσίευση από τον Coelho, 2003)

Στην έρευνα αυτή μελετήθηκε η επίδραση της διήθησης του νερού και του ρυθμού ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στο οργανικό κλάσμα αστικών στερεών αποβλήτων. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις δοκιμαστικές στήλες. Στην πρώτη στήλη χρησιμοποιήθηκε νερό που τροφοδοτούσε το σύστημα με ρυθμό ίσο με τον φυσικό. Η δεύτερη στήλη λειτουργούσε με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων με ρυθμό διπλάσιο από αυτόν της πρώτης στήλης. Στην τρίτη στήλη γίνονταν ανακυκλοφορία στραγγισμάτων αλλά με ρυθμό 5-πλάσιο της πρώτης στήλης. Στην δεύτερη και τρίτη στήλη, η διαδικασία της ανακυκλοφορίας ξεκίνησε με μεθανογενή στραγγίσματα από έναν παλιό ΧΥΤΑ.

Η χρήση των μεθανογενών στραγγισμάτων είχε σαν αποτέλεσμα την πρόωμη έναρξη της μεθανογένεσης στην δεύτερη και τρίτη στήλη. Η τρίτη στήλη παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα απ' ό,τι η δεύτερη, υπονοώντας ότι η ανακυκλοφορία με υψηλότερο ρυθμό αυξάνει την απόδοση του συστήματος. Στην πρώτη στήλη, η παραγωγή του μεθανίου έγινε σε μετέπειτα στάδιο και μόνο μετά τη ρύθμιση του pH.

7.15 Chugh (1996 – αναδημοσίευση από τον Yuen, 1999)

Στο πείραμα αυτό, ο Chugh μελέτησε την επίδραση ενός Εναλλασσόμενου Ασυνεχούς Αναερόβιου Αντιδραστήρα (Sequential Batch Anaerobic Reactor-SBAR). Η έρευνα περιελάμβανε την εναλλαγή των διεργασιών σε στραγγίσματα μεταξύ ενός φρέσκου και ενός αναερόβια σταθεροποιημένου κελιού. Τα μεθανογενή στραγγίσματα που προέκυπταν από το σταθεροποιημένο κελί, ανακυκλοφορούσαν στο φρέσκο κελί, με αποτέλεσμα την έναρξη της διεργασίας της βιοαποικοδόμησης και την έκπλυση των οργανικών οξέων που την εμποδίζουν. Στη συνέχεια τα στραγγίσματα που παράγονταν από το φρέσκο κελί, επέστρεφαν στο σταθεροποιημένο κελί όπου ο μικροβιακός πληθυσμός μπορούσε να μετατρέψει τα οργανικά οξέα σε μεθάνιο. Η εναλλαγή στην κυκλοφορία των στραγγισμάτων συνεχιζόταν μέχρι την σταθεροποίηση του κελιού.

Στο πείραμα αποδείχτηκε ότι με τον τρόπο αυτό, περίπου το 80% του βιοαποικοδομήσιμου οργανικού κλάσματος μετατράπηκε σε μεθάνιο μέσα σε 60 μέρες. Αποδείχτηκε επίσης, ότι με μικρό ρυθμό ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων είναι δυνατή η έναρξη της βιοαποικοδόμησης ενός φρέσκου κελιού. Ο Yuen (1999) υποστηρίζει ότι ο μικρός ρυθμός ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων είναι αυτός που αρμόζει σε έναν βιοαντιδραστήρα σε πλήρη κλίμακα.

7.16 Karnchanawong and Noythachang (1996)

Σε αυτήν την μελέτη ερευνήθηκε η επίδραση της ανακυκλοφορίας στα στραγγίσματα και στα χαρακτηριστικά του βιοαερίου που παράγονται από αναερόβιους και ημι-αερόβιους βιοαντιδραστήρες. Χρησιμοποιήθηκαν 8 λυσίμετρα διαμέτρου 0.15 m και ύψους 1.8 m. Εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικοί ρυθμοί ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων. Σε κάθε λυσίμετρο προσθέτονταν καθημερινά νερό για προσομοίωση των συνθηκών βροχόπτωσης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανακυκλοφορία των διασταλαζόντων αυξάνει το ρυθμό βιοαποικοδόμησης, τόσο στους αναερόβιους όσο και στους ημι-αερόβιους βιοαντιδραστήρες. Στο αναερόβιο λυσίμετρο όπου η

ανακυκλοφορία αντιστοιχούσε στο 20% της ημερήσιας βροχόπτωσης, παράχθηκαν οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων. Στο ημι-αερόβιο λυσίμετρο όπου ο ρυθμός ανακυκλοφορίας αντιστοιχούσε στο 10% της ημερήσιας βροχόπτωσης, παράχθηκαν οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν επίσης ότι οι μεγαλύτερες ποσότητες στραγγισμάτων παράχθηκαν στα λυσίμετρα με ανακυκλοφορία.

7.17 Borglin et al. (2004)

Για ερευνητικούς λόγους σε μέση κλίμακα, πραγματοποιήθηκε ένα εργαστηριακό πείραμα (Borglin, Hazen, Oldenburg and Zawislanski, 2004). Κατασκευάστηκαν τρεις βιοαντιδραστήρες των 200 lt, οι οποίοι λειτούργησαν για 400 ημέρες. Η σύσταση του βιοαερίου, οι ρυθμοί αναπνοής και η καθίζηση των απορριμμάτων ήταν οι παράμετροι που υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν φρέσκα στερεά απορρίμματα, ενώ προβλέπονταν οι παρακάτω συνθήκες: (1) εισαγωγή αέρα και ανακυκλοφορία στραγγισμάτων υπό αερόβιες συνθήκες, (2) ανακυκλοφορία στραγγισμάτων υπό αναερόβιες συνθήκες και (3) χωρίς επεξεργασία υπό αναερόβιες συνθήκες.

Οι αντιδραστήρες ήταν εξαγωνικοί, ύψους 0.55m και μήκους πλευράς 0.71m, από διαφανές υλικό. Τα απορρίμματα τεμαχίστηκαν σε μέγεθος περίπου 5cm και ομογενοποιήθηκαν ταυτόχρονα, προτού τοποθετηθούν στους αντιδραστήρες.

Πραγματοποιήθηκαν δύο ερευνητικά τεστ των 400 ημερών. Στο πρώτο τεστ, εξετάστηκαν ένας αερόβιος και ένας αναερόβιος βιοαντιδραστήρας, ενώ ο τρίτος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μετατροπής ενός συμβατικού «ξηρού» αναερόβιου ΧΥΤΑ σε έναν αερόβιο «υγρό» αντιδραστήρα. Στο δεύτερο τεστ, δημιουργήθηκαν δύο αερόβιοι και ένας αναερόβιος αντιδραστήρας.

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το COD, το BOD, η αγωγιμότητα, το ηλεκτροχημικό δυναμικό, το pH, η αμμωνία και τα ολικά αιωρούμενα στερεά.

Για να διατηρηθούν οι συνθήκες μεθανογένεσης, κρατήθηκε το pH των

στραγγισμάτων στο 7.5 με προσθήκη NaHCO_3 . Η συνολική παραγωγή μεθανίου των αναερόβιων αντιδραστήρων ήταν 2.2 mol/kg AΣA , με σύνολο $1.5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ σε κάθε αντιδραστήρα ($0.05 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg}$ απορριμμάτων).

Η συγκέντρωση του O_2 στο ρεύμα εξόδου των αερόβιων βιοαντιδραστήρων ήταν μεταξύ 19 και 20%, ενώ οι συγκεντρώσεις του CO_2 ήταν μεταξύ 0 και 1%, όμοια δηλαδή με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Στους αερόβιους αντιδραστήρες παράγονταν κατά μέσο όρο $6 \text{ mol CO}_2/\text{kg}$ απορριμμάτων.

Το pH των αερόβιων ήταν 7.8 ± 0.4 κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Κατά τη μετάβαση του ξηρού αναερόβιου αντιδραστήρα σε αερόβιο, το pH ήταν αρχικά 6 ± 0.3 , αλλά μετά την 213^η μέρα σταθεροποιήθηκε στην τιμή 7.5 ± 0.4 . Το pH στους αναερόβιους αντιδραστήρες ρυθμίστηκε στο 7.5 με την προσθήκη (μια φορά) 500 g NaHCO_3 στα στραγγίσματα. Το ηλεκτροχημικό δυναμικό στους αερόβιους βιοαντιδραστήρες βρίσκονταν σταθερά ανάμεσα στα 200 και 300 eV, ενώ στους αναερόβιους παρατηρήθηκε πτώση από τα -100 στα -300 eV όταν άρχισε η παραγωγή του μεθανίου. Η αγωγιμότητα ήταν σταθερή στις δεξαμενές και για τις μεν αερόβιες ήταν στα $3.7 \pm 0.6 \text{ mS}$, για τις δε αναερόβιες $15 \pm 3 \text{ mS}$.

Στην 365^η ημέρα του πειράματος, το BOD του αερόβιου αντιδραστήρα ήταν 4 mg/l και το COD 159 mg/l , δίνοντας ένα λόγο BOD/COD ίσο με 0.03. Οι αντίστοιχες τιμές για τον αναερόβιο αντιδραστήρα κατά την 365^η μέρα ήταν 137, 305 και 0.45. Με αυτά τα γενικά κριτήρια, διαπιστώθηκε ότι ο αερόβιος αντιδραστήρας έφτασε σε μια πιο σταθερή κατάσταση.

Η συγκέντρωση της αμμωνίας στις αερόβιες δεξαμενές αρχικά ήταν 100 mg/l αλλά πολύ γρήγορα μειώθηκε σε περίπου 2 mg/l . Στις αναερόβιες δεξαμενές, παρατηρήθηκε συνεχής αύξηση της συγκέντρωσής της μέχρι και τα 400 mg/l σε 365 μέρες.

Στην αερόβια επεξεργασία παρουσιάστηκε η μέγιστη καθίζηση των απορριμμάτων στις 400 μέρες, με τιμή κοντά στο 32%. Στην αναερόβια, η τιμή της ήταν περίπου 20% και στην ξηρή αναερόβια ήταν 7% πριν την μετατροπή της σε υγρή αερόβια.

Γενικά, οι αερόβιοι αντιδραστήρες παρουσίασαν την καλύτερη απόδοση όσον αφορά την μείωση της μάζας και την καθίζηση των απορριμμάτων απ' ότι οι αναερόβιοι. Παράλληλα διατηρήθηκε σε ουδέτερα επίπεδα το pH και σε χαμηλά επίπεδα το BOD, το COD και η NH_3 απ' ότι στα αναερόβια συστήματα. Τέλος, ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα ήταν η μείωση των οσμών στα αερόβια κελιά.

8.0 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΤΑΣΗ

8.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της διερεύνησης των κρίσιμων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που ελέγχουν την αερόβια βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα αποδόμησης στερεών αποβλήτων. Ο κύριος στόχος στην τεχνολογία των βιοαντιδραστήρων είναι η λειτουργία τους με τρόπο που σαν συνέπεια θα είναι η επιτάχυνση της σταθεροποίησης των αποβλήτων. Η λειτουργία των βιοαντιδραστήρων περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, την προσθήκη υγρασίας στα στερεά απόβλητα για να δημιουργήσει ένα περιβάλλον ευνοϊκό για τους μικροοργανισμούς από τους οποίους θα πραγματοποιηθεί η βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων. Αυτή η προσέγγιση διαφέρει πολύ από την παραδοσιακή προσέγγιση των «ξηρών» ΧΥΤΑ που αποθαρρύνει την αποδόμηση των αποβλήτων με την ελαχιστοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας τους.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του βιοαντιδραστήρα είναι η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, ενδεχομένως και άλλων υγρών, στα στερεά απόβλητα. Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα σε αυτήν την έρευνα. Ένα άλλο σχεδιαστικό χαρακτηριστικό που χρησιμοποιήθηκε για την επιτάχυνση της βιοαποικοδόμησης των αποβλήτων και για τη σταθεροποίηση των απορριμμάτων είναι η προσθήκη αέρα. Η προσθήκη του αέρα και επομένως του οξυγόνου, ενισχύει την αερόβια σταθεροποίηση των αποβλήτων. Πρόκειται για την ίδια διεργασία με την οποία αποδομούνται τα απόβλητα σε ένα σύστημα κομποστοποίησης. Μια σημαντική λεπτομέρεια αυτής της έρευνας είναι η προσπάθεια αξιολόγησης των αερόβιων διεργασιών για τη γρήγορη σταθεροποίηση των αποβλήτων. Η διάταξη αποτελείται από ένα σύστημα που επιτρέπει τόσο την εισαγωγή όσο και την εξαγωγή αέρα (Bioventing-Soil Vapor Extraction). Στην άνω επιφάνεια του κελιού

τοποθετήθηκε σωλήνας, για να συλλέγεται το μεγαλύτερο τμήμα των εκπομπών αερίου. Τα φρεάτια κατασκευάστηκαν στο βιοαντιδραστήρα έτσι ώστε να επιτρέψουν όχι μόνο την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, αλλά και την εισαγωγή και εξαγωγή αέρα.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζεται το αρχικό διαχειριστικό πλαίσιο του βιοαντιδραστήρα. Στο σχέδιο περιλαμβάνεται η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, η δυνατότητα εισαγωγής αέρα στο εσωτερικό του κελιού και η δυνατότητα συλλογής του παραγόμενου βιοαερίου. Ο βιοαντιδραστήρας οργανώθηκε με σκοπό τη συλλογή *in situ* μετρήσεων σε παραμέτρους όπως η περιεκτικότητα σε υγρασία και η θερμοκρασία των αποβλήτων. Οι πληροφορίες και τα στοιχεία που συλλέγονται θα επιτρέψουν την αξιολόγηση της μεθόδου για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων σε πλήρη κλίμακα.

Το συγκεκριμένο διαχειριστικό πλάνο εξελίχθηκε κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της φάσης κατασκευής του, για να συμπεριλάβει πληροφορίες που προέκυψαν από την καθημερινή ενασχόληση και έλεγχο του βιοαντιδραστήρα, το πρωτόκολλο επίσκεψης και έρευνας, τα σχέδια για την υγεία και την ασφάλεια και ο προσδιορισμός των ευθυνών.

8.2 Σκοποί και στόχοι

Ο αρχικός στόχος του πειράματος επίδειξης λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα είναι:

Ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η λειτουργία και ο έλεγχος ενός εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων στο Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων του Πολυτεχνείου Κρήτης, με τρόπο που να επιτρέπει την πλήρη αξιολόγηση αυτής της τεχνολογίας σαν μέθοδο διαχείρισης των στερεών αποβλήτων και με κατάλληλη εκτίμηση των επιστημονικών, των περιβαλλοντικών και των οικονομικών ζητημάτων.

Οι στόχοι της επίδειξης λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα είναι:

- Ο σχεδιασμός και η λειτουργία του βιοαντιδραστήρα με χρήση καινοτόμων τεχνολογιών και εννοιών.
- Ο σχεδιασμός και η λειτουργία του βιοαντιδραστήρα με τρόπο που να ελέγχονται και να υπολογίζονται οι σημαντικότερες εισροές και εκροές.
- Η αξιολόγηση της τεχνολογίας αερόβιων βιοαντιδραστήρων και η σύγκριση της αερόβιας με την αναερόβια προσέγγισης της τεχνολογίας των βιοαντιδραστήρων.
- Ο εξοπλισμός του βιοαντιδραστήρα με τρόπο που να επιτρέπεται η άμεση παρακολούθηση των διεργασιών του βιοαντιδραστήρα και η διεξαγωγή μετρήσεων για άλλου είδους πληροφορίες (π.χ. μανομετρικό ύψος στραγγισμάτων).
- Η παρακολούθηση του βιοαντιδραστήρα με τρόπο που να υπολογίζεται ο αντίκτυπος των βιολογικών διεργασιών και να επιτρέπεται ο έλεγχος των διεργασιών επεξεργασίας αποβλήτων (π.χ. σύσταση και παραγωγή αερίου και στραγγισμάτων, χαρακτηριστικά αποβλήτων, καθίζηση).
- Η συλλογή στοιχείων μέσω του εξοπλισμού, της παρακολούθησης και της εργαστηριακής ανάλυσης που θα επιτρέψουν στην ερευνητική ομάδα να αξιολογήσει την επιτυχία του πειράματος, τη δυνατότητα εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας σε άλλα πεδία και να συνεισφέρουν, ως προς την κεκτημένη τεχνογνωσία τους, στο μελλοντικό σχεδιασμό και λειτουργία άλλων βιοαντιδραστήρων.
- Η ανάπτυξη τυποποιημένων διαδικασιών ως προς το σχεδιασμό και λειτουργία αυτής της τεχνολογίας.
- Ο καθορισμός και η ποσοτικοποίηση του πραγματικού κόστους και οφέλους των βιοαντιδραστήρων απορριμμάτων.

- Η παροχή πόρου αλλά και εδάφους κατάρτισης για τους φοιτητές του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και τους ενδιαφερόμενους ερευνητές.

8.3 Περιγραφή του βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων

8.3.1 Επισκόπηση

Ο σχεδιασμός του βιοαντιδραστήρα, περιελάμβανε την κατασκευή ενός κελιού όγκου 340 l. Ένα σύστημα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, ένα σύστημα εισαγωγής αέρα και ένα σύστημα άντλησης αερίου εγκαταστάθηκαν σε αυτόν. Ο εξοπλισμός (αισθητήρες) εγκαταστάθηκε μέσα στη μάζα των αποβλήτων για να βοηθήσει στην παρακολούθηση και τον έλεγχο. Η συλλογή και ανάλυση των δειγμάτων και οι μετρήσεις, εκτελούνται τακτικά για να παρακολουθείται η πρόοδος της επεξεργασίας του βιοαντιδραστήρα. Ο εξοπλισμός για την ανάλυση του παραγόμενου βιοαερίου εγκαταστάθηκε λίγο αργότερα. Η ευθύνη για το σχεδιασμό και την κατασκευή του κελιού ανήκει στους ερευνητές μηχανικούς και στον φορέα (Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων).

8.3.2 Περίληψη των βασικών τμημάτων

Τα βασικά μέρη του βιοαντιδραστήρα περιλαμβάνουν:

1. Ένα σύστημα σωληνώσεων για την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων που εγκαταστάθηκε στο κελί.
2. Ένα σύστημα συλλογής στραγγισμάτων που τροποποιήθηκε έτσι ώστε να επιτρέπεται η συλλογή τους από περισσότερα από ένα σημεία.
3. Ένα σύστημα σωληνώσεων που συνδυάζει την εισαγωγή και εξαγωγή αέρα. Αυτό θα επιτρέψει την λειτουργία του ΧΥΤΑ τόσο σε αερόβια βάση όσο και σε αναερόβια. Όλες οι εκπομπές αερίων χαρακτηρίζονται.

4. Ο εξοπλισμός, η παρακολούθηση και οι διαχειριστικές ενέργειες στο κελί, επιβαρύνουν το ερευνητικό προσωπικό του αρμόδιου εργαστηρίου.
- Το προσωπικό του βιοαντιδραστήρα εκτελεί την καθημερινή λειτουργία του βιοαντιδραστήρα (ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, εισαγωγή αέρα). Η στρατηγική επεξεργασίας (ποσότητα στραγγισμάτων που ανακυκλοφορούν, αέρας που εισάγεται κ.λ.π), αναπτύσσεται από τους ερευνητές του πειράματος σε συνεργασία με τον υπεύθυνο καθηγητή.
 - Η ερευνητική ομάδα ελέγχει τακτικά διάφορες παραμέτρους του βιοαντιδραστήρα. Αυτό περιλαμβάνει τη συλλογή των δειγμάτων (στραγγισμάτων, αερίου, αποβλήτων) και τις μετρήσεις απόδοσης επί τόπου (στραγγίσματα και ροή αερίου, καθίζηση). Ο εξοπλισμός εγκαταστάθηκε σε συγκεκριμένες θέσεις, εντός και γύρω από το βιοαντιδραστήρα. Εκτός και αν λάβουν άλλες εντολές, οι ερευνητές (με την κατάλληλη κατάρτιση και με υπόδειξη του υπεύθυνου καθηγητή) εκτελούν αυτόν τον έλεγχο. Οι παράμετροι ελέγχου είναι οι ακόλουθες:
 - ο ποιότητα και ποσότητα στραγγισμάτων,
 - ο ποιότητα και ποσότητα των εκπομπών αερίου,
 - ο ποσότητα στραγγισμάτων που ανακυκλοφορεί,
 - ο ποσότητα του αέρα που εισάγεται,
 - ο καθίζηση των αποβλήτων,
 - ο χαρακτηριστικά των αποβλήτων,
 - ο μετρήσεις από τον εξοπλισμό (θερμοκρασία και υγρασία εντός του αντιδραστήρα, θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος κ.λ.π).

8.3.3 Πλάνο διαχείρισης

Σαν μέρος του σχεδιασμού και της κατασκευής, αναπτύσσεται ένα λεπτομερές διαχειριστικό πλάνο. Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται σε αυτό είναι:

- σχέδιο για την καθημερινή λειτουργία του βιοαντιδραστήρα,
- σχέδιο παρακολούθησης, για την επιβεβαίωση της ασφαλούς λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα,
- πρόγραμμα για τις συνεδριάσεις του ερευνητικού προσωπικού,
- διαδικασία συντονισμού των ερευνητικών δραστηριοτήτων και των εκπαιδευτικών επισκέψεων,
- σχέδιο υγείας και ασφάλειας για τους συμμετέχοντες στο πείραμα.

8.3.4 Ερευνητικές δραστηριότητες

Οι πολυάριθμες ερευνητικές δραστηριότητες συντονίζονται με το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία της εγκατάστασης. Οι στόχοι ενσωματώνονται κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του βιοαντιδραστήρα. Στις ερευνητικές δραστηριότητες συμπεριλαμβάνεται και ο εξοπλισμός, ως μέσο συλλογής πολύτιμων πληροφοριών για την απόδοση του βιοαντιδραστήρα. Οι ευθύνες για την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρηση αυτής της εγκατάστασης καθορίστηκαν κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού και αναπύχθηκαν ως τμήμα του λεπτομερούς διαχειριστικού σχεδίου. Τα τρέχοντα σχέδια για τον εξοπλισμό φαίνονται στον Πίνακα 8-1. Η έρευνα περιλαμβάνει επίσης τη συλλογή και ανάλυση πολυάριθμων δειγμάτων (π.χ. διασταλάζοντα υγρά, βιοαέριο, απόβλητα) και τον υπολογισμό της απόδοσης του βιοαντιδραστήρα (π.χ. καθίζηση, ροή αερίου).

Θέση εξοπλισμού	Περιγραφή
Σύστημα συλλογής στραγγισμάτων	Δύναται να εγκατασταθεί ένας μετρητής πίεσης στον πυθμένα του κελιού. Σκοπός του μετρητή είναι ο υπολογισμός του ύψους ή του βάθους των στραγγισμάτων που συγκεντρώνονται στη μεμβράνη. Εγκατάσταση αντλίας για την αυτόματη ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων. Μέχρι στιγμής, η ανακυκλοφορία πραγματοποιείται με χειρονακτικό τρόπο.
Αισθητήρες παρακολούθησης στον βιοαντιδραστήρα	Οι αισθητήρες παρακολούθησης εγκαταστάθηκαν στο κέντρο του βιοαντιδραστήρα. Στο σημείο που γίνεται η παρακολούθηση, περιλαμβάνονται: • Αισθητήρας εδαφικής υγρασίας για την παρακολούθηση του ύδατος σαν συνάρτηση της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων και της μετακίνησης των αερίων. • Αισθητήρας θερμοκρασίας για την παρακολούθηση του βαθμού βιολογικής δραστηριότητας στα απόβλητα. Η θερμοκρασία είναι επίσης μια βασική παράμετρος στον έλεγχο της λειτουργίας των βιοαντιδραστήρων. • Θύρες εναλλακτικής δειγματοληψίας αερίου για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης και της πίεσης των αερίων που μετακινούνται στον βιοαντιδραστήρα.
Αισθητήρες παρακολούθησης εκτός του βιοαντιδραστήρα	• Μετρητής ροής που εγκαταστάθηκε στο σύστημα εισαγωγής αέρα, για τον συνεχή υπολογισμό της παροχής, της πίεσης και της θερμοκρασίας του εισαγόμενου αέρα του βιοαντιδραστήρα. • Αναλυτής αερίου που εγκαθίσταται εξωτερικά του κελιού για τον έλεγχο και την ανάλυση των αερίων εκπομπών. • Αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας που εγκαταστάθηκαν εξωτερικά του κελιού για την καταγραφή και τον έλεγχο των συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος.

Πίνακας 8-1: Περίληψη του εξοπλισμού

Παρακολουθούμενη δραστηριότητα	Περιγραφή
Στραγγίσματα	Τα δείγματα των στραγγισμάτων συλλέγονται από το ειδικό δοχείο αποθήκευσης σε τακτική βάση. Τα στραγγίσματα είναι επιθυμητό να αναλύονται για τις ακόλουθες παραμέτρους: • pH • Αγωγιμότητα • Διαλυμένο οξυγόνο (DO) • Διαλυμένα στερεά • Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD) • Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD) • Οργανικός άνθρακας • Θρεπτικά (NH_3, TKN, TP) • Κοινά ιόντα (Cl^-, NO_3^-, NO_2^-, SO_4^{2-}, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) • Πτητικά λιπαρά οξέα • Οργανικοί ρύποι (PAHs, BTEX, TCE) • Βαρέα μέταλλα
Αέριες εκπομπές	Οι αέριες εκπομπές από τον αντιδραστήρα υπολογίζονται συνήθως ως τμήμα της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα για το CH_4, το CO_2, το O_2 και το N_2. Τα δείγματα συλλέγονται επίσης κατά περιόδους για τον υπολογισμό του H_2S και του N_2O.
Στερεά απόβλητα	Δεν υφίσταται η δυνατότητα συλλογής δειγμάτων στερεών αποβλήτων για την άμεση αξιολόγηση του βαθμού σταθεροποίησης. Πάντως, στις παραμέτρους που αξιολογούνται συνήθως περιλαμβάνονται: • Περιεκτικότητα σε υγρασία • Πτητικά στερεά • Απόδοση μεθανίου - ο Κυτταρίνη - ο Λιγνίνη Κατά περίπτωση, τα δείγματα αποβλήτων αναλύονται επίσης για οργανικούς ρύπους και βαρέα μέταλλα.
Καθίζηση των στερεών αποβλήτων	Ο βιοαντιδραστήρας ερευνάται τακτικά για να μετρηθεί ο βαθμός καθίζησης των αποβλήτων (δείκτης της βιολογικής αποσύνθεσης).

Πίνακας 8-2: Περίληψη των συστημάτων παρακολούθησης

Τα τρέχοντα σχέδια για τον τακτικό έλεγχο περιλαμβάνονται στον Πίνακα 8-2.

8.4 Μεθοδολογία για την επίτευξη των στόχων

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται πώς οι σκοποί και οι στόχοι του εγχειρήματος θα επιτευχθούν μέσω της πειραματικής μεθοδολογίας.

Στόχος: *Ο σχεδιασμός και η λειτουργία του βιοαντιδραστήρα με χρήση καινοτόμων μεθόδων και εννοιών.*

Ο αντιδραστήρας σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και παρακολουθείται με διάφορες καινοτόμες τεχνικές και έννοιες. Παρόλο που η μέθοδος των βιοαντιδραστήρων απορριμμάτων είναι ακόμα μια σχετικά νέα τεχνολογία, η έρευνα σε αυτήν την περιοχή πραγματοποιείται για πολλά χρόνια και έχουν δημιουργηθεί μερικές εγκαταστάσεις πραγματικού μεγέθους. Εκτός από την περαιτέρω αποκατάσταση των υπαρχόντων βιοαντιδραστήρων πλήρους κλίμακας, θα χρησιμοποιηθούν μερικές νέες προσεγγίσεις.

- Ένα σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να επιτρέπει στον βιοαντιδραστήρα να λειτουργήσει υπό αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες.
- Εγκαθίσταται ένα σύστημα συλλογής αερίου σε συνδυασμό με ένα σύστημα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, ένα σύστημα εξαγωγής και εισαγωγής αέρα.
- Ο εξοπλισμός τοποθετείται μέσα στη μάζα αποβλήτων, κατά τρόπο καινοτόμο.
 - ο Παραδίδεται δήλωση επιτυχούς τοποθέτησης και λειτουργίας του εξοπλισμού και των οργάνων.
 - ο Παρουσιάζονται τα στοιχεία από τις τακτικές εκθέσεις.
 - ο Επιδιώκεται η δημοσίευση των αποτελεσμάτων.

Στόχος: *Ο σχεδιασμός και λειτουργία του βιοαντιδραστήρα με τρόπο που να ελέγχονται και να υπολογίζονται οι σημαντικότερες εισροές και εκροές.*

Ένας σημαντικός περιορισμός στα στοιχεία που συλλέγονται από τους βιοαντιδραστήρες πραγματικού μεγέθους είναι η μέχρι σήμερα δυσκολία στον έλεγχο, στην καταγραφή και στον υπολογισμό όλων των εισροών και εκροών. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στις εκπομπές αερίου τόσο στα αερόβια όσο και στα αναερόβια συστήματα. Ο συγκεκριμένος βιοαντιδραστήρας εξοπλίστηκε με αγωγούς, προκειμένου να συλλεχθεί το αέριο από την επιφάνεια. Το σύστημα συλλογής στραγγισμάτων χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των εισροών και των εκροών. Η παραγωγή στραγγισμάτων υπολογίζεται σε καθημερινή βάση. Όλες οι εισροές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας όργανα μεγάλης ακρίβειας. Κατά συνέπεια όλες οι σημαντικές εισροές και εκροές υπολογίζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

- ο Παραδίδεται περιγραφή των εισροών και των εκροών σε τακτικές εκθέσεις.
- ο Παρουσίαση των στοιχείων σε τακτικές εκθέσεις.

Στόχος: *Η αξιολόγηση της χρήσης της αερόβιας τεχνολογίας του βιοαντιδραστήρα και η σύγκρισή της με την αναερόβια τεχνολογία βιοαντιδραστήρων απορριμμάτων.*

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το σύστημα σχεδιάστηκε κατά τρόπο εύκαμπτο έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αερόβια είτε αναερόβια. Ο αντίκτυπος κάθε μιας από τις τεχνολογίες θα αξιολογηθεί με το να λειτουργήσει ο βιοαντιδραστήρας για κάποιο χρονικό διάστημα αερόβια, και για κάποιο άλλο αναερόβια. Η επίδραση αυτών των τύπων λειτουργίας στις διεργασίες του βιοαντιδραστήρα υπολογίζεται μέσω του εξοπλισμού και του ελέγχου που περιγράφεται στους Πίνακες 8-1 και 8-2.

- ο Παραδίδεται παρουσίαση των στοιχείων σε τακτικές εκθέσεις.

Στόχος: Ο εξοπλισμός του βιοαντιδραστήρα έτσι ώστε να επιτρέπεται ο επιτόπιος έλεγχος της δραστηριότητας του βιοαντιδραστήρα και ο υπολογισμός των έως τώρα μη υπολογισμένων πληροφοριών (π.χ. μανομετρικό ύψος των στραγγισμάτων στον πυθμένα).

Ο εξοπλισμός εγκαθίσταται για τον επιτόπιο έλεγχο των παραμέτρων. Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει συσκευές μέτρησης της σύστασης του εξερχόμενου αερίου και αισθητήρες παρακολούθησης της θερμοκρασίας και της υγρασίας των αποβλήτων. Επιπρόσθετες πληροφορίες για τον εξοπλισμό παρουσιάζονται στον Πίνακα 8-1.

- ο Παραδίδεται δήλωση επιτυχούς τοποθέτησης και λειτουργίας του εξοπλισμού.
- ο Παρουσίαση των στοιχείων σε τακτικές εκθέσεις.

Στόχος: Ο έλεγχος του βιοαντιδραστήρα με τρόπο που να υπολογίζεται η επίδραση των δραστηριοτήτων του και να επιτρέπεται ο έλεγχος των διεργασιών επεξεργασίας αποβλήτων (π.χ. σύσταση και παραγωγή στραγγισμάτων και αερίου, χαρακτηριστικά αποβλήτων, καθίζηση).

Ο αντιδραστήρας παρακολουθείται προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός της επίδρασης των βιολογικών διεργασιών στην επεξεργασία των αποβλήτων. Αυτό παρέχει επίσης έναν μηχανισμό για την αξιολόγηση και τον έλεγχο της επεξεργασίας αποβλήτων. Η ποιότητα των στραγγισμάτων ελέγχεται τακτικά προκειμένου να εξετάζεται η επίδραση της λειτουργίας του αντιδραστήρα στην ποιότητά τους. Υπολογίζεται επίσης, η σύσταση των αέριων εκπομπών, η καθίζηση της μάζας των αποβλήτων και ο βαθμός της βιολογικής σταθεροποίησής τους. Οι παράμετροι που μετρώνται χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της επεξεργασίας των αποβλήτων. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση του βιοαερίου υπολογίζονται με χρήση αισθητήρων, ως μέσο αξιολόγησης και ελέγχου του ρυθμού εισαγωγής αέρα σε μια δεδομένη ποσότητα στερεών αποβλήτων.

- ο Παραδίδονται πρωτόκολλα για τον έλεγχο της επεξεργασίας αποβλήτων.

- ο Μεθοδολογία για την ποσοτικοποίηση της καθίζησης.
- ο Παρουσίαση των στοιχείων στις τακτικές εκθέσεις.

Στόχος: Η συλλογή στοιχείων μέσω του εξοπλισμού, της παρακολούθησης και της εργαστηριακής ανάλυσης που θα επιτρέψουν στην ερευνητική ομάδα να αξιολογήσει την επιτυχία του πειράματος, τη δυνατότητα εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας σε άλλα πεδία και να συνεισφέρουν, ως προς την κεκτημένη τεχνογνωσία τους, στο μελλοντικό σχεδιασμό και λειτουργία άλλων βιοαντιδραστήρων.

Τα στοιχεία που συλλέγονται μέσω του εξοπλισμού (Πίνακας 8-1) και των εργαστηριακών πειραμάτων-μετρήσεων (Πίνακας 8-2), χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση της επιτυχίας του πειράματος. Η γρήγορη σταθεροποίηση των αποβλήτων καθορίζεται με τη μέτρηση της παραγωγής αερίου, της καθίζησης του ΧΥΤΑ και της βιοαποικοδόμησης των αποβλήτων. Με αυτόν τον τρόπο αξιολογούνται οι διάφορες στρατηγικές επεξεργασίας ως προς την σχετική επιτυχία τους.

- ο Παραδίδεται: Παρουσίαση των στοιχείων στις τακτικές εκθέσεις.

Στόχος: Η ανάπτυξη τυποποιημένων διαδικασιών σχεδιασμού και λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας.

Τα στοιχεία που συλλέγονται από την έρευνα, χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές για να αναπτύξουν τυποποιημένες τεχνικές σχεδιασμού και λειτουργικών διαδικασιών. Αυτό περιλαμβάνει επίσης τη συλλογή στοιχείων για να επιτραπεί η ανάπτυξη μοντέλων εφαρμοσμένης μηχανικής για την προσομοίωση των βιοαντιδραστήρων. Οι διαδικασίες σχεδιασμού περιλαμβάνουν το σχεδιασμό των φρεατίων εισροής και εκροής, τη μεταξύ τους απόσταση, το σχεδιασμό των συστημάτων συλλογής στραγγισμάτων και το σχεδιασμό του συστήματος συλλογής αερίου.

- ο Παραδίδονται τυποποιημένες λειτουργικές διαδικασίες.

- ο Μοντέλα για χρήση στην προσομοίωση των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που εμφανίζονται στο βιοαντιδραστήρα.
- ο Παρουσίαση των στοιχείων στις τακτικές εκθέσεις.

Στόχος: Περαιτέρω καθορισμός και ποσοτικοποίηση του πραγματικού κόστους και οφέλους των βιοαντιδραστήρων απορριμμάτων.

Ένας σημαντικός στόχος του πειράματος είναι η ποσοτικοποίηση του κόστους λειτουργίας των βιοαντιδραστήρων τόσο αερόβιας όσο και αναερόβιας φάσης. Τα οφέλη ποσοτικοποιούνται στο μέτρο του δυνατού με τη δημιουργία δεικτών. Τα αναμενόμενα οφέλη περιλαμβάνουν την αυξημένη καθίζηση και το προκύπτον όφελος στην χωρητικότητα του ΧΥΤΑ.

- ο Παραδίδεται μεθοδολογία για την προετοιμασία της ανάλυσης κόστους/οφέλους.
- ο Τελική έκθεση του προγράμματος που περιλαμβάνει ένα κεφάλαιο κόστους/οφέλους που περιγράφει την πιθανή επίδραση του βιοαντιδραστήρα στο κόστος αποκατάστασης μετά το κλείσιμο και στους οικονομικούς κανονισμούς.

Στόχος: Η παροχή πόρου αλλά και εδάφους κατάρτισης για τους φοιτητές του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και τους ενδιαφερόμενους ερευνητές.

Εκτός από τους φοιτητές που ασχολούνται άμεσα με την έρευνα στο πείραμα, δίνεται επίσης μια ευκαιρία για όλους τους φοιτητές του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος να διδαχθούν για την τεχνολογία των βιοαντιδραστήρων στερεών αποβλήτων. Ο υπεύθυνος του πειράματος ερευνά για πηγές χρηματοδότησης του πειράματος.

Οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται θα διαδοθούν με τρόπο που θα ωφελήσει τους ενδιαφερόμενους ερευνητές. Μόλις καθιερωθεί το πείραμα, θα διοργανωθούν εκπαιδευτικά μαθήματα που συντονίζονται από τον υπεύθυνο καθηγητή και θα απευθύνονται στους ενδιαφερόμενους φοιτητές. Τα

εκπαιδευτικά μαθήματα θα παραδοθούν επίσης από τους ερευνητές όσον αφορά το σχεδιασμό και τις λειτουργικές διαδικασίες που αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα του εγχειρήματος. Επιδίωξη είναι η σωστή ενημέρωση όλων των ενδιαφερόμενων.

- ο Παραδίδεται σχέδιο και περιγραφή των ευκαιριών εκπαιδευτικής κατάρτισης.
- ο Έκθεση σχετικά με τη συμμετοχή και τα αποτελέσματα των ευκαιριών κατάρτισης.
- ο Σχέδιο για την επέκταση της κατάρτισης μετά από το τέλος του πειράματος.

8.5 Σχέδιο και κύρια σημεία

Μια υπόδειξη ως προς το χρόνο των προγραμματισμένων δραστηριοτήτων για το σχεδιασμό, την κατασκευή και το ξεκίνημα του βιοαντιδραστήρα συμπεριλαμβάνεται στο 9^ο κεφάλαιο όπου και περιγράφεται η λειτουργία του. Προσδιορίζεται μια σειρά κύριων σημείων που αφορούν όλο το σχεδιασμό και τη διαδικασία λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας στα διάφορα στάδια της ολοκλήρωσης, οι συνεδριάσεις του προγράμματος θα πραγματοποιηθούν για τους ερευνητές και για μέλη άλλων ομάδων για να αναθεωρήσουν και να αξιολογήσουν την εργασία κατάλληλα.

8.6 Διαχειριστικό σχέδιο

Τα τμήματα του διαχειριστικού σχεδίου παρατίθενται στην παράγραφο 8.3.3. Οι πληροφορίες που απαιτούνται για την ανάπτυξη του διαχειριστικού σχεδίου συλλέγονται ήδη. Ένα από τα σημαντικά ζητήματα είναι το σχέδιο ασφάλειας. Ένα τέτοιο σχέδιο ασφάλειας απαιτείται για να εξασφαλίσει την υγεία και την ασφάλεια των συμμετεχόντων του πειράματος, των ερευνητών και των επισκεπτών του βιοαντιδραστήρα. Το σχέδιο ασφάλειας θα περιγράφει αναλυτικά τις υποχρεώσεις κάθε ενός από τους προαναφερθέντες τύπους επισκεπτών.

9.0 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

9.1 Εισαγωγικά

Στα αρκετά εργαστηριακά πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα, παρακολουθείται η βιοαποικοδόμηση διαφόρων μειγμάτων αστικών απορριμμάτων όπως για παράδειγμα: χαρτί, τροφικά υπολείμματα, υπολείμματα κήπου, γυαλί, πλαστικό, μέταλλο, ξύλο κ.α. Τα απορρίμματα εντός των αντιδραστήρων υπόκεινται σε διάφορους συνδυασμούς συνθηκών λειτουργίας που σχετίζονται με το ρυθμό εισαγωγής αέρα και με το ρυθμό ανακυκλοφορίας των διασταλαζόντων υγρών. Στα συστήματα αυτά έχει προσαρτηθεί εξοπλισμός για την μέτρηση και καταγραφή της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της παροχής αέρα, της σύστασης του παραγόμενου αερίου και της ποιότητας των διασταλαζόντων. Αρκετές φορές τα συστήματα αυτά ελέγχονται και οπτικά. Η αερόβια βιοαποικοδόμηση στο εργαστήριο αποδεδειγμένα παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία ως προς την εισαγωγή αέρα και την ανακυκλοφορία των διασταλαζόντων.

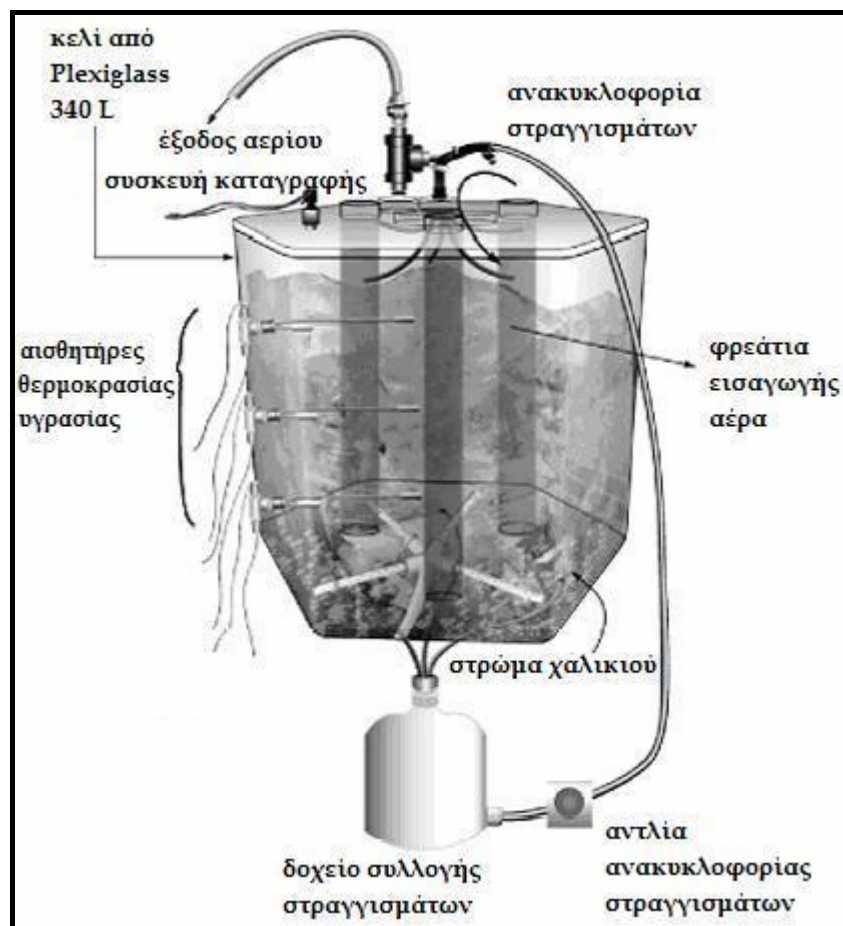
Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται ο βιοαντιδραστήρας απορριμμάτων που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε καθώς και ο εξοπλισμός που έχει προσαρτηθεί σε αυτόν για την παρακολούθηση των συνθηκών λειτουργίας του. Τέλος, στην παράγραφο 9.4 της διατριβής, δίνονται οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες του κελιού (βλ. και Παράρτημα Α).

9.2 Προσέγγιση

Η τεχνική της αερόβιας ταφής των στερεών αποβλήτων είναι μια εναλλακτική πρόταση που έχει θετικά αποτελέσματα στην επιτάχυνση του ρυθμού βιοαποδόμησης και την εξάλειψη του μεθανίου. Σκοπός του πειράματος είναι η κατανόηση των διεργασιών και η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των αερόβιων συστημάτων.

Κατασκευάστηκε ένας βιοαντιδραστήρας των 340 lt, ο οποίος πρόκειται να λειτουργήσει τουλάχιστον για 14 μήνες καθώς το διάστημα αυτό κρίνεται αρκετό προκειμένου να εξαχθούν αρκετά συμπεράσματα. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων οι παράμετροι που υπολογίζονται είναι η σύσταση

του βιοαερίου, οι ρυθμοί αναπνοής και η καθίζηση των απορριμμάτων. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή έγινε με τρόπο που να επιτρέπεται η λειτουργία του κάτω από τις παρακάτω συνθήκες: 1) εισαγωγή αέρα και ανακυκλοφορία στραγγισμάτων υπό αερόβιες συνθήκες, 2) ανακυκλοφορία στραγγισμάτων υπό αναερόβιες συνθήκες και 3) καμία επεξεργασία υπό αναερόβιες συνθήκες.



Σχήμα 9-1: Απεικόνιση του βιοαντιδραστήρα

Ο αντιδραστήρας είναι σχήματος κύβου με μήκος πλευράς 0.7m, από διαφανές υλικό (Plexiglas πάχους 15mm). Εγκαταστάθηκε εξοπλισμός για τη μέτρηση και την παρακολούθηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και της παροχής του εισαγόμενου αέρα, της θερμοκρασίας και της υγρασίας των στερεών αποβλήτων, της θερμοκρασίας και της υγρασίας του περιβάλλοντος, της σύστασης του εξερχόμενου αερίου και των στραγγισμάτων. Στον πυθμένα του αντιδραστήρα τοποθετήθηκε 0.1m χαλίκι, πάνω από αυτό τοποθετήθηκαν περίπου 68kg απορριμμάτων, ενώ υπάρχει και άνω στρώμα (πάχους 0.03m)

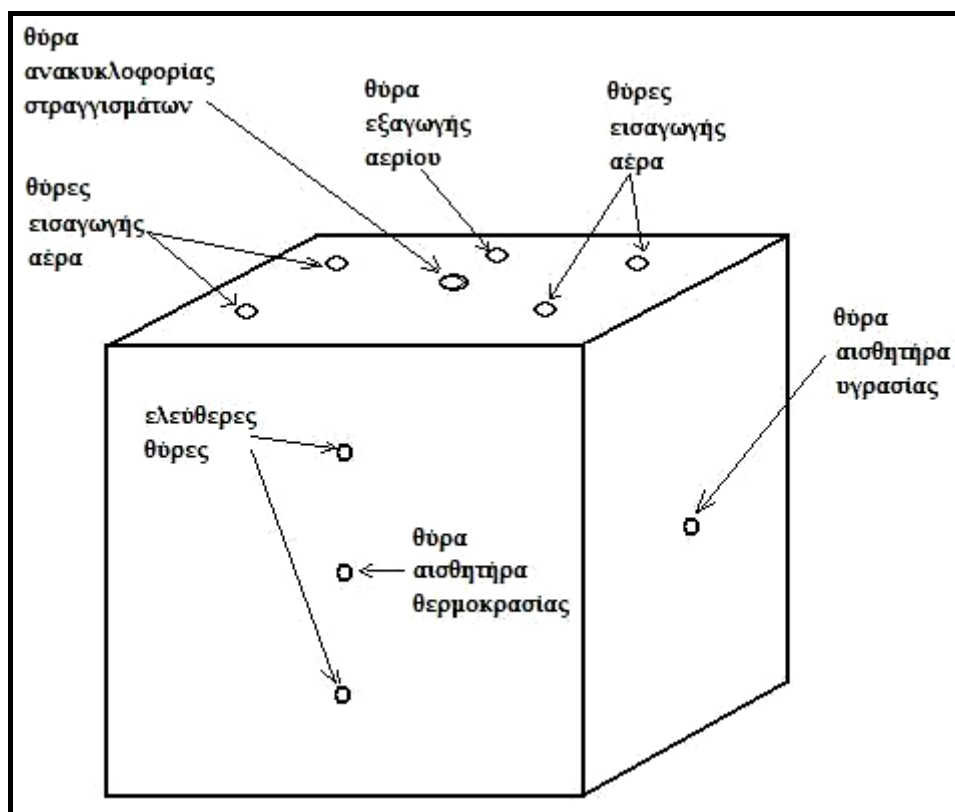
από χαλίκι (βλ. Σχήμα 9-1). Η εισαγωγή του αέρα γίνεται με χρήση ελαστικών σωλήνων από την κορυφή του κελιού. Το παραγόμενο αέριο εξέρχεται επίσης από την κορυφή. Τα στραγγίσματα συλλέγονται από τον πυθμένα και ανακυκλοφορούν στο ανώτερο τμήμα των απορριμμάτων. Τα τοιχώματα και η οροφή του αντιδραστήρα μονώθηκαν με χρήση ειδικού υλικού ενώ δεν τοποθετήθηκε κάποιο κάλυμμα για την παρεμπόδιση του φωτός (βλ. Σχήμα 9-2).

Χρησιμοποιήθηκαν φρέσκα απορρίμματα από τον Χώρο Διάθεσης Απορριμμάτων του Μουζουρά Χανίων. Τα απορρίμματα τεμαχίστηκαν σε μέγεθος 5-10 cm και ομογενοποιήθηκαν ταυτόχρονα, προτού τοποθετηθούν στον αντιδραστήρα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η συμπίεσή τους. Υπολογίστηκε η σύστασή τους και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 9-1. Η πυκνότητά τους στο εσωτερικό του κελιού υπολογίστηκε στα 628 kg/m³. Σε έναν ΧΥΤΑ πλήρους κλίμακας η πυκνότητα με καλή συμπίεση κυμαίνεται μεταξύ 400-750 kg/m³ (Παναγιωτακόπουλος, 2002). Στον Πίνακα 9-2 παρουσιάζονται οι συνθήκες λειτουργίας στο κελί κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του παρόντος πειράματος.

Σε αυτή τη φάση πραγματοποιείται ένα ερευνητικό τεστ στο οποίο εξετάζεται η αερόβια λειτουργία του βιοαντιδραστήρα, ενώ μελλοντικά μπορεί ενδεχομένως να εξεταστεί η αναερόβια λειτουργία του. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της μετατροπής ενός συμβατικού «ξηρού» αναερόβιου χώρου διάθεσης σε έναν αερόβιο «υγρό» αντιδραστήρα.

	Οργανικά	Χαρτί Χαρτόνι	Μέταλλο	Πλαστικό	Γυαλί	Ξύλο	Υφασμα	Χώμα Αδρανή	Σύνολο
Βάρος (kg)	20,3	12	2,7	8,5	2,7	0,5	1	20	67,7
Ποσοστό (%)	30	17,7	4,1	12,5	4	0,7	1,5	29,5	100

Πίνακας 9-1: Σύσταση στερεών αποβλήτων στον αντιδραστήρα



Σχήμα 9-2: Ο εργαστηριακός βιοαντιδραστήρας. Διακρίνονται οι θύρες λειτουργίας

Στο κελί προστέθηκαν αρχικά 10 L αποιονισμένου νερού έως ότου παραχθεί κάποια ποσότητα στραγγισμάτων (5 L), τα οποία στη συνέχεια συλλέχθηκαν και ανακυκλοφόρησαν στο σύστημα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν συνθήκες κορεσμού στα απορρίμματα μέσα σε λίγες μέρες. Ο ρυθμός ανακυκλοφορίας υπολογίστηκε στα 404 ml/d.

Κατά τις πρώτες μέρες λειτουργίας μια σημαντική παράμετρος που έπρεπε να ρυθμιστεί ήταν η παροχή του αέρα. Η ροή του αέρα στο εσωτερικό του αντιδραστήρα επηρεάζεται από την αρχική πυκνότητα και την καθίζηση των απορριμμάτων καθώς μεταβάλλονται τα μονοπάτια ροής και μειώνεται η διαπερατότητα του αέρα. Σκοπός είναι η επαρκής οξυγόνωση, αλλά με ταυτόχρονη παρακολούθηση του συστήματος προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική ξήρανση ή ψύξη του αντιδραστήρα. Η συγκέντρωση του οξυγόνου παρακολουθείται στο ρεύμα εξόδου του αέρα από το κελί με χρήση ειδικού εξοπλισμού (αναλυτής αερίων). Η παροχή του αέρα εισόδου

καθορίστηκε τελικά στα 10 l/min (92.5 l/min/m³ αποβλήτων) σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Περιγραφή αντιδραστήρα	Διάρκεια πειράματος (μήνες)	Περιγραφή επεξεργασίας	Ρυθμός ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων (l/d)	Παροχή αέρα (l/min)
Αερόβιος, υγρός	≥14	Αερισμός & ανακυκλοφορία στραγγισμάτων	0.404	10

Πίνακας 9-2: Συνθήκες λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα

Στον αντιδραστήρα τοποθετήθηκαν 2 αισθητήρες, ένας για τη θερμοκρασία και ένας για την υγρασία. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης της πίεσης στο εσωτερικό των σωληνώσεων, της θερμοκρασίας του αέρα, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της υγρασίας περιβάλλοντος.

Μέσω των στραγγισμάτων λαμβάνονται δείγματα για την ποιοτική ανάλυσή τους και για τον έλεγχο της σταθεροποίησης της μάζας των αποβλήτων. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD), το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD), η αγωγιμότητα (conductivity), η αλατότητα (salinity), το οξειδοαναγωγικό δυναμικό (Redox Potential), το pH, τα θειικά (SO_4^{2-}), νιτρικά (NO_3^-), φωσφορικά (PO_4^{3-}) χλωρικά (Cl^-), βρωμικά (Br^-) και φθορικά (F^-) ιόντα, το αμμωνιακό άζωτο ($NH_4^+ - N$) και μέταλλα όπως το νικέλιο (Ni), το κάδμιο (Cd), ο μόλυβδος (Pb), το αρσενικό (As), ο ψευδάργυρος (Zn) και το μαγνήσιο (Mg).

9.3 Εξοπλισμός

9.3.1 Καταγραφική συσκευή υγρασίας-θερμοκρασίας

Για την καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων θερμοκρασίας και υγρασίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή “WatchDog Data Logger” της εταιρείας “Spectrum Technologies, Inc” (βλ. Σχήμα 9-3). Η συσκευή αυτή επιτρέπει την καταγραφή και παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε απομακρυσμένα σημεία. Η ψηφιακή οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) που διαθέτει, απομακρύνει την ανάγκη για «κατέβασμα» των δεδομένων στον υπολογιστή προκειμένου να ελεγχθούν οι

τρέχουσες συνθήκες. Τα καταγραφικά αυτά παρέχουν τη δυνατότητα αλλαγής των εξωτερικών αισθητήρων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των πειραμάτων. Τα αποθηκευμένα στοιχεία μπορούν να μεταφερθούν στον υπολογιστή με χρήση λογισμικού και να παρασταθούν τόσο σε γραφική μορφή όσο και σε μορφή πίνακα.

Για το συγκεκριμένο εργαστηριακό πείραμα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “WatchDog” 450 που διαθέτει δύο εσωτερικούς αισθητήρες (θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος) και δύο εξωτερικούς αισθητήρες (4 κανάλια). Έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει μέχρι και 15.000 τιμές (3.750 ανά κανάλι). Ο εσωτερικός αισθητήρας της θερμοκρασίας λειτουργεί σε εύρος από -20 σε 70 °C και με ακρίβεια ± 0.7 °C. Όσον αφορά τον εσωτερικό αισθητήρα



Σχήμα 9-3: Καταγραφική συσκευή υγρασίας και θερμοκρασίας

υγρασίας τα αντίστοιχα μεγέθη είναι 20-100% (RH) και $\pm 3\%$. Οι διαθέσιμοι εξωτερικοί αισθητήρες διακρίνονται στον Πίνακα 9-3. Όσον αφορά το βιοαντιδραστήρα, χρησιμοποιήθηκαν οι εξωτερικοί αισθητήρες με κωδικό “3667” (θερμοκρασία) και “6450” (σχετική υγρασία).

Item #	Description	Measurement Range	Accuracy
3665I	Continuous Flow Rain Collector	N/A	$\pm 4\%$
3665R	Tipping Bucket Rain collector	N/A	$\pm 2\%$
3666	Leaf Wetness Sensor	0(Dry) - 15(Wet)	N/A
3667 3667-20	External (Soil) Temperature Sensor	-30° to 100°C -22° to 212° F	$\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ $\pm 1^{\circ}\text{F}$
3670	Silicon Pyranometer	1-1250 W/m ²	$\pm 5\%$
3668	Quantum Light Sensor	0-2500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\pm 5\%$
3669 3669LT	Soil Moisture Transducer	0-100 kPa	$\pm 2\%$
6450WD 6450WD20	Watermark Soil Moisture Sensor	0 - 200 cbars	N/A
6451	Irrigation Sensor	Switches at 5 psi	± 1 psi
3673 3674	Input Cable for user supplied Sensor	0-2.5V 4-20mA	N/A

Πίνακας 9-3: Διαθέσιμοι εξωτερικοί αισθητήρες

Με χρήση του λογισμικού “SpecWare 6.01”, η συσκευή καταγραφής μπορεί να προγραμματιστεί έτσι ώστε να καταγράφει και να αποθηκεύει μετρήσεις σε δεδομένα χρονικά διαστήματα (1, 5, 10, 15, 30, 60, 120 min).

9.3.2 Αισθητήρας υγρασίας

Για την μέτρηση της υγρασίας στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα, χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας μέτρησης εδαφικής υγρασίας τύπου “Watermark” της εταιρείας “Spectrum Technologies, Inc” (βλ. Σχήμα 9-4). Ο αισθητήρας αυτός χρησιμοποιείται κυρίως σε αγροτικές εφαρμογές (π.χ θερμοκηπιακές και μη καλλιέργειες) για την παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας, με σκοπό την σωστή άρδευση των καλλιεργούμενων



Σχήμα 9-4: Αισθητήρας υγρασίας τύπου “Watermark”

εκτάσεων. Στις εφαρμογές αυτές, τοποθετείται στην ριζόσφαιρα των φυτών και συνήθως χρησιμοποιούνται πάνω από ένας αισθητήρες για να εξασφαλιστεί η αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων. Ο αισθητήρας συνδέεται με καταγραφική συσκευή (WatchDog Data Logger) για την ερμηνεία και αποθήκευση των πληροφοριών.

Η διείσδυση του νερού καθώς και η ικανότητα συγκράτησης – δέσμευσής του σε μια περιοχή διαφέρει λόγω του τύπου του εδάφους, της αλληλεπίδρασης των διαφορετικών τύπων εδαφών και της τοπογραφίας. Η καλύτερη στρατηγική για κάποιον που θέλει να χρησιμοποιήσει τους αισθητήρες για πρώτη φορά είναι να τοποθετήσει αρκετούς από αυτούς σε μια σχετικά μικρή έκταση, ώστε να δημιουργηθεί ένα καλό προφίλ της εδαφικής υγρασίας.

Ο αισθητήρας αυτός, προτού να τοποθετηθεί στην περιοχή ενδιαφέροντος, πρέπει πρώτα να κορεστεί. Για το λόγο αυτό, ο αισθητήρας εμβαπτίζεται σε νερό για μερικές ώρες. Για ακόμα καλύτερη απόδοση λειτουργίας, προτείνεται

μια επαναληπτική διαδικασία ύγρανσης-ξήρανσης (30min εμβαπτισμός στο νερό ακολουθούμενος από μερικές ώρες ξήρανσης). Στο σημείο όπου θα τοποθετηθεί, πρέπει να μην υπάρχουν κενά αέρα προκειμένου οι μετρήσεις να είναι σωστές.

Τα προβλήματα που παρουσιάζονται συνήθως στο πεδίο είναι:

1. Ο αισθητήρας δεν είναι σωστά τοποθετημένος, με αποτέλεσμα να μην καλύπτεται όλη του η μεμβράνη με εδαφικό υλικό. Αποτέλεσμα είναι η ύπαρξη κενών με αέρα που δημιουργούν εσφαλμένες ενδείξεις.
2. Ο αισθητήρας δεν βρίσκεται σε «ενεργή» περιοχή, δηλαδή η ποσότητα του προστιθέμενου νερού δεν φτάνει σε αυτόν. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος πάνω σε πέτρα ή βράχο, ή κάτω από ένα αδιαπέρατο στρώμα που παρεμποδίζει την κίνηση του νερού προς αυτόν.
3. Όταν το έδαφος ξηραίνεται σε σημείο που οι ενδείξεις είναι υψηλότερες από 80 cbars, ενδεχομένως να έχει χαθεί η επαφή μεταξύ αισθητήρα και εδάφους, λόγω της συρρίκνωσης του εδάφους. Το πρόβλημα αυτό δεν αντιμετωπίζεται με προσθήκη υγρασίας στο έδαφος, επειδή η αντιμετώπιση αυτή λειτουργεί μόνο προσωρινά. Παρατηρείται κυρίως σε βαριά εδάφη ή σε περιόδους έντονης διαπνοής των φυτών.

Ένας γενικός κανόνας για την ερμηνεία των ενδείξεων του αισθητήρα αυτού είναι ο εξής:

- “- -” = Ξηρός ή μη εμβαπτισμένος αισθητήρας.
- 0 – 10 cbars = Κορεσμένο έδαφος.
- 10 – 30 cbars = Έδαφος επαρκώς υγρό (εκτός αν πρόκειται για χονδρόκοκκο έδαφος το οποίο αρχίζει να χάνει νερό).
- 30 – 60 cbars = Τυπικό εύρος για προσθήκη νερού (εκτός από τα πηλώδη εδάφη).

- 60 – 100 cbars = Τυπικό εύρος για προσθήκη νερού σε πηλώδη εδάφη.
- 100 – 200 cbars = Το έδαφος γίνεται επικίνδυνα ξηρό.

Ο αισθητήρας Watermark έχει ρυθμιστεί σε μια θερμοκρασία εδάφους περίπου 70 °F (21.1 °C). Για μεγαλύτερη ακρίβεια, μπορούν να ρυθμιστούν οι μετρούμενες τάσεις στις εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Οι ενδείξεις της τάσης της υγρασίας πρέπει να μειώνονται κατά 1% για κάθε βαθμό °F πάνω από τους 70 και αντιστρόφως.

9.3.3 Αισθητήρας θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα χρησιμοποιήθηκε ένας εξωτερικός αισθητήρας της εταιρείας “Spectrum Technologies, Inc” (βλ. Σχήμα 9-5). Ο αισθητήρας αυτός συνδέεται με την



εξωτερική θύρα μιας καταγραφικής συσκευής (WatchDog Data Logger).

Σχήμα 9-5: Αισθητήρας θερμοκρασίας

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, για τη θερμοκρασία του εδάφους μετά τον ενταφιασμό του και τη θερμοκρασία του νερού μετά από εμβάπτισμό. Όταν η συσκευή καταγραφής διαθέτει περισσότερες από μία εξωτερικές θύρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντίστοιχοι πλήθους αισθητήρες για την καταγραφή της θερμοκρασίας σε διαφορετικά εδάφη και βάθη.

9.3.4 Όργανο μέτρησης παροχής αέρα (ροόμετρο)

Για την μέτρηση της παροχής του αέρα που εισάγεται στον βιοαντιδραστήρα των απορριμμάτων, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “4043” της εταιρείας “TSI Incorporated” (βλ. Σχήμα 9-6). Πρόκειται για έναν θερμικό μετρητή παροχής μάζας (Thermal Mass Flowmeter) που περιέχει δύο

αισθητήρες. Ένα φιλμ από πλατίνα και έναν μετρητή θερμότητας οι οποίοι εκτίθενται στη ροή του αερίου. Το φιλμ από πλατίνα θερμαίνεται και διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία. Στο διερχόμενο αέριο μεταφέρεται θερμότητα από το φιλμ, ανάλογα με την παροχή του αερίου. Ο μετρητής θερμότητας υπολογίζει την θερμοκρασία του αερίου, ενώ χρησιμοποιείται και για την αντιστάθμιση της θερμοκρασίας.

Το όργανο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση παροχής αέρα, οξυγόνου, αζώτου αλλά και μειγμάτων αερίων. Το εύρος λειτουργίας του είναι από 0-



Σχήμα 9-6: Μετρητής παροχής αέρα

200 Standard L/min, με ακρίβεια $\pm 2\%$ (ή 0.05 Std L/min). Επίσης, μπορεί να υπολογίσει και τον όγκο του αέρα που έχει διέλθει μέσα από αυτό σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (0.01-99.9 L, ακρίβεια $\pm 2\%$), αλλά και την πίεση στο σωλήνα (50-199 kPa, ακρίβεια ± 1 kPa). Τέλος, παρέχει και ένδειξη της θερμοκρασίας του αερίου (0-50 °C, ακρίβεια ± 1 °C). Μπορεί επίσης να συνδεθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή και να ελέγχεται η λειτουργία του από εκεί.

9.3.5 Αναλυτής αερίου

Για τη μέτρηση της σύστασης του αερίου που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα χρησιμοποιήθηκε ο πολυκάναλος αναλυτής αερίων BE-DGA 3 της εταιρίας BERNT MESSTECHNIK (βλ. Σχήμα 9-7). Ο αναλυτής αυτός είναι φορητός, εφοδιασμένος με εσωτερική αντλία, λειτουργεί με μπαταρία και προορίζεται για συχνή και κάτω από δύσκολες συνθήκες δειγματοληψία. Με τη χρήση φίλτρων και δειγματοληπτών παρέχει τη δυνατότητα φθηνής και γρήγορης μέτρησης μέχρι τριών αερίων σε συνδυασμούς ανάλογα με τις απαιτήσεις των μετρήσεων. Τα αέρια που μπορεί να μετρήσει είναι το CH₄, το CO₂, το O₂ και το CO.



Σχήμα 9-7: Ο αναλυτής αερίων BE - DGA 3

Η μέτρηση των αερίων (εκτός του O₂) βασίζεται στην τεχνική υπολογισμού της μη διαχεόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR-Non Dispersive Infrared Radiation). Η καινοτομία του αναλυτή βρίσκεται στο γεγονός ότι υπάρχει ένα μόνο οπτικό μονοπάτι (αντί για δύο που υπάρχουν στα συμβατικά όργανα με NDIR), δύο φίλτρα και ένας ανιχνευτής. Το φίλτρο του δείγματος επιλέγει ένα μήκος κύματος στο οποίο απορροφά το αέριο προς μέτρηση, ενώ το φίλτρο αναφοράς επιλέγει μια περιοχή στην οποία δεν απορροφά κανένα από τα αέρια που υπάρχουν στο δείγμα. Η μέτρηση της απορρόφησης των αερίων γίνεται με την ανάλυση των ηλεκτρικών σημάτων από μικροεπεξεργαστές. Η μέτρηση του O₂ γίνεται με τη χρήση ενός ηλεκτροχημικού κελιού.

Οι διαστάσεις του αναλυτή είναι 240 x 210 x 170 mm και το βάρος του είναι 6.5 kg. Περιέχει τέσσερις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες των 12 Volt που επιτρέπουν τη συνεχόμενη άντληση και ανάλυση αερίων για επτά ώρες. Το εύρος των θερμοκρασιών στο οποίο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα είναι από 0 - 45 °C και η επίδραση της θερμοκρασίας είναι $\pm 0,03$ % ανά 1 °C. Ο χρόνος προθέρμανσης του οργάνου είναι μικρότερος των τριών λεπτών και ο χρόνος απόκρισης είναι περίπου δέκα δευτερόλεπτα. Οι συγκεντρώσεις των αερίων

απεικονίζονται σε οθόνες υγρών κρυστάλλων αλλά υπάρχει και η δυνατότητα λήψης των αποτελεσμάτων σε μορφή γραμμικοποιημένου ρεύματος ή τάσης.

9.4 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά κελιού

Υλικό Κατασκευής: Plexiglas πάχους 15mm

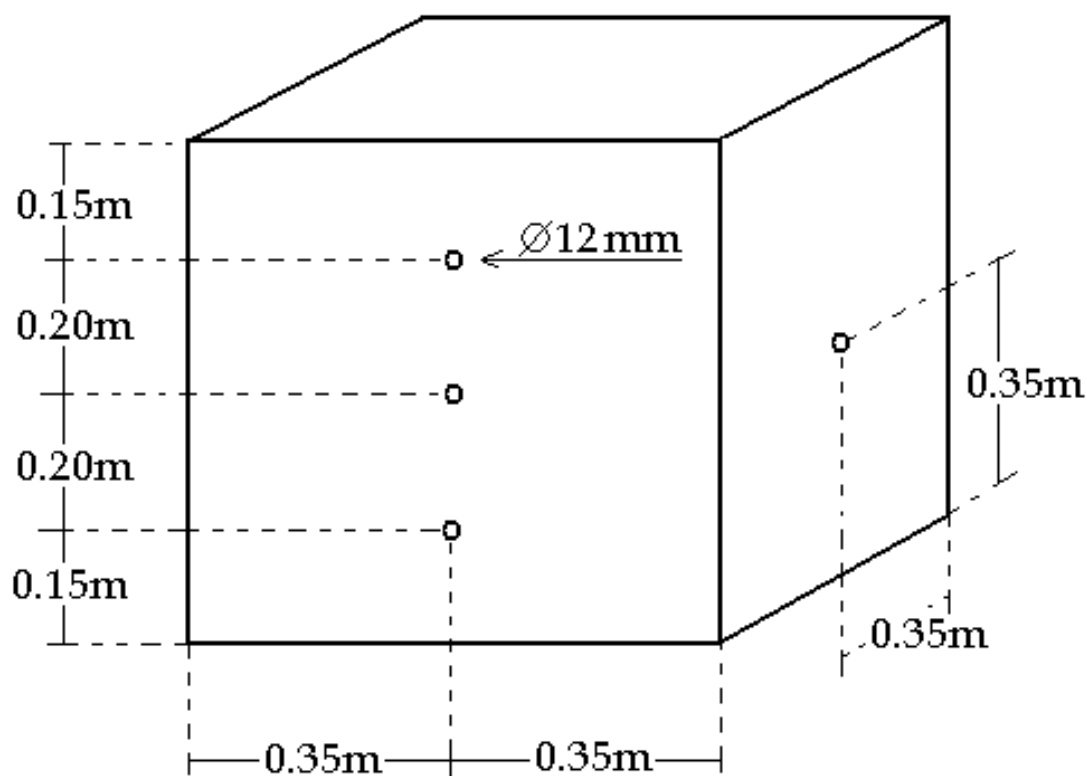
Σχήμα Κατασκευής: Κύβος με μήκος πλευράς 0.7m

Όγκος κελιού: 343 L

ΠΡΟΣΟΨΗ

Χαρακτηριστικά (βλ. Σχήμα 9-8):

- 3 οπές διαμέτρου 12mm σε κατακόρυφη διάταξη
- 1 οπή διαμέτρου 12mm

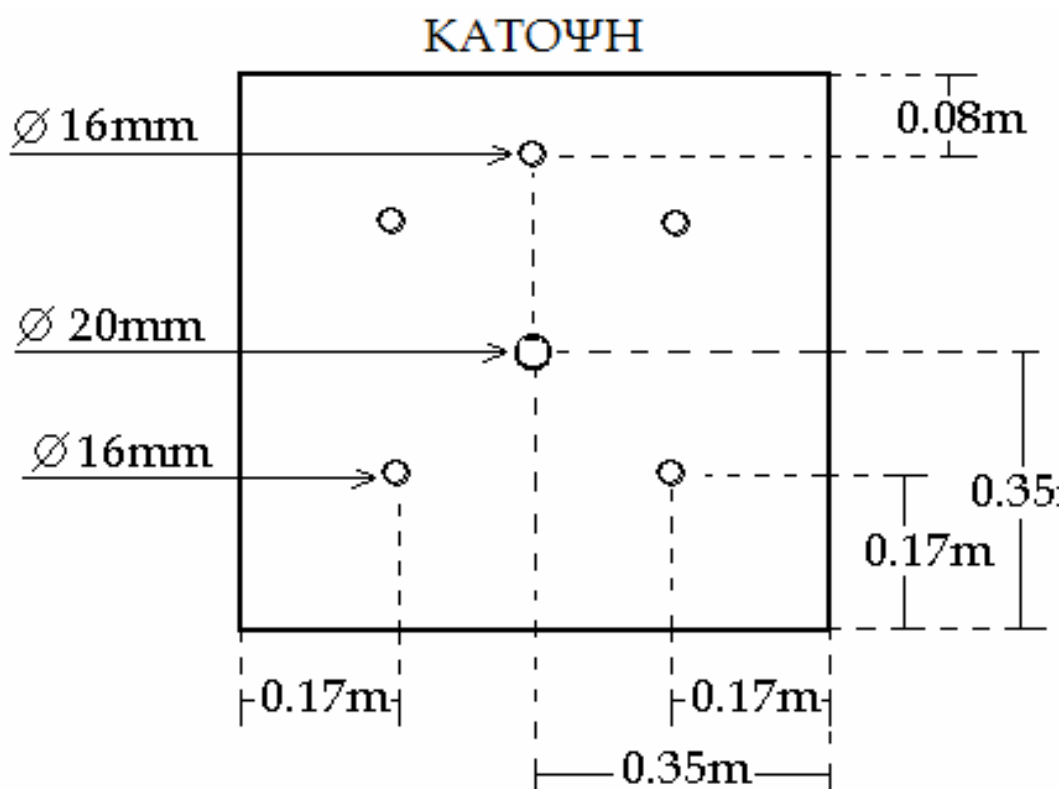


Σχήμα 9-8: Πρόσοψη της κατασκευής. Διακρίνονται οι 4 οπές διαμέτρου 12mm.

ΚΑΤΟΨΗ

Χαρακτηριστικά (βλ. Σχήμα 9-9):

- μετακινούμενο καπάκι (ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αφαίρεσής του από την υπόλοιπη κατασκευή)
- 5 οπές διαμέτρου 16mm
- 1 οπή διαμέτρου 20mm (στο κέντρο)



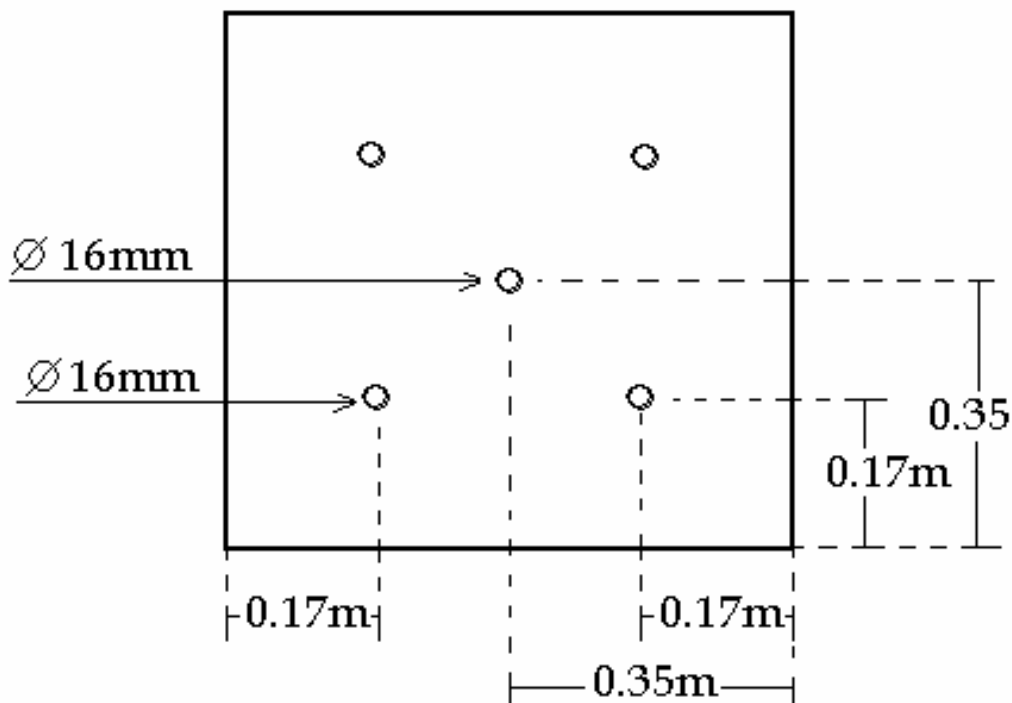
Σχήμα 9-9: Κάτοψη της κατασκευής. Διακρίνονται οι 5 οπές των 16mm και η οπή των 20mm.

Στον αρχικό σχεδιασμό της κάτοψης, οι οπές είχαν διάμετρο 12 mm και όχι 16 mm. Η αλλαγή αυτή πραγματοποιήθηκε αργότερα, μετά την παραλαβή του κελιού, καθώς κρίθηκε ότι η διάμετρος των 16 mm εξυπηρετεί καλύτερα στην τοποθέτηση των αγωγών αερισμού και του αγωγού εξαγωγής του αερίου.

ΠΥΘΜΕΝΑΣ

Χαρακτηριστικά (βλ. Σχήμα 9-10):

- 5 οπές διαμέτρου 16mm για τη συλλογή των διασταλαζόντων υγρών



Σχήμα 9-10: Ο πυθμένας της κατασκευής. Διακρίνονται οι οπές διαμέτρου 16mm.

Στο αρχικό σχέδιο του πυθμένα του κελιού, υπήρχε μία οπή στο κέντρο διαμέτρου 20 mm. Για τους λόγους όμως της καλύτερης συλλογής των στραγγισμάτων και της πρόληψης από μια ενδεχόμενη δημιουργία επίστρωσης (fouling), προτιμήθηκε η δημιουργία 5 οπών διαμέτρου 16 mm.

10.0 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειράματα και οι μετρήσεις που διεξάγονται στον αντιδραστήρα και αφορούν το χρονικό διάστημα από τις 9 Νοεμβρίου 2004 όπου και τοποθετήθηκαν τα απορρίμματα στο κελί έως και τις 9 Ιανουαρίου 2005. Το διάστημα αυτό καθορίστηκε σαν το ελάχιστο απαιτούμενο για την αρχική σταθεροποίηση των συνθηκών λειτουργίας ή απλούστερα σαν το διάστημα προσαρμογής. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η έναρξη της λειτουργίας του συστήματος και η διεξαγωγή των πρώτων πειραματικών μετρήσεων ήταν και ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Από το σημείο αυτό και έπειτα, η έρευνα στο σύστημα επικεντρώνεται στην τακτική παρακολούθηση και μελέτη των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων που συντελούν στην ελεγχόμενη βιοαποικοδόμηση των αστικών στερεών αποβλήτων.

10.1 Προτεινόμενες Αναλύσεις

Γενικότερα, οι αναλύσεις που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία για τους βιοαντιδραστήρες στερεών αποβλήτων σε πλήρη και εργαστηριακή κλίμακα είναι αρκετοί και ιδιαίτερου ενδιαφέροντος από την άποψη του συσχετισμού των παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, στις αναλύσεις που πραγματοποιούνται περιλαμβάνονται:

A. Διασταλάζοντα υγρά

1. Οι αναλύσεις για τις παραμέτρους COD, BOD, λόγος BOD/COD, pH, θερμοκρασία, αλατότητα, οξειδοαναγωγικό δυναμικό, αγωγιμότητα, ολικά πτητικά οργανικά οξέα (Total Volatile Organic Acids), ορθοφωσφορικά ιόντα (ολικός φωσφόρος), νιτρικό άζωτο ($\text{NO}_3\text{-N}$), νιτρώδες άζωτο($\text{NO}_2\text{-N}$) γίνονται μηνιαίως.
2. Οι παράμετροι VOC (Πτητικά Οργανικά Συστατικά), SVOC (Αιωρούμενα Πτητικά Οργανικά Συστατικά), Ολικό Άζωτο (κατά Kjendahl), ολικά διαλυμένα στερεά (Total Dissolved Solids), άλατα

θειικού οξέως (Sulfate), χλώριο, κάλιο, επικίνδυνα μέταλλα αναλύονται ανά εποχή (4 μήνες).

Β. Στερεά απόβλητα

1. Η θερμοκρασία και η υγρασία των αποβλήτων εξετάζονται και καταγράφονται ημερησίως.
2. Η καθίζηση των αποβλήτων εξετάζεται ανά εποχή.
3. Οι αναλύσεις για τα οργανικά στερεά, την περιεχόμενη υγρασία, το pH, το λόγο κυτταρίνης/λιγνίνης, την πυκνότητα και την όψη των αποβλήτων (χρώμα, υφή, τύπος) γίνονται ετησίως.

Γ. Αέριες εκπομπές

1. Η ροή και οι οσμές του βιοαερίου ελέγχονται εβδομαδιαίως.
2. Οι συγκεντρώσεις CO₂, CH₄, O₂ και άλλων επικίνδυνων αερίων ελέγχονται ανά εποχή.

Δ. Άλλες δραστηριότητες

1. Η παροχή του αέρα, η θερμοκρασία του αέρα και η πίεση στις σωληνώσεις ελέγχονται και καταγράφονται σε καθημερινή βάση.
2. Η θερμοκρασία και υγρασία του περιβάλλοντος ελέγχονται και καταγράφονται σε καθημερινή βάση. Οι ίδιες ενέργειες εξάλλου προτείνονται και για τη θερμοκρασία και την περιεχόμενη υγρασία στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Στόχος είναι μια ενδεχόμενη συσχέτιση των παραμέτρων αυτών. Εξετάζεται επίσης η επίδραση της θερμοκρασίας του εισαγόμενου αέρα στη θερμοκρασία των αποβλήτων.
3. Η ποσότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων και κάποια χαρακτηριστικά όπως χρώμα και οσμές καταγράφονται σε καθημερινή βάση.
4. Η ποσότητα των στραγγισμάτων που ανακυκλοφορούν και η ποσότητα του απιονισμένου ύδατος που ενδεχομένως

χρησιμοποιείται σαν συμπλήρωμα υγρασίας καταγράφονται σε καθημερινή βάση.

5. Στις σωληνώσεις γίνεται έλεγχος για πιθανές διαρροές στραγγισμάτων ή αερίων σε καθημερινή βάση.
6. Η μικροβιακή δραστηριότητα των αποβλήτων καταγράφεται σε μηνιαία βάση από την άποψη της εμφάνισης-ανάπτυξης αποικιών μικροοργανισμών.

10.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Στους δύο αυτούς μήνες λειτουργίας του συστήματος, εκτός από την καθημερινή εποπτεία μιας σειράς παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η παροχή κλπ, πραγματοποιήθηκαν και πειραματικές αναλύσεις στα παραγόμενα στραγγίσματα. Όσον αφορά τις παραμέτρους COD, BOD, έγιναν τρία σετ αναλύσεων στις 23 Νοεμβρίου, 20 και 28 Δεκεμβρίου ενώ για το pH, την αγωγιμότητα, την αλατότητα και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό στις 23 Νοεμβρίου, 28 Δεκεμβρίου και 5 Ιανουαρίου.

COD:

Το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο εκφράζει την ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη καύση του χημικού φορτίου ενός διαλύματος. Το COD των στραγγισμάτων υπολογίστηκε σε φασματοφωτόμετρο της εταιρείας “ORBECO HELLIGE”. Αρχικά έγινε η προετοιμασία δύο διαλυμάτων, του τυφλού και αυτού του δείγματος (υπό αραίωση 1/10) με οξειδωτικό αντιδραστήριο διχρωμικού καλίου. Τα διαλύματα τοποθετήθηκαν σε θερμοαντιδραστήρα για 2hr στους 150 °C. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η μέτρηση (βλ. Πίνακα 10-1) στο φασματοφωτόμετρο στην επιλογή “Mid Test” αυτού.

COD (mg/l)	
1 ^η Μέτρηση	3762
2 ^η Μέτρηση	784
3 ^η Μέτρηση	730

Πίνακας 10-1: COD στραγγισμάτων

Όπως φαίνεται στον πίνακα, μόλις σε ένα μήνα λειτουργίας του συστήματος, η συγκέντρωση του COD μειώθηκε κατά 80.6% περίπου. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του συνεχούς φιλτραρίσματος των στραγγισμάτων κατά την ανακυκλοφορία τους και εξαιτίας της μείωσης του ρυθμού εκχύλισης του χημικού φορτίου στο νερό. Σε παρόμοια πειράματα επιβεβαιώνεται αυτή η μείωση (Borglin et al., 2004).

BOD:

Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο εκφράζει την ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς για την βιοαποικοδόμηση του οργανικού φορτίου των στραγγισμάτων. Ο υπολογισμός του έγινε με βάση την υποπίεση που δημιουργείται σε ειδική φιάλη κατά την δέσμευση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα από το καυστικό κάλιο. Χρησιμοποιήθηκαν μανόμετρα τύπου “ΟxιTop”, με χρόνο επώασης 5 ημέρες, σε θερμοκρασία 20 °C. Τα αποτελέσματα μέχρι στιγμής είναι ιδιαίτερος ενθαρρυντικά (βλ. Πίνακα 10-2).

BOD (mg/l)	
1 ^η Μέτρηση	1050
2 ^η Μέτρηση	200
3 ^η Μέτρηση	180

Πίνακας 10-2: BOD στραγγισμάτων

Η μείωση του BOD είναι της τάξης του 82.8% και συνέβη για τον ίδιο λόγο που δόθηκε για τα αποτελέσματα του COD. Η συνεχής διήθηση και η μείωση του ρυθμού εκχύλισης του φορτίου των απορριμμάτων στα στραγγίσματα σε συνδυασμό με τη συνεχή αύξηση της επίδρασης της βιοδιάσπασης εξηγούν το φαινόμενο αυτό. Άλλωστε η βιοαποικοδόμηση αναμένεται να γίνει περισσότερο αισθητή κατά τους επόμενους μήνες λειτουργίας του συστήματος. Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει και η μεταβολή του λόγου των παραμέτρων αυτών, καθώς αποτελεί κριτήριο της σταθεροποίησης των στερεών αποβλήτων (Πίνακας 10-3). Η απότομη πτώση των συγκεντρώσεων του COD και του BOD είναι κάτι που επιβεβαιώνεται στην βιβλιογραφία είτε πραγματοποιείται

συνδυασμός αερισμού και ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων (Borglin et al., 2004) είτε μόνο της ανακυκλοφορίας (Warith, 2002).

BOD/COD	
1 ^η Μέτρηση	0.28
2 ^η Μέτρηση	0.26
3 ^η Μέτρηση	0.25

Πίνακας 10-3: Λόγος BOD/COD

pH και οξειδοαναγωγικό δυναμικό (Redox):

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών χρησιμοποιήθηκε η φορητή συσκευή “PH 25” της εταιρείας “CRISON INSTRUMENTS, S.A”. Για τη μέτρηση του pH χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο πλατίνας (Pt 1000, “5051”). Οι τιμές ανάγονται άμεσα σε θερμοκρασία 25 °C. Στον πίνακα που ακολουθεί διακρίνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν για αυτές τις παραμέτρους.

	pH	Redox (mV)
1 ^η Μέτρηση (@ 25 °C)	8.15	-48
2 ^η Μέτρηση (@ 25 °C)	8.34	-49
3 ^η Μέτρηση (@ 25 °C)	8.14	-48

Πίνακας 10-4: pH και Redox στραγγισμάτων

Διαπιστώνεται ότι το pH διατηρείται σε ελαφρώς αλκαλικά επίπεδα, κάτι που δεν αναμένεται να αλλάξει ιδιαίτερος καθ’ όλη τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, στα αερόβια συστήματα ενδέχεται να απαιτηθεί διόρθωση του pH μία ή δύο φορές στα πρώτα δύο χρόνια λειτουργίας τους. Αυτό συμβαίνει γιατί με την τεχνική του βιοαερισμού επιμηκώνεται η αερόβια φάση αποδόμησης και παρεμποδίζεται η εμφάνιση της όξινης αναερόβιας στη διάρκεια της οποίας ελαττώνεται το pH. Οι παρατηρήσεις αυτές ισχύουν και για το οξειδοαναγωγικό δυναμικό που επίσης δεν αναμένεται να μεταβληθεί σημαντικά.

Αγωγιμότητα και αλατότητα:

Με τον όρο αγωγιμότητα ενός διαλύματος εννοούμε την δυνατότητα που έχει το διάλυμα να επιτρέπει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και συνήθως εκφράζεται σε μονάδες S/cm. Με τον όρο αλατότητα εκφράζουμε τη συγκέντρωση ενός υποθετικού διαλύματος NaCl που έχει την ίδια αγωγιμότητα με το προς ανάλυση διάλυμα. Οι μονάδες μέτρησης είναι mg/l ή g/l NaCl. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών χρησιμοποιήθηκε η φορητή συσκευή “CM 35” της εταιρείας “CRISON INSTRUMENTS, S.A”. Για τη μέτρησή τους χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο πλατίνας (Pt 1000, “5061”). Οι τιμές ανάγονται αυτόματα στους 25 °C (θερμοκρασία αναφοράς) και με απόσταση αναφοράς το 1 cm. Τα αποτελέσματα διακρίνονται στον Πίνακα 10-5 που ακολουθεί.

	Αγωγιμότητα (mS/cm)	Αλατότητα (mg/l)
1 ^η Μέτρηση (25 °C)	9.80	5330
2 ^η Μέτρηση (25 °C)	11.06	6020
3 ^η Μέτρηση (25 °C)	10.85	5950

Πίνακας 10-5: Αγωγιμότητα και αλατότητα στραγγισμάτων

Οι παράμετροι αυτές δεν αναμένεται να μεταβληθούν ιδιαίτερος στην προβλεπόμενη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

Όσον αφορά τα θειικά (SO_4^{2-}), νιτρικά (NO_3^-), φωσφορικά (PO_4^{3-}), χλωρικά (Cl⁻), βρωμικά (Br^-) και φθορικά (F⁻) ιόντα πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων στις 14 Δεκεμβρίου 2004. Ο υπολογισμός τους έγινε με ιοντική χρωματογραφία. Το δείγμα των στραγγισμάτων φιλτράρεται αρχικά στα 0.2 μm και στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή του στον ιοντικό χρωματογράφο. Εκεί, κάθε ανιόν του δείγματος εκχειλίζεται στον χρησιμοποιούμενο διαλύτη (Na_2CO_3) σε διαφορετικό χρονικό σημείο, χαρακτηριστικό για το ανιόν αυτό. Μετά την ταυτοποίηση αυτή, δημιουργείται μια καμπύλη απόκρισης (χρωματογράφημα) από το εμβαδόν της οποίας προκύπτει η συγκέντρωση του ανιόντος. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Ανιόντα	Συγκέντρωση (ppm)	Εύρος τιμών (ppm)
Θειικά (SO_4^{-2})	985	50 - 1000
Νιτρικά (NO_3^-)	<5	5 - 40
Φωσφορικά (PO_4^{-3})	<5	4 - 80
Χλωρικά (Cl ⁻)	3745	200 - 3000
Βρωμικά (Br^-)	4.79	Μη Διαθέσιμο
Φθορικά (F ⁻)	4.76	Μη Διαθέσιμο

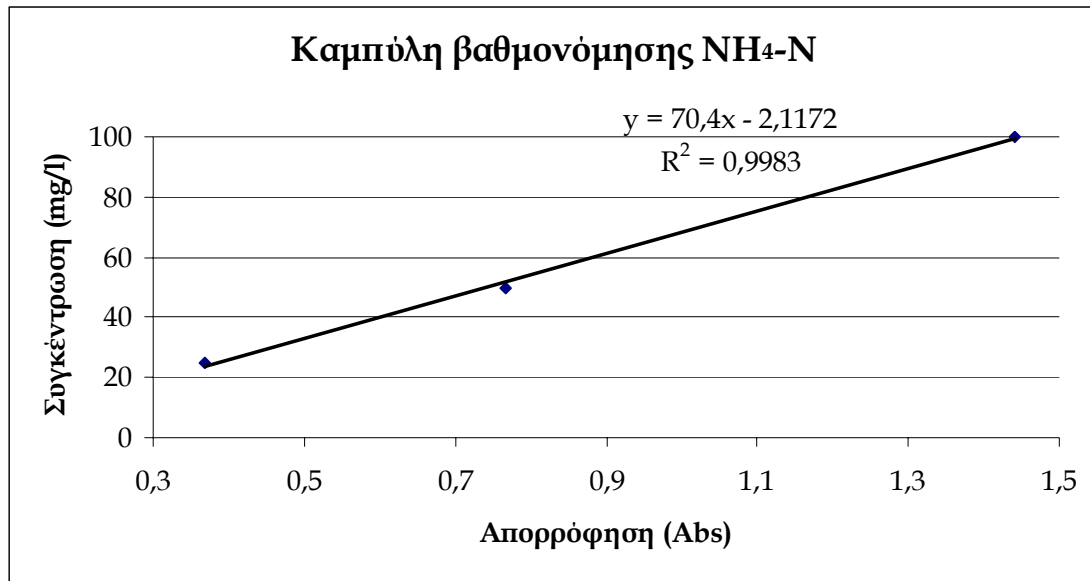
Πίνακας 10-6: Συγκεντρώσεις ανιόντων στα στραγγίσματα

Διαπιστώνουμε ότι τα θειικά ιόντα είναι οριακά εντός του εύρους των 50-1000 mg/l που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Tchobanoglous et al., 1993). Αυτό δεν ισχύει για τη συγκέντρωση των νιτρικών (εύρος 5-40 mg/l), των φωσφορικών (εύρος 4-80 mg/l) και των χλωρικών (εύρος 200-3000 mg/l) ιόντων που είναι εκτός ορίων.

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου ($NH_4^+ - N$) πραγματοποιήθηκε στις 15 Δεκεμβρίου 2004. Οι μετρήσεις έγιναν με τη μέθοδο της φασματοφωτομετρίας (UV-VIS). Για τον προσδιορισμό χρησιμοποιήθηκαν αντιδραστήρια της εταιρείας “MERCK” σε εύρος τιμών 2-150 mg/l. Η συσκευή ρυθμίστηκε σε μήκος κύματος 712 nm και χρησιμοποιήθηκε κάψουλα (κελί) των 10 mm. Δημιουργήθηκε καμπύλη βαθμονόμησης με πρότυπα διαλύματα $NH_4^+ - N$ των 25, 50 και 100 ppm. Στο στράγγισμα πραγματοποιήθηκε αραιώση 1/10, ενώ για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε το φασματοφωτόμετρο “UV-1202” της εταιρείας “Shimadzu”. Στον Πίνακα 10-7 που ακολουθεί φαίνονται τα δεδομένα για την καμπύλη βαθμονόμησης (Σχήμα 10-1), ενώ στον Πίνακα 10-8 η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου.

Πρότυπα διαλύματα	
Συγκέντρωση (ppm)	Απορρόφηση (Abs)
25	0,369
50	0,766
100	1,441

Πίνακας 10-7: Δεδομένα καμπύλης βαθμονόμησης



Σχήμα 10-1: Καμπύλη βαθμονόμησης αμμωνιακού αζώτου

Δείγμα		
Απορρόφηση	Συγκέντρωση αραιού (ppm)	Συγκέντρωση στραγγισμάτων (ppm)
1,052	71,9436	719,436

Πίνακας 10-8: Συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου στα στραγγίσματα

Διαπιστώνουμε ότι η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου είναι αρκετά υψηλή (719.5 mg/l, εύρος τιμών 10-800 mg/l) εν αντιθέσει με τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων (βλ. Πίνακα 10-6). Οι τιμές αυτές ταιριάζουν περισσότερο σε αναερόβιο σύστημα παρά σε αερόβιο. Πράγματι, η διακοπή της παροχής του αέρα στο σύστημα λόγω βλάβης του κεντρικού δικτύου διανομής που κράτησε για 3 ημέρες είχε το αποτέλεσμα αυτό. Τα προς εξέταση στραγγίσματα συλλέχθηκαν λίγο μετά την αποκατάσταση της βλάβης. Το διάστημα όμως ήταν αρκετό για την επικράτηση αναερόβιων συνθηκών στο σύστημα με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της νιτροποίησης (μετατροπή αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα). Ταυτόχρονα οι οσμές του εξερχόμενου αερίου ήταν έντονες όχι μόνο λόγω της αμμωνίας αλλά και λόγω της παραγωγής υδρόθειου.

Στις 17 και 20 Δεκεμβρίου πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης διαφόρων μετάλλων και συγκεκριμένα του

νικελίου (Ni), του καδμίου (Cd), του μολύβδου (Pb), του αρσενικού (As), του ψευδαργύρου (Zn) και του μαγνησίου (Mg). Οι μετρήσεις έγιναν με τη μέθοδο της φασματοφωτομετρίας ατομικής απορρόφησης (Atomic Absorption Spectrometry) με εφαρμογή της τεχνικής του φούρνου γραφίτη (furnace) και της φλόγας (flame). Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο “AAS 6 vario, Carl Zeiss Technology” της εταιρείας “Analytic Jena” σε οξινισμένο διάλυμα στραγγισμάτων (με προσθήκη HNO_3). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στον Πίνακα 10-9 που ακολουθεί.

Μέταλλο	Απορρόφηση (Abs)	Συγκέντρωση	Μονάδες	Εύρος (ppm)
Ni	0,2408	88,851	ppb	0.53-1.98
Cd	0,041	4,064	ppb	0.04-0.10
Pb	0,032	54,972	ppb	0.45-0.81
As	0,041	9,299	ppb	Μη Διαθέσιμο
Zn	0,8034	9,436	ppm	10-30
Mg	1,34	57,643	ppm	50-1500

Πίνακας 10-9: Συγκεντρώσεις μετάλλων στα στραγγίσματα

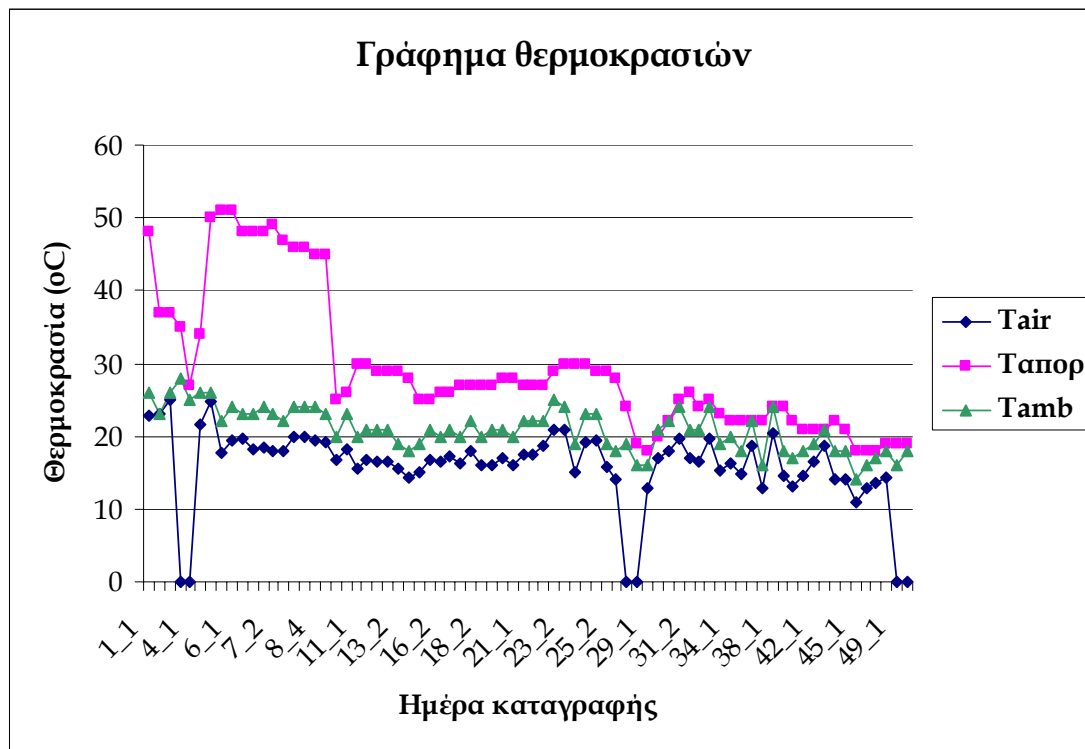
Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των μετάλλων, αυτές παρουσιάζονται πολύ χαμηλότερες αυτών που συναντά κανείς στη διεθνή βιβλιογραφία. Πιο αναλυτικά στα τρία πρώτα χρόνια ταφής μιας ποσότητας απορριμμάτων, το νικέλιο φαίνεται να κυμαίνεται μεταξύ 0.53-1.98 mg/l, το κάδμιο μεταξύ 0.04-0.10 mg/l και ο μολύβδος μεταξύ 0.45-0.81 mg/l (Qasim and Chiang, 1994). Ο ψευδάργυρος για τον πρώτο χρόνο ταφής φαίνεται μεταξύ 10-30 mg/l (Qasim and Chiang, 1994) και το μαγνήσιο μεταξύ 50-1500 mg/l για τα πρώτα δύο χρόνια λειτουργίας ενός χώρου ταφής (Tchobanoglous et al., 1993).

10.3 Καθημερινή παρακολούθηση

Εκτός από τις πειραματικές αναλύσεις, ένα πολύ σημαντικό μέρος αυτής της έρευνας είναι αυτό που αφορά την παρακολούθηση και τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος. Συγκεκριμένα, σε καθημερινή βάση γίνεται καταγραφή παραμέτρων όπως η θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία και υγρασία απορριμμάτων, η θερμοκρασία του αέρα

εισαγωγής και της πίεσης στους αγωγούς του συστήματος (βλ. Παράρτημα Β). Παράλληλα, καταγράφεται η παραγωγή και η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων καθώς και η προσθήκη απιονισμένου ύδατος. Το απιονισμένο νερό αφού πρώτα αναμιχθεί με τα διασταλάζοντα υγρά, εισάγεται στο σύστημα σαν συμπλήρωμα υγρασίας όταν η ποσότητα των στραγγισμάτων είναι μικρή. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται καταγραφή της σύστασης του εξερχόμενου αερίου με το ενδιαφέρον να εστιάζεται στο O_2 , το CO_2 και το CH_4 .

Στο σχήμα 10-2 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της θερμοκρασίας των απορριμμάτων, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας του εισαγόμενου αέρα για το διάστημα 11 Νοεμβρίου-9 Ιανουαρίου.



Σχήμα 10-2: Γραφικές παραστάσεις θερμοκρασιών

Στο γράφημα αυτό διαπιστώνουμε ότι η θερμοκρασία του εισαγόμενου αέρα (T_{air}) είναι η χαμηλότερη όλων και παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}). Οι τρεις απότομες μειώσεις μέχρι μηδενισμού της θερμοκρασίας του αέρα αντιστοιχούν στις τρεις περιπτώσεις βλάβης του συστήματος διανομής αέρα. Η απότομη πτώση στη θερμοκρασία

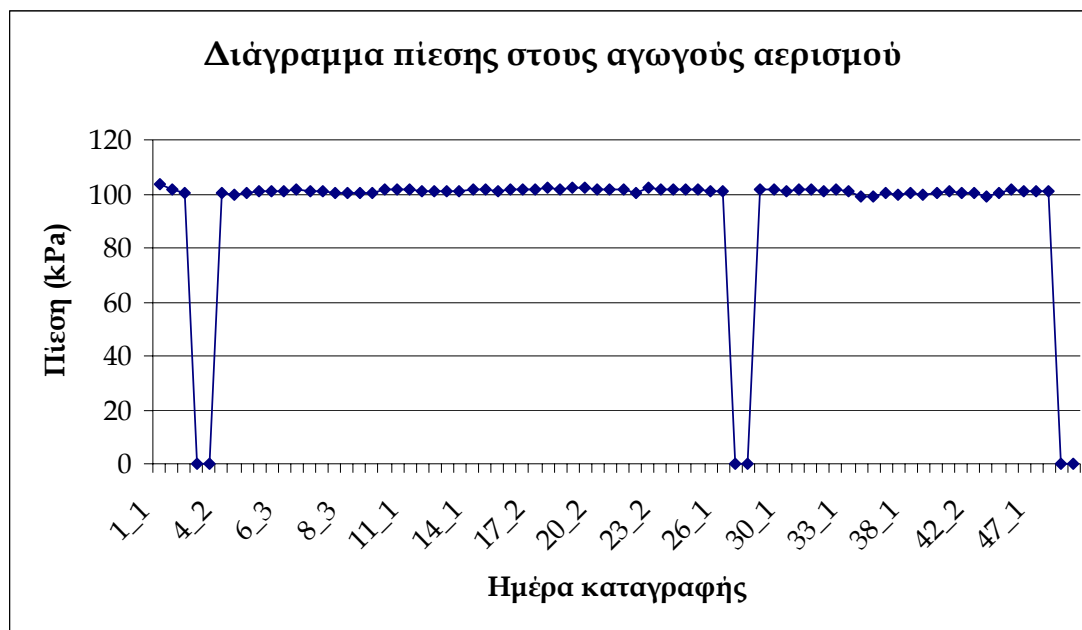
των απορριμμάτων ($T_{\text{απορ}}$) στην αρχή του πειράματος οφείλεται στην ψύξη που προκλήθηκε από την εισαγωγή μεγάλης ποσότητας απιονισμένου ύδατος (10 l). Από το σημείο αυτό και έπειτα, αρχίζει να επιδρά στη θερμοκρασία των απορριμμάτων η ψύξη από τον εισαγόμενο αέρα με αποτέλεσμα να κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30 °C.

Στο σχήμα 10-3 καταγράφεται η υγρασία περιβάλλοντος (RH_{amb}), καθώς η συσκευή καταγραφής που είναι συνδεδεμένη στο σύστημα λειτουργεί σαν μετεωρολογικός σταθμός. Η υγρασία αυτή είναι περίπου ίδια με αυτήν του εισαγόμενου αέρα. Κυμαίνεται μεταξύ 20 και 70%.



Σχήμα 10-3: Γραφική παράσταση σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος

Ιδιαίτερης σπουδαιότητας είναι οι διαπιστώσεις που αφορούν την πίεση στους αγωγούς του συστήματος (αγωγοί ροής αέρα). Στο σχήμα 10-4 που ακολουθεί διαπιστώνουμε πως η πίεση διατηρείται κοντά στα 100 kPa (1 bar). Οι τρεις μεγάλες πτώσεις της πίεσης αναπαριστούν τις τρεις περιπτώσεις βλάβης του συστήματος διανομής αέρα. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε πως ακόμη και κατά τη διάρκεια πειραματισμών με την παροχή του αέρα (2-180 l/min) που διαρκούσαν μία ή και δύο ημέρες, η πίεση στους αγωγούς δεν μεταβλήθηκε γεγονός που αποδεικνύει ότι η ροή του αέρα στα απορρίμματα είναι ομαλή.



Σχήμα 10-4: Γραφική παράσταση πίεσης στους αγωγούς

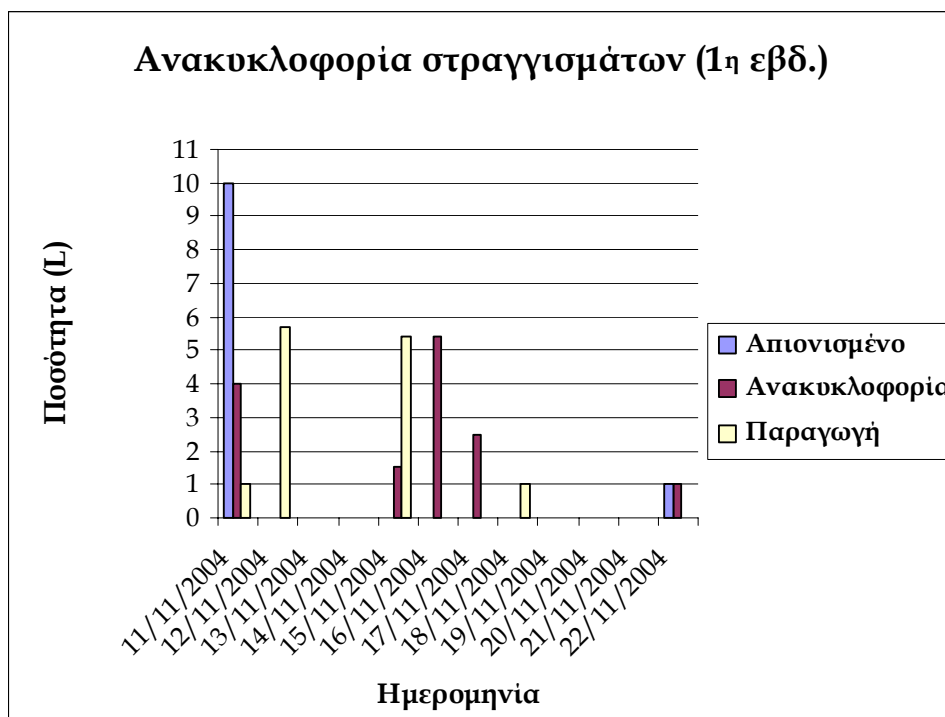
Στον Πίνακα 10-10 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέση τιμή για κάθε μία από τις παραμέτρους που παρουσιάστηκαν.

Μέσες Τιμές				
Tair (°C)	Pair (kPa)	Tαπορ (°C)	RHamb (%)	Tamb (°C)
15,9	92,9	29,3	46,7	21,0

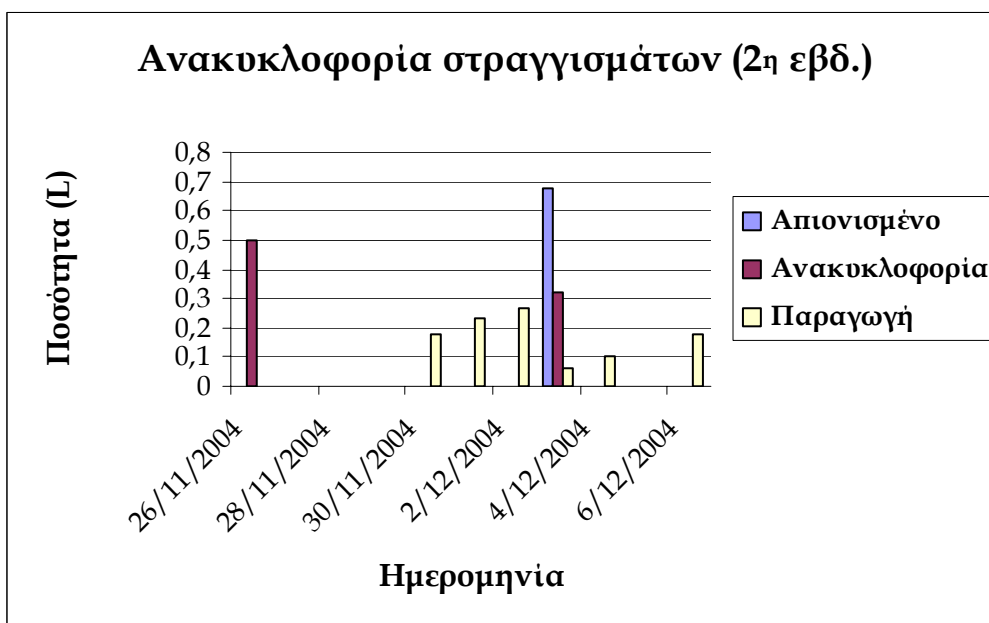
Πίνακας 10-10: Μέσες τιμές παραμέτρων λειτουργίας

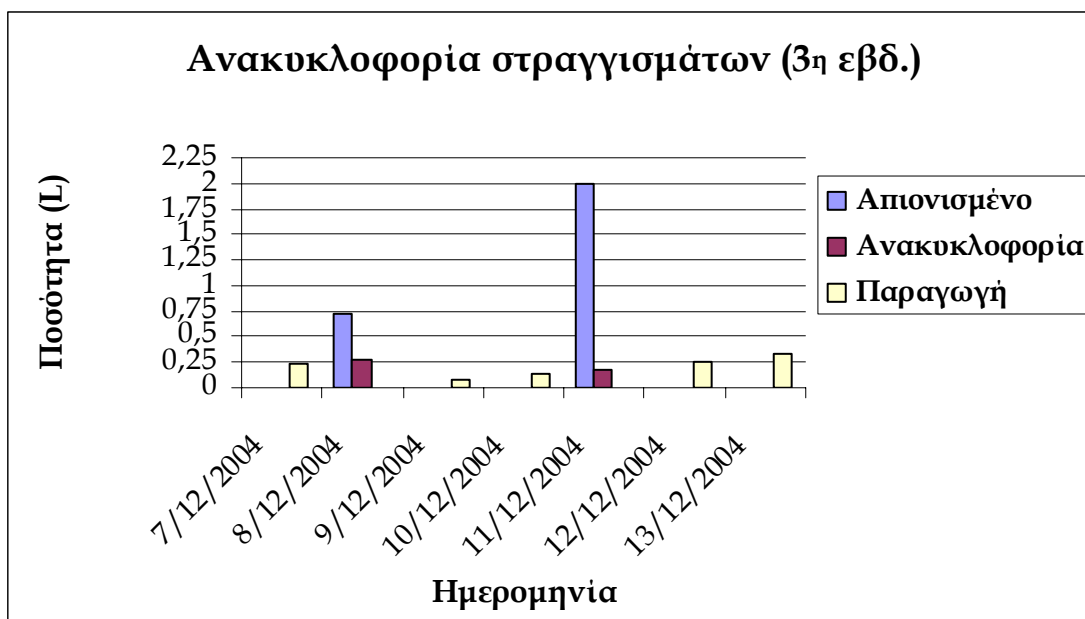
Διαπιστώνουμε ότι η μέση θερμοκρασία των απορριμμάτων (29,3 °C) διατηρείται σε επίπεδα που εξυπηρετούν τη βιοαποικοδόμηση.

Όσον αφορά τα στραγγίσματα, στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η ποσότητα ανακυκλοφορίας, η παραγωγή των διασταλαζόντων με αθροιστικό τρόπο και η εισαγωγή απιονισμένου ύδατος στο σύστημα. Τα στοιχεία παρουσιάζονται ανά εβδομάδα καταγραφής (1^η έως 6^η).

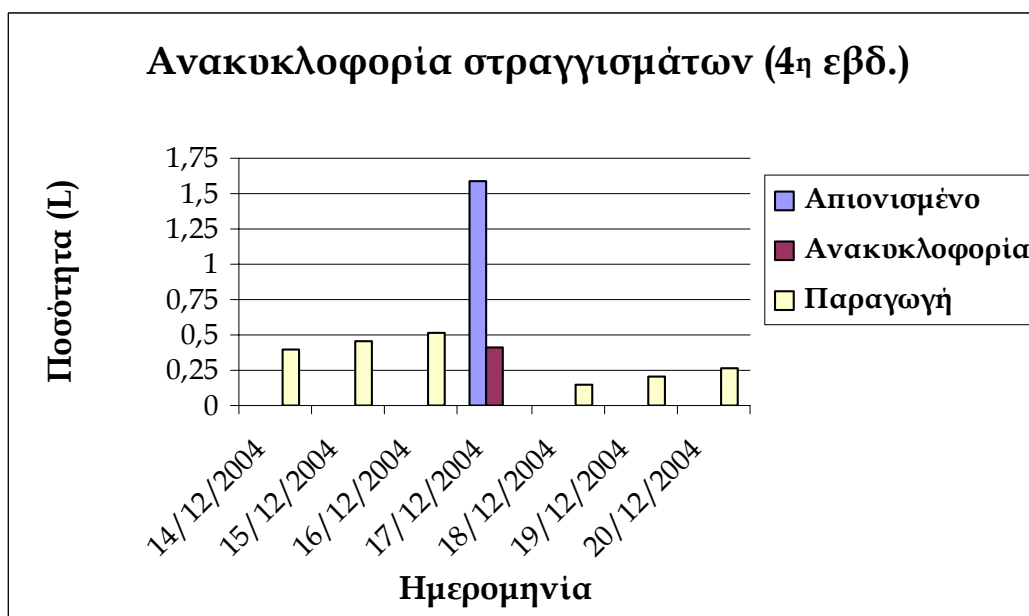
Σχήμα 10-5: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 1^η εβδομάδα καταγραφής

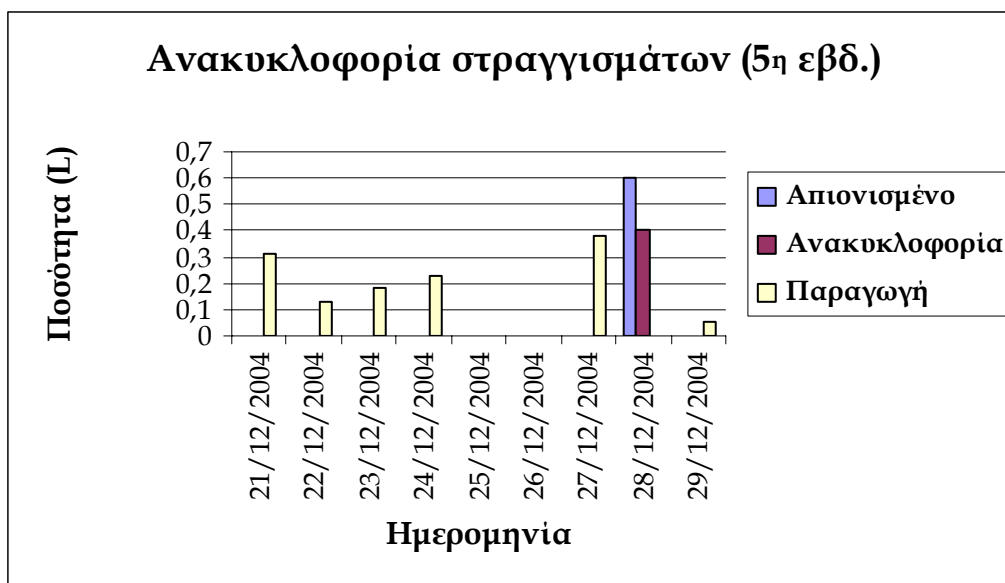
Στο σχήμα 10-5 φαίνεται η αρχική ποσότητα απιονισμένου ύδατος (10 l) που χρησιμοποιήθηκε για την προσφορά υγρασίας στο σύστημα έτσι ώστε να παραχθεί κάποια ποσότητα στραγγισμάτων (5 l). Αμέσως μετά ανακυκλοφόρησε στο σύστημα ποσότητα 4 l.

Σχήμα 10-6: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 2^η εβδομάδα καταγραφής

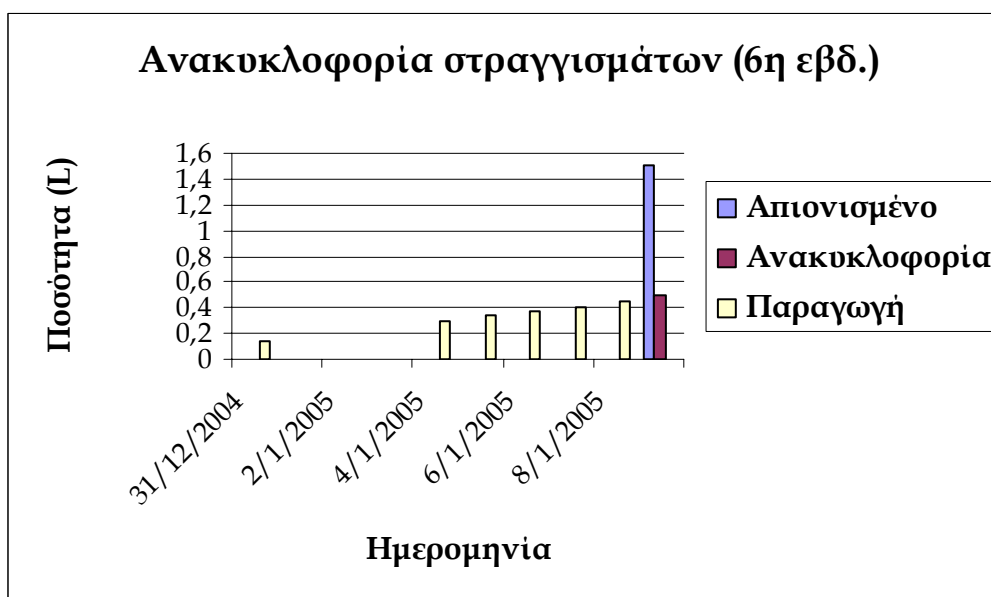
Σχήμα 10-7: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 3^η εβδομάδα καταγραφής

Κατά τη δεύτερη εβδομάδα η παραγωγή των στραγγισμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0.040 και 0.180 l, ενώ για την τρίτη 0.050 και 0.260 l ημερησίως.

Σχήμα 10-8: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 4^η εβδομάδα καταγραφής

Σχήμα 10-9: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 5^η εβδομάδα καταγραφής

Κατά την 4^η εβδομάδα καταγραφής, η παραγωγή κυμαίνεται μεταξύ 0.050 και 0.140 l ημερησίως. Για την 5^η εβδομάδα το αντίστοιχο εύρος είναι 0.050-0.150 l ανά ημέρα.

Σχήμα 10-10: Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για την 6^η εβδομάδα καταγραφής

Για την 6^η εβδομάδα καταγραφής, η παραγωγή κυμαίνεται μεταξύ 0.030-0.160 l/d.

Στον Πίνακα 10-11 που ακολουθεί διακρίνονται οι μέσες τιμές της παραγωγής, της ανακυκλοφορίας και της εισαγωγής απιονισμένου ύδατος.

Μέσες τιμές (l/d)			
	Απιονισμένο	Ανακυκλοφορία	Παραγωγή
1 ^η εβδομάδα	1,571	2,057	1,150
2 ^η εβδομάδα	0,097	0,117	0,064
3 ^η εβδομάδα	0,389	0,064	0,076
4 ^η εβδομάδα	0,227	0,059	0,061
5 ^η εβδομάδα	0,086	0,057	0,050
6 ^η εβδομάδα	0,216	0,070	0,057
Συνολικά	0,431	0,404	0,221

Πίνακας 10-11: Μέσες τιμές δεδομένων ανακυκλοφορίας

Διαπιστώνουμε γενικά ότι το σύστημα, με εξαίρεση την πρώτη εβδομάδα καταγραφής όπου και έγινε εισαγωγή μεγάλης ποσότητας απιονισμένου ύδατος, αποδίδει μεταξύ 50-80 ml ημερησίως με μέση τιμή 62 ml/d.

Η υγρασία των απορριμμάτων καθ' όλο αυτό το διάστημα λειτουργίας, σύμφωνα με τις ενδείξεις του καταγραφικού υγρασίας διατηρείται πάνω από 40 % (σε ξηρή βάση). Συγκεκριμένα, το όργανο παρέχει μετρήσεις της πίεσης κενού που δημιουργείται στους πόρους της μάζας των αποβλήτων που ως γνωστόν η τιμή της είναι αντιστρόφως ανάλογη του % ποσοστού υγρασίας. Στους δύο μήνες λειτουργίας του συστήματος, η πίεση κενού διατηρήθηκε μεταξύ 0-5 kPa.

Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος θα είναι και οι παρατηρήσεις σχετικά με τη σύσταση του εξερχόμενου αερίου. Προς το παρόν όμως, επειδή το χρονικό διάστημα λειτουργίας του συστήματος είναι μικρό, δεν μπορούμε να εξαγάγουμε ασφαλή συμπεράσματα. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 10-12) παρουσιάζεται η σύσταση του εξερχόμενου αερίου ως προς το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο.

Σύσταση αερίου (%)	O ₂	CO ₂	CH ₄
1 ^η Μέτρηση	20,4	0,6	0
2 ^η Μέτρηση	20,7	0,2	0
3 ^η Μέτρηση	20,7	0,2	0

Πίνακας 10-12: Σύσταση αερίου εξόδου

Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν ένα μήνα μετά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος και με μεταξύ τους διαφορά 15 ημερών (13 και 28 Δεκεμβρίου, 8 Ιανουαρίου).

10.4 Αναμενόμενα αποτελέσματα λειτουργίας

Εξαιτίας της πολυπαραμετρικότητας των συστημάτων βιολογικής επεξεργασίας στερεών αποβλήτων, είναι ιδιαιτέρως δύσκολο να προβεί κανείς σε προβλέψεις σχετικές με την απόδοσή τους. Όταν μάλιστα εμφανίζονται και φαινόμενα συνέργειας μεταξύ των εξεταζόμενων παραμέτρων, η σωστή εκτίμηση της απόδοσης καθίσταται ακόμα πιο δύσκολη. Παρόλα αυτά, μπορούν να γίνουν κάποιες εκτιμήσεις όσον αφορά τον αντιδραστήρα για κάποιες από τις παρακολουθούμενες παραμέτρους τουλάχιστον για το πρώτο τρίμηνο λειτουργίας του, σύμφωνα πάντα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

1. Θερμοκρασία αποβλήτων: κατά τις πρώτες 30 μέρες λειτουργίας του αντιδραστήρα η θερμοκρασία των αποβλήτων δεν είχε σταθεροποιηθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αέρας ψύχει μεν τα απόβλητα αλλά οι μικροβιακές διεργασίες δεν έχουν φτάσει σε σταθερές συνθήκες. Αναμένεται μετά το πέρας του πρώτου τριμήνου η εσωτερική θερμοκρασία να προσεγγίσει τη θερμοκρασία του εισαγόμενου αέρα. Εξάλλου, η τάση αυτή εμφανίζεται ήδη. Η διαφορά στις θερμοκρασίες μετά τη σταθεροποίηση των συνθηκών και μέχρι το τέλος των πειραμάτων θα κυμανθεί στους ± 5 °C. Παρόλο που έγιναν αρκετές προσπάθειες θερμομόνωσης του κελιού, η εισαγωγή αέρα και η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων σε συνδυασμό με τον υψηλό λόγο επιφάνειας/μάζας των αποβλήτων δεν επιτρέπουν τη διατήρηση αυξημένων θερμοκρασιών. Σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμογής του βιοαερισμού σε χώρο ταφής αποβλήτων, έχουν καταγραφεί θερμοκρασίες μέχρι και 60 °C. Επίσης, είναι γνωστός ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η θερμοκρασία στην κινητική των αντιδράσεων. Για το λόγο αυτό, ο ρυθμός που υπολογίζεται για παράδειγμα στους 20 °C δεν είναι αντιπροσωπευτικός αυτού στο πεδίο όπου οι θερμοκρασίες είναι

αυξημένες. Το πιθανότερο λοιπόν είναι πως οι ρυθμοί των αντιδράσεων στο πείραμα θα ήταν υψηλότεροι αν η θερμοκρασία ήταν πλησιέστερα σε αυτήν του πεδίου ($\approx 40^\circ\text{C}$) και επομένως τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, αποτελούν συντηρητικές προσεγγίσεις της πραγματικότητας.

2. Συγκέντρωση O_2 , CO_2 : στο αέριο που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα η συγκέντρωση του οξυγόνου θα είναι μεταξύ 20 και 20.9% ενώ η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα θα είναι μεταξύ 0 και 1% για όσο διάστημα διατηρούνται οι αερόβιες συνθήκες. Οι τιμές αυτές είναι παρόμοιες με αυτές της ατμόσφαιρας. Μετά το πέρας του πρώτου τετράμηνου και ανά τακτά χρονικά διαστήματα, πραγματοποιούνται τεστ αναπνοής για τον υπολογισμό του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου, με την παύση της εισαγωγής αέρα και την ταυτόχρονη παρακολούθηση της κατανάλωσης του οξυγόνου και της παραγωγής του διοξειδίου. Ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου υπολογίζεται από την κλίση της γραφικής παράστασης της μείωσης του οξυγόνου ως προς το χρόνο. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της συνολικής παραγωγής CO_2 και να γίνει αναγωγή στη μονάδα μάζας των απορριμμάτων.
3. Οσμές: έχει αποδειχτεί σε παρόμοια πειράματα πως υπάρχει σημαντική διαφορά στις οσμές των στραγγισμάτων από αερόβια συστήματα σε σύγκριση με αυτά των αναερόβιων. Οι ανεπιθύμητες οσμές στα αναερόβια συστήματα δημιουργούνται από τα υψηλά επίπεδα αμμωνίας (NH_3) και σουλφιδίων. Μετά το πέρας του πρώτου τριμήνου όπου και αναμένεται να φτάσει το σύστημα σε σταθερές αερόβιες συνθήκες, οι οσμές των στραγγισμάτων θα μειωθούν στο ελάχιστο.
4. pH: η παράμετρος παρακολουθείται σε όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Η τιμή του αναμένεται να κυμανθεί στα επίπεδα του 8 ± 0.5 , καθ' όλη τη διάρκεια τέλεσης των πειραμάτων.

5. Αγωγιμότητα: η παράμετρος αυτή δεν αναμένεται να μεταβληθεί ιδιαίτερος, κατά το πρώτο τρίμηνο λειτουργίας του συστήματος. Η τιμή της το πιθανότερο θα κυμανθεί στα 9.2 ± 1 mS.
6. COD, BOD: οι παράμετροι αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως για τον καθορισμό του βαθμού αποδόμησης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων. Παρόλο που τα κριτήρια ανά τον κόσμο ποικίλουν, υπάρχει μια γενικότερη άποψη ότι τα σταθεροποιημένα διασταλάζοντα υγρά έχουν μια τιμή για το λόγο BOD/COD μικρότερο του 0.1. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του BOD δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 100 mg/l και του COD τα 1000 mg/l. Μετά το πέρας του πρώτου τριμήνου λειτουργίας του συστήματος, το BOD αναμένεται να μειωθεί κοντά στα 150 από τα 1050 mg/l που είναι η πρώτη μέτρηση. Όσον αφορά το COD, η αναμενόμενη τιμή για το ίδιο διάστημα είναι τα 700 mg/l, από τα 3760 mg/l που ήταν κατά την πρώτη μέτρηση.
7. Καθίζηση των αποβλήτων: πρόκειται για μια πολύ σημαντική παράμετρο που διαφοροποιεί τους δύο τύπους ταφής αποβλήτων, τον ξηρό και αυτόν του βιοαντιδραστήρα. Αποδεδειγμένα, εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος των αποβλήτων, η περιεχόμενη υγρασία και η συμπίεση. Παρόλα αυτά, η επίδραση του βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων στην καθίζηση είναι καταλυτική. Στη βιβλιογραφία και σε εργαστηριακή κλίμακα έχει καταγραφεί καθίζηση σε ποσοστά από 18-30% μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Στο παρόν πείραμα, τα τοιχώματα από plexiglas επιτρέπουν τον υπολογισμό της καθίζησης, μέσω της καταγραφής του μέσου ύψους των αποβλήτων στον αντιδραστήρα. Λόγω της μεγάλης συμπίεσης των απορριμμάτων στο κελί και του κορεσμού του δείγματος με απιονισμένο νερό προκειμένου να παραχθεί η αρχική ποσότητα στραγγισμάτων, δεν αναμένεται κάποιο ποσοστό καθίζησης, τουλάχιστον για το πρώτο τρίμηνο. Αργότερα, μετά την σταθεροποίηση της λειτουργίας του συστήματος αναμένεται ένα ποσοστό καθίζησης λόγω της βιοαποικοδόμησης του οργανικού κλάσματος. Η αναερόβια επεξεργασία και η ξηρή ταφή

συντελούν σε μικρότερα ποσοστά καθίζησης απ' ό τι στην περίπτωση των αερόβιων συνθηκών.

8. Αμμωνία, φωσφορικά, νιτρικά, θειικά, χλωρικά, φθορικά, βρωμικά ιόντα, ιχνοστοιχεία, βαρέα μέταλλα: Με εξαίρεση την αμμωνία και τα νιτρικά ιόντα, δεν αναμένεται ιδιαίτερη μεταβολή στη συγκέντρωση αυτών των παραμέτρων. Με την σταθεροποίηση των αερόβιων συνθηκών στο σύστημα θα δημιουργηθούν συνθήκες νιτροποίησης (μετατροπή αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό).
9. Αλατότητα, οξειδοαναγωγικό δυναμικό: Δεν αναμένεται ιδιαίτερη μεταβολή σε αυτές τις παραμέτρους καθώς τόσο η αγωγιμότητα όσο και το pH δεν πρόκειται να μεταβληθούν σημαντικά κατά το πρώτο τρίμηνο λειτουργίας.

10.5 Προτάσεις

Σύστημα Εισαγωγής Αέρα

1. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα (2 ή 3 μηνών) προτείνεται η πραγματοποίηση τεστ αναπνοής (respiration tests). Σκοπός είναι ο υπολογισμός του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου από τους μικροοργανισμούς στις διάφορες φάσεις της βιοαποικοδόμησης και η επιβεβαίωση της ισχύος των εξισώσεων διαστασιολόγησης του βιοαερισμού στο εργαστηριακό σύστημα.
2. Μετά την διεξαγωγή των τεστ αναπνοής στο σύστημα και την καταγραφή πολύτιμων δεδομένων όπως η σύσταση του εξερχόμενου αερίου, θα είναι δυνατός ο υπολογισμός της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα που παράχθηκε. Στη συνέχεια μπορεί να γίνει η αναγωγή της ποσότητας αυτής στη μονάδα μάζας των απορριμμάτων.

Στραγγίσματα

1. Ανά τρεις μήνες προτείνεται η μεταβολή του ρυθμού ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων (μετά την επίτευξη σταθερών

συνθηκών) με σκοπό την μελέτη της επίδρασης αυτής της παραμέτρου στην ποιότητα των στραγγισμάτων.

2. Μετά την επίτευξη των σταθερών αερόβιων συνθηκών, προτείνεται η πραγματοποίηση του ισοζυγίου ύδατος ανά εποχή του έτους. Συγκεκριμένα, γίνεται ο υπολογισμός του ποσοστού εξάτμισης, του ποσοστού συγκράτησης στη μάζα των αποβλήτων και του ποσοστού που μετά την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων καταλήγει άμεσα στη βάση του κελιού και απομακρύνεται από αυτό.
3. Εκτός από τη βελτίωση των συστημάτων ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, προτείνεται η μελέτη της μείωσης της απόδοσής τους εξαιτίας του “bio-fouling” (δημιουργία επίστρωσης).

Υγρασία Απορριμμάτων

1. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας και της ετερογενούς φύσης των χώρων διάθεσης στερεών αποβλήτων, δεν υπάρχει ιδανική μέθοδος για τον έμμεσο προσδιορισμό του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας των απορριμμάτων in situ. Ο χρησιμοποιούμενος αισθητήρας υγρασίας παρέχει μετρήσεις της πίεσης κενού (σε kPa) που δημιουργείται στους πόρους του εδάφους. Για αρκετούς τύπους εδαφών αλλά όχι για τα απορρίμματα, υπάρχουν γραφικές παραστάσεις που συναρτούν την περιεχόμενη υγρασία (% ποσοστό) με την πίεση κενού. Για το λόγο αυτό προτείνεται η δημιουργία πρότυπων καμπύλων βαθμονόμησης (κανονιστικά διαγράμματα) για απορρίμματα με διαφορετικές συστάσεις. Με τον τρόπο αυτό, θα είναι δυνατός ο έμμεσος προσδιορισμός της υγρασίας (σε % ποσοστό) χωρίς τη λήψη ποσότητας δείγματος.
2. Σε πολλές εφαρμογές πεδίου έχει αποδειχτεί ότι η μοντελοποίηση της μεταφοράς της υγρασίας στο σώμα των αποβλήτων είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κλασσική προσέγγιση που βασίζεται στη ροή σε κορεσμένο ή ακόρεστο πορώδες μέσο δεν βρίσκει εφαρμογή στην πρόβλεψη της

κατανομής της υγρασίας στα απορρίμματα. Προτείνεται η παρακολούθηση της υγρασίας με δεδομένο το μικρό ποσοστό ομοιογένειας που επιτυγχάνεται στα απορρίμματα σε σύγκριση με αυτήν που επιτυγχάνεται σε άλλους τύπους εδαφών. Σκοπός είναι η δημιουργία ισοκλινών για την χαρτογράφηση της κατανομής των στραγγισμάτων (υδρολογία χώρων διάθεσης απορριμμάτων).

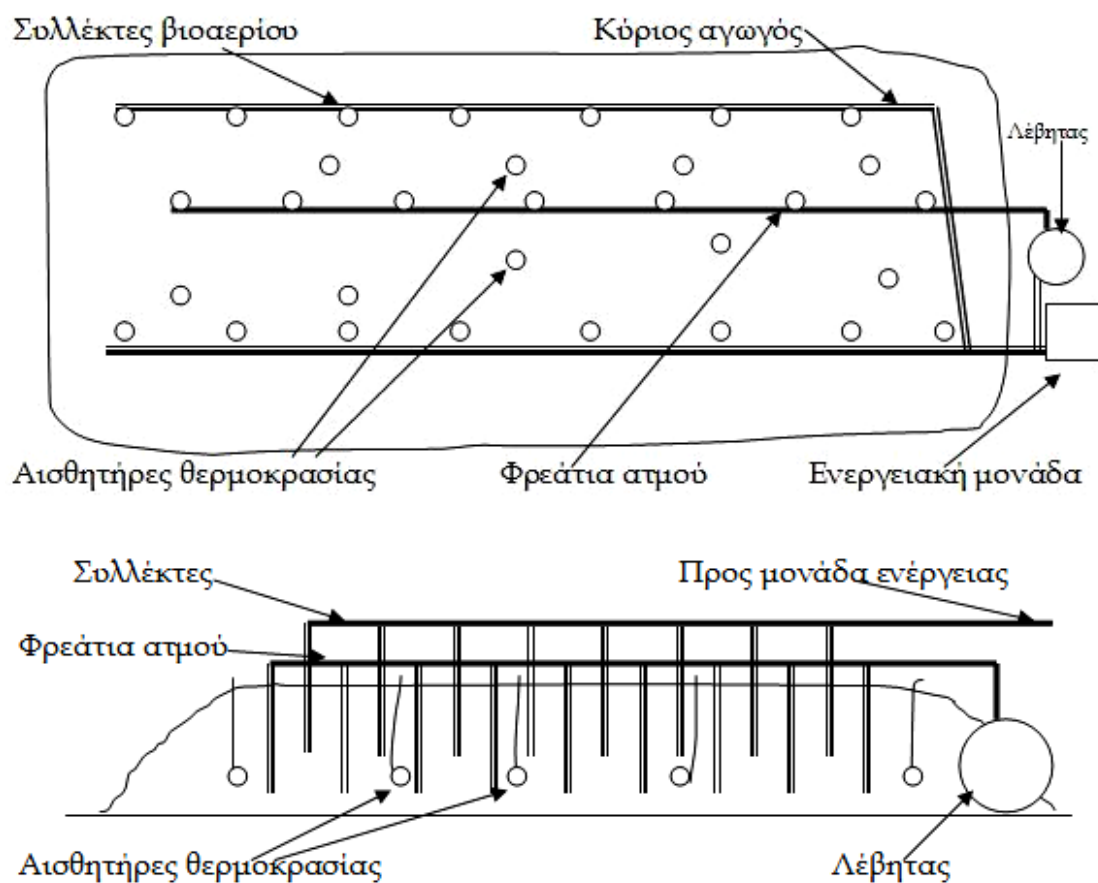
3. Προτείνεται η μελέτη της επίδρασης της εποχικότητας στην βιοαποικοδόμηση των αποβλήτων. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η περίπτωση της προσθήκης υγρασίας (στραγγισμάτων) σύμφωνα με τα βροχομετρικά δεδομένα μιας περιοχής ανά εποχή.

Άλλα πεδία έρευνας

1. Εξαιτίας της ανομοιογένειας των αποβλήτων και της επίδρασής της στην κατανομή του αέρα και της υγρασίας, προτείνεται η μελέτη της χωρικής καταγραφής της δομής της μικροβιακής κοινότητας στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα.
2. Η μοντελοποίηση των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στο σώμα των αποβλήτων κάτω από την επίδραση του αερισμού απαιτεί καλή γνώση της σύστασης της στερεής και της υγρής φάσης. Εκτός και αν σχεδιαστεί ειδικός δειγματολήπτης, δεν είναι δυνατή η λεπτομερής εξέταση της στερεής φάσης. Παρόλα αυτά, είναι δυνατή η ανάλυση των στραγγισμάτων για τα ιχνοστοιχεία, τα βαρέα μέταλλα και τα πιο σημαντικά ανιόντα με σκοπό τη μοντελοποίηση των διεργασιών κινητοποίησής τους.
3. Εξαιτίας της ανομοιογένειας του σώματος των αποβλήτων, ενδεχομένως σχηματίζονται ζώνες διαφορετικών οξειδοαναγωγικών συνθηκών και μεταξύ αυτών φορές αντιδράσεων. Για το λόγο αυτό, η μέτρηση του οξειδοαναγωγικού δυναμικού με ηλεκτρόδιο πλατίνας είναι μερικώς εσφαλμένη εξαιτίας της έλλειψης ισορροπίας και της παρουσίας αναγωγικών στοιχείων (H_2 , CH_4 , Fe). Οι έρευνες σήμερα προσανατολίζονται

στον κατά το δυνατό σωστότερο προσδιορισμό του δυναμικού στα στραγγίσματα και για αυτό το λόγο προτείνεται ο επιπλέον υπολογισμός των οξειδοαναγωγικών στοιχείων (οξυγόνο, νιτρικά, νιτρώδη, σίδηρος, μαγγάνιο, H_2S , μεθάνιο και υδρογόνο). Με βάση τις αναλύσεις αυτές θα μπορεί να εκτιμηθεί η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για πλήρη οξείδωση και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για το σκοπό αυτό.

4. Η ανάγκη για πλήρη κατανόηση των διεργασιών που διέπουν την ταφή των απορριμμάτων, οδηγούν την ερευνητική δραστηριότητα σε ιδιαίτερα εξειδικευμένους τομείς. Σε νεότερες έρευνες προτείνεται η εκτίμηση της μεταφοράς των βαρέων μετάλλων μέσω κολλοειδών στα διασταλάζοντα υγρά με σκοπό την ανάδειξη της διανομής των κόκκων που δύναται να κινητοποιηθούν ανάλογα με το μέγεθός τους και κάτω από διαφορετικές συνθήκες οξειδοαναγωγής. Από τα πειράματα αυτά εκτιμάται η σημασία της μεταφοράς μέσω κολλοειδών σε σύγκριση με τη μεταφορά λόγω διάλυσης.
5. Μια από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στους αερόβιους βιοαντιδραστήρες απορριμμάτων είναι η ταυτόχρονη εισαγωγή αέρα και υδρατμών (βλ. Σχήμα 10-11). Κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής πραγματοποιείται αλλαγή φάσης στα στραγγίσματα των στερεών αποβλήτων (από την υγρή στην αέρια) και στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή τους στο σώμα των απορριμμάτων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση της θερμοκρασίας των αποβλήτων σε συνδυασμό με καλύτερη κατανομή υγρασίας. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεν αυξημένες απαιτήσεις σε ενέργεια, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με ψυχρά κλίματα ή σε ψυχρές περιόδους του έτους.



Σχήμα 10-11: Βιοαντιδραστήρας με εισαγωγή ατμού

Βιβλιογραφία

- Augenstein, D., Yazdani, R., Moore, R., Dahl, K., 1997. Yolo County Controlled Landfill Project., Proceedings, SWANA, Landfill Symposium.
- Barlaz, M. A., Ham, R.K., Schaefer, D.M., 1990. Methane Production From Municipal Refuse: A Review of Enhancement Techniques and Microbial Dynamics., Critical Reviews in Environmental Control, 19(6): 557.
- Barlaz, M. A., Milke, M. W., Ham, R. K., 1987. Gas Production Parameters in Sanitary Landfill Simulators., Waste Management and Research, 5 p.27.
- Beckett, G. D., Huntley, D., 1994. Characterization of flow parameters controlling soil vapour extraction., Groundwater, 32:239-47.
- Borglin, S. E., Hazen, T. C., Oldenburg, C. M., Zawislanski P. T., 2004. Comparison of Aerobic and Anaerobic Biotreatment of Municipal Solid Waste., Technical Paper. J. Air & Waste Manage. Assoc. 54:815-822.
- Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Nonthapund, U., Sittichoktam, S., 2002. Acceleration of solid waste biodegradation in tropical landfill using bioreactor landfill concept., 5th Asian Symposium on Academic Activities for Waste Management, 9-12 September, Kuala Lumpur.
- Coelho, R. A., 2003. Facultative Bioreactor Landfill: An Environmental and Geotechnical Study., Ph.D Thesis. University of New Orleans.
- Doedens, H., Cord-Landwehr, K., 1989. Leachate Recirculation, Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact: Academic Press.
- Driscoll, F. G., 1986. Groundwater and Wells., Johnson Filtration Systems, Inc., St. Paul, MN. 7 pp.
- Edil, T. B., Ranguette, V. J., Wuellner, W. W., 1990. Settlement of Municipal Refuse., Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice, STP 1070, Landva and Knowles (eds), ASTM, West Conshohocken, Pa., pp. 225-239.

- Hantush, M.S., Jacob, C.E., 1955. Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer., Trans. Amer. Geophys. Union. 36. pp. 95-100.
- Harrison, S., Watkins, R.K., 1996. HDPE Leachate Collection Pipe Design by Fundamentals of Mechanics., Proceedings Nineteenth International Madison Waste Conference, Municipal and Industrial Waste, Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, September 25-26.
- Hartz, K. E., Ham, R. K., 1983. Moisture Level and Movement effects on Methane Production Rates in Landfill Samples., Waste Management and Research, No. 1, p.139.
- Hillel, D., 1980a. Fundamentals of Soil Physics., Academic Press, New York, 413 pp.
- Hudgins, M., Harper, S., 1999. Operational characteristics of two aerobic landfill systems., Presented at The Seventh International Waste Management and Landfill Symposium in Sardinia, Italy, October 4.
- Jakobsen, S.T., 1992. Chemical reactions and air change during decomposition of organic matters., Resour. Cons. and Recyc., 6, 259-266.
- Johnson, P. C., Kemblowski, M. W., Colthart, J. D., 1990b. Quantitative analysis for the cleanup of hydrocarbon-contaminated soils by in-situ venting., Groundwater, 28(3):413-29.
- Jones-Lee, A., Lee, G.F., 2000. Appropriate Use of MSW Leachate Recycling in Municipal Solid Waste Landfilling., Proceedings Air and Waste Management Association 93rd national annual meeting CD-rom paper 00-455 Pittsburgh, PA June.
- Kaiser, J., 1996. Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach., Ecological Modelling, 91, 25-37.
- Karnchanawong, S., Noythachang, P., 1996. Effects of Leachate Recirculation on Leachate Characteristics and Gas Compositions Produced from Anaerobic and Semi-Aerobic Landfill Simulators., Proceedings of the International Conference on Ecological Engineering, Beijing, China, S501.

- Kelly, R.J., 2002. Solid Waste Biodegradation Enhancements and the Evaluation of Analytical Methods Used to Predict Waste Stability., Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment for the degree of Master of Science in Environmental Science and Engineering, Blacksburg, Virginia.
- King, L. G., 1968. Mathematical Models for Underground Injection of Gaseous Wastes into the Vadose Zone., Battelle Technical Report No. BNRL-945., Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA. 146 pp.
- Kinman, R. N., Nutini, D. L., Walsh, J. J., Vogt, W. G., Stamm, J., Rickabaugh, J., 1987. Gas Enhancement Techniques in Landfill Simulators., Waste Management and Research, 5 (1987), p.13.
- Klinkenberg, L. J., 1941. The permeability of porous media to liquids and gases., American Petroleum Institute Drilling and Production - Practice., pp. 200- 13.
- Leckie, J. O., Pacey, J. G., 1979. Landfill Management with Moisture Control., Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol.105 (EE2), p.337.
- Leuschner, A. P., 1989. Enhancement of Degradation: Laboratory Scale Experiments, Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact: Academic Press.
- Ling H. I., Leshchinsky D., Mohri, Y., Kawabata, T., 1998. Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement., Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 21-28.
- Maier, T. B., 1998. Analysis Procedure for Design of Leachate Recirculation Systems., Proceedings, SWANA, Landfill Symposium.
- Massmann, J. W., 1989. Applying groundwater flow models in vapor extraction system design., Journal of Environmental Engineering, ASCE 115(1): 129-49.

- Mata-Alvarez J., Martinez-Viturtia A., 1986. Laboratory Simulation of Municipal Solid Waste Fermentation with Leachate Recycle., *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 36, p.547.
- McWhorter, D. B., 1990. Unsteady radial flow of gas in the vadose zone., *Journal of Contaminant Hydrology*, 5:297-314.
- McWhorter, D. B., Sunada, D. K., 1977. *Groundwater Hydrology and Hydraulics.*, Water Resources Publications, Littleton, CO. 256 pp.
- Metcalf and Eddy., 2003. *Wastewater engineering treatment, disposal, reuse.*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill.
- Morris, D. V., Woods, C. E., 1990. Settlement and Engineering. Considerations in Landfill and Final Cover Design., *Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice*, STP 1070, Landva and Knowles (eds), ASTM, West Conshohocken, Pa., pp. 9-21.
- Muskat, M., Botset, H. G., 1931. Flow of gas through porous materials., *Physics*. 1:27-47.
- Naval Facilities Engineering Service Center., 1996. Technical Memorandum. Technical requirements to consider when preparing a scope of work for full-scale implementation of bioventing., TM-2186-ENV. California 93043-4370.
- Neuman, S.P., 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response., *Water Resources Res.* 11. pp. 329-342.
- Oldenburg, C. M., 2001. T2LBM Version 1.0: Landfill Bioreactor Model for TOUGH2., Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California Berkeley. LBNL-47961.
- Pacey, J.G., Glaub J.C., Van Heuit, R.E., 1987. Results of the Mountain View Controlled Landfill Project., *Proceedings of the GRCD 10th International Landfill Gas Symposium*, GRCD, Silver Spring, Maryland.
- Peirce, J., Weiner R., Vesilind P., 1997. *Environmental Pollution and Control.*, Fourth Edition, Butterworth-Heinemann Ed.

- Pohland, F. G., 1975. Sanitary Landfill Stabilization with Leachate Recycle and Residual Treatment., Report EPA-600/2-75-043, US EPA, Cincinnati, OH.
- Popov, V., Power, H., 1999. Landfill emission of gases into the atmosphere: boundary element analysis., WIT Press, Boston, 189 pp.
- Qasim, S. R., Chiang, W., 1994. Sanitary Landfill Leachate. Generation, Control and Treatment., Technomic Publishing Co.
- Read, A.D., Hudgins, M., Harper, S., Phillips P., Morris, J., 2001. The successful demonstration of aerobic landfilling. The potential for a more sustainable solid waste management approach? Resources, Conservation and Recycling 32, 115-146.
- Reinhardt, J.J., Ham, R.K., 1974. Solid Waste Milling and Disposal on Land Without Cover., U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, PB-234 930.
- Reinhart, D. R., Townsend, T. G., 1997. Landfill Bioreactor Design and Operation., Lewis Publishers, New York, NY.
- Reinhart, D., Townsend, T., 1998. Landfill Bioreactor Design and Operation., CRC Press.
- Repa, E., 2003. Bioreactor Landfills: A viable technology., National Solid Wastes Management Association Research Bulletin 03-02.
- Shan, C., Falta, R., Javandel, I., 1992. Analytical solutions for steady state gas flow to a soil vapour extraction well., Water Resources Research, 28(4): 1105-20.
- Sohn, K.C., Lee, S., 1994. A Method for Prediction of Long Term Settlement of Sanitary Landfill., Proceedings of the First International Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton, Canada, pp. 807-811.
- Sowers, G. F., 1973. Settlement of Waste Disposal Fills., Proceedings Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, pp. 207-210.
- Stumm, W., Morgan, J.J., 1996. Aquatic Chemistry, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, NY, 1022 pp.

- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., 1993. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues., Irwin McGraw-Hill.
- Theis, C. V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge to a well using groundwater storage., Transactional American Geophysical Union. 2:519-24.
- Tittlebaum, M. E., 1982. Organic Carbon Content Stabilization through Landfill Leachate Recirculation., Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 54, pp.428.
- U.S Army Corps of Engineers., 2002. Engineer Manual: Soil Vapor Extraction and Bioventing., EM 1110-1-4001.
- U.S. EPA., 1991a. Current and developing analytical technologies for quantifying biogenic gas emissions (June)., EPA/600/3-91/044. Washington, DC.
- U.S. EPA., 1995. Manual: Principles and Practices of Bioventing, Volume I: Bioventing Principles., EPA/540/R-95/534a.
- U.S. EPA., 1995. Manual: Principles and Practices of Bioventing, Volume II: Bioventing Design., EPA/540/R-95/534a.
- U.S. EPA., 2000. Introduction to Phytoremediation., EPA/600/R-99/107.
- U.S. EPA., 2000. Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 1998., EPA Publication, EPA530-F-00-024.
- U.S. EPA., 2002. State of the Practice for Bioreactor Landfills., EPA Publication, EPA/625/R-01/012.
- Vaidya, R.D., 2002. Solid Waste Degradation, Compaction and Water Holding Capacity., Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Environmental Engineering, Blacksburg, Virginia.

- Vidali, M., 2001. Bioremediation. An overview., *Pure Appl. Chem.*, Vol. 73, No. 7, pp. 1163-1172.
- Visvanathan, C., Tränkler, J., Kuruparan, P., Xiaoning, Q., 2002. Influence of landfill operation and waste composition on leachate control: lysimeter experiments under tropical conditions., *Asian Pacific Landfill Symposium*, September 25-28, Seoul Korea.
- Warith, M., 2002. Bioreactor landfills: experimental and field results., *Waste Management* 22, 7-17.
- Waste Management., 2002. *The Bioreactor Landfill. The Next Generation of Landfill Management.*, W.M. Publication.
- Yazdani, R., Kieffer, J., Akau, H., 2002. Full scale landfill bioreactor project at the Yolo county central landfill., *Final Report*, Yolo County, Planning and Public Works Department, 292 West Beamer Street Woodland, CA 95695.
- Yen, B. C., Scanlon, B., 1975. Sanitary Landfill Settlements Rates., *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 101, n° 5, pp. 475-487.
- Yuen, S.T.S., Styles, J.R., Wang, Q.J., McMahon, T.A., 1999. Findings from a full- scale bioreactor landfill study in Australia., *Proc., Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 4-8 October.
- Yuen, S. T. S., 1999. *Bioreactor Landfills Promoted by Leachate Recirculation: A Full-Scale Study.*, Thesis submitted to the University of Melbourne in total fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Melbourne, Australia.
- Yuen, S. T. S., 2001. *Bioreactor Landfills: Do They Work?.*, *Proceedings of the Geoenvironment 2001-2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics*, Newcastle, Australia.

Zhao, X., Voice, T.C., Khire, M., Maher, S., Musleh, R., Heerwani, P., Hashsham, S., 2003. Full-scale evaluation of bioreactor landfill technology., 8th Annual Landfill Symposium, Atlantic City, NJ, June 16-20.

Παναγιωτακόπουλος Δ.Χ., 2002. Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων., Εκδόσεις Ζυγός, ISBN: 960-8065-31-3.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ





ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Ημερήσιες καταγραφές						
Ημερομηνία	Μέρα Δειτ_Α/Α Καταγρ.	Tair (°C)	Pair (kPa)	Ταπορ (°C)	RHamb (%)	Tamb (°C)
11-Νοε	1_1	22,9	103,4	48	44	26
11-Νοε	1_2	23,1	101,7	37	58	23
12-Νοε	2_1	25,1	100,6	37	51	26
13-Νοε	3_1	0	0	35	49	28
15-Νοε	4_1	0	0	27	55	25
15-Νοε	4_2	21,7	100,4	34	44	26
16-Νοε	5_1	24,7	99,8	50	38	26
16-Νοε	5_2	17,7	100,2	51	45	22
17-Νοε	6_1	19,5	100,9	51	41	24
17-Νοε	6_2	19,7	101,2	48	38	23
17-Νοε	6_3	18,2	101,3	48	38	23
18-Νοε	7_1	18,5	101,8	48	30	24
18-Νοε	7_2	17,9	101	49	38	23
19-Νοε	8_1	17,9	101,1	47	39	22
19-Νοε	8_2	19,9	100,5	46	38	24
19-Νοε	8_3	19,9	100,5	46	44	24
19-Νοε	8_4	19,4	100,4	45	39	24
20-Νοε	9_1	19,2	100,3	45	52	23
22-Νοε	10_1	16,8	101,7	25	34	20
22-Νοε	10_2	18,2	101,7	26	21	23
23-Νοε	11_1	15,6	101,4	30	38	20
23-Νοε	11_2	16,7	101,3	30	37	21
24-Νοε	12_1	16,4	100,9	29	57	21
25-Νοε	13_1	16,5	100,7	29	46	21
25-Νοε	13_2	15,6	100,8	29	40	19
26-Νοε	14_1	14,3	101,5	28	31	18
27-Νοε	15_1	15,1	101,4	25	50	19
29-Νοε	16_1	16,8	101,3	25	51	21
29-Νοε	16_2	16,5	101,4	26	59	20
30-Νοε	17_1	17,3	101,4	26	53	21
30-Νοε	17_2	16,3	101,5	27	57	20
1-Δεκ	18_1	18	102	27	46	22
1-Δεκ	18_2	16,1	101,7	27	46	20
2-Δεκ	19_1	16,1	102,1	27	55	21
3-Δεκ	20_1	16,9	102,1	28	50	21
3-Δεκ	20_2	16,1	101,8	28	54	20
4-Δεκ	21_1	17,5	101,8	27	57	22
6-Δεκ	22_1	17,4	101,4	27	62	22
6-Δεκ	22_2	18,7	100,4	27	60	22
7-Δεκ	23_1	21	102	29	49	25
7-Δεκ	23_2	21	101,8	30	50	24
8-Δεκ	24_1	15,1	101,7	30	46	19
8-Δεκ	24_2	19,1	101,4	30	35	23

Ημερήσιες καταγραφές						
Ημερομηνία	Μέρα Λειτ_Α/Α Καταγρ.	Tair (°C)	Pair (kPa)	Tαπορ (°C)	RHamb (%)	Tamb (°C)
9-Δεκ	25_2	15,9	101,3	29	45	19
10-Δεκ	26_1	14,1	100,7	28	57	18
12-Δεκ	28_1	0	0	19	46	16
13-Δεκ	29_1	12,9	101,5	18	52	16
13-Δεκ	29_2	17,1	101,4	20	37	21
14-Δεκ	30_1	18	101,2	22	36	22
15-Δεκ	31_1	19,7	101,5	25	22	24
15-Δεκ	31_2	17,1	101,6	26	22	21
16-Δεκ	32_1	16,6	101,2	24	24	21
16-Δεκ	32_2	19,7	101,8	25	22	24
17-Δεκ	33_1	15,2	100,7	23	46	19
18-Δεκ	34_1	16,3	99,3	22	49	20
19-Δεκ	35_1	14,7	99	22	53	18
20-Δεκ	36_1	18,7	100,1	22	46	22
21-Δεκ	37_1	12,8	100	22	63	16
22-Δεκ	38_1	20,5	100,4	24	43	24
23-Δεκ	39_1	14,5	99,8	24	59	18
24-Δεκ	40_1	13,1	100,1	22	57	17
27-Δεκ	41_1	14,5	101,1	21	67	18
28-Δεκ	42_1	16,6	100,5	21	62	19
28-Δεκ	42_2	18,6	100,6	21	54	21
29-Δεκ	43_1	14	99,2	22	54	18
31-Δεκ	44_1	14,2	100,6	21	65	18
4-Ιαν	45_1	10,9	101,4	18	64	14
5-Ιαν	46_1	12,8	101,1	18	45	16
6-Ιαν	47_1	13,7	101,1	18	56	17
7-Ιαν	48_1	14,4	100,8	19	54	18
8-Ιαν	49_1	0	0	19	48	16
9-Ιαν	50_1	0	0	19	56	18

Ημερομηνία	Στραγγίσματα (kg)		Παραγωγή
	Εισαγωγή απιον.	Ανακυκλοφορία	
11-Νοε	10,000	4,000	5,000
12-Νοε	0	0,000	5,700
15-Νοε	0	1,500	5,400
16-Νοε	0	5,400	2,000
17-Νοε	0	2,500	2,500
18-Νοε	0	0,000	1,000
22-Νοε	1,000	1,000	0,500
26-Νοε	0	0,500	0,000
30-Νοε	0	0,000	0,180
1-Δεκ	0	0,000	0,230
2-Δεκ	0	0,000	0,270
3-Δεκ	0,680	0,320	0,060
4-Δεκ	0	0,000	0,100
6-Δεκ	0	0,000	0,180
7-Δεκ	0	0,000	0,230
8-Δεκ	0,720	0,280	0,000
9-Δεκ	0	0	0,080
10-Δεκ	0	0	0,140
11-Δεκ	2,000	0,170	0,000
12-Δεκ	0	0	0,260
13-Δεκ	0	0	0,340
14-Δεκ	0	0	0,400
15-Δεκ	0	0	0,460
16-Δεκ	0	0	0,510
17-Δεκ	1,590	0,410	0,000
18-Δεκ	0	0	0,140
19-Δεκ	0	0	0,200
20-Δεκ	0	0	0,260
21-Δεκ	0	0	0,310
22-Δεκ	0	0	0,130
23-Δεκ	0	0	0,180
24-Δεκ	0	0	0,230
27-Δεκ	0	0	0,380
28-Δεκ	0,600	0,400	0,000
29-Δεκ	0	0	0,050
31-Δεκ	0	0	0,140
4-Ιαν	0	0	0,300
5-Ιαν	0	0	0,340
6-Ιαν	0	0	0,380
7-Ιαν	0	0	0,410
8-Ιαν	0	0	0,450
9-Ιαν	1,510	0,490	0