

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων**

**Διπλωματική Εργασία**

**«Λειτουργία βιοαντιδραστήρα αποδόμησης στερεών  
αποβλήτων υπό συνθήκες αερισμού και ανακυκλοφορίας  
στραγγισμάτων.»**



**ΣΗΜΑΝΤΗΡΑΚΗ ΦΩΤΕΙΝΗ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Γιδαράκος Ευάγγελος, (Επιβλέπων)

Γκέκας Βασίλειος

Οικονομόπουλος Αλέξανδρος

**Χανιά – Οκτώβριος 2006**

Πρώτα απ'όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γιδαράκο Ευάγγελο, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια υλοποίησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Την εξεταστική επιτροπή, τον κ. Βασίλειο Γκέκα και τον κ. Αλέξανδρο Οικονομόπουλο για την συμβολή τους στην εργασία αυτή.

Το προσωπικό του Εργαστηρίου Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων και ιδιαίτερα τον κ.Γιαννή Απόστολο για την βοήθεια του καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Το προσωπικό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας & Διαχείρισης Περιβάλλοντος για την βοήθεια τους στην διεξαγωγή εργαστηριακών αναλύσεων στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Μακρυπόδη Γεώργιο, ο οποίος σχεδίασε και εγκατέστησε τον αερόβιο βιοαντιδραστήρα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία και με βοήθησε ουσιαστικά στα πρώτα στάδια αυτής της μελέτης.

Τέλος ευχαριστώ την κ. Σωμαρά Μαρία, φίλη και συνάδελφο μου με την οποία συνεργαστήκαμε αποτελεσματικά επί ενάμιση χρόνο για τη διεξαγωγή των εργαστηριακών αναλύσεων των διπλωματικών μας εργασιών.

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται η λειτουργία ενός βιοαντιδραστήρα αποδόμησης στερεών αποβλήτων μικρής κλίμακας που σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και λειτούργησε στο Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο βιοαντιδραστήρας λειτουργούσε αερόβια για διάστημα 17 μηνών, με ταυτόχρονη ανακυκλοφορία των παραγόμενων διασταλαγμάτων. Οι βασικές λειτουργικές παράμετροι του βιοαντιδραστήρα αερισμός και ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, ρυθμίζονταν με στόχο την επίτευξη βέλτιστων συνθηκών για την βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρύπων. Βασικός στόχος αυτής της μελέτης είναι ο προσδιορισμός του βαθμού και του ρυθμού βιοαποικοδόμησης του οργανικού κλάσματος των στερεών αποβλήτων καθώς και η επιτάχυνση της σταθεροποίησης της απορριμματικής μάζας του βιοαντιδραστήρα. Οι συνθήκες λειτουργίες μεταβάλλονταν κατά την διάρκεια του πειράματος με στόχο την μελέτη της επίδρασης αυτών των παραμέτρων στην λειτουργία του βιοαντιδραστήρα. Η επίδραση αυτή προσδιορίστηκε κυρίως μέσω της ποιοτικής ανάλυσης των στραγγισμάτων.

## **Abstract**

In this research, it was investigated the operation of a pilot-scale bioreactor containing solid waste which was designed, manufactured and operated in the Laboratory of Toxic & Hazardous Waste Management of the Department of Environmental Engineering at the Technical University of Crete. The bioreactor operated aerobically for 17 months with simultaneous leachate recirculation. The basic operational factors of the bioreactor were the aeration and the leachate recirculation. These factors were defined in order to achieve the optimal conditions for the biodegradation of the organic carbons. The basic goal of this study is to determine the degree and the rate of the organics' matter biodegradation as well as the acceleration of the waste mass's stabilization. The function conditions were changed during the operation of the bioreactor in order to study the effect of these factors to the bioreactors' function. The certain effect was defined through the quality analysis of the produced leachate.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	iii
Abstract .....	iv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : ΑΣΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥΣ .....	3
2.1 Ορισμός ΑΣΑ .....	3
2.2 Χαρακτηριστικά των ΑΣΑ .....	3
2.2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά .....	3
2.2.2 Βιολογικά χαρακτηριστικά .....	8
2.2.3 Χημικά χαρακτηριστικά .....	9
2.3 Διαχείριση αποβλήτων .....	12
2.3.1 Μέθοδοι διαχείρισης ΑΣΑ .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ .....	15
3.1 Βιοεξυγίανση .....	15
3.2 Τεχνολογία βιοαερισμού .....	19
3.2.1 Μικροβιακές διεργασίες που επηρεάζουν το βιοαερισμό .....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ .....	30
4.1 Εισαγωγή .....	30
4.2 Περιγραφή ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρα .....	31
4.3 Κατάταξη των βιοαντιδραστήρων στερεών αποβλήτων .....	34
4.4 Σύγκριση αερόβιων-αναερόβιων βιοαντιδραστήρων .....	36
4.5 Αερόβια αποικοδόμηση αστικών στερεών απορριμμάτων .....	39
4.6 Τέστ αναπνοής .....	40
4.6.1 Απαιτούμενη παροχή αέρα .....	40
4.7 Καθίζηση .....	42
4.7.1 Καθίζηση των αστικών στερεών αποβλήτων .....	43
4.7.2 Μοντέλα μακροπρόθεσμης καθίζησης στερεών αποβλήτων .....	44
4.7.3 Καθίζηση και βιοαποικοδόμηση .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑΤΑ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ .....	48
5.1 Εισαγωγή .....	48
5.2 Μέθοδοι διαχείρισης στραγγισμάτων .....	49
5.3 Χαρακτηρισμός στραγγισμάτων .....	51
5.4 Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων .....	54
5.6 Υδατικό ισοζύγιο .....	58
5.7 Βιολογικές διεργασίες .....	60

5.7.1 Νιτροποίηση.....	60
5.7.2 Οξείδωση φωσφόρου .....	62
5.7.3 Οξείδωση θείου.....	63
5.8 Τοξικότητα στραγγισμάτων .....	64
5.9 Βαρέα μέταλλα στα στραγγίσματα ΑΣΑ .....	66
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	68
6.1 Περιγραφή του εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων: .....	68
6.2 Κατηγορίες αναλύσεων.....	70
6.3 Περιγραφή σχεδιασμού βιοαντιδραστήρα .....	71
6.4 Αναλυτική περιγραφή εξοπλισμού .....	73
6.5 Περιγραφή εργαστηριακών μετρήσεων .....	75
6.5.1 Τεστ αναπνοής .....	75
6.5.2 Τεστ τοξικότητας .....	77
6.5.3 Υπολογισμός COD .....	79
6.5.4 Υπολογισμός BOD <sub>5</sub> .....	79
6.5.5 Υπολογισμός: NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> .....	80
6.5.6 Μέτρηση Βαρέων μετάλλων.....	82
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 <sup>ο</sup> : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	83
7.1 Παράμετροι παρακολούθησης .....	83
7.2 Προσδιορισμός αντιπροσωπευτικού μοριακού τύπου ΑΣΑ βιοαντιδραστήρα .....	87
7.3 Τεστ αναπνοής .....	90
7.4 Αναλύσεις .....	96
7.5 Υπολογισμός ποσοστού απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων .....	105
7.6 Υδατικό ισοζύγιο .....	109
7.7 Τεστ Τοξικότητας .....	112
7.8 Καθίζηση.....	118
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 <sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	121
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	126
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΠΙΝΑΚΕΣ .....	i
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ .....	i

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Ειδικό βάρος Αστικών Στερεών Αποβλήτων .....	4
Πίνακας 2-2 :Ποσοστά υγρασίας στα ΑΣΑ.....	6
Πίνακας 2-3: Στοιχειακή Ανάλυση των συστατικών των ΑΣΑ .....	11
Πίνακας 3-1: Βέλτιστες συνθήκες βιοαποικοδόμησης.....	22
Πίνακας 5.1: Σύσταση των στραγγισμάτων αστικών στερεών αποβλήτων .....	52
Πίνακας 5.2: Σύσταση στραγγισμάτων σε ΧΥΤΑ με και χωρίς ανακυκλοφορία. ....	53
Πίνακας 5.3: Σύσταση στραγγισμάτων - βαθμός σταθεροποίησης του ΧΥΤΑ .....	53
Πίνακας 5.4: Σύσταση των στραγγισμάτων σαν συνάρτηση του βαθμό σταθεροποίησης του ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και χωρίς .....	54
Πίνακας 7-1: Στοιχειακή ανάλυση Αστικών Στερεών Απορριμμάτων .....	88
Πίνακας 7-2: Υπολογισμός συνολικού βάρους κάθε χημικού στοιχείου στα απορρίμματα....	88
Πίνακας 7-3: Προσδιορισμός ατόμων χημικών στοιχείων για τα απορρίμματα .....	89
Πίνακας 7-4: Παράμετροι λειτουργίας κατά τους μήνες διεξαγωγής των τεστ αναπνοής	90
Πίνακας 7-5: Ρυθμοί κατανάλωσης οξυγόνου O <sub>2</sub> , ρυθμοί παραγωγής CO <sub>2</sub> .....	96
και ρυθμοί βιοαποικοδόμησης.....	96
Πίνακας 7-6: Συγκεντρώσεις μετάλλων στα ΑΣΑ σε mg/g .....	105
Πίνακας 7-7: Μάζα μετάλλων στον αερόβιο αντιδραστήρα .....	105
Πίνακας 7-8: Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα.....	106
Πίνακας 7-9: Μάζα μετάλλων στα στραγγίσματα.....	106
Πίνακας 7-10: Ποσοστό απομάκρυνσης μελετούμενων βαρέων μετάλλων από την απορριμματική μάζα του αντιδραστήρα .....	106
Πίνακας 7-11 :Παραγόμενο νερό ανάλογα με τον ρυθμό παροχής αέρα .....	110
Πίνακας 7-12: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων .....	116
Πίνακας 7-13: Ποσοστό καθίζησης καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας .....	118
Πίνακας I-1 :Μέσες μηνιαίες τιμές μετρούμενων παραμέτρων .....	i
Πίνακας I-2: Μετρήσεις pH, οξειδοαναγωγικό δυναμικό, αγωγιμότητα, θερμοκρασία στραγγισμάτων.....	ii

Πίνακας I-3: COD και BOD <sub>5</sub> στραγγισμάτων βιοαντιδραστήρα .....	iii
Πίνακας I-4 : Συγκέντρωση αμμωνιακών, νιτρικών, φωσφορικών και θεικών ιόντων ...	iv
Πίνακας I-5: Υδατικό ισοζύγιο βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων .....	iv
Πίνακας I-6: 1 <sup>ο</sup> Test αναπνοής-Απρίλιος 2005 και 2 <sup>ο</sup> Test αναπνοής-Αύγουστος 2005. .	vi
Πίνακας I-7: 3 <sup>ο</sup> Test αναπνοής-Νοέμβριος 2005 και 4 <sup>ο</sup> Test αναπνοής-Φλεβάρης 2006.	vii
Πίνακας I-8: Συγκεντρώσεις βαρέων μεταλλων- Δεκέμβριος 2004.....	viii
Πίνακας I-9: Συγκεντρώσεις βαρέων μεταλλων-Ιούλιος 2005.....	viii
Πίνακας I-10: Συγκεντρώσεις βαρέων μεταλλων-Δεκέμβριος 2005.....	viii
Πίνακας I-11: Συγκεντρώσεις χρωμίου και βρωμίου. ....	ix
Πίνακας I-12: Καθίζηση σώματος απορριμμάτων, από το αρχικό ύψος.....	ix
Πίνακας I-13:1 <sup>ο</sup> τεστ τοξικότητας Άνοιξη 2005.....	x
Πίνακας I-14:2 <sup>ο</sup> τεστ τοξικότητας Καλοκαίρι 2005 .....	x
Πίνακας I-15:Πειραματικά αποτελέσματα 3 <sup>ο</sup> και 4 <sup>ο</sup> τεστ τοξικότητας ,Φθινόπωρο 2005- Χειμώνας 2006.....	xi
Πίνακας I-16:Βαθμονόμηση αντλίας ανακυκλοφορίας.....	xi



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3-1: Τυπική διάταξη συστήματος βιοαερισμού .....	20
Εικόνα 3-2: Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου και pH .....	24
Εικόνα 4-1: Σχηματική απεικόνιση βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων .....	33
Εικόνα 4-2: Απεικόνιση αερόβιου βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων .....	34
Εικόνα 4-3: Απεικόνιση αναερόβιου βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων .....	35
Εικόνα 4-4: Απεικόνιση υβριδικού βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων .....	36
Εικόνα 4-5: Προβλεπόμενες εντάσεις από 4 μοντέλα .....	46
Εικόνα 5-6: Αερόβιοι κύκλοι αζώτου, άνθρακα και θείου .....	62
Εικόνα II-1: Ολική άποψη αερόβιου βιοαντιδραστήρα- Ιανουάριος 2005 .....	i
Εικόνα II-2: Βιοαντιδραστήρας στερεών αποβλήτων -Φεβρουάριος 2006.....	i
Εικόνα II-3: Βιοαντιδραστήρας στερεών αποβλήτων .....	ii
Εικόνα II-4: Κεντρικός σωλήνας διασποράς στραγγισμάτων .....	ii
Εικόνα II-5: Απορριμματική μάζα βιοαντιδραστήρα -Ιανουάριος 2005 .....	iii
Εικόνα II-7: Αντλία ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων.....	iv
Εικόνα II-8: Δοχείο αποθήκευσης στραγγισμάτων .....	iv
Εικόνα II-9: Θερμοαντιδραστήρας και φωτόμετρο .....	v
Εικόνα II-10: Σύστημα αερισμού βιοαντιδραστήρα.....	v

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 7-1: Μέση μηνιαία πίεση αέρα που εισέρχεται στον βιοαντιδραστήρα .....	83
Διάγραμμα 7-2: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία απορριμμάτων .....	84
Διάγραμμα 7-3: Μέση μηνιαία θερμοκρασία στο εσωτερικό της απορριματικής μάζας. 85	
Διάγραμμα 7-4: Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος .....	86
Διάγραμμα 7-5: Μέση μηνιαία θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα .....	87
Διάγραμμα 7-6: Τεστ αναπνοής-Άνοιξη 2005 .....	92
Διάγραμμα 7-7: Τεστ αναπνοής-Καλοκαίρι 2005 .....	93
Διάγραμμα 7-8: Τεστ αναπνοής-Φθινόπωρο 2005 .....	94
Διάγραμμα 7-9: Τεστ αναπνοής-Χειμώνας 2006 .....	95
Διάγραμμα 7-10: pH στραγγισμάτων .....	96
Διάγραμμα 7-11: Μέση μηνιαία μεταβολή δυναμικού οξειδοαναγωγής .....	97
Διάγραμμα 7-12: Μεταβολή συγκέντρωσης COD συναρτήσει του χρόνου .....	98
Διάγραμμα 7-13: Συγκέντρωση BOD <sub>5</sub> συναρτήσει του χρόνου .....	99
Διάγραμμα 7-14: Μεταβολή BOD <sub>5</sub> /COD .....	100
Διάγραμμα 7-15: Μεταβολή αμμωνιακών ιόντων σε συνάρτηση με τον χρόνο .....	101
Διάγραμμα 7-16: Μεταβολή νιτρικών ιόντων σε συνάρτηση με τον χρόνο .....	102
Διάγραμμα 7-17: Μεταβολή Ορθοφωσφορικών συναρτήσει του χρόνου .....	103
Διάγραμμα 7-18: Μεταβολή θεικών ιόντων συναρτήσει του χρόνου .....	103
Διάγραμμα 7-19: Καμπύλη ποσοστού θανάτωσης –συγκέντρωσης υγρού δείγματος για το 1 <sup>ο</sup> τεστ τοξικότητας-Απρίλιος 2005 .....	113
Διάγραμμα 7-20: Καμπύλη ποσοστού θανάτωσης –συγκέντρωσης υγρού δείγματος για το 2 <sup>ο</sup> τεστ-Αύγουστος 2005 .....	114
Διάγραμμα 7-21: Καμπύλη ποσοστού θανάτωσης –συγκέντρωσης υγρού δείγματος για το 3 <sup>ο</sup> τεστ-Νοέμβριος 2005. ....	115
Διάγραμμα 7-22: Καμπύλη ποσοστού θανάτωσης–συγκέντρωσης υγρού δείγματος για το 4 <sup>ο</sup> τεστ-Φεβρουάριος 2006 .....	116
Διάγραμμα 7-23: Καθίζηση απορριματικής μάζας .....	119
Διάγραμμα 7-24: Συσχέτιση καθίζησης και BOD .....	120



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, ο σωστός σχεδιασμός τους και η οικονομική αλλά και αποδοτική λειτουργία τους αποτελεί θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και αντικείμενο περαιτέρω έρευνας. Η μελέτη και η κατανόηση του συνόλου των βιολογικών και χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στους χώρους εναπόθεσης απορριμμάτων, αποτελεί βασικό στόχο πολλών μελετητών που στοχεύουν στην βελτιστοποίηση των συστημάτων διαχείρισης και επεξεργασίας στερεών απορριμμάτων.

Στους συμβατικούς χώρους εναπόθεσης απορριμμάτων επικρατούν αναερόβιες συνθήκες και η βιοαποδόμηση των απορριμμάτων πραγματοποιείται με πολύ αργούς ρυθμούς και συνοδεύεται από την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου. Η μεγάλη παραγωγή μεθανίου συνεπάγεται την αναγκαιότητα ύπαρξης κατάλληλων συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας. Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, δημιουργείται η ανάγκη εύρεσης καινούργιων μεθόδων διαχείρισης απορριμμάτων με στόχο την εξοικονόμηση χρόνου αλλά και τον περιορισμό των οικονομικών απαιτήσεων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Μια νέα πολλά υποσχόμενη μέθοδος διαχείρισης απορριμμάτων περιλαμβάνει τον αερισμό των αποβλήτων με στόχο την επιτάχυνση του ρυθμού βιοαποικοδόμησης τους και την μείωση της παραγωγής μεθανίου. Ταυτόχρονα με τον αερισμό ανακυκλοφορούνται τα παραγόμενα στραγγίσματα και με αυτόν τον τρόπο οι συνθήκες βιοαποδόμησης είναι ακόμα πιο ευνοϊκές.

Στην παρούσα διατριβή μελετάται η λειτουργία εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα που σχεδιάστηκε από το Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στα πρώτα κεφάλαια περιγράφονται βασικές έννοιες για τα χαρακτηριστικά των απορριμμάτων και τις μεθόδους διαχείρισης τους, καθώς και έννοιες που έχουν άμεση σχέση με την βιοεξυγίανση και την τεχνολογία του βιοαερισμού. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή των ΧΥΤΑ-βιοαντιδραστήρων και των βασικών χαρακτηριστικών τους. Επίσης αφιερώνεται ένα ολόκληρο κεφάλαιο στα στραγγίσματα τα οποία αποτελούν το

βασικό στοιχείο μελέτης αυτής της εργασίας, καθώς επίσης και αναλυτική περιγραφή του εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα και της λειτουργίας του.

Πιο αναλυτικά, σε αυτή την μελέτη περιγράφονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα και μελετάται η πορεία όλων εκείνων των παραμέτρων που σχετίζονται άμεσα και έμμεσα με την βιοαποικοδόμηση αλλά και επιβεβαιώνουν την σταθεροποίηση των απορριμμάτων που συντελείται. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται κατάλληλος εξοπλισμός με τον οποίο μετρώνται μεγέθη όπως η σχετική υγρασία των απορριμμάτων, η θερμοκρασία εσωτερικά και εξωτερικά του βιοαντιδραστήρα, η παροχή του εισαγόμενου αέρα αλλά και η σύσταση των παραγόμενων στραγγισμάτων και των παραγόμενων αερίων. Επιπλέον διεξήχθησαν τεστ αναπνοής μέσω των οποίων υπολογίστηκε ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου και ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης του οργανικού κλάσματος. Για τον προσδιορισμό της τοξικότητας των παραγόμενων στραγγισμάτων εκπονήθηκαν τέστ τοξικότητας σε μικροοργανισμούς (*Daphnia Magna*). Τέλος έγινε ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου του βιοαντιδραστήρα.

Συμπερασματικά λοιπόν, η αποδόμηση των στερεών αστικών απορριμμάτων υπό αερόβιες συνθήκες είναι μια νέα μέθοδος που δεν έχει ακόμα εφαρμοστεί ευρέως και σε μεγάλο βαθμό στο πεδίο. Ωστόσο εργαστηριακές μελέτες μεταξύ των οποίων και η παρούσα έχουν σαν στόχο την επιβεβαίωση του γεγονότος ότι μια τέτοια εναλλακτική επιλογή διαχείρισης των απορριμμάτων επιταχύνει την βιοαποδόμηση τους και κατά συνέπεια τον ρυθμό σταθεροποίησης της απορριμματικής μάζας. Σε πραγματικές συνθήκες επιτάχυνση της σταθεροποίησης οδηγεί σε μείωση του χρόνου αποκατάστασης των ΧΥΤΑ, αυξάνει τον διαθέσιμο χώρο εναπόθεσης απορριμμάτων και γενικά αποτελεί μια περιβαλλοντικά φιλική επιλογή επεξεργασίας απορριμμάτων. Επιπλέον μια τέτοια επιλογή περιορίζει σχεδόν σε μηδενικά επίπεδα την παραγωγή μεθανίου ενώ τα παραγόμενα στραγγίσματα είναι ποιοτικά πολύ καλύτερα από ότι εκείνα των συμβατικών ΧΥΤΑ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΑΣΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥΣ

### 2.1 Ορισμός ΑΣΑ

Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ) είναι τα στερεά απόβλητα που παράγονται από τις δραστηριότητες των νοικοκυριών (οικιακά στερεά απόβλητα), των εμπορικών δραστηριοτήτων (εμπορικά στερεά απόβλητα), των καθαρισμών οδών και άλλων κοινόχρηστων χώρων, καθώς και άλλα στερεά απόβλητα (από ιδρύματα, επιχειρήσεις κ.λ.π) τα οποία μπορούν από τη φύση τους ή τη σύνθεσή τους να εξομαλυνθούν με τα οικιακά στερεά απόβλητα. Σύμφωνα με την απόφαση 29407/3508 ΦΕΚ 1572/ 16-12-2002: «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή αποβλήτων», ως αστικά απόβλητα θεωρούνται «...τα οικιακά απόβλητα καθώς και άλλα απόβλητα που λόγω φύσης ή σύνθεσης είναι παρόμοια με τα οικιακά τα οποία διέπονται από τις διατάξεις της ΚΥΑ 69728/824/1996». Εξαίρεση αποτελούν τα απόβλητα εκσκαφών και οικοδομικών, κατεδαφίσεων, όπως επίσης και τα κατεστραμμένα αυτοκίνητα.

### 2.2 Χαρακτηριστικά των ΑΣΑ

#### 2.2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Προκειμένου να διερευνηθούν και να αξιολογηθούν οι δυνατότητες εναλλακτικών μορφών επεξεργασίας και διάθεσης των ΑΣΑ, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε ορισμένα φυσικά χαρακτηριστικά τους, όπως: πυκνότητα (ή ειδικό βάρος), υγρασία, μέγεθος τεμαχίων, υδροαπορροφητικότητα και υδραυλική αγωγιμότητα.

#### Πυκνότητα και ειδικό βάρος

Ως πυκνότητα ενός υλικού ορίζεται η μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου. Ως ειδικό βάρος ( $\rho$ ) του υλικού ορίζεται το βάρος του υλικού ανά μονάδα όγκου. Συχνά γίνεται αναφορά στην πυκνότητα με μονάδες ειδικού βάρους (π.χ. τόνοι ανά κυβικό

μέτρο). Οι τιμές του ειδικού βάρους είναι απαραίτητες για τις αντιστοιχίες βάρους και όγκου. Το ειδικό βάρος ( $\rho$ ) των ΑΣΑ διαφοροποιείται ανάλογα με τη φάση στη διαδικασία διαχείρισης. Όταν είναι ασύμφορος η άμεση εκτίμηση, στο πεδίο, των πραγματικών τιμών, ο μελετητής στηρίζεται στη βιβλιογραφία. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-1) δίνονται διακυμάνσεις τιμών του  $\rho$ . Ο μελετητής θα πρέπει, λαμβάνοντας υπόψη του και άλλους παράγοντες, να επιλέξει, για κάθε περίπτωση, μια συγκεκριμένη τιμή.

**Πίνακας 2-1: Ειδικό βάρος Αστικών Στερεών Αποβλήτων**

<b>Κατάσταση ΑΣΑ</b>	<b>Ειδικό Βάρος, <math>\rho</math> (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
	<b>Διακύμανση τιμών</b>
<b>Οικιακά</b>	60-200
Σε χαλαρή κατάσταση /χωρίς επεξεργασία	
Συμπιεσμένα μέσα στο απορριμματοφόρο	180-450
Μετά την εκκένωσή τους από το Α/Φ	120-250
Εμπορικά/Βιομηχανικά	175-350
<b>Αστικά Στερεά Απόβλητα Α/Φ με συμπίεση</b>	180-450
Στο ΧΥΤΑ, με απλή συμπίεση	300-500
Στο ΧΥΤΑ, καλή συμπίεση	400-750
Στο ΧΥΤΑ, με πολύ καλή συμπίεση	600-1200
Κατασκευών /Κατεδαφίσεων (Αδρανή)	1000-1800

**Πηγή: Παναγιωτακόπουλος, 2002**

## Υγρασία

Η υγρασία είναι ένα χαρακτηριστικό κατ' εξοχήν καθοριστικό για την καταλληλότητα των ΑΣΑ για καύση και για την παραγωγή ατμού ή/και ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το νερό πρέπει να εξατμιστεί πριν προχωρήσει η θερμική επεξεργασία. Επίσης είναι σημαντικό χαρακτηριστικό για την κομποστοποίηση και για τη συμπεριφορά των ΑΣΑ στις αναερόβιες συνθήκες ενός ΧΥΤΑ.

Για να μετρήσουμε την υγρασία των ΑΣΑ, παίρνουμε ένα δείγμα και μετράμε το «υγρό βάρος» του ( $S_w$ ), τοποθετούμε το δείγμα σε κλίβανο με θερμοκρασία 105 °C μέχρι σταθερού βάρους και κατόπιν μετράμε το ξηρό βάρος του ( $S_d$ ). Το ποσοστό (%) υγρασίας,  $Y$ , ορίζεται είτε ως:

$$Y_w = [(S_w - S_d) / S_w] 100$$

είτε ως

$$Y_d = [(S_w - S_d) / S_d] 100$$

Δηλαδή, ορίζεται είτε ως ποσοστό (%) επί του «υγρού» βάρους (το συνηθέστερο, δεδομένου ότι η κατάσταση εκκίνησης είναι η κατάσταση των ΑΣΑ στον κάδο, με την υγρασία τους), ή ως ποσοστό (%) επί του «ξηρού» βάρους. Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2-2) δίνονται ενδεικτικές τιμές υγρασίας των διαφόρων συστατικών υλικών των ΑΣΑ. Γνωρίζοντας την υγρασία του κάθε συστατικού υλικού και τη ποσοστιαία σύνθεση των ΑΣΑ, μπορούμε να εκτιμήσουμε τη συνολική υγρασία τους. Η υγρασία επηρεάζεται από την εποχή του έτους, τη σύνθεση των ΑΣΑ, τις καιρικές συνθήκες (π.χ. υγρασία ατμόσφαιρας), κ.τ.λ. Σημειώνεται ότι οι τιμές του συγκεκριμένου πίνακα (Πίνακας 2-2) προέρχονται κατά βάση από στοιχεία των ΗΠΑ. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τα ΑΣΑ της χώρας μας, αλλά μόνον για το κάθε συστατικό χωριστά (Παναγιωτακόπουλος, 2002). Στη χώρα μας, αν και τα στοιχεία είναι σποραδικά, έχουν παρατηρηθεί μεγαλύτερες τιμές υγρασίας, μέχρι και 50 % «υγρού» βάρους.



Πίνακας 2-2 :Ποσοστά υγρασίας στα ΑΣΑ

Συστατικό υλικό	Ποσοστό υγρασίας (%υγρού βάρους)	Συστατικό υλικό	Ποσοστό υγρασίας (%υγρού βάρους)
<b>Οργανικά</b>		<b>Ανόργανα</b>	
Τροφικά υπολείμματα	50-80	Γυαλί	1-4
Χαρτί	4-10	Μέταλλα	2-4
Χαρτόνι	4-8	Αδρανή	2-6
Πλαστικά	1-4	<b>Αστικά Στερεά Απόβλητα</b>	
Υφάσματα	6-12	Σε Α/Φ	15-40
Λάστιχα	1-4	Σε ΧΥΤΑ	15-40
Δέρματα	8-12	Απορρίμματα κήπων	30-80
Εμπορικά απορρίμματα	10-80		

Πηγή: Παναγιωτακόπουλος, 2002

### Υδροαπορροφητικότητα

Ως υδροαπορροφητικότητα των αστικών απορριμμάτων ορίζεται η μέγιστη υγρασία (% επί του ξηρού βάρους ) που μπορεί να συγκρατηθεί από αυτά σε κανονικές συνθήκες πεδίου βαρύτητας. Από το μέγεθος αυτό εξαρτάται η δημιουργία στραγγισμάτων καθώς διασταλάγματα δημιουργούνται μόνο εφόσον η υγρασία υπερβεί την υδροαπορροφητικότητα. Η έννοια της υδροαπορροφητικότητας (Α%) είναι ότι εφόσον το % ποσοστό υγρασίας των αστικών απορριμμάτων (επί του ξηρού βάρους) δεν υπερβεί το Α%, δεν θα υπάρξει στράγγισμα, δηλαδή ροή υγρού λόγω βαρύτητας.

Η υδροαπορροφητικότητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι κυριότεροι των οποίων είναι: η σύνθεση των αστικών απορριμμάτων, ο βαθμός συμπίεσης και η έκταση ή ο βαθμός στον οποίο έχει προχωρήσει ο βαθμός συμπίεσης. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες τιμές για την υδροαπορροφητικότητα των ΑΣΑ στις διάφορες

φάσεις της διαχείρισής τους. Για τα μη συμπιεσμένα ΑΣΑ αναφέρονται τιμές από 50 έως 60 %, όταν για τα συνήθη εδάφη οι τιμές κυμαίνονται από 5 έως 35% (Παναγιωτακόπουλος, 2002).

### Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υλικού (π.χ. του εδάφους ή των αποβλήτων) είναι ένα μέτρο της ταχύτητας με την οποία το νερό διαπερνάει το υλικό. Για κάθε συγκεκριμένο υλικό, η υδραυλική αγωγιμότητα μετριέται εργαστηριακά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πιεζομετρικού ύψους. Οι μονάδες μέτρησης είναι μήκος ανά μονάδα χρόνου (δηλαδή μονάδες ταχύτητας).

Η υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  των ΑΣΑ σχετίζεται με τη διαπερατότητα των ΑΣΑ ως εξής:  $K = k * \rho * g / \mu$  (2-3)

Όπου:

$K$ : το μέτρο της υδραυλικής αγωγιμότητας (m/sec)

$k$ : η ειδική διαπερατότητα του υλικού ( $m^2$ )

$\rho$ : πυκνότητα του νερού ( $Kg/m^3$ )

$g$ : επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/sec^2$ )

$\mu$ : δυναμικό ιξώδες του νερού ( $Kg/[m*sec]$ )

Η ειδική διαπερατότητα  $k$  εξαρτάται από χαρακτηριστικά του υλικού όπως το πορώδες, η κοκκομετρία, η πολυπλοκότητα των πόρων των ΑΣΑ, η ειδική επιφάνεια, κ.τ.λ. Για ΑΣΑ συμπιεσμένα σε ΧΥΤΑ, οι τιμές του  $k$  κυμαίνονται από  $10^{-12}$  έως  $10^{-11} m^2$  στην κάθετη κατεύθυνση και είναι περίπου  $10^{-10} m^2$  στην οριζόντια κατεύθυνση .

### Μέγεθος και κατανομή μεγέθους τεμαχίων

Η αποτελεσματικότητα των επεξεργασιών εκείνων που σχετίζονται με την καύση, τη συμπίεση, την κομποστοποίηση, κυρίως όμως με τη μηχανική διαλογή και την ανάκτηση υλικών επηρεάζεται, εκτός άλλων παραγόντων, και από την κοκκομετρία των ΑΣΑ (μέγεθος των τεμαχίων των ΑΣΑ). Για το μέγεθος ενός τεμαχίου χρησιμοποιούνται διάφορα μέτρα, όπως: το μήκος  $L$  (μεγαλύτερη διάσταση) του τεμαχίου, η μέση τιμή μήκους  $L$  και πλάτους  $W$  του τεμαχίου ( $[L+W]/2$ ), η τιμή της έκφρασης  $(L*W)^{1/2}$ , κ.τ.λ. Το μέγεθος των τεμαχίων και η κατανομή τους μπορούν επίσης να προσδιορίζονται από τη δυνατότητα των τεμαχίων να περάσουν από κόσκινα με συγκεκριμένων διαστάσεων ανοίγματα.

#### 2.2.2 Βιολογικά χαρακτηριστικά

Υπάρχουν ορισμένα χαρακτηριστικά ή ιδιότητες των ΑΣΑ, αναφερόμενα ως βιολογικά, τα οποία επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα εκείνων των μορφών επεξεργασίας οι οποίες έχουν σαν στόχο την βιοαποικοδόμηση (ή βιοδιάσπαση ή βιοσταθεροποίηση) της οργανικής ύλης των ΑΣΑ. Τα χαρακτηριστικά αυτά αναφέρονται στη βιοαποδομησιμότητα, στις παραγόμενες οσμές, και στην ανάπτυξη εντόμων.

#### Βιοαποδομησιμότητα

Το βασικότερο βιολογικό χαρακτηριστικό των ΑΣΑ είναι ότι το οργανικό κλάσμα τους είναι βιοαποδομήσιμο. Αυτό σημαίνει ότι το κλάσμα αυτό μπορεί να μετατραπεί με βιολογικές διεργασίες (κυρίως διαμέσω μικροβιακών διεργασιών) σε αέρια και σε σχετικώς αδρανή οργανικά και ανόργανα στερεά. Η βιολογική αυτή διαδικασία μπορεί να λάβει χώρα: είτε σε αναερόβιες (απουσία οξυγόνου) συνθήκες, οπότε παράγονται οσμές και αναπτύσσονται έντομα είτε σε αερόβιες (παρουσία οξυγόνου) συνθήκες, οπότε παράγεται ένα άοσμο, σταθεροποιημένο στερεό υλικό (compost) πλούσιο σε οργανική ύλη, υδατάνθρακες και πρωτεΐνες.

Τα διάφορα οργανικά υλικά βιοαποδομούνται με διαφορετικό ρυθμό δηλαδή έχουν διαφορετικό δείκτη βιοαποδομησιμότητας, ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί εμπειρικά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των τροφικών υπολειμμάτων είναι διπλάσιο του βιοαποδομήσιμου κλάσματος του χαρτονιού και τετραπλάσιο του χαρτιού εφημερίδας. Γενικά, τα οργανικά συστατικά των ΑΣΑ διαχωρίζονται σε βραδέως και ταχέως βιοαποδομήσιμα. Ορισμένα οργανικά, όπως πλαστικά, ελαστικά και δέρματα, βιοαποδομούνται με τόσο βραδύ ρυθμό ώστε σε πρακτικό επίπεδο να χαρακτηρίζονται ως μη βιοαποδομήσιμα.

### **Παραγωγή Οσμών**

Η παραγωγή οσμών είναι αποτέλεσμα αναερόβιων διεργασιών στους χώρους συσσώρευσης των ΑΣΑ (κάδους, σταθμούς μεταφόρτωσης, χώρους εδαφικής διάθεσης, κ.τ.λ.) και βεβαίως ευνοείται σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε τέτοιο περιβάλλον ευνοείται ο σχηματισμός υδρόθειου και μερκαπτανών από οργανικές ουσίες που περιέχουν θείο.

### **Ανάπτυξη Εντόμων**

Η κοινή μύγα αναπτύσσεται σε 9 με 11 μέρες από τη στιγμή παραγωγής των αυγών, γεγονός που υποδεικνύει όρια στο χρόνο μεταξύ συγκομιδής των ΑΣΑ.

#### **2.2.3 Χημικά χαρακτηριστικά**

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να διατυπωθούν τα χημικά χαρακτηριστικά των ΑΣΑ όπως η ομαδοποίηση χημικών ενώσεων και η εκτίμηση των ποσοστών τους στην σύνθεση των ΑΣΑ, η στοιχειακή ανάλυση, η ανάλυση που αφορά στα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την καταλληλότητα των ΑΣΑ ως καύσιμο και η εκτίμηση της θερμογόνου δύναμης.

### **Ομαδοποίηση χημικών ενώσεων**

Οι κύριες ομάδες που συνήθως αναφέρονται είναι: λιπίδια με χαμηλή διαλυτότητα στο νερό και υψηλή θερμογόνο δύναμη, υδατάνθρακες με μεγάλη διαλυτότητα στο νερό και υψηλό βαθμό βιοαποδόμησης, φυτικές και τεχνητές ίνες, πρωτεΐνες, συνθετικά οργανικά υλικά, ανόργανα υλικά.

### **Ανάλυση καταλληλότητας για καύση**

Αναφέρεται στον προσδιορισμό τεσσάρων χαρακτηριστικών που είναι καθοριστικά για την καταλληλότητα των ΑΣΑ ως καύσιμο:

1. Υγρασία
2. Τέφρα
3. Πτητική καύσιμη ύλη
4. Μη πτητικός άνθρακας

### **Στοιχειακή ανάλυση**

Περιλαμβάνεται ο προσδιορισμός του ποσοστού καθενός από τα χημικά στοιχεία που υπάρχουν στα συστατικά των ΑΣΑ. Τα πέντε κύρια στοιχεία που αφορούν στα ΑΣΑ είναι ο άνθρακας, το οξυγόνο, το υδρογόνο, το άζωτο, το θείο και η τέφρα. Με βάση τα ποσοστά αυτά, χαρακτηρίζεται η χημική σύνθεση της οργανικής ύλης στα ΑΣΑ και εκτιμάται η τιμή του λόγου C/N που επηρεάζει τις βιολογικές διεργασίες στα ΑΣΑ.

Πίνακας 2-3: Στοιχειακή Ανάλυση των συστατικών των ΑΣΑ

Συστατικό ΑΣΑ	Ποσοστό Χημικού Στοιχείου κατά “ξηρό βάρος”					
	C Τέφρα	H	O	N	S	
<b>Οργανικά</b>						
Τροφικά υπολείμματα	50	6	38	3	0,4	2,6
Χαρτί	44	6	44	0,3	0,2	5,5
Χαρτόνι	44	6	44	0,3	0,2	5,5
Πλαστικά	60	7	23	-	-	10
Υφάσματα	56	7	30	5	0,2	1,8
Λάστιχα	76	10	-	2	-	12
Δέρματα	60	9	12	10	0,4	8,6
Απορρίμματα κήπων	48	6	38	3	0,3	4,7
Ξύλα	50	6	43	0,2	0,1	0,7
<b>Ανόργανα υλικά</b>						
Γυαλί	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Μέταλλα	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
Αδρανή	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

Πηγή: Παναγιωτακόπουλος, 2002

### Θερμογόνος δύναμη

Ως θερμογόνος δύναμη του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ χαρακτηρίζεται η θερμότητα που εκλύεται όταν αυτό καίγεται πλήρως. Ένα ποσοστό της μάζας του υλικού παραμένει ως αδρανές υπόλειμμα (τέφρα).

## **2.3 Διαχείριση αποβλήτων**

Διαχείριση αποβλήτων είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων προσωρινής αποθήκευσης, συλλογής, μεταφοράς, μεταφόρτωσης, επεξεργασίας, αξιοποίησης, επαναχρησιμοποίησης ή τελικής διάθεσης σε φυσικούς αποδέκτες, συμπεριλαμβανομένης της εποπτείας των εργασιών αυτών καθώς και της μετέπειτα φροντίδας των χώρων διάθεσης (ΚΥΑ 69728/824).

Η διαχείριση των ΑΣΑ συνεπάγεται μετατροπές ή μετασχηματισμούς των χαρακτηριστικών τους, οι οποίες γενικά αναφέρονται ως μέθοδοι επεξεργασίας. Στην Κοινοτική Οδηγία 1999/31/EK (περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων) οι μέθοδοι επεξεργασίας ΑΣΑ ορίζονται ως «Οι φυσικές, θερμικές, χημικές ή βιολογικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της διαλογής, που μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων προκειμένου να περιοριστούν, ο όγκος ή οι επικίνδυνες ιδιότητες τους, να διευκολυνθεί η διακίνηση τους ή να βελτιωθεί η ανάκτηση χρήσιμων υλών». Επιπρόσθετοι στόχοι της επεξεργασίας των ΑΣΑ είναι η ανάκτηση ενέργειας και η μέγιστη εκμετάλλευση της διατιθέμενης χωρητικότητας του φυσικού περιβάλλοντος να απορροφήσει απόβλητα χωρίς υπέρβαση, των κοινωνικώς αποδεκτών ορίων για την ποιότητα.

### **2.3.1 Μέθοδοι διαχείρισης ΑΣΑ**

#### **Φυσικές μέθοδοι διαχείρισης**

Στις φυσικές μεθόδους διαχείρισης περιλαμβάνονται: ο διαχωρισμός των ΑΣΑ σε επιμέρους συστατικά τους, η συμπίεση τους (μείωση όγκου) και η μείωση του μεγέθους με μηχανικό κυρίως τεμαχισμό των τεμαχίων.

Με τον διαχωρισμό επιδιώκεται η μετατροπή ενός ανομοιογενούς και ποικιλόμορφου υλικού, όπως τα απορριπτόμενα ανάμεικτα ΑΣΑ, σε πολλά λιγότερα ποικιλόμορφα και σχεδόν ομοιόμορφα συστατικά.

Με την μηχανική συμπίεση επιδιώκεται κυρίως η αύξηση της αποδοτικότητας (μείωση του κόστους ανά τόνο ΑΣΑ). Μηχανική μείωση του όγκου έχουμε στην

συλλογή και μεταφορά, στην δεματοποίηση υλικών που έχουν ανακτηθεί από ΑΣΑ και στους χώρους εδαφικής διάθεσης.

Με τον τεμαχισμό επιδιώκεται η διαμόρφωση ενός πιο ομοιόμορφου υλικού και πιο κατάλληλου για περαιτέρω επεξεργασία. Για ορισμένα υλικά όπως τα κλαδιά φυτών, μείωση μεγέθους σημαίνει και μείωση όγκου, ενώ για άλλα όπως χαρτί μπορεί να σημαίνει αύξηση όγκου. Ο τεμαχισμός γίνεται με διάφορα είδη τεμαχιστών, θρυματιστών, θραυστήρων και άλλα.

### **Βιολογικές μέθοδοι διαχείρισης**

Η βιολογική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων βασίζεται στην αποδόμηση των οργανικών ουσιών με την βοήθεια μικροοργανισμών και περιλαμβάνει την μετατροπή τους μέσω βιοχημικών διεργασιών σε αέρια υγρά και στερεά προϊόντα. Τα προϊόντα αυτά μπορούν στην συνέχεια να αξιοποιηθούν σε διάφορες χρήσεις ή να διατεθούν χωρίς προβλήματα για την δημόσια υγεία και το περιβάλλον.

#### *Αερόβια βιολογική επεξεργασία*

Πρόκειται για την ελεγχόμενη βιοοξειδωση ετερογενών οργανικών υλικών, με την βοήθεια ετερότροφων μικροοργανισμών οι οποίοι βιοαποδομούν τα οργανικά συστατικά παρουσία οξυγόνου. Προϊόν της κομποστοποίησης είναι το compost, το οποίο είναι πλούσιο σε σταθεροποιημένη οργανική ουσία με υψηλό χουμικό περιεχόμενο. Το compost ανάλογα με την ποιότητα του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό υλικό και ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια των φυτών.

#### *Αναερόβια βιολογική επεξεργασία*

Το προς επεξεργασία υλικό τοποθετείται σε κλειστό χώρο και με την βοήθεια μηχανικής ανάμειξης υφίσταται αναερόβια αποσύνθεση.



### Θερμικές μέθοδοι διαχείρισης

Η θερμική επεξεργασία έχει ως κύριο στόχο την μείωση του όγκου των ΑΣΑ προς διάθεση, με την σύγχρονη μετατροπή τους σε μη επιβλαβή για την δημόσια υγεία, υλικά και δευτερευόντως την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κάποια επιμέρους κλάσματα των απορριμμάτων παρουσιάζουν υψηλή θερμογόνο δύναμη και η διάθεση τους στους χώρους υγειονομικής ταφής συνεπάγεται απώλεια ενέργειας και περιβαλλοντική επιβάρυνση. Στη θερμική επεξεργασία αποβλήτων ανήκουν οι διεργασίες της καύσης, της πυρόλυσης και της αεριοποίησης.

Η *καύση* είναι η χημική αντίδραση οξυγόνου με οργανική ύλη, κατά την οποία παράγονται οξυγονωμένες ενώσεις και εκλύεται ενέργεια.

Η *πυρόλυση* είναι μια εξαιρετικά ενδόθερμη επεξεργασία με πλήρη απουσία οξυγόνου, κατά την οποία η οργανική ύλη διασπάται σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα.

Η *αεριοποίηση* (μετατροπή των ΑΣΑ σε άριο) είναι η καύση με ποσότητα οξυγόνου μικρότερη της στοιχειομετρικής (μερική καύση), κατά την οποία παράγεται καύσιμο αέριο που περιέχει CO, H<sub>2</sub> και υδρογονάνθρακες κυρίως CH<sub>4</sub>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ

### 3.1 Βιοεξυγίανση

Η βιολογική επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών (βιοεξυγίανση) ουσιαστικά αποτελεί μια διεργασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται βιοτικές διαδικασίες για την αποδόμηση ή τον μετασχηματισμό των υφιστάμενων ρύπων σε λιγότερο ή καθόλου τοξική μορφή, περιορίζοντας ή εξαλείφοντας την υπάρχουσα ρύπανση. Με άλλα λόγια μέσω μιας σειράς διεργασιών, επιτυγχάνεται η βιολογική αποδόμηση οργανικών αποβλήτων σε ενώσεις μικρότερης επικινδυνότητας, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Παρουσία οξυγόνου και θρεπτικών συστατικών οι εδαφικοί μικροοργανισμοί μπορούν να μετατρέψουν διάφορους οργανικούς ρύπους σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και βιομάζα, ενώ υπό αναερόβιες συνθήκες σε μεθάνιο και μικρές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου.

Σε ένα ρυπασμένο πεδίο είναι δυνατόν να παρατηρηθεί βιοαποικοδόμηση οργανικών ρύπων σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην χρειάζεται καμία ανθρώπινη επέμβαση για την αποκατάσταση του. Η λεγόμενη φυσική μείωση οργανικών ρύπων από υπάρχοντες μικροοργανισμούς του εδάφους αποτελεί την ιδανική περίπτωση βιοαποικοδόμησης. Στην πράξη ωστόσο η φυσική μείωση των οργανικών εδαφικών ρύπων δεν επαρκεί από μόνη της για την αποκατάσταση μιας ρυπασμένης περιοχής. Συνήθως απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση για την βελτιστοποίηση των επικρατούντων συνθηκών και την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης.

Η βιοαποικοδόμηση είναι δυνατόν να περιοριστεί από μια σειρά φαινομένων όπως: α) η αυξημένη συγκέντρωση ρύπων, η οποία ενδέχεται να έχει τοξική επίδραση στους υφιστάμενους μικροοργανισμούς, β) ο ανεπαρκής πληθυσμός ή ο ακατάλληλος πληθυσμός για την αποικοδόμηση των υφιστάμενων ρύπων γ) η απουσία θρεπτικών συστατικών ή οξυγόνου και δ) η επικράτηση μη ευνοϊκών συνθηκών για την επιβίωση και δράση των υπαρχόντων μικροοργανισμών.

Οι κυριότεροι οργανικοί ρύποι που έχουν αποδειχθεί επιρρεπείς στην βιοαποικοδόμηση είναι οι ακόλουθοι:

- Πετρελαϊκοί υδρογονάνθρακες
- Πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες
- Μη χλωριωμένοι διαλύτες
- Ελαφρά χλωριωμένες ενώσεις
- Χλωριωμένοι διαλύτες

### **In-situ τεχνολογίες βιοεξυγίανσης**

Στην περίπτωση που απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση για την αποκατάσταση της ρύπανσης εδαφών έχουν αναπτυχθεί in-situ τεχνολογίες κατά τις οποίες εισάγονται στο έδαφος οξυγόνο ή θρεπτικά συστατικά με στόχο την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής ανάπτυξης και δράσης των υπαρχόντων μικροοργανισμών. Όταν ο περιοριστικός παράγοντας της βιοαποικοδόμησης είναι το είδος ή η ποσότητα των υφιστάμενων μικροοργανισμών, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί εισαγωγή κατάλληλων μικροοργανισμών στο πεδίο (*βιο-αύξηση* -bioaugmentation).

Δύο παράγοντες επηρεάζουν τη χρήση μικροοργανισμών σε μια υπό εξυγίανση περιοχή: 1) οι μη ενδογενείς μικροοργανισμοί οι οποίοι 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.

### **Ex-situ τεχνολογίες βιοεξυγίανσης**

Δεδομένου ότι η διαδικασία της βιοαποικοδόμησης είναι δύσκολο να ελεγχθεί πλήρως στο πεδίο, έχουν αναπτυχθεί ex-situ τεχνολογίες αποκατάστασης ρυπασμένων εδαφών. Σύμφωνα με αυτές τις τεχνολογίες το προς επεξεργασία έδαφος μεταφέρεται σε ειδικές εγκαταστάσεις. Στις εγκαταστάσεις αυτές πραγματοποιείται κατάλληλη προεπεξεργασία του εδάφους και πλήρως ελεγχόμενη βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρύπων σε ειδικούς αντιδραστήρες. Επιγραμματικά οι κυριότερες ex-situ τεχνολογίες βιοεξυγίανσης είναι:

- Η μέθοδος του *Landfarming*
- Η μέθοδος της *κομποστοποίησης*
- Η μέθοδος των *βιοσωρών*
- Η μέθοδος των *βιοαντιδραστήρων*

### 3.1.2 Μικροβιακοί πληθυσμοί στις διεργασίες βιοεξυγίανσης

Οι μικροοργανισμοί που δρουν κατά την διάρκεια των βιολογικών διεργασιών 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 μικροοργανισμοί κατατάσσονται στις παρακάτω ομάδες:

- *Αερόβιοι*, παρουσία οξυγόνου: *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Sphingomonas*, *Rhodococcus* και *Mycobacterium*. Τα περισσότερα από αυτά τα βακτήρια χρησιμοποιούν τις ενώσεις σαν πηγή άνθρακα και ενέργειας.
- *Αναερόβιοι*, απουσία οξυγόνου.
- Μύκητες, όπως ο *Phanaerochaete chrysosporium*. Τα πιο συνήθη υποστρώματα που χρησιμοποιούνται είναι το άχυρο και ο κώνος καλαμποκιού.
- *Μεθυλότροφοι μικροοργανισμοί*, αερόβια βακτήρια που αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας μεθάνιο σαν πηγή άνθρακα και ενέργειας.

### 3.1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιοεξυγίανσης:

Πλεονεκτήματα:

- Η βιοεξυγίανση είναι μια φυσική διεργασία και για το λόγο αυτό γίνεται πιο εύκολα αποδεκτή από το κοινωνικό σύνολο στις περιοχές ρύπανσης. Οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν στην βιοεξυγίανση αυξάνονται για όσο διάστημα οι ρύποι είναι παρόντες. Όταν ο ρύπος αποδομηθεί τότε η ποσότητά τους 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.

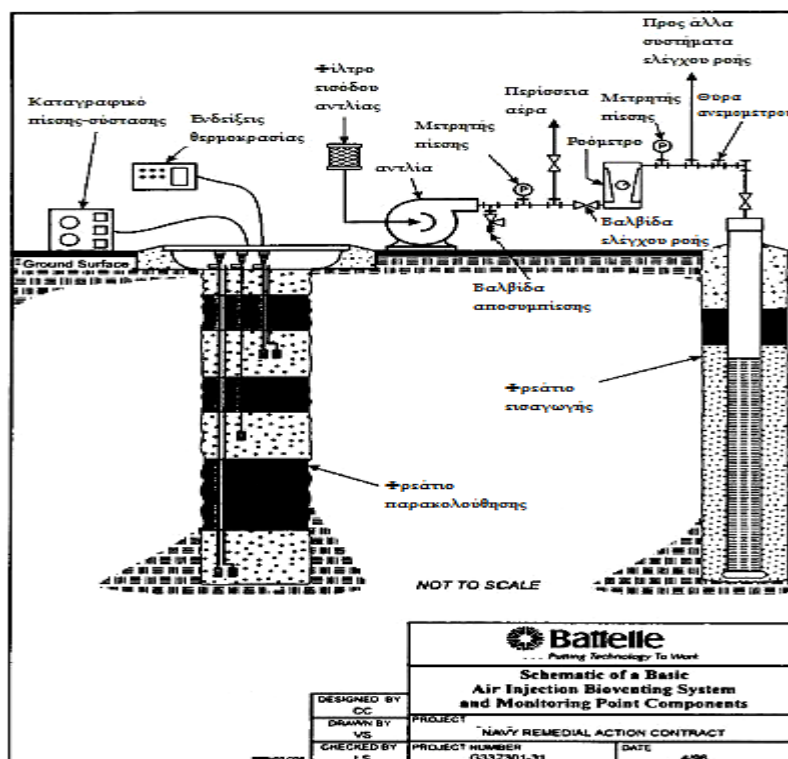
Μειονεκτήματα:

- 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 αλάτων 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.

### 3.2 Τεχνολογία βιοαερισμού

Ο βιοαερισμός αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία εξυγίανσης εδαφών, η οποία περιλαμβάνει την διοχέτευση αέρα στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους με στόχο την ενεργοποίηση της μικροβιακής δράσης και την βιοαποικοδόμηση των υφιστάμενων ρύπων. Βασικός στόχος της διεργασίας του βιοαερισμού είναι η αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στο υπό μελέτη μέσο με κατάλληλο σύστημα απ'ευθείας εισαγωγής αέρα. Ο ρυθμός ροής του εισαγόμενου αέρα είναι μικρός ώστε να αποφεύγεται η ενίσχυση της εξάτμισης των ρύπων και παράλληλα να ενισχύεται η μικροβιακή δράση. Στην ακόλουθη εικόνα (3-1) παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη βιοαερισμού.

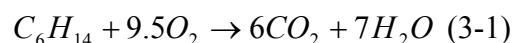


Εικόνα 3-1: Τυπική διάταξη συστήματος βιοαερισμού (Πηγή: Technical Memorandum, NFESC, 1996)

### 3.2.1 Μικροβιακές διεργασίες που επηρεάζουν το βιοαερισμό

#### 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. 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.

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/l),

t: χρόνος (min),

k: μέγιστος ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος (g<sub>s</sub>/g<sub>x</sub> · min),

X: συγκέντρωση των μικροοργανισμών (g<sub>x</sub>/l) και

K<sub>s</sub>: σταθερά ημίσεως ρυθμού του Monod (g<sub>s</sub>/l).

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 διαλυτότητά 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.



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

Κάθε μια από αυτές τις παραμέτρους επηρεάζει με ξεχωριστό τρόπο την διαδικασία του βιοαερισμού 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.

Οι βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες για την βιοαποικοδόμηση των ρύπων αναφέρονται στον Πίνακα 3-1 που ακολουθεί.

**Πίνακας 3-1: Βέλτιστες συνθήκες βιοαποικοδόμησης**

Παράμετροι	Συνθήκες μικροβιακής ανάπτυξης
Υγρασία εδάφους	25-28% της δυνατότητας συγκράτησης
Εδαφικό pH	5.5 - 8.8
Συγκέντρωση οξυγόνου	Αερόβιες, ελάχιστο κενό πορώδες: 10%
Θρεπτικά συστατικά	N και P για την ανάπτυξη
Θερμοκρασία (°C)	15 - 45
Ρύποι	Όχι πολύ τοξικοί
Βαρέα μέταλλα	Συνολική συγκέντρωση 2000 ppm
Τύπος εδάφους	Χωμάτινο ή βραχώδες

*Οι συνθήκες των δεκτών ηλεκτρονίων*

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής του βιοαερισμού, το οξυγόνο θεωρείται ο κύριος περιοριστικός παράγοντας της μεθόδου με ελάχιστες εξαιρέσεις.

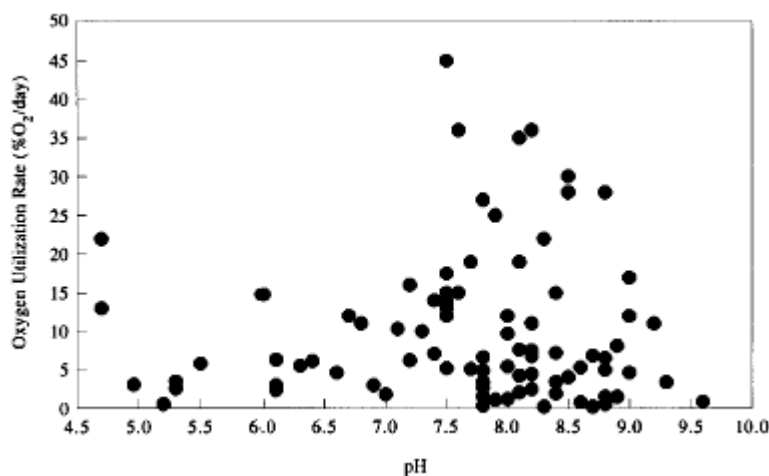
*Περιεχόμενη υγρασία*

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.

*pH του μέσου*

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 το pH δεν επηρεάζει την *in situ* βιοαποκατάσταση, παρά μόνο όταν η ρύπανση συντελεί στην μεταβολή του υπάρχοντος pH. (Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-2: Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου και του εδαφικού pH

### Θερμοκρασία του μέσου

Για κάθε είδος ρύπου υπάρχει ένα βέλτιστο εύρος θερμοκρασιών στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη βιοαποδόμηση του ρύπου από μικροοργανισμούς. Η μικροβιακή δραστηριότητα έχει διαπιστωθεί σε θερμοκρασίες από -12 ως 100 °C.

Έχει παρατηρηθεί 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 (εξίσωση 3-3):

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

όπου:

$k_T$ : θερμοκρασιακά διορθωμένος ρυθμός βιοαποικοδόμησης (% O<sub>2</sub>/day)

$k_o$ : βασικός ρυθμός βιοαποικοδόμησης (% O<sub>2</sub>/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.

#### *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 (εξίσωση 3-4) 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<sup>-1</sup>).

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).

#### *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 ο ρυθμός θα είναι χαμηλός, επειδή η επαφή μεταξύ του ρύπου και των μικροοργανισμών είναι περιορισμένη και η συγκέντρωση του υποστρώματος είναι πιθανόν κάτω από την ελάχιστη.

Οι μεταβολές στον ρυθμό βιοαποικοδόμησης κατά την εφαρμογή της μεθόδου βιοαερισμού σε πολλές περιοχές οφείλονται εν μέρει στο γεγονός της απομάκρυνσης των περισσότερο βιοδιασπάσιμων ενώσεων όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο, το αιθυλοβενζόλιο και το ξυλένιο.

#### *Βιοδιαθεσιμότητα και σχετική βιοαποικοδομησιμότητα*

Η βιοδιαθεσιμότητα είναι μια γενικότερη έννοια που περιγράφει την προσβασιμότητα του ρύπου στον μικροβιακό πληθυσμό. 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.

### **Φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν τον βιοαερισμό**

Οι κύριες φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν τον βιοαερισμό είναι:

- η διαπερατότητα του εδάφους
- η διάχυση του ρύπου στο έδαφος
- η κατανομή του ρύπου
- η ακτίνα επίδρασης του οξυγόνου.

#### *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 0,25-0,5 του όγκου των πόρων ανά ημέρα.

#### *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

*Ακτίνα επίδρασης του οξυγόνου*

Σαν ακτίνα επίδρασης του οξυγόνου ορίζεται η απόσταση μέχρι την οποία πρέπει να παρέχεται το οξυγόνο προκειμένου να διατηρηθούν οι βέλτιστες συνθήκες βιοαποικοδόμησης. 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.

Η μικροβιακή δραστηριότητα επηρεάζει την ακτίνα επιρροής, καθώς όσο αυξάνεται η μικροβιακή δραστηριότητα τόσο μειώνεται η ακτίνα. Για το λόγο αυτό, προτείνεται ο υπολογισμός της ακτίνας και ο σχεδιασμός του συστήματος σε περιόδους μέγιστης μικροβιακής δραστηριότητας.

**3.3 Πλεονεκτήματα –Μειονεκτήματα τεχνολογίας βιοαερισμού**

Πλεονεκτήματα:

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της διεργασίας του βιοαερισμού είναι τα εξής:

- Προκαλεί ελάχιστη παρέμβαση στο προς εξυγίανση πεδίο
- Μπορεί να εφαρμοστεί και σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές
- Απαιτεί σχετικά μικρούς χρόνους εξυγίανσης από 6 μήνες έως 2 χρόνια υπό βέλτιστες συνθήκες
- Παρουσιάζει μικρό κόστος αποκατάστασης
- Συνδυάζεται εύκολα με άλλες τεχνολογίες αποκατάστασης εδάφους

Μειονεκτήματα:

- Δεν είναι αποτελεσματική στην αποκατάσταση πολύ ρυπασμένων εδαφών, καθώς η μεγάλη συγκέντρωση των υφιστάμενων ρύπων αποδεικνύεται τοξική για τους μικροοργανισμούς και δεν είναι δυνατή η βιοαποικοδόμηση.
- Πολλές φορές ίσως απαιτείται η προσθήκη θρεπτικών στοιχείων για την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης.
- Ο εισαγόμενος αέρας μπορεί να προκαλέσει σταδιακά πρόβλημα συσσώρευσης ατμών στο έδαφος και να καταστεί αναγκαία η άντληση και η επεξεργασία τους.
- Η ύπαρξη ετερογένειας και χαμηλής διαπερατότητας στο έδαφος μπορεί να αποτρέψει τελείως την εφαρμογή της.
- Η μειωμένη παρουσία υγρασίας και οι χαμηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν άμεσα την απόδοση της καθώς είναι δυνατόν να περιορίσουν σημαντικά την βιοαποικοδόμηση των υφιστάμενων ρύπων .



ωννμβμ

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ****4.1 Εισαγωγή**

Η επιτακτική ανάγκη εξάλειψης του φαινομένου των ανεξέλεγκτων χωματερών εξηγεί την αλματώδη πρόοδο που παρατηρείται στον σχεδιασμό και την κατασκευή χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Για την ορθή λειτουργία των ΧΥΤΑ είναι αναγκαία η τακτική, αν όχι η συνεχής παρακολούθηση των παραγόμενων στραγγισμάτων και αερίων. Στόχος των μελετητών και των κατασκευαστών των ΧΥΤΑ είναι η εξοικονόμηση χώρου και χρόνου χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στα πλαίσια αυτής της στρατηγικής περιλαμβάνεται και η αύξηση των ρυθμών βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων έτσι ώστε η διαχείριση των απορριμμάτων να είναι η βέλτιστη δυνατή. Προς αυτή την κατεύθυνση παρατηρείται ένα ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον για την διαχείριση των στερεών αστικών απορριμμάτων σαν αναερόβιους ή σαν αερόβιους βιοαντιδραστήρες. Βασικός στόχος είναι μέσω της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα να επιτυγχάνεται αύξηση του ρυθμού βιοαποικοδόμησης του οργανικού κλάσματος σε σύγκριση με τον αντίστοιχο ρυθμό σε ένα απλό ΧΥΤΑ. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός ΧΥΤΑ-βιοαντιδραστήρα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένων οικονομικών, κλιματικών και περιβαλλοντικών.

Οι βιοαντιδραστήρες, σαν εναλλακτική λύση από τους συμβατικούς ΧΥΤΑ, σχεδιάζονται με στόχο την προώθηση της γρήγορης αποικοδόμησης του οργανικού μέρους των αστικών απορριμμάτων. Υπάρχουν αρκετές παράμετροι που αν λάβουν συγκεκριμένες τιμές βελτιστοποιούν τις διεργασίες της βιοαποικοδόμησης. Αυτές είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία των απορριμμάτων και η παρουσία ή απουσία οξυγόνου ανάλογα με τον τύπο του βιοαντιδραστήρα. Λόγω της ύπαρξης ευνοϊκών συνθηκών επιταχύνονται οι βιολογικές διεργασίες και κατ'επέκταση επιταχύνονται η σταθεροποίηση και η καθίζηση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δυνατότητα γρηρότερης απόθεσης νέας στρώσης στερεών αστικών απορριμμάτων και την ταχύτερη αποκατάσταση της χρησιμοποιούμενης έκτασης.

Τόσο στους αερόβιους όσο και στους αναερόβιους βιοαντιδραστήρες στραγγίσματα παραγόμενα από τα αστικά απορρίμματα ανακυκλοφορούνται

ανακατανέμοντας θρεπτικά συστατικά και βακτήρια διαμέσω της απορριμματικής μάζας. Στους αναερόβιους βιοαντιδραστήρες το αυξανόμενο ποσοστό υγρασίας αυξάνει το ρυθμό παραγωγής μεθανίου κάνοντας την συλλογή και την χρήση του μεθανίου σαν πηγή ενέργειας πιο οικονομική. Με την εισαγωγή αέρα καθώς και νερού σε ΧΥΤΑ δημιουργούνται αερόβιες συνθήκες και αναπτύσσονται αερόβιοι μικροοργανισμοί βιοαποικοδόμησης. Οι ρυθμοί αερόβιας βιοαποικοδόμησης είναι πιο γρήγοροι και μπορούν να μειώσουν τον χρόνο σταθεροποίησης και να αυξήσουν τους ρυθμούς καθίζησης της απορριμματικής μάζας.

Η προσθήκη αέρα διακόπτει την παραγωγή μεθανίου η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι επιθυμητή. Υπο αερόβιες συνθήκες το οξειδοαναγωγικό δυναμικό μετατρέπεται από ισχύρα αρνητικό σε θετικό το οποίο μπορεί να επηρεάσει την κίνηση των μετάλλων και την αποικοδόμηση οργανικού υλικού. Για παράδειγμα αερόβιες συνθήκες δύναται να περιορίσουν τις αντιδράσεις που παράγουν μεγάλες ποσότητες οξέων και μειώνουν το pH επηρεάζοντας την διαλυτότητα και τις ιδιότητες προσρόφηση οργανικών ενώσεων και μετάλλων. Αντιδράσεις αποσύνθεσης και εξουδετέρωσης που συμβαίνουν κάτω από αναερόβιες συνθήκες συμπεριλαμβανομένου της παραγωγής της αμμωνίας μειώνονται δραματικά σε αερόβιους αντιδραστήρες και έτσι μειώνονται οι οσμές που δημιουργούνται από την παρουσία τέτοιων ενώσεων.

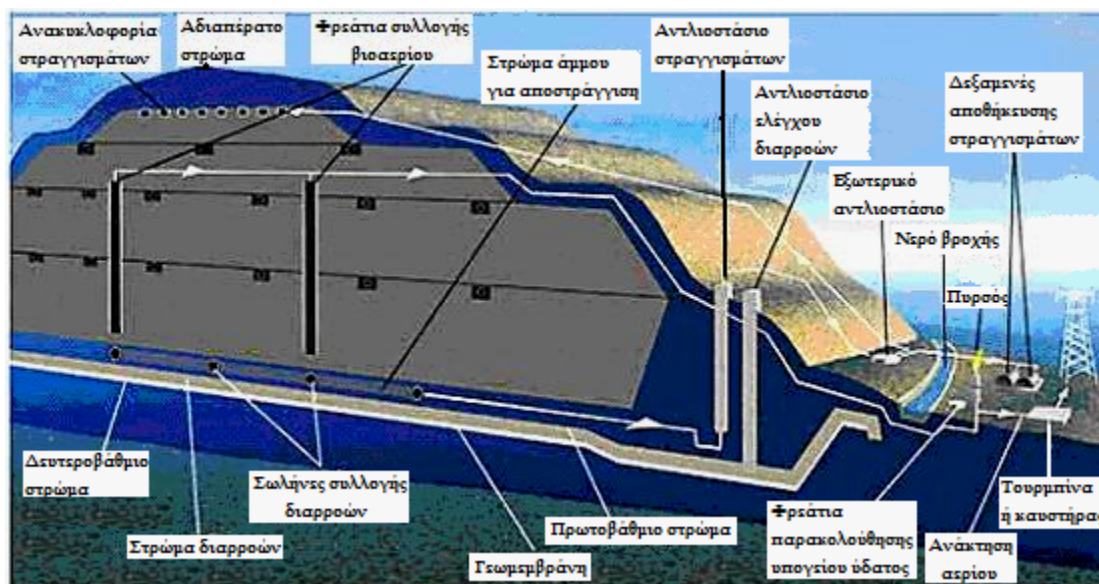
## **4.2 Περιγραφή ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρα**

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 αυτόν τον τρόπο λειτουργίας αυξάνεται σημαντικά η αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων, ο ρυθμός μετατροπής και η απόδοση της διεργασίας, σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη ενός συμβατικού ΧΥΤΑ. Με τον όρο σταθεροποίηση εννοούμε το 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 σε διάστημα μεγαλύτερο των 5–10 χρόνων από την έναρξη λειτουργίας 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 (εικόνα 3-1) είναι μια επέκταση της τεχνικής ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων. Παρόλα αυτά, στον βιοαντιδραστήρα απαιτείται προσθήκη επαρκούς ποσότητας υγρασίας για να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Η ποσότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων, αν ανακυκλοφορηθεί συνήθως δεν αρκεί 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 ύγρυνσης.



Εικόνα 4-1: Σχηματική απεικόνιση βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων

Λίγο μετά το κλείσιμο του βιοαντιδραστήρα, η παραγωγή του βιοαερίου είναι συνήθως μέγιστη. Στη συνέχεια αυξάνεται αλλά αναμένεται να 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 ώστε να 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.

#### Παραδείγματα ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρων

1. Καλιφόρνια: Επί τρία χρόνια λειτουργεί στην περιφέρεια Yolo ένα κελί του ΧΥΤΑ σαν βιοαντιδραστήρας που περιέχει 9000 tn αποβλήτων.
2. Φλόριντα: 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”.

### 4.3 Κατάταξη των βιοαντιδραστήρων στερεών αποβλήτων

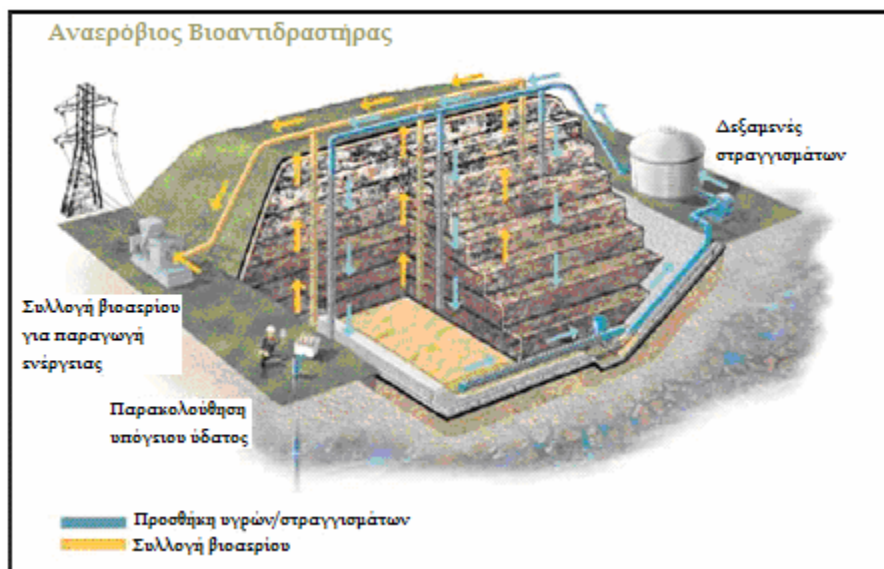
Οι βιοαντιδραστήρες στερεών αποβλήτων κατατάσσονται σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες αναπτύσσονται οι μικροοργανισμοί (EPA, 2002) σε αερόβιους, αναερόβιους ή υβριδικούς. Οι διαφορετικοί τύποι των βιοαντιδραστήρων περιγράφονται παρακάτω:

- Αερόβιοι: στους αερόβιους βιοαντιδραστήρες γίνεται εισαγωγή οξυγόνου (ή αέρα) στη μάζα των απορριμμάτων, μέσω οριζόντιων ή κατακόρυφων φρεατίων (Εικόνα 4-2). 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.



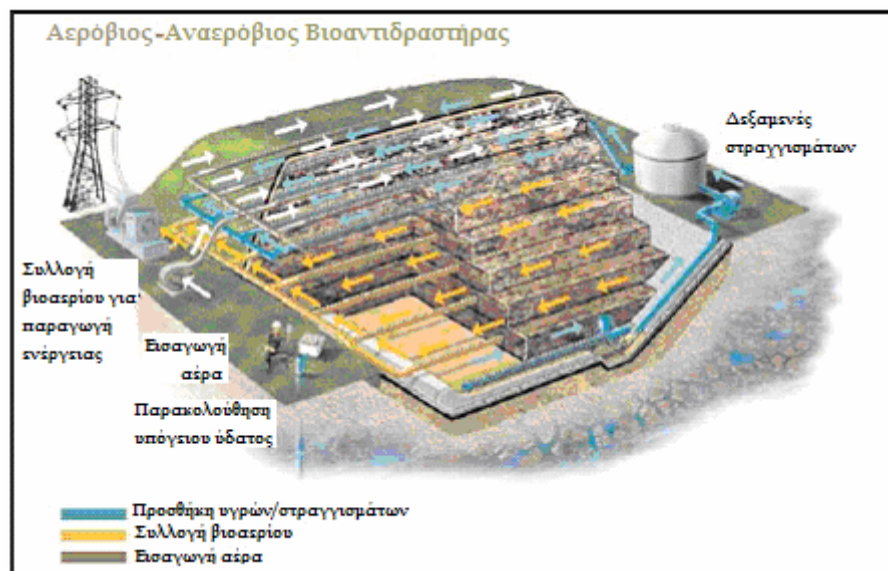
Εικόνα 4-2: Απεικόνιση αερόβιου βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων (Πηγή: Rera, 2003)

- Αναερόβιοι: σε έναν αναερόβιο αντιδραστήρα (Εικόνα 4-3), 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 σκοπό αλλά και για έλεγχο των αέριων εκπομπών.



Εικόνα 4-3: 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 (Εικόνα 4-4).



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

#### 4.4 Σύγκριση αερόβιων-αναερόβιων βιοαντιδραστήρων

Με στόχο να κατανοηθεί η διαφορά μεταξύ αερόβιων και αναερόβιων βιοαντιδραστήρων απαιτούνται περισσότερες, ποιοτικές πληροφορίες σχετικά με την παραγωγή μεθανίου και τους αερόβιους ρυθμούς αναπνοής. Αν και η ανακυκλοφορία στραγγισμάτων έχει μελετηθεί σαν παράμετρος βελτίωσης της παραγωγής μεθανίου από αναερόβιους βιοαντιδραστήρες, τα τελευταία χρόνια γίνεται μελέτη πάνω στην κατανόηση της επίδρασης της στην αερόβια αποικοδόμηση. Οι Stessel και Murphy (1992) σχεδίασαν και κατασκεύασαν λυσιμέτρα στα οποία τοποθετήθηκαν στερεά αστικά απορρίμματα με αυτό τον σκοπό. Η παροχή αέρα και ο ρυθμός ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων μεταβάλλονταν κατά την διάρκεια της μελέτης τους, με στόχο την βελτιστοποίηση της βιοαποικοδόμησης. Η μελέτη αυτή συσχετίζει την αύξηση της παροχής αέρα με την αύξηση στην καθίζηση της απορριμματικής μάζας και την μείωση της συγκέντρωσης του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) στα στραγγίσματα. Σε άλλη μελέτη αερόβιου αντιδραστήρα (March et al., 2001) αποδεικνύεται αυξημένη καθίζηση και σημαντικότερη βελτίωση της ποιότητας των στραγγισμάτων.

Τα θέματα κόστους για ένα βιοαντιδραστήρα είναι δύσκολο να προβλεφθούν με ακρίβεια. Πιθανά οφέλη, με οικονομικές ωστόσο συνέπειες σε έργα κατασκευής αερόβιων αντιδραστήρων, περιλαμβάνουν την βελτιωμένη και πιο γρήγορη παραγωγή

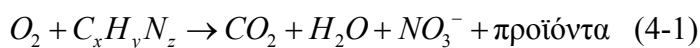


αερίων, τις μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την μικρότερη φροντίδα αποκατάστασης της χρησιμοποιούμενης περιοχής. Αντιστάθμισμα σε αυτά τα οφέλη αποτελούν το κόστος σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας ενός βιοαντιδραστήρα. Στα αερόβια συστήματα αναμένονται μεγαλύτερα οικονομικά οφέλη λόγω της καλύτερης ποιότητας των παραγόμενων στραγγισμάτων και της μηδαμινής παραγωγής μεθανίου. Στα αναερόβια από την άλλη πλευρά απαιτούνται ειδικά συστήματα, συχνά δαπανηρά, για την συλλογή των παραγόμενων εκπομπών και τον περιορισμό των οσμών.

Συγκρίνοντας τους αερόβιους με τους αναερόβιους αντιδραστήρες η ενέργεια είναι σίγουρα ένα από τα σημαντικότερα θέματα κόστους. Οι αερόβιοι βιοαντιδραστήρες έχουν το πλεονέκτημα της σαφώς πιο γρήγορης βιολογικής αποδόμησης του οργανικού φορτίου ωστόσο για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η εισαγωγή οξυγόνου. Το σύστημα εισαγωγής οξυγόνου περιλαμβάνει ένα σύστημα σωληνώσεων και φρεατίων που θα εξασφαλίζει τον επαρκή αερισμό όλου του βιοαντιδραστήρα και το οποίο αποτελεί σημαντικό στοιχείο κόστους για τον προϋπολογισμό κατασκευής και λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

Επιπρόθετα αναφορικά με τις ενεργειακές απαιτήσεις θεωρείται ότι οι απαιτήσεις για την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων και την προσθήκη νερού είναι οι ίδιες και στα δυο συστήματα. Επιπλέον σ'έναν αναερόβιο αντιδραστήρα απαιτείται σύστημα συλλογής του παραγόμενου μεθανίου ενώ σ'έναν αερόβιο απαιτείται σύστημα αερισμού και τα παραγόμενα αέρια διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα. Θεωρείται ότι η ενέργεια που απαιτείται για την συλλογή βιοαερίου σε αναερόβια συστήματα είναι η ίδια με την ενέργεια που απαιτείται για την εισαγωγή αέρα σε αερόβια συστήματα.

Η βασική εξίσωση αερόβιας αποδόμησης σύνθετων οργανικών ενώσεων της μορφής  $C_xH_yN_z$  είναι: (Peirce et al., 1997):



Όπως φαίνεται από την εξίσωση (4-1) 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 (4-1):

Η αναερόβια αποδόμηση από την άλλη πλευρά 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<sub>2</sub>S).

#### Παραγωγή και μεταφορά θερμότητας

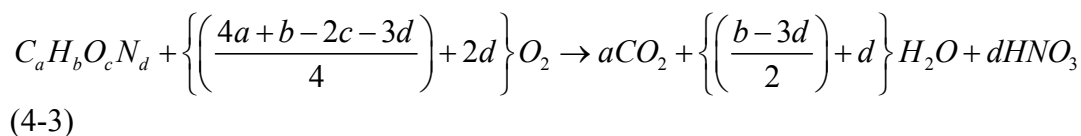
Οι αντιδράσεις βιοαποικοδόμησης είναι εξώθερμες. Η καθαρή ποσότητα θερμότητας που παράγεται από αυτές τις αντιδράσεις έχει υπολογιστεί και είναι της τάξης των  $7.0 \cdot 10^6$  J/kgHA<sub>c</sub> για τις αερόβιες συνθήκες (Kaiser, 1996) και  $2.7 \cdot 10^5$  J/KgHA<sub>c</sub> για τις αναερόβιες (Poron and Power, 1999).

Αερόβιες αντιδράσεις τείνουν να αποδίδουν περισσότερη ενέργεια από τις ανοξικές ή αναερόβιες αντιδράσεις.Υπό χαμηλά επίπεδα υγρασίας υψηλότερη αποδιδόμενη ενέργεια καταλήγει σε αυξημένες θερμοκρασίες που με τη σειρά τους είναι δυνατόν να δημιουργήσουν συνθήκες που δεν ευνοούν την ανάπτυξη ορισμένων μικροοργανισμών.

#### 4.5 Αερόβια αποικοδόμηση αστικών στερεών απορριμμάτων

Παρουσία επαρκούς ποσότητας οξυγόνου, υγρασίας και αερόβιων βακτηρίων οι υδρογονάνθρακες που περιέχονται στα οργανικά απορρίμματα μετασχηματίζονται μέσω της οξείδωσης σε μικρότερα μόρια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα νερού και βιομάζας .

Η αερόβια αποικοδόμηση περιγράφεται απο την παρακάτω αντίδραση (4-3):



##### 4.5.1 Παράμετροι που επιδούν στην λειτουργία του αερόβιου βιοαντιδραστήρα

Τα επίπεδα υγρασίας, η θερμοκρασία, το pH και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό είναι παράμετροι που σχετίζονται άμεσα με την ορθή λειτουργία του βιοαντιδραστήρα. Όλοι αυτοί οι παράγοντες σχετίζονται με τον βαθμό απόδοσης των χημικών και βιολογικών αντιδράσεων αποικοδόμησης. Αυτό σημαίνει για παράδειγμα, ότι χωρίς υγρασία δεν λαμβάνει χώρα βιοαποικοδόμηση καθώς οι βιολογικές διεργασίες εξαρτώνται από το διαλυτικό μέσο, που εν προκειμένω είναι το νερό. Επιπρόσθετα ο ρυθμός των χημικών αντιδράσεων και οι διεργασίες αποδόμησης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα μια μέση αύξηση στην θερμοκρασία να προκαλεί αύξηση στον ρυθμό των αντιδράσεων και της αποικοδόμησης. Το pH και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό συχνά καθορίζουν τις διάφορες φάσεις της βιολογικής αποδόμησης. Συγκεκριμένα το οξειδοαναγωγικό δυναμικό είναι παράμετρος ιδιαίτερης σημασίας καθώς καθορίζει και ελέγχει ποιές βιολογικές διεργασίες μπορούν να λάβουν χώρα. Οι βιολογικές διεργασίες με την σειρά τους καθορίζουν ποια συστατικά ανταλλάσσονται μεταξύ περιβάλλοντος και βιοαντιδραστήρα μέσω των στραγγισμάτων και των αερίων εκπομπών.

#### 4.6 Τέστ αναπνοής

Για τον ορθό σχεδιασμό των συστημάτων βιοαερισμού σημαντικό ρόλο παίζει ο ρυθμός αποικοδόμησης των υφιστάμενων ρύπων ο οποίος δύναται να προσδιοριστεί μέσω των τεστ αναπνοής. Τα τεστ αναπνοής αναπτύχθηκαν με σκοπό την συγκέντρωση μετρήσεων πεδίου για τον καθορισμό των ρυθμών βιοαποικοδόμησης αλλά και για τον προσδιορισμό της δυνητικής καταλληλότητας ενός αεριζόμενου συστήματος σε μια ρυπασμένη περιοχή. Επιπρόσθετα μέσω των τεστ αναπνοής παρέχονται πληροφορίες για τον σχεδιασμό σε μεγάλη κλίμακα αερόβιας μονάδας.

Κατά την διάρκεια αυτών των τεστ παρακολουθείται η σύσταση του αέρα της απορριματικής μάζας μετά τη διακοπή της παροχής αέρα. Η μεταβολή της περιεκτικότητας του αέρα σε οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα πριν και μετά την διακοπή του αερισμού αποτελεί την βάση για τον υπολογισμό του ρυθμού βιοαποικοδόμησης των υπαρχόντων ρύπων. Θεωρώντας ως δεδομένο ότι η βιοαποικοδόμηση πραγματοποιείται από τους μικροοργανισμούς με κατανάλωση οξυγόνου και παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα, σε ρυθμό ανάλογο με τον ρυθμό βιοαποικοδόμησης των ρύπων. Αρχικά είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου και στην συνέχεια με βάση αυτό το δεδομένο είναι δυνατή η εκτίμηση του ρυθμού βιοαποικοδόμησης των ρύπων εκφρασμένος σε mg ισοδύναμου υδρογονάνθρακα ανά Kg απορριμμάτων/ημέρα.

##### 4.6.1 Απαιτούμενη παροχή αέρα

Η παροχή του οξυγόνου για το σύστημα μπορεί να υπολογιστεί από τις απαιτήσεις οξυγόνου των ενδογενών μικροοργανισμών. Η απαιτούμενη ποσότητα που θα υπολογιστεί καθορίζεται από την μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου ( $k_0$ ) που υπολογίστηκε κατά την πραγματοποίηση των τεστ αναπνοής.

Η θεωρητικά απαιτούμενη παροχή αέρα δίνεται από τον εξίσωση 4-4:

$$Q_s = \frac{k_0 V \theta_a}{(20.9 - 10\%) 60 \text{ min/hr}} \quad (4-4)$$

όπου:  $Q_s$ : παροχή αέρα για την περιοχή σε  $\text{m}^3/\text{min}$

$\Delta C_{O_2}$ :  $20,9-10=10,9\%$  μεταβολή στην συγκέντρωση οξυγόνου

$k_0$ : ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου % /hr

$V$ : όγκος απορριμμάτων ( $m^3$ )

$\theta_a$ : το πορώδες της απορριμματικής μάζας που καταλαμβάνεται από αέρα

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

#### 4.6.2 Ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου και ρυθμός βιοαποικοδόμησης

Κατά την διάρκεια των τεστ αναπνοής υπολογίζονται: ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου και ο ρυθμός παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα. Ο μεν ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου υπολογίζεται από την κλίση της γραφικής παράστασης της μείωσης οξυγόνου ως προς τον χρόνο, ο δε ρυθμός παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα προκύπτει από την γραφική παράσταση της αύξησης του διοξειδίου του άνθρακα με τον χρόνο.

Ο ρυθμός αποικοδόμησης των ρύπων δίνεται από τον εξίσωση (4-5):

$$k_B = \frac{-\frac{k_0}{100} \theta_a \frac{1L}{1000cm^3} \rho_{O_2} C}{\rho_K \frac{1kg}{1000gr}} \quad (4-5)$$

όπου:

$\rho_{O_2}$ : η πυκνότητα του οξυγόνου σε mg/L

$C$ : η αναλογία μάζας υδρογονανθράκων –απαιτούμενου οξυγόνου

$\rho_K$ : η πυκνότητα της απορριμματικής μάζας  $g/cm^3$

$k_0$ : ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου % /hr

$\theta_a$ : το πορώδες της απορριμματικής μάζας που καταλαμβάνεται από αέρα

#### 4.7 Καθίζηση

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 απορροή, 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 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.

Οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την καθίζηση των ΑΣΑ είναι περίπλοκοι. Η έντονη ανομοιογένεια των απορριμμάτων, τα μεγάλα κενά που υπάρχουν και η αποδόμηση τους με τον χρόνο διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο κατά την διαδικασία της καθίζησης. Οι καθιζήσεις των ΑΣΑ δεν είναι τόσο κατανοητές όσο αυτές των εδαφών και δύσκολα εκτιμώνται με ακρίβεια.

Η καθίζηση των ΑΣΑ διέρχεται μέσω τεσσάρων φάσεων:

- Φυσική συμπίεση και μετακίνηση εξαιτίας της μηχανικής παραμόρφωσης, κονιορτοποίησης και της εναπόθεσης των ΑΣΑ
- Καθίζηση λόγω μετακίνησης μικρότερων κλασμάτων των ΑΣΑ σε χώρους όπου υπάρχουν μεγάλα κενά.
- Καθίζηση αποδόμησης εξαιτίας της βιοαποδόμησης των οργανικών ενώσεων.
- Σύνθλιψη στοιχείων λόγω φυσικοχημικών διεργασιών όπως η διάβρωση, η οξείδωση και η αποδόμηση των ανόργανων συστατικών.

#### 4.7.1 Καθίζηση των αστικών στερεών αποβλήτων

Η καθίζηση των αστικών στερεών αποβλήτων σύμφωνα με τους Morris and Woods, (1990) πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Αυτά είναι: το στάδιο της αρχικής συμπίεσης, της κύριας συμπίεσης και της δευτερεύουσας συμπίεσης. Η αρχική συμπίεση συμβαίνει με την εκφόρτωση των απορριμμάτων στον χώρο διάθεσης. Το γεγονός αυτό συντελεί σε μια αρχική συμπίεση των κενών διαστημάτων και προκαλεί μια παραμόρφωση ως ένα βαθμό.

Ο Bowels (1998) πρότεινε μια σχέση για την ελαστικότητα των απορριμμάτων:

$$E_s = \frac{\Delta q \cdot H_0}{S_i} \quad (4-6)$$

Όπου:

$E_s$ : ο συντελεστής ελαστικότητας,

$\Delta q$ : 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.

#### 4.7.2 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.

$$m = \frac{1}{H_0} \frac{dS}{dt} = c - d \log t \quad (4-7)$$

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:

$$S = H_0 \int m \cdot dt = H_0 \left( ct - \frac{d}{\ln 10} (t \ln t - t) \right)_{t_0}^{t_1} \quad (4-8),$$

όπου:  $t_0$  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:

$$\frac{S}{H_0} = \varepsilon(t) = \Delta \sigma \left( a + b \left( 1 - e^{-(\lambda/b)t} \right) \right) \quad (4-9),$$

όπου  $\varepsilon(t)$ : η ένταση,  $\Delta \sigma$ : η τάση συμπίεσης ( $L^{-2}M$ ),  $a$ : η παράμετρος της κύριας συμπίεσης ( $L^2M^{-1}$ ),  $\lambda/b$ : 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:

$$a = \frac{\varepsilon(t_k)}{\Delta\sigma} - b(1 - e^{-(\lambda/b)t_k}) \quad (4-10).$$

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:

$$\frac{S}{H_0} = \varepsilon(t) = \Delta\sigma m(t/t_r)^n \quad (4-11),$$

όπου  $m$ : 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.

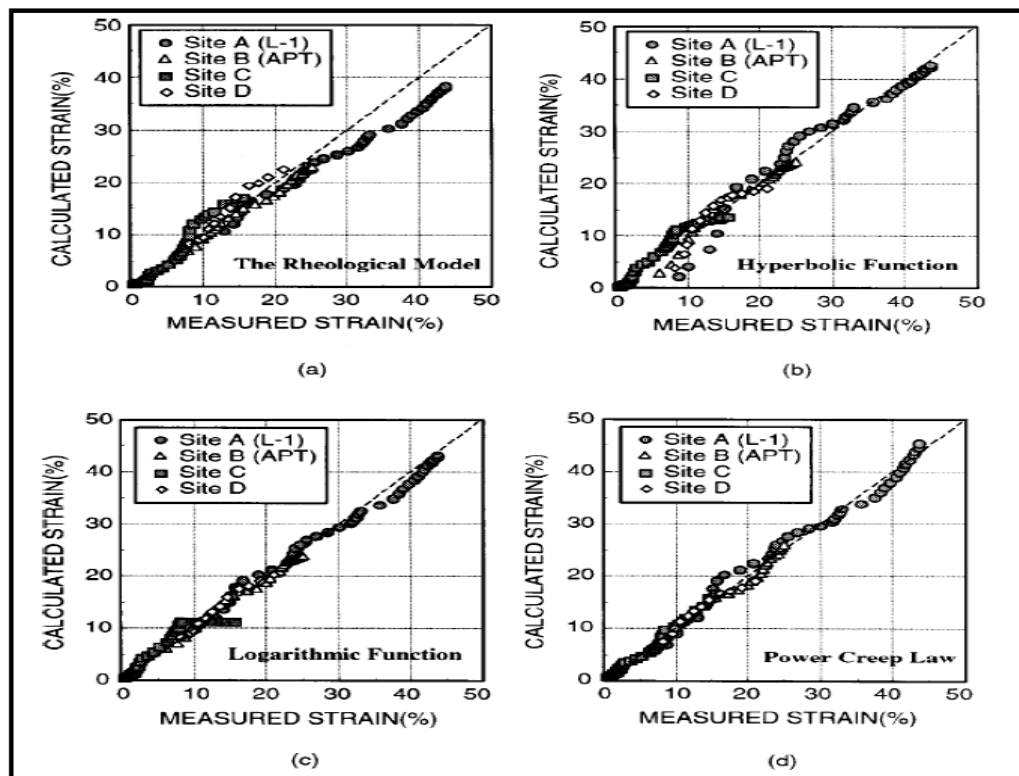
δ) Μοντέλο υπερβολικής συνάρτησης: Χρησιμοποιήθηκε πρώτα από τον Ling et al.

$$(1998): \frac{S}{H_0} = \varepsilon(t) = \frac{t}{\frac{H_o}{\rho_o} + \frac{H_o}{S_{ult}}t} \quad \text{και συνεπώς: } \frac{t}{\varepsilon(t)} = \frac{H_o}{\rho_o} + \frac{H_o}{S_{ult}}t \quad (4-9), \quad \text{όπου } S_{ult}: \text{ η}$$

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 4-5 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.



Εικόνα 4-5: Προβλεπόμενες εντάσεις από 4 μοντέλα, (Πηγή: Coelho, 2003).

### Υπολογισμός καθίζησης με την μέθοδο Tchobanoglous

Η παρακάτω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αύξησης του ειδικού βάρους των ΑΣΑ σαν συνάρτηση της υπερκείμενης πίεσης

$$SW_p = SW_i + \frac{p}{a + bp}$$

όπου  $SW_p$  το ειδικό βάρος των ΑΣΑ σε πίεση  $p$   $\text{kg/m}^3$

$SW_i$  αρχικό ειδικό βάρος απορριμάτων  $\text{kg/m}^3$

$p$  πίεση λόγω απορριμάτων και υλικού κάλυψης  $\text{kg/m}^2$

$a$  εμπειρική σταθερά (m), τυπική τιμή 15,58m

$b$  εμπειρική σταθερά ( $\text{m}^3 / \text{kg}$ ), τυπική τιμή  $1,68 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 / \text{kg}$

#### 4.7.3 Καθίζηση και βιοαποικοδόμηση

Σε έναν βιοαντιδραστήρα με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων η βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων είναι πολύ πιο γρήγορη εξαιτίας της συνεχούς ροής των στραγγισμάτων. Η αυξανόμενη ταχύτητα και ο βαθμός της μικροβιακής αποδόμησης σε ένα βιοαντιδραστήρα έχει σαν αποτέλεσμα το οργανικό φορτίο των απορριμμάτων να αποδομείται. Τα προϊόντα των αντιδράσεων αποικοδόμησης μεταφέρονται στα υγρά και τα αέρια που παράγονται από τον βιοαντιδραστήρα. Όταν η αποικοδόμηση δεν συνεχίζεται άλλο τότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι έχει επιτευχθεί σταθεροποίηση. Σ'έναν συμβατικό ΧΥΤΑ η σταθεροποίηση επιτυγχάνεται μετά απο 100 χρόνια. Σ'ένα ΧΥΤΑ-βιοαντιδραστήρα απαιτούνται 10 ή και λιγότερα χρόνια καθώς αέρια απελευθερώνονται από τον αντιδραστήρα και ο ελεύθερος χώρος μπορεί να πληρωθεί εκ νέου με απορρίμματα. Σταθεροποίηση σημαίνει ότι οι μετρώμενοι παράμετροι (σύσταση στραγγισμάτων, ρυθμοί βιοαποικοδόμησης) παραμένουν σε σταθερά επίπεδα και δεν θα αυξηθούν σε περίπτωση κάποιας μερικής διακοπής του συστήματος συγκράτησης πέρα από 5-10 χρόνια εφαρμογής της διαδικασίας των βιολογικών αντιδράσεων.

Η βιοαποικοδόμηση και η καθίζηση συσχετίζονται με την υπόθεση ότι ο όγκος που θα καθιζάνει αντιστοιχεί στο πραγματικό ποσό στερεών απορριμμάτων που μετατρέπεται σε αέριο (EL-Fadel, 1998). Βέβαια από αυτήν την θεώρηση θα πρέπει να αφαιρέσουμε την καθίζηση που προκαλείται επιπλέον λόγω της προσθήκης απιονισμένου νερού ή/και στραγγισμάτων. Με βάση αυτό το σκεπτικό, η παρατηρούμενη καθίζηση μπορεί να αποδοθεί στην βιοαποδόμηση καθώς το παραγόμενο CO<sub>2</sub> μπορεί να συσχετιστεί με οργανική μάζα ίση με την μέση καθίζηση που παρατηρείται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΔΙΑΣΤΑΛΑΓΜΑΤΑ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

### 5.1 Εισαγωγή

Με τον όρο στραγγίσματα αναφερόμαστε στα υγρά που παράγονται από την απορριμματική μάζα και μεταφέρει διαλυμένους και αιωρούμενους ρύπους. Η ποιότητα των στραγγισμάτων διαφέρει σημαντικά από τόπο σε τόπο και οι βασικοί παράγοντες που μπορούν επηρεάσουν την σύσταση στραγγισμάτων από ΧΥΤΑ είναι:

- Ηλικία ΧΥΤΑ
- Τύπος απορριμμάτων
- Βαθμός βιοαποικοδόμησης που λαμβάνει χώρα
- Ειδικό βάρος απορριμμάτων
- Μέση θερμοκρασία

Η παραγωγή των στραγγισμάτων από ένα ΧΥΤΑ αποτελεί σοβαρό περιβαλλοντικό ζήτημα. Οι οργανικές ουσίες αποτελούν την σημαντικότερη επιβάρυνση των στραγγισμάτων και είναι το σημαντικότερο κριτήριο για την εκτίμηση της ποιότητας τους. Οι οργανικές χημικές ενώσεις εμφανίζονται με την μορφή ευδιάλυτων ή αιωρούμενων προϊόντων βιοαποδόμησης, αλλά και ως οργανικές ενώσεις που έχουν αποβληθεί μαζί με τα ΑΣΑ, όπως βενζόλιο, τολουόλιο, αιθέρες, διοξίνες, αλειφατικές αλογονομένες ενώσεις, αλκοόλες, φαινόλες, παρασιτοκτόνα κτλ. Για αυτό και οι σπουδαιότεροι παράμετροι θεωρούνται το BOD<sub>5</sub>, το COD και το TOC παράμετροι οι οποίοι εξαρτώνται από την ηλικία της εγκατάστασης, το είδος της εφαρμοζόμενης συμπίεσης και την σύνθεση των αστικών στερεών απορριμμάτων.

Η βιοαποδομησιμότητα των στραγγισμάτων ενός ΧΥΤΑ είναι συναρτήσει του χρόνου. Η μεταβολή στην βιοαποδομησιμότητα ελέγχεται μέσω του λόγου BOD<sub>5</sub>/COD. Εάν οι τιμές αυτού του λόγου κυμαίνονται από 0,4-0,6 τότε αυτό είναι ένδειξη ότι η οργανική ύλη του στραγγίσματος είναι εύκολα βιοαποικοδομήσιμη. Με την πάροδο του χρόνου η τιμή αυτή μειώνεται και σε παλαιούς ΧΥΤΑ η τιμή του λόγου BOD<sub>5</sub>/COD είναι αρκετά χαμηλή και κυμαίνεται από 0,05-0,2. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι τα στραγγίσματα πιο παλαιών ΧΥΤΑ περιέχουν ενώσεις που δεν

εμφανίζουν μεγάλο βαθμό βιοαποικοδομησιμότητας, τέτοιες ενώσεις είναι τα φουλβικά και χουμικά οξέα. Επιπλέον στους ΧΥΤΑ είναι πολύ σημαντικό το θέμα της μόνωσης, καθώς σε περίπτωση διαρροής στραγγισμάτων στον υπόγειο υδροφορέα το κόστος αποκατάστασης είναι πολύ μεγάλο.

## **5.2 Μέθοδοι διαχείρισης στραγγισμάτων**

### *Φυσικές μέθοδοι διαχείρισης*

Οι φυσικές μέθοδοι διαχείρισης χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και τον διαχωρισμό επικίνδυνων ανόργανων όσο και οργανικών ενώσεων. Οι περισσότερες φυσικές μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την διαχείριση στραγγισμάτων είναι συμβατικές τεχνολογίες που μπορούν να απομακρύνουν μια σειρά ρύπων. Περισσότερο εφαρμόζονται οι τεχνολογίες μεμβράνης παρά οι απλές διεργασίες αντίστροφης ώσμωσης, όπως η ηλεκτροδιάλυση και η υπερδιήθηση. Ωστόσο οι τεχνολογίες με χρήση μεμβρανών δεν δίνουν τις καλύτερες αποδόσεις γιατί πάσχουν από προβλήματα που αφορούν στην πλήρωση των μεμβρανών και στις υψηλές συγκεντρώσεις COD στα στραγγίσματα αστικών στερεών απορριμμάτων. Ωστόσο η αντίστροφη ώσμωση δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η προ-επεξεργασία με φυσικές τεχνολογίες πριν την βιολογική διαχείριση περιλαμβάνει: καθίζηση, συσσωμάτωση ή διήθηση με στόχο την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών.

### *Χημικές μέθοδοι επεξεργασίας*

Οι χημικές μέθοδοι εφαρμόζονται ευρύτατα για την διαχείριση στραγγισμάτων. Σε αυτές περιλαμβάνονται: η οξείδωση, η κατακρήμνιση και η υγρή-αέρια οξείδωση. Η χημική προ-επεξεργασία των στραγγισμάτων πριν την βιολογική επεξεργασία περιλαμβάνει την προσθήκη ενός αλκαλίου, συχνά με στόχο την αύξηση του pH ή εάν το ποσό του ασβεστίου στα στραγγίσματα είναι τέτοιο ώστε να αποτελεί πρόβλημα, προστίθεται κονίαμα σόδας για την κατακρήμνιση του ανθρακικού ασβεστίου.

### *Ανακυκλοφορία*

Η ανακυκλοφορία είναι μια άλλη τεχνική διαχείρισης των στραγγισμάτων. Όταν τα στραγγίσματα ανακυκλοφορούνται διαμέσω της απορριματικής μάζας οι διεργασίες της βιοαποικοδόμησης επιταχύνονται και κατά συνέπεια μειώνουν τον χρόνο σταθεροποίησης του ΧΥΤΑ. Η τεχνική αυτή ωστόσο δεν αποτελεί και μέθοδο διαχείρισης των στραγγισμάτων, τα οποία θα πρέπει να διαχειριστούν με κάποια από τις άλλες μεθόδους.

Στόχοι της ανακυκλοφορίας είναι:

- Ενθάρρυνση γρήγορης σταθεροποίησης και μεθανογένεσης που επίσης βοηθάται από τα υψηλά επίπεδα υγρασίας και την κίνηση των στραγγισμάτων. Επίσης δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες για την αποδόμηση επικίνδυνων οργανικών ρύπων και άλλων βιοαποδομήσιμων υλικών.
- Βελτίωση της ποιότητας των στραγγισμάτων και επομένως μείωση του κόστους αποκατάστασης του ΧΥΤΑ.
- Μείωση των περιοχών που θα ήταν πιθανό να παρέμεναν χωρίς ικανότητα βιοαποικοδόμησης για χρόνια.
- Παροχή προσωρινής αποθήκευση μεγάλων παροχών αιχμής.
- Το βασικό πλεονέκτημα της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων είναι η αύξηση του ρυθμού σταθεροποίησης των απορριμμάτων και η αισθητή μείωση στον όγκο των στραγγισμάτων.

### *Βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας*

Οι μέθοδοι βιολογικής διαχείρισης είναι διαδικασίες κατά τις οποίες μικρόοργανισμοί χρησιμοποιούνται για να εξαλείψουν ή τουλάχιστον να μειώσουν την τοξικότητα των παραγόμενων προϊόντων από ένα ΧΥΤΑ. Οι μικροοργανισμοί μπορεί να είναι είτε αερόβιοι είτε αναερόβιοι.

Οι βασικές βιοχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την βιολογική μέθοδο είναι :1)Αποδόμηση οργανικών και μετατροπή τους σε CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O και ανόργανα άλατα, 2)Αναγωγή ανόργανων στοιχείων, 3)Δέσμευση βαρέων μετάλλων.

### 5.3 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 τα αστικά υγρά απόβλητα ή πολλά βιομηχανικά απόβλητα. Αρχικά, δε θεωρούνταν επικίνδυνα, διότι ήταν λίγες οι περιπτώσεις στις οποίες είχαν διαπιστωθεί προβλήματα ρύπανσης εδάφους ή υπογείων υδάτων.

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 η λειτουργία του ΧΥΤΑ.

Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται κάποιες παράμετροι σύστασης των στραγγισμάτων ΑΣΑ (Tchobanoglous et al., 1993). Στον Πίνακα 5-2 παρουσιάζεται η σύσταση για συμβατικούς ΧΥΤΑ και για ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων (Reinhart and Townsend, 1998), στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζεται η σύσταση των στραγγισμάτων σαν συνάρτηση του βαθμού σταθεροποίησης, ενώ στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζεται η σύσταση σαν συνάρτηση του βαθμού σταθεροποίησης των απορριμμάτων για συμβατικούς ΧΥΤΑ και για ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων (Reinhart and Townsend, 1998).

**Πίνακας 5.1: Σύσταση των στραγγισμάτων αστικών στερεών αποβλήτων (Πηγή: Tchobanoglous et al., 1993)**

Παράμετρος	Τιμή(mg.L)		
	Νέος ΧΥΤΑ (<2 χρόνων)		Παλαιός ΧΥΤΑ (>10 χρόνων)
	Εύρος	Τυπική τιμή	Εύρος
BOD <sub>5</sub> (5-δαν βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο)	2,000 - 30,000	10,000	100 -200
TOC (ολικός οργανικός άνθρακας)	1,500 - 20,000	6,000	80 -160
COD (χημικά απαιτούμενο οξυγόνο)	3,000 - 60,000	18,000	100 - 500
TSS (ολικά αιωρούμενα στερεά)	200-2,000	500	100-400
Οργανικό άζωτο	10 - 800	200	80 -120
Αμμωνία	10 - 800	200	20-40
Νιτρικά	5-40	25	5-10
Ολικός φώσφορος	5-100	30	5-10
Ορθοφωσφορικά	4-80	20	4-8
Αλκαλικότητα όπως CaCO <sub>3</sub>	1,000 - 10,000	3,000	200-1,000
pH	4.5 - 7.5	6	6.6 - 7.5
Ασβέστιο	200-3,000	1,000	100 -400
Μαγνήσιο	50 - 1,500	250	50-200
Potassium	200 - 1,000	300	50-400
Sodium	200-2,500	500	100 - 200
Χλώριο	200-3,000	500	100 -400
Θειικά	50 - 1,000	300	20 -50
Ολικός σίδηρος	50 -1,200	60	20-200



**Πίνακας 5.2: Σύσταση των στραγγισμάτων σε ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και χωρίς (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998).**

Παράμετρος	Συμβατικός ΧΥΤΑ	ΧΥΤΑ με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων
BOD (mg/L)	20-40.000	12-28.000
COD (mg/L)	500-60.000	20-34.560
Σίδηρος (mg/L)	20-2.100	4-1.095
Αμμωνία (mg/L)	30-3.000	6-1.850
Χλώριο (mg/L)	100-5.000	9-1.884
Ψευδάργυρος (mg/L)	6-370	0.1-66

**Πίνακας 5.3: Σύσταση των στραγγισμάτων σε συνάρτηση με το βαθμό σταθεροποίησης του ΧΥΤΑ (Πηγή: Reinhart and Townsend, 1998).**

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 ( $\mu\Omega$ /cm)	2,450 – 3,310	1,600 -17,100	2,900 – 7,700	1,400 – 4,500

**Πίνακας 5.4: Σύσταση των στραγγισμάτων σαν συνάρτηση του βαθμού σταθεροποίησης του 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	-

#### 5.4 Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων

Ένας αντιδραστήρας αποδόμησης στερεών απορριμμάτων απαιτεί συγκεκριμένες λειτουργικές ρυθμίσεις για την ορθή λειτουργία του και την αποτελεσματική ενίσχυση των μικροβιακών διεργασιών αποικοδόμησης. Η πιο σημαντική διαχειριστική μέθοδος αφορά στην προσθήκη υγρών και την ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Η διαδικασία της βιολογικής αποσύνθεσης απαιτεί σημαντική προσθήκη υγρών έτσι ώστε να επιτευχθούν και να διατηρηθούν οι ιδανικές συνθήκες αποικοδόμησης. Τα στραγγίσματα από μόνα τους συχνά δεν επαρκούν για να διατηρήσουν τα βέλτιστα επίπεδα υγρασίας για την βιολογική διεργασία. Για τον λόγο αυτό νερό ή άλλα μη τοξικά και μη επικίνδυνα υγρά χρησιμοποιούνται για την διατήρηση της απαιτούμενης υγρασίας. Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων διαμέσω της απορριμματικής μάζας μερικώς αποκαθιστά ή/και μειώνει την τοξικότητα των στραγγισμάτων.

Δεδομένα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία αναφέρουν ξεκάθαρα ότι η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων αυξάνει σημαντικά τον ρυθμό σταθεροποίησης των απορριμμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων προωθεί την βιολογική δραστηριότητα αυξάνοντας το περιεχόμενο υγρασίας και επιτρέποντας καλύτερη επαφή μεταξύ μικροβίων, υποστρώματος και θρεπτικών, παράγοντας τα προϊόντα βιοαποικοδόμησης. Ο Townsend et al (1996) ισχυρίζεται ότι όλες οι

εργαστηριακές μελέτες και οι μικρής κλίμακας βιοαντιδραστήρες που έχουν μελετηθεί αποδεικνύουν ότι αυξάνοντας την υγρασία μέσω της ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων δημιουργείται θετική επίδραση στην σταθεροποίηση των απορριμμάτων. Ο βαθμός της βελτιστοποίησης είναι σημαντικός σύμφωνα με τους Klink και Ham (1982) οι οποίοι σημειώνουν αύξηση στην παραγωγή μεθανίου της τάξης 25-50% στα πειράματα με ανακυκλοφορία σε σχέση με εκείνα χωρίς. Η ανακυκλοφορία στραγγισμάτων είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την λειτουργία ενός βιοαντιδραστήρα. Ο βαθμός σταθεροποίησης απορριμμάτων λόγω ανακυκλοφορίας εξαρτάται από το πως και σε τι βαθμό παραγματοποιείται η ανακυκλοφορία. Μεγαλύτερος όγκος ανακυκλοφορούντων στραγγισμάτων μπορεί σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Chugh et al (1998) να προωθήσουν την δημιουργία μεθανογενών συνθηκών καθώς επίσης και αύξηση του ρυθμού παραγωγής μεθανίου.

#### **5.4.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων σε ΧΥΤΑ**

Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα αναφορικά με την διαχείριση στραγγισμάτων μέσω της ανακυκλοφορίας τους διαμέσω της απορριμματικής μάζας τα οποία αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

- Οι ΧΥΤΑ στους οποίους λαμβάνει χώρα ανακυκλοφορία στραγγισμάτων παρουσιάζουν μειωμένες συγκεντρώσεις στις μετρούμενες παραμέτρους συγκριτικά με αυτούς που δεν περιλαμβάνουν ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Αυτό το γεγονός μειώνει την απαίτηση επεξεργασίας των παραγόμενων στραγγισμάτων πριν την τελική τους διάθεση και συνεπώς μειώνει το απαιτούμενο κόστος.
- Τα αυξημένα επίπεδα υγρασίας στην απορριμματική μάζα βελτιώνουν τις συνθήκες του συστήματος για καλύτερη βιολογική αποικοδόμηση του οργανικού υλικού των απορριμμάτων.
- Το αναγωγικό περιβάλλον που επικρατεί στην απορριμματική μάζα ευνοεί την μεταφορά ανόργανων στοιχείων στα στραγγίσματα μέσω διεργασιών κατακρήμνισης και προσρόφησης.

- Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων σταθεροποιεί το βιολογικό σύστημα των ΧΥΤΑ αλλά και περιορίζει τις απαιτήσεις παρακολούθησης τους μετά το κλείσιμο.
- Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων αυξάνει τον ρυθμό της αποικοδόμησης των απορριμμάτων και σε περιπτώσεις αναερόβιων ΧΥΤΑ αυτή η αύξηση προκαλεί αύξηση στον ρυθμό παραγωγής του μεθανίου. Με αυτό τον τρόπο η αξιοποίηση του μεθανίου για ενεργειακούς σκοπούς είναι ευκολότερη.
- Η ανακυκλοφορία στραγγισμάτων είναι μια μέθοδος διαχείρισης στραγγισμάτων η οποία είναι σχετικά απλή και οικονομική.

Τα μειονεκτήματα της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων είναι

- Λόγω της ετερογένειας της απορριμματικής μάζας τα στραγγίσματα μπορεί να συναντήσουν εμπόδια και να μην διαχυθούν σε όλη την απορριμματική μάζα. Έτσι είναι δύσκολο να επιβεβαιωθεί εάν τα στραγγίσματα έρχονται σε επαφή με όλα τα απορρίμματα.
- Κίνδυνος της περιβαλλοντικής έκθεσης όταν τα στραγγίσματα βρίσκονται στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ.
- Η έλλειψη πληροφοριών και εκπαίδευσης για το αντικείμενο αυξάνει τις πιθανότητες μη ορθής χρήσης τους.

### 5.5 Ροή στραγγισμάτων-Διήθηση

Τα φαινόμενα που λαμβάνουν μέρος στην συμπεριφορά των στραγγισμάτων είναι η απορρόφηση, η προσρόφηση, η καθίζηση και το φιλτράρισμα. Η ροή των στραγγισμάτων χαρακτηρίζεται από τον Darcy ως μια δέσμη παράλληλων αγωγών και ισχύει η εξίσωση (5-1):

$$Q = \frac{K_p * h}{I * F} \quad (5-1)$$

Όπου :  $K_p = Q/I F$

F: η επιφάνεια όπου διέρχεται μια ποσότητα νερού Q

$K_p$ : τιμή διαπερατότητας

I: μήκος ροής

H: διαφορά πίεσης

Ως προς την διάχυση ισχύει ο νόμος του Fick:  $J = \frac{D(C_1 - C_2)}{I}$  (5-2)

J: πυκνότητα ροής (kg/m<sup>2</sup>s)

C<sub>1</sub>: περιεκτικότητα στο σημείο 1

C<sub>2</sub>: περιεκτικότητα στο σημείο 2

I: η διανυόμενη απόσταση μεταξύ δυο σημείων

D: συντελεστής διάχυσης (cm<sup>2</sup>/s)

Τα στραγγίσματα κινούνται με την επίδραση του βάρους τους με μορφή κίνησης πολλαπλών φάσεων στους πόρους των απορριμμάτων που δεν υπάρχει αέρας. Η διαδρομή μιας σταγόνας νερού στο έδαφος εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων. Η ταχύτητα δίνεται από τον εμπειρικό τύπο:

$$V = -\frac{K * I * h}{I * s} \quad (5-3)$$

Όπου:

V: ταχύτητα διήθησης m/s

K: συντελεστής διαπερατότητας

I: πτώση στάθμης υδάτων εφάφους

h: ύψος στάθμης σωλήνα ροής (m)

s: απόσταση στάθμης σωλήνα ροής

### 5.5.1 Διήθηση

Η συνιστώσα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για ένα ΧΥΤΑ καθώς καθορίζει το ποσοστό του υγρού που διεισδύει μέσω του υλικού εδαφικής κάλυψης των απορριμμάτων. Ο τύπος του νερού που διηθείται μπορεί να χωριστεί σε δυο κατηγορίες, στο νερό που αρχικά καταλαμβάνει ο αέρας στο έδαφος και στην συνέχεια λόγω της δύναμης της βαρύτητας οδηγείται προς τα κάτω και στο νερό που κατακρατείται λόγω των τριχοειδών φαινομένων και παραμένει μετά την αποστράγγιση λόγω της βαρύτητας.

Εξισώσεις προσδιορισμού διήθησης:

$$\Delta\iota\eta\theta\eta\sigma\eta = K_u = K_s \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \right]^{3+\frac{2}{\lambda}} \quad (5-4)$$

$K_u$  και  $K_s$  η ακόρεστη και η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα αντίστοιχα

$\lambda$ : η κατανομή του μεγέθους των πόρων

$\phi$ : το πορώδες

$\theta_r$ : η παραμένουσα περιεχόμενη υγρασία

$\theta$ : πραγματική περιεχόμενη υγρασία

Η εξίσωση Green Ampt αποτελεί μια ευρέως γνωστή προσέγγιση που χρησιμοποιεί τον νόμο του Darcy

$$I = K \left( 1 + \frac{(\Phi - \Theta)S_f}{F} \right) \quad (5-5)$$

όπου:

$F$ : η διήθηση που έχει συσσωρευτεί (cm)

$\Theta$ : η αρχική περιεχόμενη υγρασία τους εδάφους ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\Phi$ : το πορώδες του εδάφους ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$S_f$ : η ενεργή ρόφηση στο υγρό μέτωπο (cm)

$K$ : η ενεργή υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους (cm/hr)

$I$ : ρυθμός διήθησης (cm/hr)

Σε απλούστερη μορφή ο ρυθμός διήθησης μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση  
 Ρυθμός διήθησης = πάχος στρώματος \* υδραυλική αγωγιμότητα \* κλίση/μήκος κλίσης.

## 5.6 Υδατικό ισοζύγιο

Ο υπολογισμός των στραγγισμάτων δεν μπορεί να είναι ακριβής λόγω έλλειψης είτε δεδομένων είτε τεχνογνωσίας. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι υπολογισμού με πλέον συνήθη αυτή του υδατικού ισοζυγίου. Με την μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου

προσθέτουμε όλες τις ποσότητες που βρίσκονται στο σώμα του ΧΥΤΑ ή εισέρχονται σε αυτό ή παράγονται μέσα σε αυτό από βιοχημικές αντιδράσεις και αφαιρούμε τις ποσότητες που διαφεύγουν ως υδρατμοί ή κατακρατούνται από τα ΑΣΑ και τις επικαλύψεις τους ή διατίθενται για την αναερόβια βιοαποδόμηση. Τα στραγγίσματα εμφανίζονται στον πυθμένα όταν υπερνικηθεί η ικανότητα κατακράτησης υγρασίας από τα απορρίμματα δηλαδή όταν ξεπεραστεί η υδροαπορροφητικότητα.

Η δυνητική περιεχόμενη υγρασία του απορριμματικού όγκου στον χώρο απόθεσης μπορεί να εκτιμηθεί με χρήση της επόμενης απλοποιημένης εξίσωσης (5-5):

$$\Delta S_{LC} = P - R - ET - PER_{SW} \quad (5-5)$$

Όπου :

$\Delta S_{LC}$ : η διαφορά στην αποθηκευτικότητα του νερού που κατακρατείται ανά μονάδα όγκου του εδαφικού υλικού

P: η ποσότητα βροχόπτωσης ανά μονάδα επιφάνειας

R: η ποσότητα απορροής ανά μονάδα επιφάνειας

ET: η ποσότητα νερού που χάνεται λόγω εξατμισοδιαπνοής ανά μονάδα επιφάνειας

$PER_{SW}$  : η ποσότητα νερού που διηθείται από το εδαφικό υλικό στα συμπιεσμένα απορρίμματα ανά μονάδα επιφάνειας

Για τον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου ,σε αντιστοιχεία με την εξίσωση των Reinhart et al. (1998), παρουσιάζεται παρακάτω:

$$M_{in} + M_{InH_2O} + M_r - M_{gas} - M_{waste} - M_{out} = 0 \quad (5-6)$$

Όπου:

$M_{in}$ :εισερχόμενα στραγγίσματα λόγω ανακυκλοφορίας

$M_{InH_2O}$ :εισερχόμενη ποσότητα απιονισμένου νερού

$M_{gas}$ :απώλειες λόγω εξερχόμενων υδρατμών

$M_r$  : νερό παραγόμενο από τις βιολογικές διεργασίες

$M_{waste}$ :στραγγίσματα που συγκρατούνται από την απορριμματική μάζα

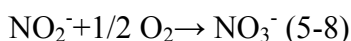
$M_{out}$ : εξερχόμενα στραγγίσματα στο δοχείο αποθήκευσης

## 5.7 Βιολογικές διεργασίες

### 5.7.1 Νιτροποίηση

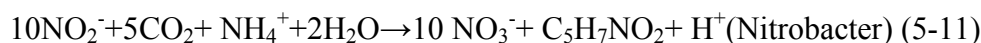
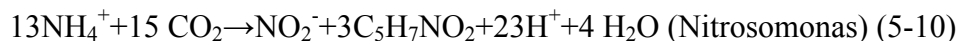
Η νιτροποίηση είναι μια αερόβια βιολογική διαδικασία δύο σταδίων κατά την οποία αυτότροφα βακτήρια οξειδώνουν τα αμμωνιακά ιόντα σε νιτρώδη και στη συνέχεια σε νιτρικά. Στο πρώτο βήμα η αμμωνία οξειδώνεται σε νιτρώδη από βακτήρια *Nitrosomonas* σύμφωνα με την αντίδραση:  $\text{NH}_4^+ + 3/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$  (5-7)

Στο δεύτερο βήμα, τα νιτρώδη οξειδώνονται σε νιτρικά από βακτήρια *Nitrobacter*:



και η συνολική αντίδραση είναι:  $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$  (5-9)

Παράλληλα συντίθεται βιομάζα σύμφωνα με τις εξισώσεις:



Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις καταλήγουμε στην εξίσωση που περιγράφει την πλήρη νιτροποίηση:



οι συντελεστές της οποίας μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι κατά την νιτροποίηση, για κάθε mole αφαιρούμενου αμμωνίου, απαιτείται σημαντικό ποσό οξυγόνου, παράγεται λίγη βιομάζα και μειώνεται σημαντικά η αλκαλικότητα λόγω της παραγωγής ιόντων υδρογόνου.

Η διαδικασία της νιτροποίησης επηρεάζεται από το διαλυμένο οξυγόνο, την οργανική φόρτιση, το pH, την αλκαλικότητα, την θερμοκρασία, την ποσότητα των νιτροποιητικών βακτηρίων και την παρουσία τοξικών. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τα νιτροποιητικά βακτήρια είναι το ότι δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τα ετερότροφα βακτήρια στην κατανάλωση θρεπτικών και οξυγόνου. Η νιτροποίηση γίνεται ευκολότερα σε υψηλές τιμές pH. Ιδανικές συνθήκες επικρατούν σε επίπεδα pH 7.5-8.5 παρόλο που τα νιτροποιητικά βακτήρια μπορούν να προσαρμοστούν και έξω από την περιοχή αυτή.



Ο ρυθμός της νιτροποίησης επηρεάζεται σημαντικά από την θερμοκρασία. Όσο αυξάνει η θερμοκρασία, αυξάνει και ο ρυθμός της νιτροποίησης. Θερμοκρασίες πάνω από 20 °C και μέχρι περίπου τους 35 °C, ενισχύουν την νιτροποίηση. Η νιτροποίηση επιβραδύνεται δραματικά γύρω στους 5 °C. Τα Nitrobacter είναι πιο ευαίσθητα στην θερμοκρασία από τα Nitrosomonas. Με τη μείωση της θερμοκρασίας, μειώνεται η ανάπτυξη των Nitrobacter με αποτέλεσμα να μειώνεται η νιτροποίηση και να συσσωρεύονται τα νιτρώδη.

Για την νιτροποίηση απαιτείται ένας ελάχιστος πληθυσμός νιτροποιητικών βακτηρίων. Τα βακτήρια αυτά για να αναπτυχθούν πρέπει να προσκολληθούν σε κάποια επιφάνεια. Στον βιοαντιδραστήρα τα οργανικό υλικό αποτελεί επιφάνεια έδρασης των νιτροποιητικών βακτηρίων. Τα νιτροποιητικά βακτήρια είναι περισσότερο ευαίσθητα σε ανασταλτικούς παράγοντες, όπως τα βαρέα μέταλλα, από όσο τα βακτήρια αποδόμησης του BOD<sub>5</sub>, έτσι θα είναι και τα πρώτα που θα πεθάνουν σε περίπτωση ύπαρξης τοξικών. Αν οποιοσδήποτε από τους αναγκαίους παράγοντες για την πραγματοποίηση της νιτροποίησης λείπει ή είναι περιορισμένος, μπορεί η νιτροποίηση να μην ολοκληρωθεί. Αυτό το φαινόμενο που καλείται "μερική νιτροποίηση" αφήνει στην έξοδο αμμωνία ή και νιτρώδη.

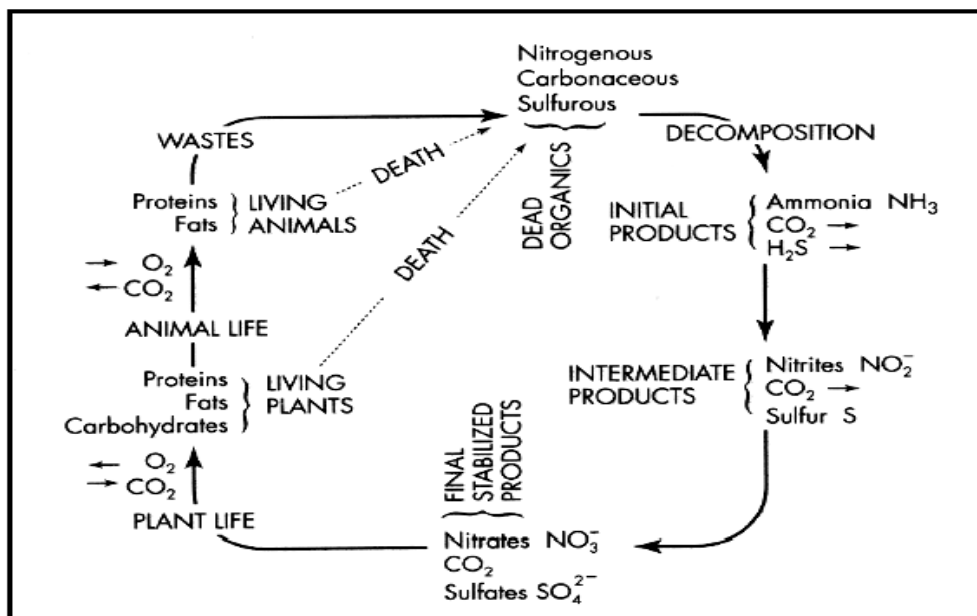
Για τον υπολογισμό της απομάκρυνσης του ολικού αζώτου έχει προταθεί η σχέση (Reed, Crites and Middlebrooks – 1995 – Natural Systems for Waste Management and Treatment, McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> edition):

$$NIT_e = NIT_i \{ -k[\theta + 60.6(\text{pH} - 6.6)] \} (5-13)$$

όπου,  $k = k_{20} * 1.039^{T_w - 20}$

η σταθερά του ρυθμού αφαίρεσης με  $k_{20} = 0.0064 \text{ d}^{-1}$  και  $T_w$  = θερμοκρασία νερού.

Εξαιτίας αυτής της διαδοχής, το άζωτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης ποιότητας νερών. Στην εικόνα 5-6 παρουσιάζονται οι αερόβιοι κύκλοι του αζώτου, του άνθρακα και του θείου.



Εικόνα 5-6: Αερόβιοι κύκλοι αζώτου, άνθρακα και θείου (Peirce et al., 1997)

### 5.7.2 Οξείδωση φωσφόρου

Ο φώσφορος, με τη μορφή φωσφορικών κυρίως ιόντων ( $PO_4^{3-}$  και  $HPO_4^{2-}$ ) αποτελεί ένα από τα βασικά θρεπτικά συστατικά τόσο των ζωικών όσο και των φυτικών οργανισμών. Φώσφορος υπάρχει στο μόριο του DNA, του ATP, στην κυτταρική μεμβράνη (φωσφολιπίδια) και αλλού.

Οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τον φώσφορο κατά την διάρκεια της κυτταρικής σύνθεσης και μεταφοράς ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αφαίρεση του εισερχόμενου φωσφόρου λόγω των βιολογικών διεργασιών. Τα βακτήρια *acinetobacter*, οι κυριότεροι μικροοργανισμοί που συνεισφέρουν στην αφαίρεση φωσφόρου, όταν υπόκεινται σε αερόβιες συνθήκες εκτός από οξυγόνο καταναλώνουν φώσφορο πάνω από τα κανονικά επίπεδα, ο οποίος χρησιμοποιείται για κυτταρική σύνθεση, μεταφορά ενέργειας και επίσης αποθηκεύεται για μετέπειτα χρήση από τους μικροοργανισμούς.

Στον βιοαντιδραστήρα που μελετάμε λοιπόν σχετικά με τον φώσφορο αναμένουμε παρουσία  $PO_4^{3-}$  [ $H_2 PO_4^- \rightarrow H PO_4^{2-} \rightarrow PO_4^{3-}$ ] αφού σε αυτή την μορφή καταλήγουν τα

μόρια τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP) μετά την οξείδωση τους που λαμβάνει χώρα σε αερόβιες συνθήκες.

Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση του φωσφόρου είναι η θερμοκρασία, το pH και η συγκέντρωση των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων. Υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τους ρυθμούς αποικοδόμησης των οργανικών ουσιών και συνεπώς την απελευθέρωση φωσφόρου. Παράλληλα βέβαια υψηλές θερμοκρασίες εντείνουν την πρόσληψη φωσφόρου από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Συνήθως όμως ο ρυθμός της πρώτης διαδικασίας (απελευθέρωση φωσφόρου) είναι μεγαλύτερος από αυτόν της δεύτερης (δέσμευση φωσφόρου), με αποτέλεσμα υψηλές θερμοκρασίες να επιφέρουν αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου στο στραγγίσματα. Σε υψηλές τιμές pH συμβαίνει ανταλλαγή των ιόντων υδροξυλίου του νερού με φώσφορο από ενώσεις σιδήρου και αργιλίου του πυθμένα. Συνεπώς αύξηση του pH επιφέρει αύξηση της συγκέντρωσης του φωσφόρου στο στραγγίσματα. Ανοξικές συνθήκες ευνοούν τη διάχυση του φωσφόρου από τα απορρίμματα στο νερό. Αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών και των νιτρωδών ιόντων μειώνει το ρυθμό απελευθέρωσης του φωσφόρου στα στραγγίσματα εξαιτίας της οξειδωτικής τους δράσης.

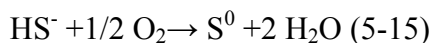
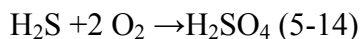
### 5.7.3 Οξείδωση θείου

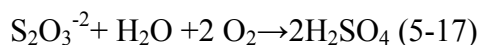
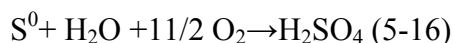
Το θείο είναι ένα από τα βασικά συστατικά των ζώντων οργανισμών και βρίσκεται στα απορρίμματα σε διάφορες μορφές. Η σημαντικότερη από τις ενώσεις του θείου είναι το  $\text{SO}_4^{-2}$  γιατί η παρουσία του στα στραγγίσματα δημιουργεί προβλήματα που οφείλονται στο σχηματισμό  $\text{H}_2\text{S}$  και  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Οι αερόβιοι χημειοανότροφοι μικροοργανισμοί οξείδωσης θείου χρησιμοποιούν σαν ηλεκτρονιακούς δότες ανηγμένες ενώσεις του θείου όπως υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ), μοριακό θείο ( $\text{S}^0$ ) και υποθειώδες ( $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$ ).

Το τελικό προϊόν της βιοχημικής αντίδρασης των ενώσεων του θείου είναι το ( $\text{SO}_4^{-2}$ ):

Οι αντιδράσεις οξείδωσης του θείου είναι:





Οι πιο γνωστοί αερόβιοι χημειοαυτότροφοι μικροοργανισμοί οξείδωσης θείου είναι οι *Thiobacillus thiooxidans* και ο *Thiobacillus ferrooxidans*. Πολλά θείο βακτήρια εναποθέτουν ενδοκυτάρρια  $S^0$  σαν ενεργειακό απόθεμα.

## 5.8 Τοξικότητα στραγγισμάτων

Η μελέτη των επικινδύνων ουσιών και αποβλήτων, καθώς επίσης και η προσπάθεια εύρεσης βέλτιστων τρόπων διαχείρισης και επεξεργασίας αυτών, οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην ανάγκη προστασίας της ανθρώπινης ζωής. Η τοξικολογία αποτελεί μια επιστήμη η οποία αναπτύχθηκε με στόχο την μελέτη της επίδρασης διαφόρων χημικών ενώσεων στον ανθρώπινο οργανισμό ή σε άλλους ζώντες οργανισμούς με γνωστή ευαισθησία σε συγκεκριμένες ουσίες. Επιπλέον μελετάται η ικανότητα χημικών ουσιών να βλάψουν οργανικά συστήματα και να επηρεάσουν την ομαλή διεξαγωγή πραγματοποιούμενων βιοχημικών διεργασιών. Αν και θεωρητικά καμία χημική ουσία δεν μπορεί να θεωρηθεί απολύτως ασφαλής, καθώς είναι δυνατόν σε υψηλή συγκέντρωση να αποδειχθεί επιβλαβής, η τοξικολογία προσπαθεί να δώσει ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με το ποιές ουσίες είναι τοξικές, για ποιούς οργανισμούς και σε ποιές δόσεις.

Η πιο βασική έννοια της τοξικολογίας είναι αυτή της τοξικότητας η οποία ορίζεται ως η ιδιότητα που έχει μια ουσία να δηλητηριάσει ένα ζώντα οργανισμό και να προκαλέσει την εμφάνιση αρνητικών επιδράσεων σε αυτόν. Ως τοξική ουσία ορίζεται οποιαδήποτε χημική ουσία μπορεί να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στο βιολογικό σύστημα ανθρώπων και ζώων.

Η εκτίμηση της τοξικότητας υγρών δειγμάτων γίνεται με δυο δείκτες. Ο πρώτος δείκτης είναι ο δείκτης τοξικότητας  $LC_{50}$  (Lethal Concentration: θανατηφόρα συγκέντρωση). Αυτός εκφράζει την συγκέντρωση της υπό εξέταση τοξικής ή επικίνδυνης ουσίας που προκαλεί θάνατο στο 50% των πειραματόζωων. Ο δεύτερος είναι ο δείκτης  $LD_{50}$  (Lethal Dose: θανατηφόρα δόση) ο οποίος εκφράζει την δόση της

υπό εξέταση τοξικής ή επικίνδυνης ουσίας που προκαλεί τον θάνατο στο 50% των πειραματόζων.

Για να χαρακτηριστεί μία ουσία ως προς την τοξικότητα της πρέπει να γνωρίζουμε τη μέγιστη ποσότητα έκθεσης των οργανισμών σε αυτήν για συγκεκριμένο χρόνο έκθεσης. Χαρακτηριστικό όριο αποτελεί η τιμή TLV και TLV-TWA.

**TLV** (Threshold Limit Value: οριακή τιμή κατωφλιού). Αυτό αποτελεί έκφραση της μέγιστης συγκέντρωσης της δεδομένης ουσίας στην οποία θα μπορούσε να εκτίθεται ένας συγκεκριμένος οργανισμός κάθε ημέρα χωρίς να υποστεί σημαντική βλάβη.

**TLV-TWA** (Time-Weighted Average: μέση τιμή –υπολογισμένη ως προς το χρόνο). Αποτελεί έκφραση της μέσης συγκέντρωσης μιας ουσίας ως προς το χρόνο για ένα συνηθισμένο οκτάωρο εργάσιμης ημέρας ή 40 ώρες μιας εβδομάδας εργασιμων ημερών στην οποία ένας εργαζόμενος μπορεί να εκτεθεί στην συγκεκριμένη ουσία χωρίς επιβλαβή επίδραση.

Για την συγκεκριμένη περίπτωση, δηλ. για τα στραγγίσματα του βιοαντιδραστήρα, αναφερόμαστε σε μίγμα που πιθανόν αποτελείται από τοξικές και επικίνδυνες ουσίες. Η σχέση που μας βοηθάει στον υπολογισμό της τοξικότητας τους είναι η ακόλουθη:

$$R_m = \sum C_i / TLV_i \quad (5-18)$$

Όπου:

**R<sub>m</sub>** είναι σχετική αναλογία της τοξικότητας του μίγματος

**C<sub>i</sub>** είναι συγκέντρωση της συγκεκριμένης τοξικής ουσίας (ppm)

**TLV<sub>i</sub>** είναι το όριο έκθεσης για την συγκεκριμένη τοξική ουσία (ppm)

Για  $R_m > 1$ , σημαίνει ότι η συγκέντρωση του μίγματος υπερβαίνει το όριο TLV και θεωρείται επικίνδυνη τόσο για το περιβάλλον όσο και για τον ανθρώπινο οργανισμό.

Για τον προσδιορισμό της οικολογικής ποιότητας των επιφανειακών νερών χρησιμοποιούμε το τέστ τοξικότητας, δηλ. για τον προσδιορισμό της τοξικότητας να γίνεται χρήση υδρόβιων οργανισμών π.χ. οστρακόδερμα *Daphnia*, βακτήρια, άλγη κ.λ.π.

### 5.9 Βαρέα μέταλλα στα στραγγίσματα ΑΣΑ

Οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα ποικίλουν σε ένα εύρος που εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων που περιλαμβάνουν την σύσταση των απορριμμάτων, την ηλικία του βιοαντιδραστήρα και την υγρασία της απορριμματικής μάζας. Τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων επιδρούν έντονα την μετακίνηση κάθε διαλυτών μετάλλων από τα στραγγίσματα μέσω των μηχανισμών μεταφοράς. Μελέτες έδειξαν ότι κατά μέσο όρο οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα είναι σχετικά χαμηλές .

Γενικότερα υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον σχετικά με το κατά πόσο οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα αυξάνουν κατά την διάρκεια της φάσης οξείδωσης στους ΧΥΤΑ. Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει ως τώρα από εργαστηριακά πειράματα δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Αυξημένες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν από τους Mennerich, (1984), Martensson et al. (1999) και Flyhammar και Hakansson, (1999). Οι τελευταίοι υποστηρίζουν ότι οι συγκεντρώσεις των μετάλλων αυξάνουν. Εργαστηρικά πειράματα και μοντελοποιήσεις από τους Revans et al (1999), ωστόσο υποδεικνύουν ότι οι συγκεντρώσεις των μετάλλων μπορεί να μεταβληθούν αλλά δεν αναμένονται σημαντικές αυξήσεις στις συγκεντρώσεις τους στα στραγγίσματα. Οι Ritzkowski και Stegmann (2001) κατέληξαν ότι οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων είναι συνάρτηση του οξειδοαναγωγικού δυναμικού. Σύμφωνα με τους παραπάνω μια αλλαγή από αερόβιες σε αναερόβιες συνθήκες δεν επηρεάζει σημαντικά την κινητοποίηση των μετάλλων και την εκχύλιση τους στα στραγγίσματα εφόσον το δυναμικό οξειδοαναγωγής δεν ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή. Μια άλλη αιτία για τις μεταβολές που παρατηρούνται στις συγκεντρώσεις μπορεί να είναι οι μεταβολές στο pH, σύμφωνα με τους Flyhammar και Hakansson (1999), οι διαφορές στο ποσό και την σύσταση του οργανικού υλικού στα στραγγίσματα αλλά και οι συνθήκες αερισμού και ανακυκλοφορίας κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Οι Martensson et al (1999) κατέληξαν στο ότι η ανακυκλοφορία μπορεί να μειώσει την πιθανότητα αυξημένης σταθεροποίησης των μετάλλων. Οι Hantsch et al αναφέρουν πολύ μικρή και όχι αξιοσημείωτη αύξηση στις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα αερόβιων κελιών σε σύγκριση με τα αναερόβια. Οι Ritkowski και Stegmann (2003) μετά απο μελέτη σε

αερόβιους αντιδραστήρες για πάνω απο ένα χρόνο παρατήρησαν μείωση στην εκχύλιση των μετάλλων. Αναφορικά με την εκχυλισιμότητα των βαρέων μετάλλων μόνο το 0,02% με 0,5% των βαρέων μετάλλων κινητοποιήθηκαν προς τα στραγγίσματα σύμφωνα με τους Bulent Inanc et al (2005).

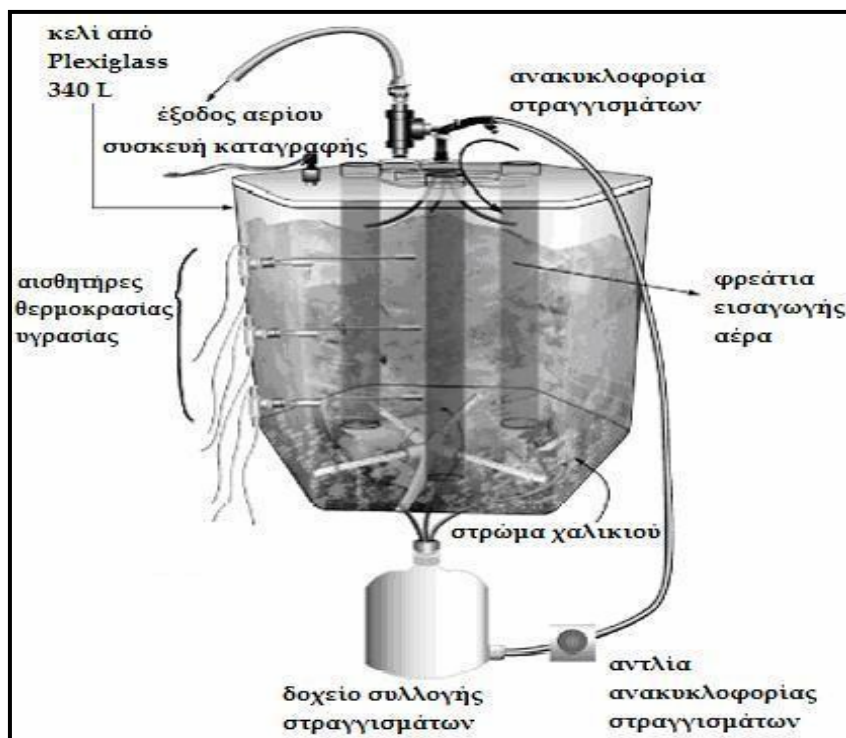




## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

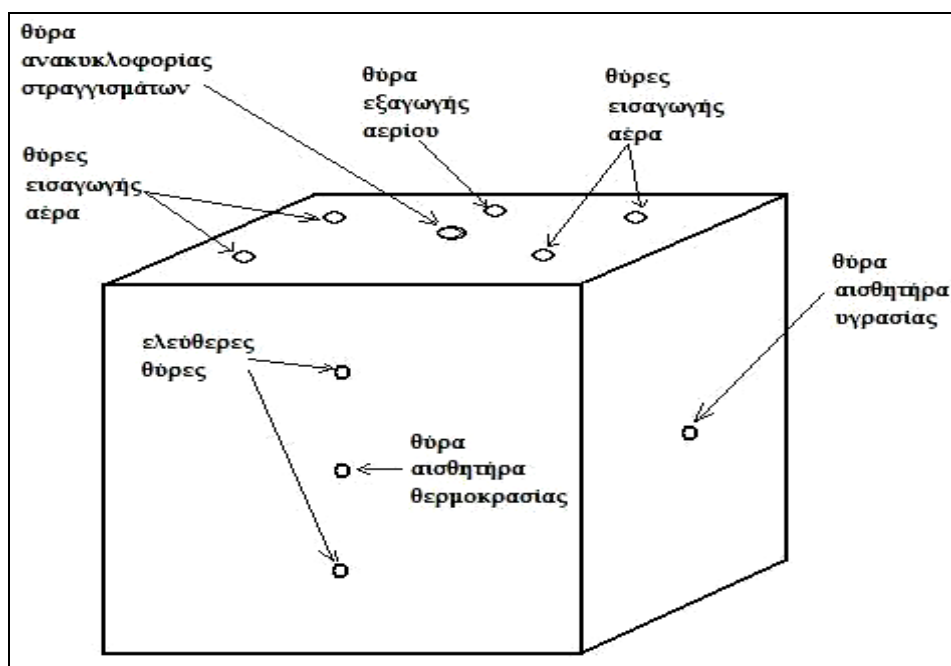
### 6.1 Περιγραφή του εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων:

Ο βιοαντιδραστήρας αποτελείται από ένα κελί όγκου 340L που περιλαμβάνει σύστημα συλλογής και ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων και σύστημα εισαγωγής αέρα (εικόνα 6-1). Ο εξοπλισμός (αισθητήρες) εγκαταστάθηκε μέσα στη μάζα των αποβλήτων για να βοηθήσει στην παρακολούθηση και στον έλεγχο. Η συλλογή και η ανάλυση των δειγμάτων καθώς και οι μετρήσεις εκτελούνται τακτικά έτσι ώστε να παρακολουθείται η πρόοδος της επεξεργασίας του βιοαντιδραστήρα. Η ευθύνη για το σχεδιασμό και την κατασκευή του κελιού ανήκει στους ερευνητές μηχανικούς και στον φορέα (Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων).



Εικόνα 6-1: Αερόβιος εργαστηριακός βιοαντιδραστήρας

Πιο αναλυτικά ο αντιδραστήρας είναι ένα κυβικό κελί με μήκος πλευράς 0.7m, από διαφανές υλικό (Plexiglas πάχους 15mm) (εικόνα 6-2). Μέσα στο κελί τοποθετήθηκαν 68 kg φρέσκα απορρίμματα από τον Χώρο Διάθεσης Απορριμμάτων του Μουζουρά Χανίων. Πριν την τοποθέτησή τους, τα απορρίμματα τεμαχίστηκαν σε μέγεθος 5-10 cm και ομογενοποιήθηκαν. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η συμπίεσή τους. Η σύσταση των απορριμμάτων σύμφωνα με μελέτη που έχει εκπονηθεί για στερεά αστικά απορρίμματα του Δήμου Χανίων παρουσιάζεται παρακάτω (πίνακας 6-1). Η πυκνότητά των απορριμμάτων στο εσωτερικό του κελιού μετά την αρχική συμπίεση υπολογίστηκε στα  $628 \text{ kg/m}^3$  (Μακρυπόδης 2005). Σε έναν ΧΥΤΑ πλήρους κλίμακας η πυκνότητα με καλή συμπίεση κυμαίνεται μεταξύ  $400\text{-}750 \text{ kg/m}^3$  (Παναγιωτακόπουλος, 2002). Αρχικά τοποθετήθηκε στον πυθμένα στρώμα χαλικιού πάχους 0,1m και πάνω από αυτό το στρώμα τοποθετήθηκαν τα συμπιεσμένα απορρίμματα μετά την προεπεξεργασία που προηγήθηκε σε αυτά. Τέλος ακολουθεί και άνω στρώμα (πάχους 0.03m) από χαλίκι.



Εικόνα 6-2: Ο εργαστηριακός βιοαντιδραστήρας (Διακρίνονται οι θύρες λειτουργίας).

Τα βασικά μέρη του βιοαντιδραστήρα περιλαμβάνουν:

*Ένα σύστημα σωληνώσεων συλλογής και ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων.* Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε έτσι ώστε η συλλογή των στραγγισμάτων να γίνεται από

περισσότερα του ενός σημεία και τα δείγματα να είναι πιο αντιπροσωπευτικά. Επιπλέον το σύστημα αυτό επιτρέπει τη διασπορά των ανακυκλοφορούντων στραγγισμάτων σε όλη την απορριμματική μάζα. Τα στραγγίσματα συλλέγονται από τον πυθμένα και ανακυκλοφορούν στο ανώτερο τμήμα των απορριμμάτων. Για την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων χρησιμοποιήθηκε αντλία τύπου Watson Marlon 2058.

*Ένα σύστημα σωληνώσεων εισαγωγής και εξαγωγής αέρα.* Το σύστημα αυτό επιτρέπει την εισαγωγή αέρα σε όλο τον όγκο του σώματος των αποβλήτων καθώς τα φρεάτια εισαγωγής αέρα σχεδιάστηκαν ώστε να καλύπτουν τον αερισμό όλης της επιφάνειας του βιοαντιδραστήρα. Επιπρόσθετα στο σύστημα αυτό περιλαμβάνεται σωλήνας εξαγωγής αέρα από τον βιοαντιδραστήρα στην ατμόσφαιρα.

Επιπλέον 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. Η εισαγωγή του αέρα γίνεται με χρήση ελαστικών σωλήνων από την κορυφή του κελιού. Τα τοιχώματα και η οροφή του αντιδραστήρα μονώθηκαν με χρήση ειδικού υλικού.

**Πίνακας 6-1: Σύσταση στερεών αποβλήτων στον αντιδραστήρα**

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

Πηγή: Μακρυπόδης, 2005

## 6.2 Κατηγορίες αναλύσεων

Η παρακολούθηση του βιοαντιδραστήρα περιλάμβανε τις παρακάτω κατηγορίες αναλύσεων:

Τα δείγματα των στραγγισμάτων συλλέγονταν από το ειδικό δοχείο αποθήκευσης σε τακτική βάση. Οι αναλύσεις αφορούν στις παρακάτω παραμέτρους: pH, αγωγιμότητα,

βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο ( $BOD_5$ ), χημικά απαιτούμενο οξυγόνο ( $COD$ ), κοινά ιόντα ( $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^{2+}$ ), βαρέα μέταλλα. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν εποχιακά τεστ τοξικότητας με σκοπό τον προσδιορισμό της τοξικότητας των στραγγισμάτων σε ένα συγκεκριμένο είδος μικροοργανισμών.

#### *Αναλύσεις αερίων εκπομπών:*

Σε τακτά χρονικά διαστήματα γινόταν μέτρηση της σύστασης του εκπεμπόμενου αερίου. Επίσης εκπονήθηκαν τεστ αναπνοής ανά εποχή, με σκοπό τον προσδιορισμό του ρυθμού αναπνοής των μικροοργανισμών και κατ'επέκταση του ρυθμού βιοαποικοδόμησης των στερεών αστικών απορριμμάτων.

#### *Αναλύσεις σε στερεό δείγμα:*

Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα δεν υφίστατο η δυνατότητα συλλογής δειγμάτων στερεών αποβλήτων για την άμεση αξιολόγηση του βαθμού σταθεροποίησης. Ωστόσο παρακολουθούνταν η καθίζηση της απορριμματικής μάζας. Μετά την ολοκλήρωση της λειτουργίας λήφθηκε δείγμα στο οποίο πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για τον προσδιορισμό των παρακάτω: περιεχόμενη υγρασία, πτητική ύλη, θερμογόνο δύναμη τέφρα, στοιχειακή ανάλυση. Επιπλέον εκπονήθηκαν τεστ εκχύλισης με στόχο τον προσδιορισμό των στοιχείων που συνθέτουν την απορριμματική μάζα μετά την αερόβια λειτουργία του βιοαντιδραστήρα.

### **6.3 Περιγραφή σχεδιασμού βιοαντιδραστήρα**

Στο κελί προστέθηκαν αρχικά 10 L απιονισμένου νερού έως ότου παραχθεί κάποια ποσότητα στραγγισμάτων (5L), 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 αρχικά 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/m<sup>3</sup> αποβλήτων) σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (Μακρυπόδης, 2005).

Βασικό στοιχείο ήταν η στάθμη του υγρού στο δοχείο αποθήκευσης να διατηρούνταν σταθερή για αυτό και γινόταν προσθήκη νερού ανάλογα με τις δημιουργούμενες ανάγκες δηλαδή όταν η στάθμη κατέβαινε από την επιθυμητή. Η υγρασία των απορριμμάτων μετράται μέσω ενός αισθητήρα που συνδέεται με συσκευή αποθήκευσης δεδομένων. Οι αισθητήρες υγρασίας έχει αποδειχτεί ότι είναι πολύ χρήσιμοι στην παρακολούθηση του επιπέδου υγρασίας σε τέτοιους βιοαντιδραστήρες.

Τα σενάρια που διαχειριστήκαμε κατά την διάρκεια λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα είναι τα εξής:

- Αύξηση της παροχής αέρα και ταυτόχρονα αύξηση της ανακυκλοφορίας.
- Αύξηση της παροχής αέρα και σταθερή ανακυκλοφορία
- Μείωση παροχής -αύξηση ανακυκλοφορίας

Η στάθμη στο δοχείο αποθήκευσης των στραγγισμάτων διατηρούνταν σταθερή ανά περίοδο που επικρατούσαν σταθερές συνθήκες. Μεταξύ των περιόδων διαφορετικών συνθηκών παρατηρήθηκε μικρή μεταβολή στην στάθμη, που αντιμετωπίστηκε με προσθήκη κατάλληλης ποσότητας απιονισμένου νερού. Η αύξηση του οξυγόνου στον βιοαντιδραστήρα διευκόλυνε τους αερόβιους μικροοργανισμούς στην δράση τους και συνεπαγόταν αύξηση του παραγόμενου νερού λόγω βιολογικών διεργασιών. Οι αντιδράσεις διευκολύνονταν επιπλέον και λόγω αύξησης της ανακυκλοφορίας που ευνοούσε την ανάπτυξη υδρόφιλων αερόβιων μικροοργανισμών.

## 6.4 Αναλυτική περιγραφή εξοπλισμού

### 6.4.1 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”. 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  $\pm 0.7$  °C. Όσον αφορά τον εσωτερικό αισθητήρα υγρασίας τα αντίστοιχα μεγέθη είναι 20-100% (RH) και  $\pm 3\%$ .

### 6.4.2 Αισθητήρας υγρασίας

Για την μέτρηση της υγρασίας στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα, χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας μέτρησης εδαφικής υγρασίας τύπου “Watermark” της εταιρείας “Spectrum Technologies, Inc”. 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. 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. Στο σημείο όπου θα τοποθετηθεί, πρέπει να μην υπάρχουν κενά αέρα προκειμένου οι μετρήσεις να είναι σωστές.

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.

### 6.4.3 Αισθητήρας θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα χρησιμοποιήθηκε ένας εξωτερικός αισθητήρας της εταιρείας “Spectrum Technologies, Inc”. Ο αισθητήρας αυτός συνδέεται με την εξωτερική θύρα της καταγραφικής συσκευής (WatchDog Data Logger).

### 6.4.4 Μετρητές pH - οξειδοαναγωγικού δυναμικού (Redox)- αγωγιμότητας :

Για τον υπολογισμό του pH και του οξειδοαναγωγικού δυναμικού 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. Για τον υπολογισμό της αγωγιμότητας 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.

### 6.4.5 Μέτρηση παροχής αέρα (ροόμετρο)

Για την μέτρηση της παροχής του αέρα που εισάγεται στον βιοαντιδραστήρα των απορριμμάτων, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “4043” της εταιρείας “TSI Incorporated”. 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 0-200 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 (0.01-99.9L, ακρίβεια  $\pm 2\%$ ), αλλά και την πίεση στο σωλήνα (50-

199 kPa, ακρίβεια  $\pm 1$  KPa). Τέλος, παρέχει και ένδειξη της θερμοκρασίας του αερίου (0-50 °C, ακρίβεια  $\pm 1$  °C). Μπορεί επίσης να συνδεθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή και να ελέγχεται η λειτουργία του από εκεί.

#### 6.4.6 Περιγραφή αναλυτή 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. 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 CH<sub>4</sub>, το CO<sub>2</sub>, το O<sub>2</sub> και το CO.

Η μέτρηση των αερίων (εκτός του O<sub>2</sub>) 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 O<sub>2</sub> γίνεται με τη χρήση ενός ηλεκτροχημικού κελιού.

### 6.5 Περιγραφή εργαστηριακών μετρήσεων

#### 6.5.1 Τεστ αναπνοής

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την διεξαγωγή των τεστ αναπνοής περιγράφεται παρακάτω:

- Μέτρηση συγκεντρώσεων O<sub>2</sub> ,CO<sub>2</sub> ,CH<sub>4</sub> πριν την εκκίνηση του τέστ.



- Διακοπή της παροχής του αέρα και των οπών διαφυγής του από τον βιοαντιδραστήρα ώστε να επικρατήσουν αναερόβιες συνθήκες στο εσωτερικό.
- Έναρξη περιοδικής παρακολούθησης των συγκεντρώσεων  $O_2$ ,  $CO_2$ . Οι μέτρησεις γίνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα αρχικά πιο πυκνά και στη συνέχεια πιο αραιά. Η συχνότητα δειγματοληψίας και ανάλυσης διαμορφώνεται έτσι ώστε να προκύπτει μια ξεκάθαρη τάση μείωσης ή αύξησης των συγκεντρώσεων του  $O_2$ ,  $CO_2$ .
- Συνέχιση της μέτρησης της συγκέντρωσης του  $O_2$ ,  $CO_2$  μέχρι να παρατηρηθεί αλλαγή της τάξης του 5%,
- Ανάλυση των δεδομένων σύμφωνα με κινητική μηδενικής και πρώτης τάξης. Για ανάλυση με κινητική μηδενικής τάξης συγκρίνονται οι συγκεντρώσεις  $O_2$  και  $CO_2$  συναρτήσει του χρόνου. Για ανάλυση με κινητική πρώτης τάξης συγκρίνονται οι λόγοι των συγκεντρώσεων  $O_2$  και  $CO_2$  προς τις αρχικές συγκεντρώσεις τους συναρτήσει του χρόνου. Στην συνέχεια πραγματοποιείται γραμμική παλινδρόμηση και προσδιορίζεται η ευθεία που προσεγγίζει καλύτερα τα εκάστοτε δεδομένα καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  των ευθειών αυτών. Επιλέγεται η τάξη κινητικής που παρουσιάζει τιμή  $R^2$  πλησιέστερη στη μονάδα.
- Από την κλίση της ευθείας προκύπτει ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου.
- Υπολογισμός ρυθμού βιοαποικοδόμησης.

Πριν από κάθε μέτρηση αφήνουμε να περάσει λίγος χρόνος έτσι ώστε να σταθεροποιηθούν οι συγκεντρώσεις  $O_2$  και  $CO_2$  και η κάθε μέτρηση να είναι πιο αντιπροσωπευτική. Σχετικά με την συχνότητα λήψης μετρήσεων αναφέρουμε ότι αρχικά ξεκινήσαμε τις μετρήσεις σε πιο συχνά χρονικά διαστήματα στην συνέχεια όμως, λόγω της αργής μεταβολής της συγκέντρωσης οξυγόνου, τα διαστήματα αυτά αραιώσαν.

### 6.5.2 Τεστ τοξικότητας

#### Μέθοδος προσδιορισμού τοξικότητας:

Για την διεξαγωγή των τεστ τοξικότητας χρησιμοποιήθηκαν σετ Daphtoxkit F Magna. Οι δοκιμές χρησιμοποιούν τα νεογνά *Daphnia magna* που εκκολάπτονται σε περίπου 3 ημέρες από τα αυγά –εφίπια.

Τα όργανα και τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα ακόλουθα:

Εφίπια *Daphnia Magna* (συμπυκνωμένο διάλυμα ISO), δισκίο επώασης, φύλλα parafilm, μικροσιφόνια, σιφόνια, θάλαμος επώασης, εμφιαλωμένο μη χλωριωμένο νερό, πιάτο με κυψελίδες, τραπέζι φωτισμού και δείγματα στραγγισμάτων βιοαντιδραστήρα.

Ακολουθεί ο πίνακας 6-2 με τις παραμέτρους που επηρεάζουν το συγκεκριμένο τεστ καθώς και οι τιμές τους προκειμένου να μην αποτελούν παράγοντες παρεμπόδισης για τον υπολογισμό του  $LC_{50}$ .

Πίνακας 6-2: Παράμετροι που επηρεάζουν τα τεστ τοξικότητας

Παράμετροι	pH	O <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
<i>Daphnia magna</i>	5-9	2	29 (23-35,2)	70 (54,5-85,6)

Για την εκτέλεση του παραπάνω πειράματος ακολουθούνται τα εξής βήματα:

#### 1. Εκκόλαψη των εφίπων *Daphnia magna*:

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Εκκένωση του φιαλιδίου με τα εφίπια και ξέπλυμα ώστε να απομακρυνθούν όλα τα υπολείμματα. Τα εφίπια μεταφέρονται στο δισκίο επώασης σε 50ml εμφιαλωμένου μη χλωριωμένου νερού, στο οποίο έχει διοχετευτεί αέρας έτσι ώστε να επιτευχθεί η αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου. Κάλυψη του δισκίου και επώαση για 3 ημέρες. Η επώαση γίνεται σε θερμοκρασία 20–22 °C και με συνεχή φωτισμό (6000lux).

**2. Δημιουργία διαλυμάτων αραιώσης τοξικού αποβλήτου:**

Δημιουργία 5 διαλυμάτων των 50ml και δημιουργία στραγγισμάτων με τις εξής συγκεντρώσεις: 100%, 75%, 50%, 25%, 10%.

**3. Πλήρωση κυψελίδων:**

Η 1<sup>η</sup> στήλη του δισκίου επώασης αποτελεί χώρο αποθήκευσης των νεογνών με σκοπό να αποτραπεί η αραιώση της τοξικής ουσίας κατά την διάρκεια της μεταφοράς των νεογνών από το δισκίο εκκόλαψης στις κυψελίδες δοκιμής εξαιτίας του νερού που θα μεταφερθεί αναγκαστικά μαζί με τα νεογνά. Στις επόμενες γραμμές τοποθετούνται τα διαλύματα που παρασκευάστηκαν παραπάνω. (10ml /κυψελίδα).

**4.Μεταφορά των νεογνών στις κυψελίδες δοκιμής:**

Αφού τοποθετηθεί το δισκίο επώασης στην φωτιζόμενη πλάκα μεταφέρονται με μικροσιφόνια 20 (κολυμπώντας ενεργά) νεογνά στις κυψελίδες αποθήκευσης. Στην συνέχεια τοποθετούνται οι κυψελίδες στη φωτιζόμενη πλάκα και μεταφέρονται 5 νεογνά σε κάθε μία κυψελίδα της ίδιας γραμμής με την κυψελίδα αποθήκευσης.

**5.Επώαση των νεογνών εντός των κυψελίδων και σημείωση των αποτελεσμάτων:**

Αφού τοποθετηθεί ένα φύλλο Parafilm για την κάλυψη των κυψελίδων, τα νεογνά αφήνονται να επωαστούν στους 20 °C στο σκοτάδι. Μετά από ένα εικοσιτετράωρο τοποθετούνται οι κυψελίδες στη φωτεινή πλάκα και μετράται ο αριθμός των νεκρών και ακινητοποιημένων οργανισμών στις κυψελίδες.

Υπολογισμός μέσου όρου νεκρών μικροοργανισμών *Daphnia magna* στις κυψελίδες και υπολογισμός ποσοστού θανάτωσης

Ο μέσος όρος των νεκρών μικροοργανισμών για όλες τις κυψελίδες τον υπολογίζεται ως εξής: Σε κάθε κυψελίδα τοποθετούνται 5 μικροοργανισμοί οι κυψελίδες είναι 4 άρα το πλήθος των μικροοργανισμών είναι 20. Υπολογίζεται το άθροισμα των νεκρών μικροοργανισμών από κάθε αραιώση και διαιρείται με το 20. Το ποσοστό των νεκρών μικροοργανισμών είναι ο μέσος όρος επί 100%.Ο μέσος όρος των νεκρών μικροοργανισμών *Daphnia magna* στις κυψελίδες αναφοράς αφαιρείται από τον αντίστοιχο μέσο όρο για τις υπόλοιπες κυψελίδες έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο αξιόπιστα.

### 6.5.3 Υπολογισμός COD

Το COD των πρώτων δειγμάτων 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 στο φασματοφωτόμετρο στην επιλογή “Mid Test” αυτού.

Κατά τους περισσότερους μήνες της λειτουργίας του συστήματος η μέτρηση του COD έγινε με την βοήθεια των Kit τεστ της εταιρείας MercK. Η διαδικασία μέτρησης είναι:

- Τοποθετούνται 3 ml δείγματος στην κυψελίδα με το τεστ.
- Η κυψελίδα τοποθετείται στον βιοαντιδραστήρα για 2 hr στους 148 °C.
- Μετά το πέρας των 2 hr αφήνεται να κρυώσει σε καρουζέλ.
- Μετά από 10 λεπτά ανακινείται και αφήνεται να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου.
- Μέτρηση με το φωτόμετρο Spectroquant NOVA 60 της Merck.

### 6.5.4 Υπολογισμός BOD<sub>5</sub>

Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο είναι η ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για την οξείδωση των οργανικών συστατικών των στραγγισμάτων από μικροοργανισμούς σε αερόβιες συνθήκες.

Ο πειραματικός προσδιορισμός 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 “OxiTop”, με χρόνο επώασης 5 ημέρες, σε θερμοκρασία 20 °C.

**6.5.5 Υπολογισμός:  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$   $\text{NH}_4^+$   $\text{SO}_4^{2-}$** **Μέτρηση Cr , Κωδ Merck:1.14758**

- Έλεγχος του pH ώστε να κυμαίνεται στο εύρος 1-9 .
- Προσθήκη μιας δόσης του αντιδραστηρίου Cr-1A σε στεγνό δοκιμαστικό σωλήνα.
- Προσθήκη 6 σταγόνων του αντιδραστηρίου Cr-2A.
- Καλή ανακίνηση για να διαλυθεί το στερεό αντιδραστήριο.
- Προσθήκη 5 ml δείγματος.
- Άδειασμα του διαλύματος σε κυψελίδα 10mm.
- Μέτρηση με το φωτόμετρο Spectroquant NOVA 60 της Merck.

**Μέτρηση  $\text{SO}_4^{2-}$ , Κωδ Merck: 1.14564**

- Έλεγχος του pH ώστε να κυμαίνεται στο εύρος 1-9.
- Προσθήκη 1 ml δείγματος στην κυψελίδα με το test και ανάμιξη.
- Προσθήκη μιας δόσης του αντιδραστηρίου  $\text{SO}_4^{2-}$ -1K και ανακίνηση.
- Χρόνος αντίδρασης 2 λεπτά και άμεση μέτρηση με το φωτόμετρο Spectroquant NOVA 60 της Merck.

**Μέτρηση  $\text{NH}_4^+$ , Κωδ Merck: 1.00683**

- Προσθήκη σε ένα δοκιμαστικό σωλήνα 5 ml του αντιδραστηρίου  $\text{NH}_4$ -1.
- Προσθήκη με μια πιπέτα 0,2ml δείγματος για την περιοχή μέτρησης 2-75 mg/l  $\text{NH}_4$ -1.
- Προσθήκη 2 δόσεων του αντιδραστηρίου  $\text{NH}_4$ -2.
- Καλή ανακίνηση μέχρι να διαλυθεί το στερεό αντιδραστήριο.
- Χρόνος αντίδρασης 15 λεπτά.
- Άδειασμα του διαλύματος σε κυψελίδα.
- Μέτρηση με το φωτόμετρο Spectroquant NOVA 60 της Merck.

### **Μέτρηση $\text{PO}_4^{3-}$ , Κωδ Merck 1.14543**

- Έλεγχος του pH ώστε να κυμαίνεται στο εύρος 0-10.
- Προσθήκη 5 ml δείγματος στην κυψελίδα με το test και ανάμιξη.
- Προσθήκη μιας δόσης του αντιδραστηρίου  $\text{P}^{-1}\text{K}$  και ανακίνηση.
- Τοποθέτηση της κυψελίδας με το τεστ στον βιοαντιδραστήρα Spectroquant TR 420 της Merck, για 30min στους 120 °C.
- Αναμονή ώστε η κυψελίδα να έρθει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Προσθήκη 5 σταγόνων του αντιδραστηρίου P-2K και ανάμιξη.
- Καλή ανακίνηση για να διαλυθεί το στερεό αντιδραστήριο.
- Προσθήκη μιας δόσης του αντιδραστηρίου P-3K.
- Χρόνος αντίδρασης 5 λεπτά.
- Μέτρηση με το φωτόμετρο Spectroquant NOVA 60 της Merck.

### **Μέτρηση $\text{NO}_3^-$ , Κωδ Merck 1.14563**

- Προσθήκη 1 ml δείγματος στην κυψελίδα με το test και όχι ανάμιξη.
- Προσθήκη 1 ml του αντιδραστηρίου  $\text{NO}_3^{-1}\text{K}$  και ανάμιξη.
- Χρόνος αντίδρασης 10 λεπτά.
- Μέτρηση με το φωτόμετρο Spectroquant NOVA 60 της Merck.

### 6.5.6 Μέτρηση Βαρέων μετάλλων

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 οξιτισμένο διάλυμα στραγγισμάτων (με προσθήκη  $\text{HNO}_3$ ).

Μετά την λήψη των δειγμάτων από το δοχείο αποθήκευσης έγινε χώνευση αυτών με σκοπό την επίτευξη καθαρότερου δείγματος. Η διαδικασία της χώνευσης περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω:

#### *Χώνευση δειγμάτων με $\text{HNO}_3$*

80ml δείγματος και 5 ml  $\text{HNO}_3$  τοποθετούνται σε ποτήρι ζέσεως μαζί με πέτρες βρασμού. Σε θερμοκρασία 100 °C το διάλυμα βράζει για 24 hr και ο αργός βρασμός ολοκληρώνεται όταν ο όγκος του διαλύματος γίνει 15ml. Εάν απαιτείται συνεχίζεται ο βρασμός με προσθήκη  $\text{HNO}_3$  μέχρι να ολοκληρωθεί η χώνευση. Σε περίπτωση μη καθαρού δείγματος ακολουθεί και διήθηση με πλύση δύο φορές από 5 ml νερού. Στη συνέχεια το διάλυμα μεταφέρεται σε ογκομετρική την 100 ml και αραιώνεται με νερό μέχρι τη χαραγή της ογκομετρικής.

Η συγκέντρωση του μετάλλου ( $C_1$ ) δίνεται από τον τύπο:  $\frac{A * B}{C}$

Όπου:

A: η συγκέντρωση του μετάλλου στο χωνευμένο διάλυμα mg/l

B: τελικός όγκος χωνευμένου διαλύματος ml

C: όγκος δείγματος ml





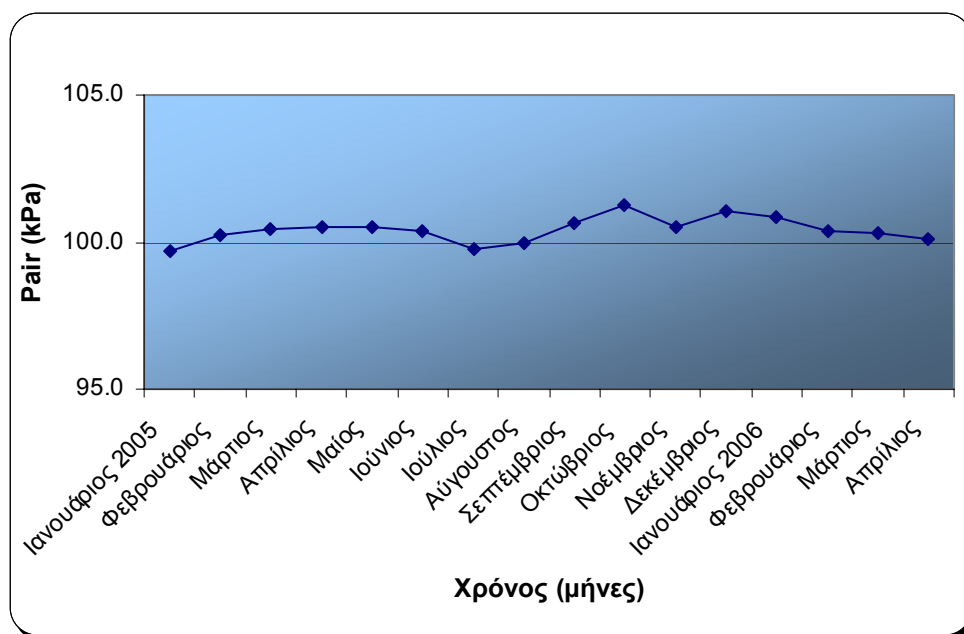
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 7.1 Παράμετροι παρακολούθησης

Η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα, η πίεση αυτού καθώς και η θερμοκρασία στο εσωτερικό της απορριματικής μάζας, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία των απορριμμάτων μετρώνταν σε καθημερινή βάση. Ακολουθούν τα γραφήματα για τις παραπάνω παραμέτρους σε συνάρτηση με τον χρόνο.

#### 7.1.1 Πίεση εισερχόμενου αέρα

Σύμφωνα τις μετρήσεις της πίεσης του εισερχόμενου αέρα σε καθημερινή βάση, υπολογίστηκε μια μέση τιμή για κάθε μήνα λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Η μεταβολή της πίεσης του αέρα σε συνάρτηση με τον χρόνο παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα (7-1).

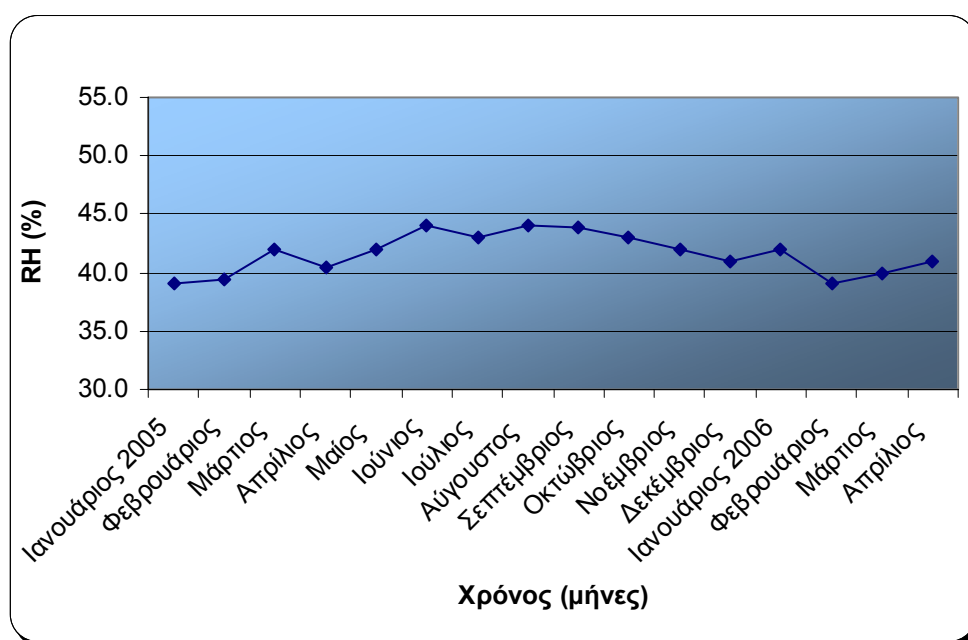


Διάγραμμα 7-1: Μέση μηνιαία πίεση αέρα που εισέρχεται στον βιοαντιδραστήρα

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα η πίεση στους αγωγούς του συστήματος κυμαινόταν καθ'όλη την διάρκεια του πειράματος στα 100 KPa με ελάχιστες μεταβολές. Κατά την διάρκεια του πειράματος μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές παροχές αέρα 15L/min, 20L/min και 30L/min. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 7-1 η πίεση στους αγωγούς δεν μεταβλήθηκε αξιοσημείωτα λόγω της αύξησης της παροχής, γεγονός που αποδεικνύει ότι η ροή του αέρα στο εσωτερικό της απορριματικής μάζας ήταν ομαλή.

### 7.1.2 Σχετική υγρασία απορριμμάτων

Στο παρακάτω διάγραμμα παριστάνεται η μεταβολή της μέσης μηνιαίας σχετικής υγρασίας των απορριμμάτων κατά την διάρκεια της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

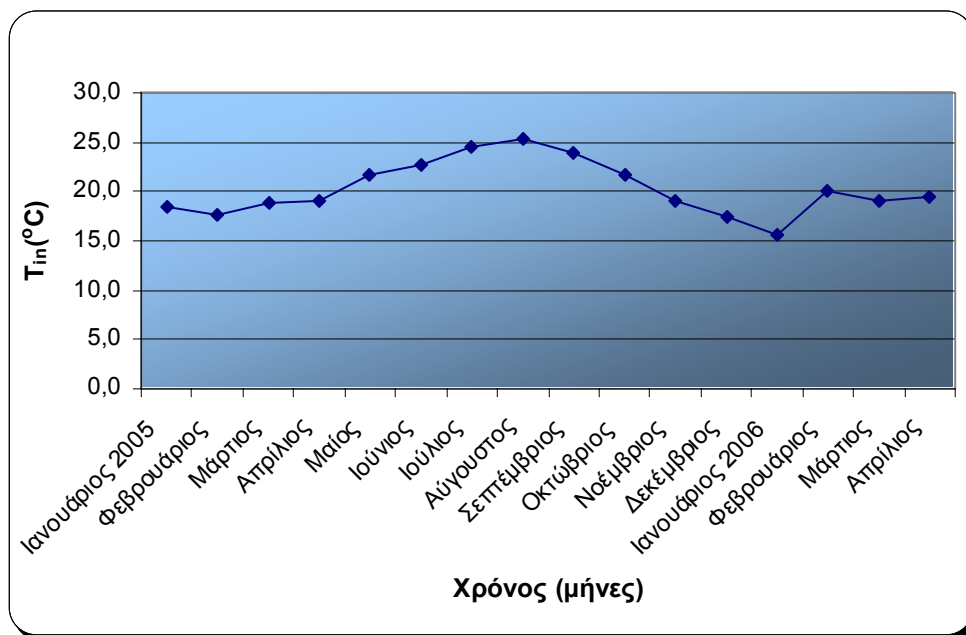


Διάγραμμα 7-2: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία απορριμμάτων

Η υγρασία των απορριμμάτων σύμφωνα με τις μετρήσεις κυμαινόταν σε εύρος 40-45%. Από τις διακυμάνσεις της σχετικής υγρασίας καθοριζόταν ο ρυθμός ανακυκλοφορίας των παραγόμενων στραγγισμάτων αλλά και η απαίτηση για προσθήκη απιονισμένου νερού. Για τον λόγο αυτό η συγκεκριμένη παραμέτρος ήταν ένα μέγεθος οδηγός κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

### 7.1.3 Θερμοκρασία στο εσωτερικό της απορριμματικής μάζας.

Στο ακόλουθο διάγραμμα (7-3) παριστάνεται η μεταβολή της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Διάγραμμα 7-3: Μέση μηνιαία θερμοκρασία στο εσωτερικό της απορριμματικής μάζας

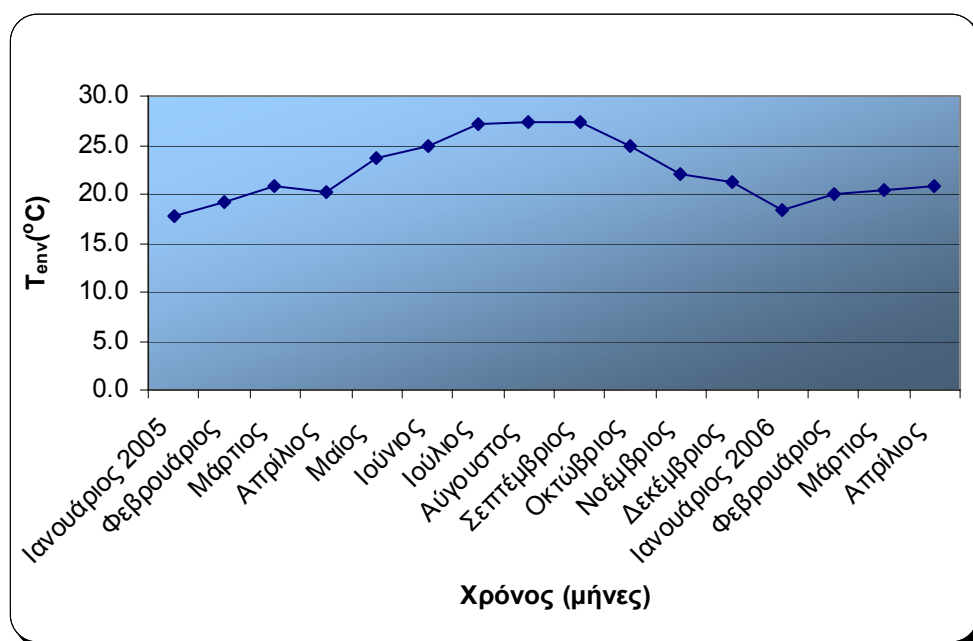
Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα επίπεδα θερμοκρασίας στο εσωτερικό της απορριμματικής μάζας ήταν ευνοϊκά για την βέλτιστη δράση των αερόβιων βιοαποικοδομητών. Γενικά θερμοκρασίες πάνω από 20 °C και κάτω των 35 °C (Stegamnn, 2005) ευνοούν την βιοαποικοδόμηση. Ειδικά κατά τους πρώτους μήνες λειτουργίας που η βιοαποικοδόμηση ήταν πιο έντονη, η θερμοκρασία κυμαινοτάν σε πιο υψηλά επίπεδα, σύμφωνα με τις μετρήσεις του Μακρυπόδη (2005). Η θερμοκρασία της απορριμματικής μάζας επηρεάζεται από τις εξώθερμες αερόβιες αντιδράσεις ωστόσο δεν παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας καθώς άλλοι παράγοντες όπως η εισαγωγή του αέρα, η ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και η προσθήκη απιονισμένου νερού προκαλούσαν ψύξη και μείωναν τα επίπεδα της θερμοκρασίας. Για αυτόν τον λόγο παρατηρήθηκε μείωση της θερμοκρασίας όταν αυξήθηκε ο ρυθμός ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων ή/και αυξήθηκε η παροχή του αέρα. Γενικά δεν αναμενόταν μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας καθώς ο βιοαντιδραστήρας ήταν εργαστηριακός και δεν επηρεαζόταν καθόλου από την

ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον το υλικό κατασκευής του δεν επέτρεπε την απόλυτη μόνωσή του από το εξωτερικό περιβάλλον.

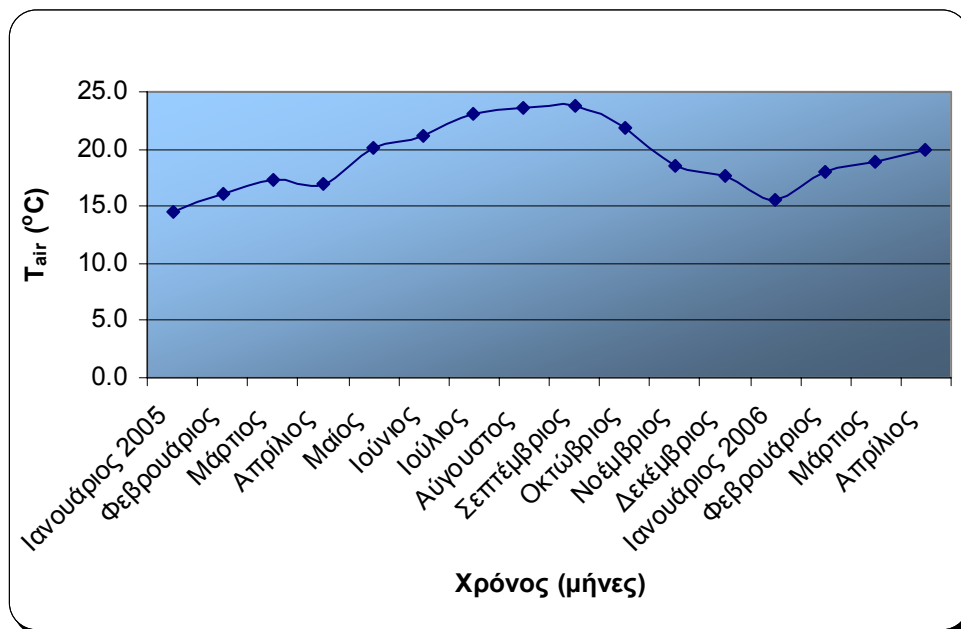
Σύμφωνα με τους Stegmann et al.(2005) ο έλεγχος της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του αερισμού των ΧΥΤΑ είναι παράμετρος καθοριστικής σημασίας και μπορεί έμμεσα να συμβάλλει στην μείωση του συνολικού χρόνου λειτουργίας του συστήματος. Πολλοί μελετητές προωθούν την ιδέα της αυξημένης προσθήκης νερού στους ΧΥΤΑ με στόχο τον έλεγχο της θερμοκρασίας (Cossu et al., 2003).

#### 7.1.4 Θερμοκρασία περιβάλλοντος–Θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα.

Στα διαγράμματα 7-4, 7-5 παρουσιάζονται οι μεταβολές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 7-4: Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος



**Διάγραμμα 7-5: Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα που εισέρχεται στον βιοαντιδραστήρα**

Παρατηρώντας τα παραπάνω δυο γραφήματα 7-4, 7-5 γίνεται αντιληπτό ότι η πορεία της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα ήταν η ίδια με την πορεία της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Δηλαδή κυμαινόταν στα ίδια περίπου επίπεδα με ελαφρά πιο υψηλές τιμές για την θερμοκρασία περιβάλλοντος και εμφάνιζαν τις ίδιες μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα η θερμοκρασία του αέρα αυξανόταν από τον Μάιο μέχρι και τον Αύγουστο του 2005 και μειωνόταν κατά τους φθινοπωρινούς και χειμωνιάτικους μήνες. Η πορεία αυτή ήταν σαφώς αναμενόμενη ειδικά για την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

## **7.2 Προσδιορισμός αντιπροσωπευτικού μοριακού τύπου ΑΣΑ βιοαντιδραστήρα**

### **Σύσταση ΑΣΑ.**

Με βάση την στοιχειακή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε απορρίμματα, από την χωματερή του Νομού Χανίων στα πλαίσια της Μεταπτυχιακής Διατριβής της κ.Μύρκου (2005) (Πίνακας 7-1) και τον πίνακα 2-3, προσδιορίστηκε όπως περιγράφεται παρακάτω ο αντιπροσωπευτικός μοριακός τύπος των αστικών στερεών απορριμμάτων για τον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα.

Πίνακας 7-1: Στοιχειακή ανάλυση Αστικών Στερεών Απορριμμάτων

Συστατικά	C	H	O	N	S	Τέφρα
Οργανικά	42,86	5,75	38,00	2,30	0,40	2,60
Χαρτί	38,41	5,17	44,00	0,58	0,20	5,50
Πλαστικά	77,22	8,56	23,00	0,71		10,00
ΔΕΥΛ	52,23	5,94	28,30	1,81	0,23	5,80

Πολλαπλασιάζοντας το ξηρό βάρος κάθε κατηγορίας απορριμμάτων με τα αντίστοιχα κατά βάρος ποσοστά των χημικών στοιχείων του παραπάνω πίνακα (7-1), προκύπτει η ποσότητα χωρίς νερό, σε Kg, για κάθε στοιχείο ανά κατηγορία (Πίνακας 7-2). Λόγω του ότι προσδιορίζονται τέσσερις μοριακοί τύποι: α) με νερό απουσία θείου, β) χωρίς νερό, απουσία θείου, γ) με νερό και θείο και δ) χωρίς νερό παρουσία θείου απαιτείται και ο προσδιορισμός του περιεχομένου υγρασίας. Η περιεχόμενη υγρασία προκύπτει από την διαφορά:  $\Sigma(\% \text{ σύνθεση}) - \Sigma(\text{kg στοιχείων χωρίς νερό})$  και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μάζας O και H, όταν λαμβάνεται υπ' όψη και το νερό. Τέλος υπολογίζονται τα αντίστοιχα άτομα των χημικών στοιχείων (Πίνακας 7-3).

Πίνακας 7-2: Υπολογισμός συνολικού βάρους σε Kg κάθε χημικού στοιχείου στα υπό μελέτη απορρίμματα

Συστατικά	% Σύνθεση w/w	% Υγρασία w/w	Ξηρό βάρος (Kg)	C	H	O	N	S	Τέφρα
Οργανικά	30,00	69,17	9,25	3,96	0,53	3,51	0,21	0,04	0,24
Χαρτί- Χαρτόνι	17,70	15,71	14,92	5,73	0,77	6,56	0,09	0,03	0,82
Πλαστικά	12,50	1,63	12,30	9,50	1,05	2,83	0,09	0,00	1,23
ΔΕΥΛ	2,20	9,46	1,99	1,04	0,12	0,56	0,04		0,12
<b>Σύνολο</b>	<b>62,40</b>	<b>95,97</b>	<b>38,46</b>	<b>20,23</b>	<b>2,47</b>	<b>13,47</b>	<b>0,42</b>	<b>0,07</b>	<b>2,41</b>

Πίνακας 7-3: Προσδιορισμός ατόμων χημικών στοιχείων για τα απορρίμματα του βιοαντιδραστήρα

Στοιχείο	Ατομικό βάρος	kg με νερό	kg χωρίς νερό	n με νερό	n χωρίς νερό	Με νερό και θείο	χωρίς νερό και θείο	Με νερό χωρίς θείο	Χωρίς νερό και θείο
C	12,00	20,23	20,23	1,69	1,69	807	807	56	56
H	1,00	5,07	2,47	5,07	2,47	2425	1185	168	82
O	16,00	34,20	13,47	2,14	0,84	1024	403	71	28
N	14,00	0,42	0,42	0,03	0,03	14	14	1	1
S	32,00	0,07	0,07	0,00	0,00	1	1		

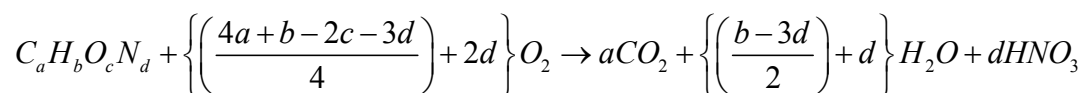
Συνεπώς οι τέσσερις μοριακοί τύποι που προέκυψαν είναι:

α)  $C_{56}H_{168}O_{71}N$ , β)  $C_{56}H_{82}O_{28}N$

γ)  $C_{807}H_{2425}O_{755.5}N_{14}S$ , δ)  $C_{807}H_{1185}O_{403}N_{14}S$

Στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθεί σαν αντιπροσωπευτικός τύπος του βιοαποδομήσιμου οργανικού υλικού αυτός χωρίς νερό και θείο δηλαδή ο:  $C_{56}H_{82}O_{28}N$ .

Η αερόβια αποικοδόμηση περιγράφεται από την παρακάτω αντίδραση:



**Υποθέσεις :**

- Το βιοαποικοδομήσιμο υλικό των στερών απορριμμάτων έχει ως αντιπροσωπευτικό χημικό τύπο τον  $C_{56}H_{82}O_{28}N$ .
- Η αντίδραση έχει 100% απόδοση.
- Το οξυγόνο διοχετεύεται εξίσου σε όλη την απορριμματική μάζα.
- Οι υπολογισμοί γίνονται σε κανονικές συνθήκες δηλαδή  $0^{\circ}C$  και 1 atm.
- Όγκος βιοαντιδραστήρα:  $V_{\text{βιοαντιδραστήρα}} = 0.7 * 0.7 * 0.4 = 0.196 \approx 0.2 m^3$
- Πυκνότητα απορριμμάτων:  $628 kg/m^3$
- Χρόνος διεξαγωγής πειράματος: 17 μήνες
- Μέση τιμή θερμοκρασίας απορριμμάτων :  $20^{\circ}C$

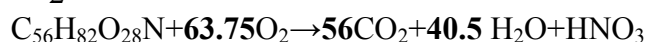
- Μέση τιμή θερμοκρασίας περιβάλλοντος :25 °C
- Σχετική υγρασία απορριμμάτων:45%
- Σχετική υγρασία υδρατμών 40%

**Συμπεπώς:**

Για  $a=56$ ,  $b=82$ ,  $c=28$ ,  $d=1$

$$\frac{4a + b - 2c - 3d}{4} + 2d = 63,75$$

$$\frac{b - 3d}{2} + d = 40,5$$



### 7.3 Τεστ αναπνοής

Στο αέριο που εξέρχεται από το σύστημα, η συγκέντρωση του οξυγόνου ήταν μεταξύ 20-20.9% και η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα ήταν μεταξύ 0-1% κατά την διάρκεια του αερισμού.

Κατά την διάρκεια του πειράματος διεξήχθησαν τέσσερα τεστ αναπνοής, ένα τεστ για κάθε διαφορετική εποχή του χρόνου μελέτης του βιοαντιδραστήρα ξεκινώντας από την Άνοιξη του 2005. Για τους μήνες που διεξήχθησαν τα τεστ αναπνοής οι παράμετροι λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα έχουν τις τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 7-4 που ακολουθεί:

**Πίνακας 7-4: Παράμετροι λειτουργίας κατά τους μήνες διεξαγωγής των τεστ αναπνοής**

Μήνας	T <sub>air</sub> (°C)	P <sub>air</sub> (Kpa)	T <sub>in</sub> (°C)	RH (%)	T <sub>out</sub> (°C)	Q <sub>air</sub> (L/min)	RPM
Απρίλιος	17	100,5	20	42	20,2	15	15
Αύγουστος	24	100,8	25	45	27,2	20	25
Νοέμβριος	19	100,5	19	44	22	30	25
Φεβρουάριος	16	100,2	17,6	42	19	20	35



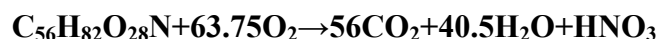
Υπολογισμός ρυθμού βιοαποικοδόμησης

Ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης δίνεται από τον τύπο :

$$k_B = \frac{-\frac{k_0}{100} \theta_a \frac{1l}{1000cm^3} \rho_{O_2} C}{\rho_K \frac{1kg}{1000gr}}$$

Για τον συγκεκριμένο βιοαντιδραστήρα ισχύουν :  $\rho_{O_2}=1.33 \text{ mg/L}$

Ο αντιπροσωπευτικός μοριακός τύπος των υδρογονανθράκων που βρίσκονται στα απορρίμματα όπως προσδιορίστηκε είναι ο:  $C_{56}H_{82}O_{28}N$ , η αντίδραση οξείδωσης περιγράφεται παρακάτω:



Σύμφωνα με την παραπάνω αντίδραση 1 mol οργανικής ένωσης απαιτεί 63,75 mol οξυγόνου, 1 mol  $C_{56}H_{82}O_{28}N$  αντιστοιχεί σε μάζα 1216 gr και το 1 mol οξυγόνου αντιστοιχεί σε μάζα 32 gr συνεπώς η ζητούμενη αναλογία ισούται με  $C=1216/(63,75*32)=0,6$

Η πυκνότητα της απορριματικής μάζας από τον σχεδιασμό της ισούται με:  $0.68 \text{ gr/cm}^3$

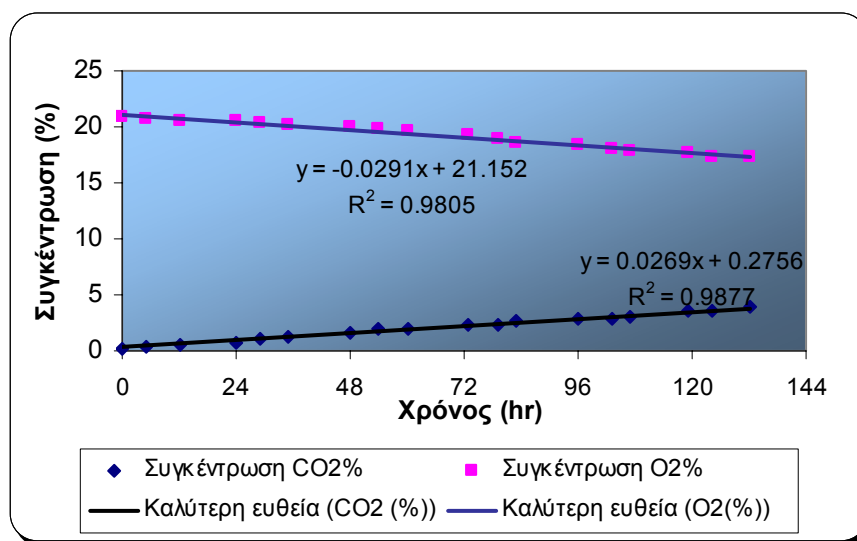
Από την βιβλιογραφία:  $\theta_a = 0,25 \text{ cm}^3_{\text{air}} / \text{cm}^3_{\text{απορριμμάτων}}$

Και  $k_0$  όπως υπολογίστηκε απο τα τεστ αναπνοής σε:  $\%/hr$ .

Οι κλίσεις των εξισώσεων που προσεγγίσουν περισσότερα στα πειραματικά αποτελέσματα και εμφανίζονται στα παρακάτω γραφήματα και ισούνται με τους ρυθμούς κατανάλωσης οξυγόνου και τους ρυθμούς παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα για κάθε ένα από τα τεστ αναπνοής που διεξήχθησαν. Επιπρόσθετα με βάση τα παραπάνω δεδομένα που αφορούν στον αερόβιο αντιδραστήρα που μελετήθηκε, υπολογίζεται ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων.

### 7.3.1: 1<sup>ο</sup> Τεστ αναπνοής

Στο διάγραμμα 7-6 παρατηρείται η μεταβολή των συγκεντρώσεων O<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub> σύμφωνα με τις μετρήσεις που λήφθηκαν κατά την διάρκεια του πρώτου τεστ αναπνοής που πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο του 2005.

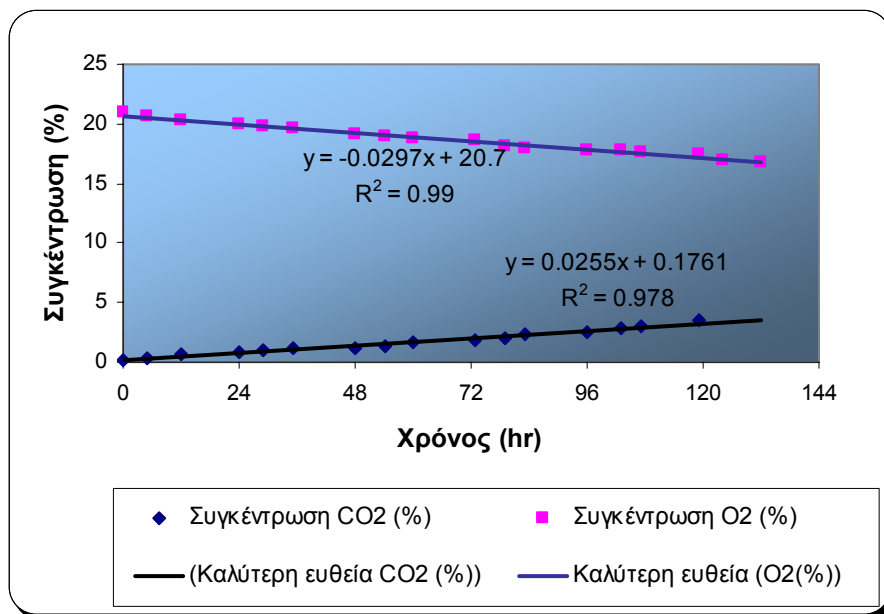


Διάγραμμα 7-6: Τεστ αναπνοής-Άνοιξη 2005

Η θερμοκρασία που επικρατούσε κατά το πρώτο τεστ αναπνοής ( $T_{in} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ήταν αρκετά ευνοϊκή για την δράση των μικροοργανισμών και συνεπώς ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου ήταν αναμενόμενο να είναι από τους πιο υψηλούς κατά την διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί θερμοκρασίες κάτω από  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  δεν ευνοούν την ανάπτυξη των βιοαποικοδομητών και όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία τόσο παρεμποδίζεται η δράση τους. Επιπλέον η σχετική υγρασία των απορριμμάτων ήταν κατάλληλη για την δράση του μικροβιακού πληθυσμού. Σε αυτό το τεστ το διαθέσιμο προς αποικοδόμηση οργανικό κλάσμα δεν αποτελούσε περιοριστικό παράγοντα για την βιοαποικοδόμηση. Το τεστ πραγματοποιήθηκε τον τέταρτο μήνα λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα που το BOD<sub>5</sub> ήταν αρκετά χαμηλό ( $12\text{ mg/l}$ ) γεγονός που αιτιολογεί την χαμηλή τάξη μεγέθους του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου. Ακόμα είχε περάσει ένα ικανό χρονικό διάστημα από την έναρξη λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα ώστε να αναπτυχθεί και να δράσει ο απαραίτητος μικροβιακός πληθυσμός.

### 7.3.2: 2<sup>ο</sup> Τεστ αναπνοής

Στο ακόλουθο διάγραμμα (7-7) παρουσιάζονται οι ευθείες μεταβολής, των συγκεντρώσεων O<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>, που προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα, όπως προέκυψαν κατά την διάρκεια του δευτέρου τεστ αναπνοής που έλαβε χώρα τον Αύγουστο του 2005.

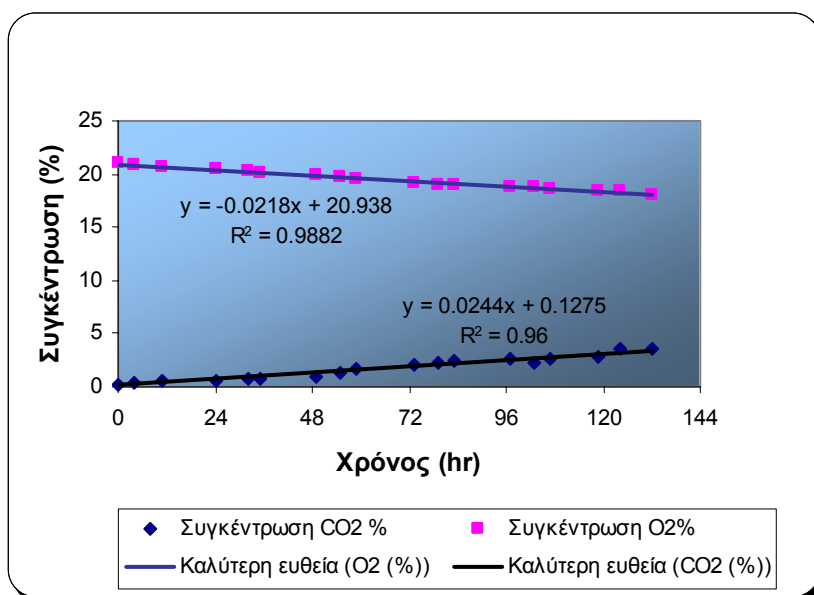


Διάγραμμα 7-7: Τεστ αναπνοής-Καλοκαίρι 2005

Σε αυτό το τεστ παρατηρείται ο μεγαλύτερος ρυθμός βιοαποικοδόμησης ( $k_B$ ). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ξεκινά με μεγαλύτερη παροχή αέρα (30L/min), σε σχέση με το προηγούμενο και επομένως εξασφαλίζεται πλήρως το διαθέσιμο οξυγόνο για τη δράση των αερόβιων μικροοργανισμών. Επιπλέον και οι λοιπές παράμετροι που επιδρούν στην βιοαποικοδόμηση ήταν ευνοϊκές για την βιοαποδόμηση των υφιστάμενων ρύπων. Η θερμοκρασία που επικρατούσε ήταν ιδιαίτερα ευνοϊκή για τους μικροοργανισμούς ( $T_{in}=25^{\circ}\text{C}$ ) καθώς και τα επίπεδα pH (8) και οξειδοαναγωγικού δυναμικού (238 mV). Το BOD<sub>5</sub> των στραγγισμάτων πριν την έναρξη του 2<sup>ου</sup> τεστ ήταν 11,2 mg/L, δηλαδή όχι πολύ υψηλό, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού κλάσματος έχει ήδη αποδομηθεί κατά το πρώτο τετράμηνο λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

7.3.3: 3<sup>ο</sup> Τεστ αναπνοής

Στο παρακάτω διάγραμμα 7-8 παριστάνεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων  $O_2$  και  $CO_2$  σύμφωνα με τις μετρήσεις που λήφθηκαν κατά την διάρκεια του τρίτου τεστ αναπνοής που πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 2005.

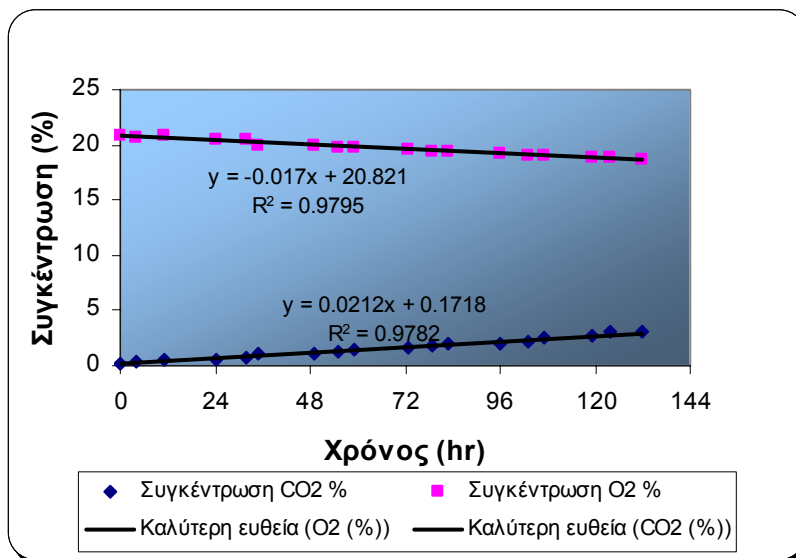


Διάγραμμα 7-8: Τεστ αναπνοής-Φθινόπωρο 2005

Το  $BOD_5$  είχε μειωθεί στα 8mg/L συνεπώς ήταν αναμενόμενη η μείωση στο ρυθμό κατανάλωσης  $O_2$  σε σχέση με τα προηγούμενα τεστ. Η μείωση του βιοαποδομήσιμου οργανικού κλάσματος του βιοαντιδραστήρα οδήγησε σε μείωση της κατανάλωσης  $O_2$ . Επιπλέον αυτή την περίοδο η θερμοκρασία δεν ήταν η βέλτιστη για την δράση των αερόβιων βιοαποικοδομητών.

7.3.4: 4<sup>ο</sup> Τεστ αναπνοής

Στο διάγραμμα 7-9 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ευθείες μεταβολής, των συγκεντρώσεων  $O_2$  και  $CO_2$  που προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα, όπως προέκυψαν κατά την διάρκεια του τέταρτου τεστ αναπνοής που πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 2006.



Διάγραμμα 7-9: Τεστ αναπνοής-Χειμώνας 2006

Το τελευταίο τεστ παρουσιάζει τον μικρότερο ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου. Κατά την διάρκεια διεξαγωγής αυτού του τεστ επικρατούσαν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που δεν ενίσχυαν την βέλτιστη δράση των μικροοργανισμών. Επιπλέον το βιοαποδομήσιμο οργανικό υλικό ήταν περιορισμένο όπως αποδεικνύεται και από την τιμή του  $BOD_5$  που τον Ιανουάριο του 2006 ήταν 6mg/l. Άλλωστε τους χειμερινούς μήνες η μικροβιακή δραστηριότητα είναι στο ελάχιστο της δυναμικότητας της. Εξάλλου η μείωση του οργανικού υλικού θεωρούνταν δεδομένη εκείνη την περίοδο αφού είχε ήδη ολοκληρωθεί ένα έτος αερόβιας λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

Στον συγκεντρωτικό πίνακα που ακολουθεί (7-5) συνοψίζονται τα παραπάνω αποτελέσματα.

**Πίνακας 7-5: Ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου  $O_2$ , ρυθμός παραγωγής  $CO_2$  και ρυθμός βιοαποικοδόμησης**

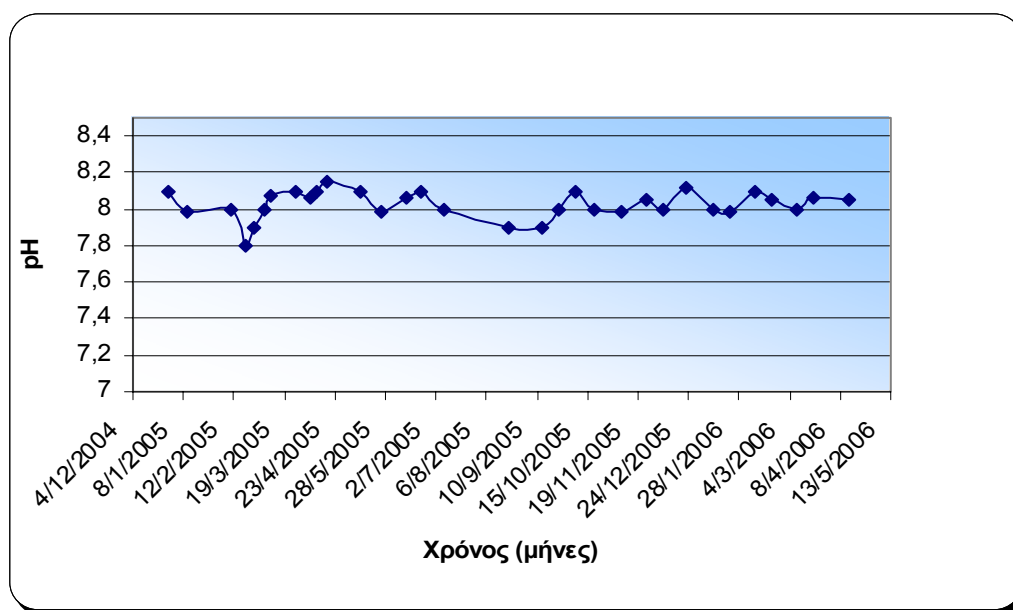
Αριθμός τέστ	$k_o$ % /hr	$k_B$ mg/kgday	$k_{CO_2}$ % hr
1ο	0.0291	2.08	0.027
2ο	0.0297	2.13	0.026
3ο	0.0218	1.56	0.024
4ο	0.017	1.22	0.021

#### 7.4 Αναλύσεις

Σε τακτά χρονικά διαστήματα περίπου κάθε δυο εβδομάδες γινόταν μέτρηση pH και οξειδοαναγωγικού δυναμικού (Redox) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

##### 7.4.1: Μεταβολή pH

Στο διάγραμμα 7-10 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία μεταβολή του pH σε συνάρτηση με τον χρόνο:

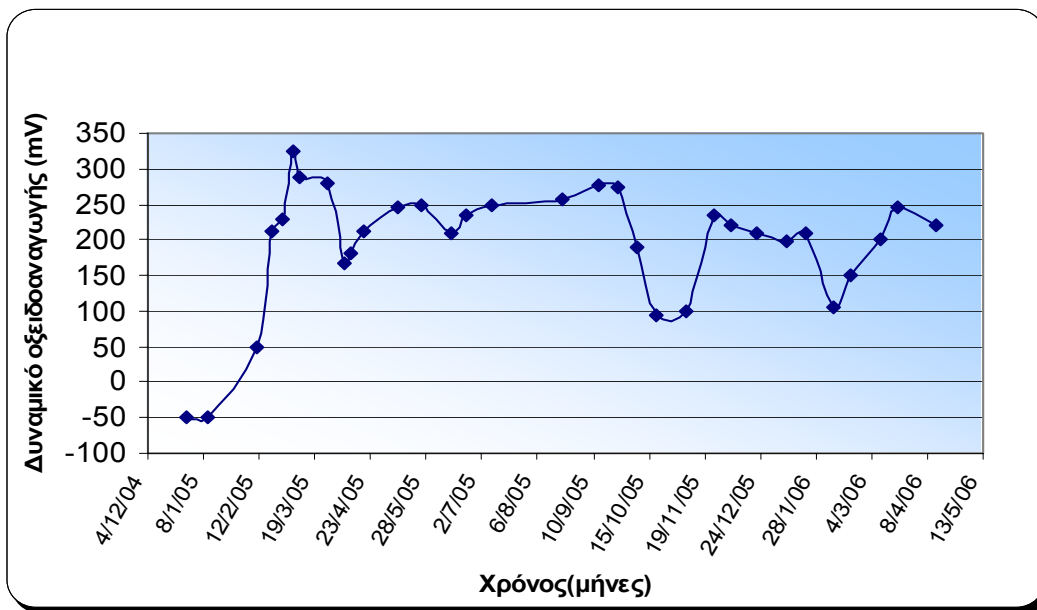


**Διάγραμμα 7-10: pH στραγγισμάτων**

Στους ΧΥΤΑ για αστικά στερεά απορρίμματα, ο αερισμός προκαλεί αύξηση στις τιμές του pH των στραγγισμάτων. Για τα δεδομένα του βιοαντιδραστήρα διαπιστώνεται ότι το pH διατηρείται σε ελαφρώς αλκαλικά επίπεδα 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 επιμηκύνεται η αερόβια φάση αποδόμησης και παρεμποδίζεται η εμφάνιση της όξινης αναερόβιας στη διάρκεια της οποίας ελαττώνεται το pH. Σύμφωνα και με μελέτη του Lagerkvis, (1995) σε αερόβιο ΧΥΤΑ, το pH των στραγγισμάτων ήταν ελαφρά αλκαλικό, περίπου 8.

#### 7.4.2: Μεταβολή δυναμικού οξειδοαναγωγής.

Στο παρακάτω γράφημα (7-11) παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών του δυναμικού οξειδοαναγωγής κατά τους μήνες της αερόβιας λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

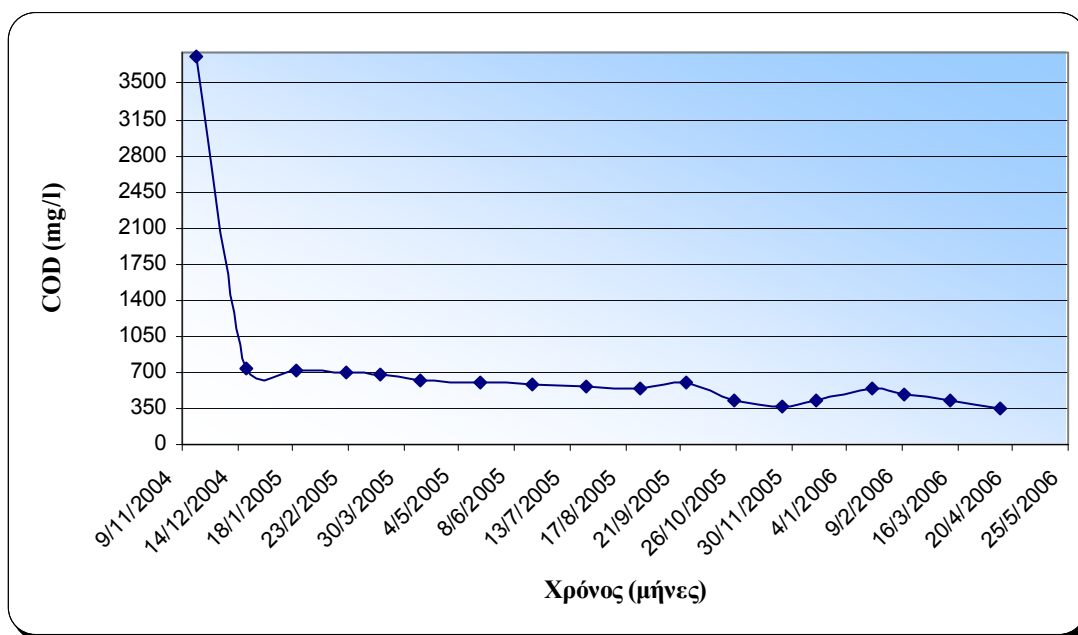


Διάγραμμα 7-11: Μέση μηνιαία μεταβολή δυναμικού οξειδοαναγωγής

Το οξειδοαναγωγικό δυναμικό είναι παράμετρος καθοριστικής σημασίας καθώς καθορίζει και ελέγχει ποιές βιολογικές διεργασίες μπορούν να λάβουν χώρα. Σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα το δυναμικό οξειδοαναγωγής ήταν αρνητικό αρχικά, στη συνέχεια όμως έλαβε θετικές τιμές οι οποίες διατηρήθηκαν σε όλη την διάρκεια της παρούσας μελέτης. Αυτή η αύξηση στο δυναμικό οξειδοαναγωγής αντικατοπτρίζει και το βαθμό σταθεροποίησης των στραγγισμάτων σύμφωνα με τους A.Tatsi et al.(2002). Το δυναμικό οξειδοαναγωγής των στραγγισμάτων αερόβιου βιοαντιδραστήρα αυξήθηκε από αρνητικό σε θετικό και κατά την μελέτη των B.Inanc et al.(2005).

#### 7.4.3: Μεταβολή COD.

Ακολουθεί το διάγραμμα 7-12 στο οποίο παριστάνεται η μεταβολή του COD συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 7-12: Μεταβολή συγκέντρωσης COD στα στραγγίσματα συναρτήσει του χρόνου

Όπως φαίνεται στο παραπάνω γράφημα καθ'όλη την διάρκεια της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα η συγκέντρωση του COD μειώθηκε. Το ποσοστό μείωσης υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

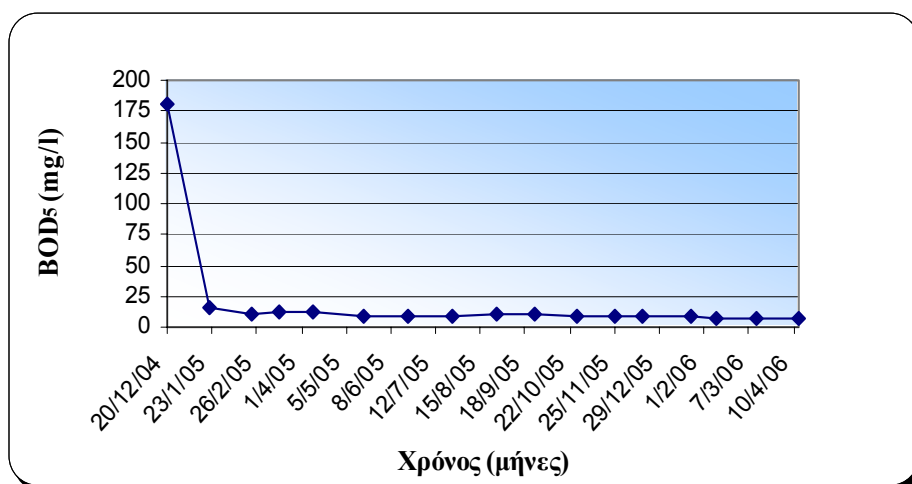


$$\frac{COD_0 - COD_t}{COD_0} = \frac{3762 - 352}{3762} = 0,91 \rightarrow 91\% .$$

Η μεγαλύτερη απομάκρυνση (81%) έλαβε χώρα κατά την διάρκεια των τεσσάρων πρώτων μηνών της λειτουργίας του συστήματος. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι αυτή την χρονική περίοδο συντελείται η αποδόμηση της μεγαλύτερης ποσότητας οργανικών ρύπων. Η μείωση του COD οφείλεται επίσης και στο συνεχές φιλτραρίσμα των στραγγισμάτων κατά την ανακυκλοφορία τους αλλά και στη μείωση του ρυθμού εκχύλισης του χημικού φορτίου στο νερό. Σε πείραμα των Borglin et al.(2004), σε αερόβιο αντιδραστήρα, παρατηρήθηκε μείωση του COD μετά από ένα χρόνο από 1000mg/l σε 159mg/l.

#### 7.4.4: Μεταβολή BOD<sub>5</sub>

Ακολουθεί το διάγραμμα 7-13 στο οποίο παριστάνεται η μεταβολή του BOD συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 7-13: Συγκέντρωση BOD<sub>5</sub> συναρτήσει του χρόνου

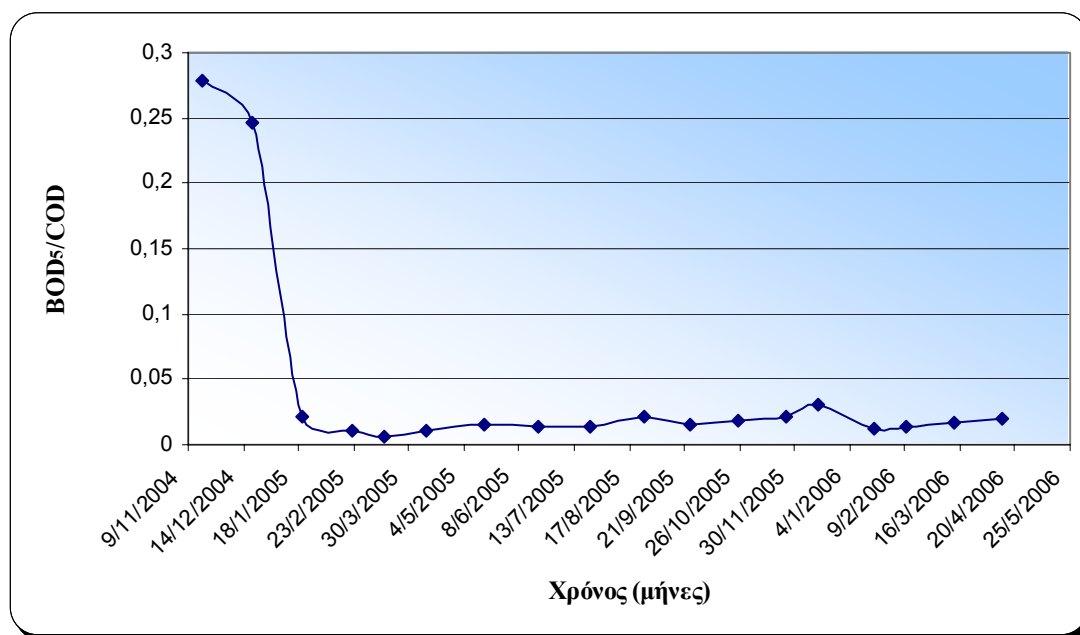
Το ποσοστό μείωσης του BOD<sub>5</sub> καθ'όλη την διάρκεια του πειράματος είναι:  $(1050 - 7)/1050 = 0,993$  δηλαδή έχουμε μείωση κατά 99.3%. Το ποσοστό αυτό είναι μεγάλο και ιδιαίτερα ικανοποιητικό, καθώς αποδεικνύει τον βαθμό βιοαποικοδόμησης του αερόβιου αντιδραστήρα. Όπως και στο COD έτσι και στο BOD<sub>5</sub> η μεγαλύτερη απομάκρυνση παρατηρείται το πρώτο τετράμηνο (98%). Τους τέσσερις τελευταίους μήνες η τιμή του BOD<sub>5</sub> ήταν σταθερή στα 7 mg/l γεγονός που αποδεικνύει την σταθεροποίηση της απορριμματικής μάζας. Με βάση τα αποτελέσματα οι τιμές του BOD<sub>5</sub> μειώνονταν όταν η παροχή του αέρα ήταν σταθερή και αυξανόταν η ανακυκλοφορία των

στραγγισμάτων, καθώς το φιλτράρισμα των στραγγισμάτων ήταν μεγαλύτερο και επιπλέον προκαλούσε αραίωση. Από την άλλη πλευρά όταν η ανακυκλοφορία ήταν σταθερή και μεταβαλλόταν η παροχή του αέρα και συγκεκριμένα αυξανόταν, τότε ευνοούνταν οι αερόβιες διεργασίες και εφόσον υπήρχε βιοαποδομήσιμο οργανικό υλικό αυξανόταν το  $BOD_5$ .

Συμπερασματικά λοιπόν προκύπτει ότι η μείωση της συγκέντρωσης του  $BOD_5$  οφείλεται, εκτός από την βιοαποικοδόμηση, στη συνεχή διήθηση και στη μείωση του ρυθμού εκχύλισης του φορτίου των απορριμμάτων στα στραγγίσματα. Η απότομη πτώση των συγκεντρώσεων του COD και του  $BOD_5$  των στραγγισμάτων επιβεβαιώνεται και στην βιβλιογραφία σύμφωνα με τους Borglin et al., 2004 και τον Warith, 2002.

#### 7.4.5: Μεταβολή λόγου $BOD_5/COD$

Στο παρακάτω διάγραμμα 7-14 παριστάνεται η μεταβολή του λόγου  $BOD_5/COD$  συναρτήσει του χρόνου.

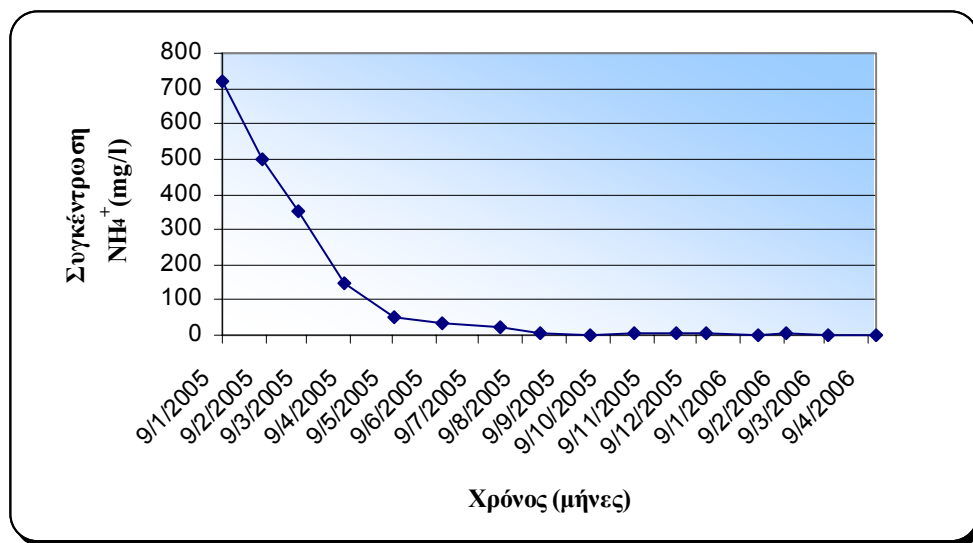


Διάγραμμα 7-14: Μεταβολή  $BOD_5/COD$

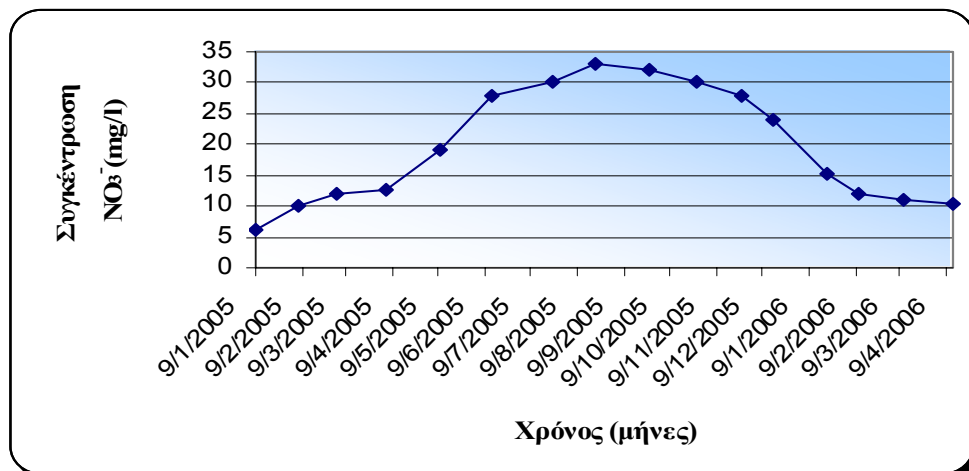
Ιδιαίτερης σημασίας είναι η μεταβολή του λόγου των παραπάνω δύο παραμέτρων,  $BOD_5/COD$ , καθώς αποτελεί κριτήριο της σταθεροποίησης των στερεών αποβλήτων. Στην αρχή λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα η παράμετρος αυτή ήταν 0,28 και μετά από 17 μήνες 0,02. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι τα στραγγίσματα του βιοαντιδραστήρα μετά την ολοκλήρωση της αερόβιας λειτουργίας του περιέχουν ενώσεις που δεν εμφανίζουν μεγάλο βαθμό βιοαποικοδομησιμότητας. Σύμφωνα με τους Borglin et al., 2004 τα στραγγίσματα θεωρούνται σταθεροποιημένα όταν η τιμή του λόγου  $BOD_5/COD$  είναι κάτω από 0.1.

#### 7.4.6: Μεταβολή $NO_3^-$ , $NH_4^+$

Ακολουθούν τα διάγραμμα 7-15, 7-16 στα οποία παριστάνονται οι μεταβολές των και  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$  αντίστοιχα συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 7-15: Μεταβολή αμμωνιακών ιόντων σε συνάρτηση με τον χρόνο



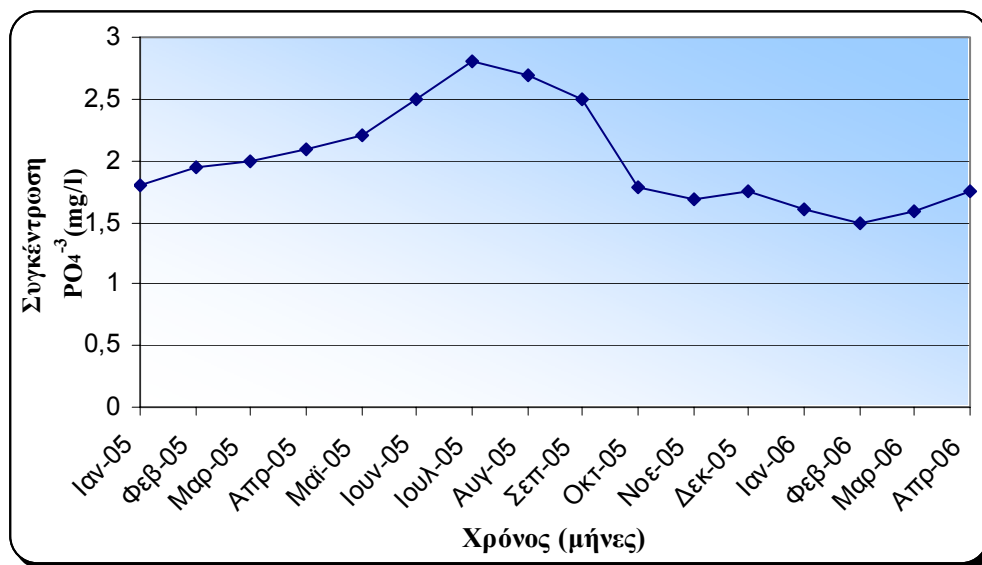
Διάγραμμα 7-16: Μεταβολή νιτρικών ιόντων σε συνάρτηση με τον χρόνο

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι συνθήκες, ιδιαίτερα τις πρώτες περιόδους του πειράματος, ήταν ιδανικές για την πραγματοποίηση της νιτροποίησης καθώς και το pH αλλά και τα επίπεδα θερμοκρασίας και BOD<sub>5</sub> ήταν τα κατάλληλα για την δράση των νιτροποιητικών βακτηρίων. Σύμφωνα με τους Stegmann et al. 2005, θερμοκρασίες κάτω από 35 °C ευνοούν την νιτροποίηση. Η μέγιστη παραγωγή NO<sub>3</sub><sup>-</sup> συμβαίνει κατά τους καλοκαιρινούς μήνες που και η παροχή του αέρα ήταν η μέγιστη που εφαρμόστηκε κατά την διάρκεια του πειράματος και τα επίπεδα pH (8) και θερμοκρασίας (25 °C) ήταν τα πιο κατάλληλα για τους αερόβιους μικροοργανισμούς. Η διαδικασία της νιτροποίησης περιορίζεται λόγω της παρουσίας βαρέων μετάλλων ή και άλλων τοξικών γιαυτό και έχουμε παρουσία αμμωνιακών ιόντων καθ'όλη την διάρκεια του πειράματος παρότι σε χαμηλά επίπεδα.

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών παρουσιάζουν μείωση εξαιτίας του αερισμού σύμφωνα με τους Heyer et al. (1999) Leikam et al. (1999) Cossu et al. (2001) και οι συγκεντρώσεις τους έχουν παρατηρηθεί σε επίπεδα κάτω από 70mg/l σύμφωνα με τους Heyel et al. (1999) Leikam et al (1999).

#### 7.4.7: Μεταβολή $\text{PO}_4^{3-}$

Ακολουθεί το διάγραμμα 7-17 στο οποίο παριστάνεται η μεταβολή των  $\text{PO}_4^{3-}$  συναρτήσει του χρόνου

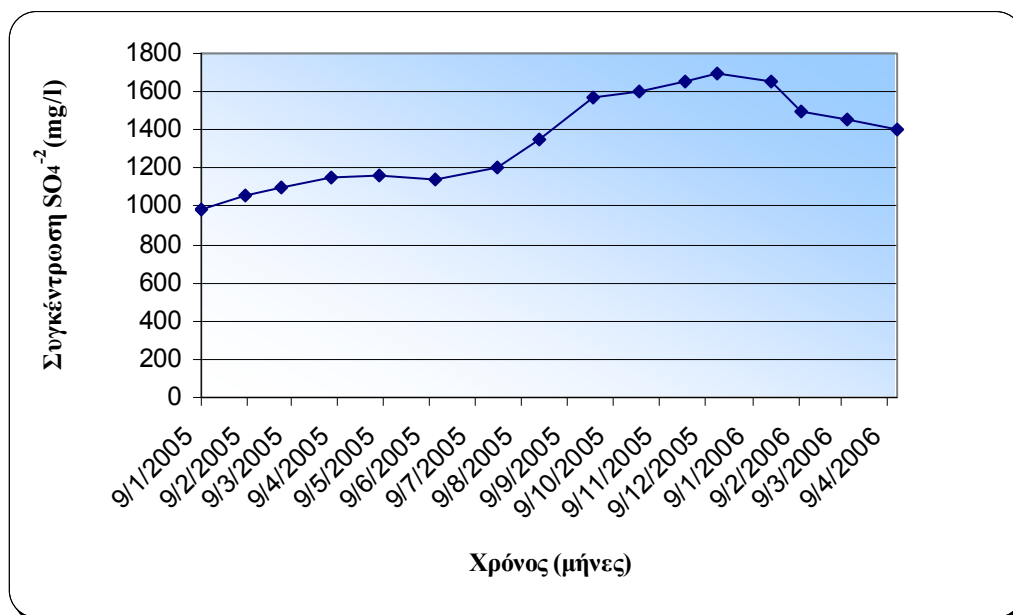


Διάγραμμα 7-17: Μεταβολή Ορθοφωσφορικών συναρτήσει του χρόνου

Οι αερόβιες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον βιοαντιδραστήρα δεν ευνοούσαν την διάχυση των ενώσεων φωσφόρου στα στραγγίσματα γι' αυτό και τα επίπεδα αυτών σύμφωνα με τις μετρήσεις ήταν σχετικά χαμηλά καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Κατά τους πρώτους μήνες λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα οι συγκεντρώσεις των φωσφορικών ιόντων παρουσίαζαν αυξητική τάση. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο αν ληφθούν υπ' όψη οι υψηλές θερμοκρασιών που επικράτουσαν, κυρίως κατά τους πρώτους οκτώ μήνες λειτουργίας του συστήματος. Τα επίπεδα θερμοκρασίας εκείνη την περίοδο διευκόλυναν την δράση των αερόβιων αποικοδομητών. Η μείωση που παρατηρήθηκε στην συνέχεια στις συγκεντρώσεις των φωσφορικών ιόντων οφειλόταν τόσο στην οξειδωτική δράση των νιτρικών ιόντων όσο και στην χρονική περίοδο μελέτης και στις συνθήκες λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Οι μεταβολές του pH των στραγγισμάτων δεν θεωρούνται πολύ σημαντικές έτσι ώστε να επηρεάσουν τα αποτελέσματα για τα φωσφορικά ιόντα.

7.4.8: Μεταβολή  $\text{SO}_4^{-2}$ 

Ακολουθεί το διάγραμμα 7-18 στο οποίο παριστάνεται η μεταβολή των  $\text{SO}_4^{-2}$  συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 7-18: Μεταβολή θειικών ιόντων σε συνάρτηση με τον χρόνο

Η παρατηρούμενη αύξηση της συγκέντρωσης των θειικών ιόντων οφείλεται στο γεγονός ότι στα απορρίμματα του βιοαντιδραστήρα περιλαμβάνονται ενώσεις του θείου (σύμφωνα και με την στοιχειακή ανάλυση των ΑΣΑ) συνεπώς λάμβανε χώρα η αερόβια αντίδραση μετατροπής θειικών ενώσεων σε θειικά ιόντα. Αερόβια βακτήρια οξειδώνουν τις ενώσεις του θείου και παράγονται τα θειικά ιόντα. Μείωση στα επίπεδα των θειικών ιόντων θα ήταν ένδειξη είτε ανεπαρκούς αερισμού είτε μη ικανοποιητικών συνθηκών για την ανάπτυξη και την δράση των αερόβιων οξειδωτικών βακτηρίων του θείου. Στο συμπέρασμα ότι με τον αερισμό των στερεών απορριμμάτων προκαλείται αύξηση στην συγκέντρωση των θειικών ιόντων κατέληξαν σε μελέτη τους οι Stegmann et al. (2005).

### 7.5 Υπολογισμός ποσοστού απομάκρυνσης βαρέων μετάλλων

Από την βιβλιογραφία λαμβάνεται ο παρακάτω πίνακας που δίνει το ποσό των βαρέων μετάλλων στα επιμέρους συστατικά των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων σύμφωνα με μελέτη των P.He et.al, 2006. Θεωρείται ότι η σύσταση των ΑΣΑ του βιοαντιδραστήρα δεν διαφέρει σημαντικά από την σύσταση των απορριμμάτων της μελέτης της βιβλιογραφίας.

**Πίνακας 7-6: Συγκεντρώσεις μετάλλων στα ΑΣΑ σε  $\mu\text{g/g}$**

Συστατ.	Ημερομηνία	Cd	Cr	Pb	Ni	Zn
Χαρτί	9-29-2004	3,4	35,6	39,3	22,8	73
	10-27-2005	6,1	9,1	39,3	27,7	73
Πλαστικό	9-29-2004	3,3	68,6	119	37	259,6
	10-27-2005	9,7	7,2	54,5	224,8	109,6
Γυαλί	9-29-2004	33,9	426,6	130	38,3	378,4
	10-27-2005	6,3	363,6	84,8	170,2	80,2
Ξύλο	9-29-2004	2,1	41	47,2	28,4	136,3
	10-27-2005	4,4	36,7	24,7	20,9	40,1
Οργανικά	9-29-2004	5,7	88	362,5	52,9	499,9
	10-27-2005	5,1	35,6	56,4	52,9	121,6
Υφάσματα	9-29-2004	0	38,9	192	32,9	113,5
	10-27-2005	5	58,3	215,6	148	52,8
Χώμα		6,3	83,7	47,8	151,7	76,3

Λαμβάνεται η μέση τιμή των δυο μετρήσεων ως αντιπροσωπευτική και πολλαπλασιάζεται με την συνολική ποσότητα απορριμμάτων που υπάρχουν στον βιοαντιδραστήρα, δηλαδή 68kg επί το ποσοστό επί του συνόλου για κάθε συστατικό, οπότε με άθροιση προκύπτει το συνολικό ποσό από κάθε μέταλλο που περιέχεται αρχικά στον βιοαντιδραστήρα σε mg.

**Πίνακας 7-7: Μάζα μετάλλων στον αερόβιο αντιδραστήρα**

Συστατ.	Βάρος σε kg	Μάζα (mg)Cd	Μάζα (mg)Cr	Μάζα (mg)Pb	Μάζα (mg)Ni	Μάζα (mg)Zn
Χαρτί	12	57.0	268.2	471.6	303	876
Πλάστικό	8.5	55.2	322.1	737.4	1112.7	1569.1
Γυαλί	2.7	54.3	1066.8	290.0	281.5	619.1
Ξύλο	0.5	1.6	19.4	18.0	12.3	44.1
Οργανικά	20.3	109.6	1254.5	4251.8	1073.9	6308
Υφάσμα	1.0	2.5	48.6	203.8	90.5	83.0
Χώμα	20.0	6.3	83.7	83.7	47.8	151.7
<b>Σύνολο</b>	<b>65.0</b>	<b>286.6</b>	<b>3063.4</b>	<b>6056.3</b>	<b>2921.6</b>	<b>9651.4</b>

## Συγκεντρώσεις στα στραγγίσματα

Από τις μετρήσεις στα στραγγίσματα με βάση την πιο πρόσφατη μέτρηση υπολογίζεται η συνολική ποσότητα για κάθε ένα από τα βαρέα μέταλλα που εκχυλίστηκε στα στραγγίσματα πολλαπλασιάζοντας την υπολογισμένη συγκέντρωση με τον όγκο των στραγγισμάτων στο δοχείο αποθήκευσης.

Πίνακας 7-8: Συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα.

	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Pb</b>	<b>Ni</b>	<b>Zn</b>
<b>Συγκέντρωση (ppm)</b>	0,001	0,09	0,001	0,001	1

Πίνακας 7-9: Μάζα μετάλλων στα στραγγίσματα.

	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Pb</b>	<b>Ni</b>	<b>Zn</b>
<b>Μάζα (mg)</b>	0,008	0,72	0,008	0,008	8

Γνωρίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίζουμε το ποσοστό απομάκρυνσης για κάθε ένα από τα παραπάνω βαρέα μέταλλα που μελετάμε, από την απορριμματική μάζα. Για τον συγκεκριμένο βιοαντιδραστήρα τα ποσοστά απομάκρυνσης είναι πολύ μικρά.

Πίνακας 7-10: Ποσοστό απομάκρυνσης μελετούμενων βαρέων μετάλλων από την απορριμματική μάζα του αντιδραστήρα

	<b>Απομάκρυνση% Cd</b>	<b>Απομάκρυνση % Cr</b>	<b>Απομάκρυνση % Pb</b>	<b>Απομάκρυνση % Ni</b>	<b>Απομάκρυνση % Zn</b>
<b>Συγκέντρωση (ppm)</b>	$2,8 \cdot 10^{-5}$	0,023	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$	0,083



## Σχολιασμός

**Ακολουθεί σχολιασμός των αποτελεσμάτων σε σχέση με τους σημαντικότερους παράγοντες που επιδρούν στις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα του βιοαντιδραστήρα.**

1) *Ουδέτερο προς υψηλό pH.* Γενικά τα βαρέα μέταλλα είναι λιγότερο διαλυτά σε υψηλότερα επίπεδα pH. Αύξηση του pH μπορεί να οφείλεται στην παρουσία μεταξύ άλλων θετικά φορτισμένων ιόντων όπως αμμωνιακών ιόντων. Το σχετικά υψηλό pH που επικρατεί στον βιοαντιδραστήρα οδηγεί σε αύξηση της δέσμευσης των μετάλλων στην απορριμματική μάζα. Πολλά υδροξειδία μετάλλων που μπορούν να δεσμεύσουν βαρέα μέταλλα έχουν χαμηλή διαλυτότητα σε ελαφρά βασικό pH στραγγισμάτων όπως αυτό που επικρατεί στα στραγγίσματα του εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα.

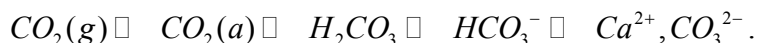
2) *Διαθεσιμότητα σουλφιδίων, ανθρακικών ιόντων και υδροξυλίων.* Κατά την διάρκεια αντιδράσεων οξειδοαναγωγής άλλες χημικές ενώσεις γίνονται δέκτες και άλλες δότες ηλεκτρονίων. Κατά την διάρκεια της σταθεροποιητικής διαδικασίας των απορριμμάτων λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις αναγωγής γεγονός που σημαίνει ότι χημικά στοιχεία και συστατικά τείνουν να λάβουν ηλεκτρόνια χρησιμοποιώντας οργανικό υλικό σαν ηλεκτρονιοδότη. Για παράδειγμα τα θειικά ιόντα ανάγονται σε  $S^{2-}$  υπό αναερόβιες συνθήκες. Τα ιόντα αυτά είναι στην συνέχεια διαθέσιμα ικανά να αντιδράσουν με πολλά βαρέα μέταλλα καταλήγοντας σε μορφές διαλυτές και με αυτό τον τρόπο έχουμε αύξηση στις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα (Poland et al 2003). Στον συγκεκριμένο όμως αντιδραστήρα που είναι αερόβιος κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει για αυτό και με την πάροδο του χρόνου που μειώνονται οι αρχικές ποσότητες θεικών οξέων, χωρίς να παράγονται άλλες, μειώνονται και οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα.

3) *Δυναμικό οξειδοαναγωγής.* Το δυναμικό οξειδοαναγωγής δύναται να επηρεάσει τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στον βιοαντιδραστήρα όπως την μετατροπή των θεικών ιόντων σε  $S^{2-}$  και κατ'επέκταση την μείωση των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα. Επιπλέον καθώς η εκχυλισιμότητα σχετίζεται με το δυναμικό οξειδοαναγωγής και αυτό με την σειρά του σχετίζεται με τους ρυθμούς αερισμού, θα πρέπει να επιλέγονται τέτοιοι ρυθμοί αερισμού ώστε να μην αυξάνεται πολύ το δυναμικό και επηρεάζεται η εκχυλισιμότητα των μετάλλων ( B. Inanc et al. 2005).

Στην παρούσα μελέτη δεν παρατηρήθηκε αύξηση των βαρέων μετάλλων με αύξηση του δυναμικού οξειδοαναγωγής, αυτό σύμφωνα με τους B. Inanc et al. (2005) μπορεί να σημαίνει ότι επικρατεί οξειδωτικό περιβάλλον λόγω της παρουσίας και κάποιων άλλων οργανικών ρύπων παρά την αρχική απομάκρυνση των πιο διαλυτών μορφών των ρύπων.

4) *In situ* διήθηση. Τα συμπιεσμένα απορρίμματα μπορούν να αποτελέσουν σε ικανοποιητικό βαθμό φίλτρο ειδικά στον βιοαντιδραστήρα που λαμβάνει χώρα ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Η επίδραση αυτού του *in situ* φίλτρου καταλήγει στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών και άλλων συστατικών των στραγγισμάτων. Η δέσμευση /προσρόφηση από το στερεό οργανικό υλικό του αντιδραστήρα, όπως το ξύλο και το χαρτί, μπορεί ιδίως για τον ψευδάργυρο, τον μόλυβδο και τον χαλκό να θεωρηθεί σημαντική. Επιπλέον οξειδωτικά στοιχεία αργιλίου είναι πιθανοί προσροφητές μετάλλων.

5)  $\text{CO}_2$ . Ένας επιπλέον λόγος που δικαιολογεί τις πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα είναι η ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων  $\text{CO}_2$  που παράγονται κατά την διάρκεια αποδόμησης οργανικού υλικού. Οι μεγάλες αυτές ποσότητες οδηγούν σε ορυκτοποίηση των απορριμμάτων. Αυτή η ορυκτοποίηση μπορεί να έχει σημαντικό ρόλο στην μείωση της εκχυλισιμότητας των βαρέων μετάλλων σύμφωνα με τους B. Inanc et al. (2005). Οι αντιδράσεις του  $\text{CO}_2$  που λαμβάνουν χώρα στον βιοαντιδραστήρα είναι:



6) *Μορφή βαρέων μετάλλων*. Οι μορφές με τις οποίες τα βαρέα μέταλλα βρίσκονται στα προϊόντα που απορρίπτονται είναι δυνατόν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων (Kjeldsen et al., ). Σχετικές μελέτες έχουν δείξει ότι μια μεγάλη μερίδα του συνόλου των υπαρχόντων μετάλλων στα αστικά απορρίμματα βρίσκεται σε μορφή που είναι δυνατόν να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις (Prudent et al., 1996). Τα περισσότερα βαρέα μέταλλα σε ΧΥΤΑ συναντώνται σε αδιάλυτη μορφή. Για το Cr και τον Pb αυτό το μερίδιο ξεπερνά το 80% και για τον Zn είναι τουλάχιστον 20% (w/w )

Για τα ποσοστά απομάκρυνσης που υπολογίστηκαν θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι δεν είναι όλα τα μέταλλα που υπάρχουν στα ΑΣΑ διαθέσιμα για εκχύλιση. Η σύσταση των μετάλλων κάποιων κατηγοριών απορριμμάτων όπως το πλαστικό είναι κατά ένα μόνο μικρό ποσοστό εκχυλίσιμα

ανεξαρτήτως των συνθηκών που επικρατούν στον αντιδραστήρα. Οι Flyhammar et al. υποστηρίζουν ότι μόνο το 30% των μετάλλων των ΑΣΑ που έχουν τοποθετηθεί σε ΧΥΤΑ έχουν δυνατότητα εκχύλισης.

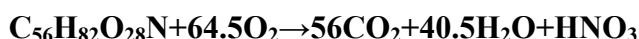
Στον μελετούμενο βιοαντιδραστήρα την μεγαλύτερη απομάκρυνση παρουσιάζει ο Zn σε σχέση με τα υπόλοιπα βαρέα μέταλλα και το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι ο Zn βρίσκεται σε περισσότερο διαλυτή μορφή. Στο συμπέρασμα αυτό κατέληξαν και P. He et al.(2005). Την μικρότερη απομάκρυνση έχει ο Pb που όπως προαναφέραμε κατά 80% βρίσκεται σε αδιάλυτη μορφή. Γενικότερα οι χαμηλές συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων που παρατηρούνται οφείλονται στην παρουσία τους κυρίως σε αδιάλυτη μορφή.

- Στην παρούσα εργασία δεν έγινε ανάλυση του παραγόμενου αερίου για να ανιχνευθεί η παρουσία βαρέων μετάλλων σε αυτό ωστόσο οι Belevi και Baccini αναφέρουν για παράδειγμα για τον Hg ότι μεταφέρεται και μέσω του αερίου όπως και μέσω των στραγγισμάτων. Μια επιπλέον εκδοχή λοιπόν είναι και η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων σε αέρια μορφή συνεπώς μείωση της παρουσίας τους στα παραγόμενα στραγγίσματα

## 7.6 Υδατικό ισοζύγιο

*Υπολογισμός παραγόμενου νερού λόγω βιολογικών διεργασιών ( $Q_{\text{bwater}}$ )*

Η αντίδραση οξείδωσης για το αντιπροσωπευτικό μοριακό τύπο των απορριμμάτων του βιοντιδραστήρα παρουσιάζεται παρακάτω:



Για αερόβια αποικοδόμηση 1 mol οργανικής ένωσης σύμφωνα με τον παραπάνω μοριακό τύπο παράγονται 40,5 mol νερού  $m=n \cdot \text{MB} = 40,5 \cdot 18 = 729 \text{gr} = 0,729 \text{Kg}$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{Kg/m}^3 \rightarrow V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,729 \text{L/mol}$$

*Υπολογισμός mol που αποδομούνται την ημέρα*

Για αποικοδόμηση ενός mol απαιτούνται 64,5 mol  $\text{O}_2$

Παροχή αέρα  $Q_{\text{air}} = 15 \text{ l/min} = 21.600 \text{ L/day}$

$$P_{\text{air}} = 1,3 \text{ Kg/m}^3 \text{ Για } T = 20^\circ \text{C } \rho = 0,0827 \text{ lb/ft}^3 = 0,0827 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} * \frac{0,454 \text{ kg}}{\text{lb}} \frac{\text{ft}^3}{0,028 \text{ m}^3} = 1,34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M_{\text{air}} = V_{\text{air}} * \rho_{\text{air}} = 21.600 \text{ L/day} * 1,34 \text{ Kg/m}^3 = 28.944 \text{ kg}$$

$$\text{Σύσταση αέρα σε οξυγόνο } 21\% \text{ O}_2 \rightarrow 0,21 * 28.944 \text{ g} = 6078,24 \text{ g O}_2/\text{day}$$

$$n = m/MB = \mathbf{189,95 \text{ moles O}_2}$$

Συνεπώς με αυτή την παροχή αέρα μπορούν να αποδομηθούν  $189,95/64,5 \approx 3 \text{ moles}$  οργανικής ένωσης την ημέρα. Άρα το παραγόμενο νερό λόγω των αερόβιων αντιδράσεων, θεωρώντας 100% απόδοση αυτών είναι  $3 \text{ mol} * 0,792 \text{ L/mol} = \mathbf{2,35 \text{ L/day}}$

- Για  $Q_{\text{air}} = 20 \text{ l/min} = 28.800 \text{ L/day} \rightarrow M_{\text{air}} = 38,6 \text{ kg}$

$$\text{Σύσταση αέρα σε οξυγόνο } 21\% \text{ O}_2 \rightarrow 0,21 * 38.592 \text{ g} = 8104,32 \text{ g O}_2/\text{day}$$

$$n = m/MB = \mathbf{253,3 \text{ moles O}_2}$$

Συνεπώς με αυτή την παροχή αέρα μπορούν να αποδομηθούν  $253,26/64,5 \approx 4 \text{ moles}$  οργανικής ένωσης την ημέρα. Άρα το παραγόμενο νερό λόγω των αερόβιων αντιδράσεων, θεωρώντας 100% απόδοση αυτών είναι  $4 \text{ mol} * 0,792 \text{ L/mol} = \mathbf{3,23 \text{ L/day}}$

- Για  $Q_{\text{air}} = 30 \text{ l/min} = 43.200 \text{ L/day} \rightarrow M_{\text{air}} = 57,9 \text{ kg}$

$$\text{Σύσταση αέρα : } 21\% \text{ O}_2 \rightarrow 0,21 * 57.888 \text{ g} = 12156,48 \text{ g O}_2/\text{day} \rightarrow n = \mathbf{380 \text{ moles O}_2}$$

Συνεπώς με αυτή την παροχή αέρα μπορούν να αποδομηθούν  $380/64,5 = 5,9 \text{ moles}$  οργανικής ένωσης την ημέρα. Άρα το παραγόμενο νερό λόγω των αερόβιων αντιδράσεων, θεωρώντας 100% απόδοση αυτών είναι  $5,9 \text{ mol} * 0,792 \text{ L/mol} = \mathbf{4,67 \text{ L/day}}$

Συνεπώς για τις τρεις διαφορετικές παροχές αέρα που εφαρμόζονται κατά την διαξαγωγή του πειράματος διαμορφώνουμε τον συνοπτικό πίνακα 7-11 που ακολουθεί:

**Πίνακας 7-11 : Παραγόμενο νερό ανάλογα με τον ρυθμό παροχής αέρα**

$Q_{\text{air}}(\text{L/d})$	$Q_{\text{bwater}}(\text{L/d})$
15	2,35
20	3,23
30	4,67

- Στην πραγματικότητα οι αντιδράσεις αερόβιας αποικοδόμησης δεν έχουν 100% απόδοση. Ειδικότερα για τον υπό μελέτη βιοαντιδραστήρα με την πάροδο του χρόνου μειώνεται η πραγματοποίηση αυτών των αντιδράσεων λόγω μείωσης του οργανικού υποστρώματος και μεταβολής των συνθηκών θερμοκρασίας. Συνεπώς οι παραπάνω ποσότητες που υπολογίστηκαν στην πραγματικότητα είναι μικρότερες.

#### *Παραγόμενοι υδρατμοί ( $Q_{gas}$ )*

Καθημερινά γινόταν μέτρηση της σχετικής υγρασίας των παραγόμενων υδρατμών η οποία μειωνόταν με αύξηση της σχετικής υγρασίας των απορριμμάτων. Το αέριο συχνά είναι κορεσμένο από τους ατμούς του νερού. Η ποσότητα των ατμών που εξέρχονται από τον βιοαντιδραστήρα υπολογίζονται θεωρώντας ότι ο αέρας είναι κορεσμένος σε ατμούς και ακολουθεί τον νόμο των τελείων αερίων.

$$P_v V = n R T$$

όπου:  $P_v$  η πίεση των ατμών του νερού σε θερμοκρασία  $T$ ,  $\text{Kg/m}^2$ ,

$V$  όγκος,  $\text{m}^3$

$n$  αριθμός των moles

$R$  παγκόσμια σταθερά αερίων  $= 0,082 \text{ Latm/mol deg}$

$T$  η θερμοκρασία σε  $^{\circ}\text{K}$

Για μέση θερμοκρασία  $T = 20^{\circ}\text{C} = 293\text{K} \rightarrow P = 17,54\text{mmHg} \rightarrow P = 0,023\text{atm}$

Συνεπώς τα moles του νερού υπό μορφή ατμού ανά  $\text{m}^3$  αερίου σε θερμοκρασία είναι

$$n = (0,023 \cdot 10^3 / 0,082 \cdot 293) = 0,96\text{mol} \rightarrow V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,96\text{gmol} \cdot 18\text{gr/grmol} \cdot 1\text{gr/ml} = 17,28\text{ml/m}^3$$

- Η ακριβής ποσότητα αέρα που εκπεμπόταν σε καθημερινή βάση από τον βιοαντιδραστήρα δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί. Επομένως δεν είναι δυνατός και ο υπολογισμός της ακριβούς ποσότητας νερού, υπό μορφή ατμών, που χάνεται από τον βιοαντιδραστήρα σε ημερήσια βάση. Θεωρείται όμως ότι η ποσότητα αυτή δεν είναι σημαντική, καθώς η οπή διαφυγής του αέρα ήταν πολύ μικρή.

*Προσθήκη απιονισμένου νερού(  $Q_{inH2O}$ )*

Σε περίπτωση που η παραγωγή νερού λόγω βιολογικών διεργασιών δεν κάλυπτε τις απώλειες λόγω εξάτμισης ή παρεμπόδισης της ροής των στραγγισμάτων στο σώμα των αποβλήτων, υπήρχε απαίτηση προσθήκης απιονισμένου νερού για την διατήρηση του υδατικού ισοζυγίου. Δηλαδή εάν δεν εκρεόταν από τον βιοαντιδραστήρα ίση ποσότητα στραγγισμάτων με αυτήν που ανακυκλοφορούταν, ήταν αναγκαία η προσθήκη επιπλέον ποσότητας νερού.

Από την εξίσωση υδατικού ισοζυγίου (5-5) μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα των στραγγισμάτων που συγκρατώνται από την απορριμματική μάζα. Η ποσότητα αυτή υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

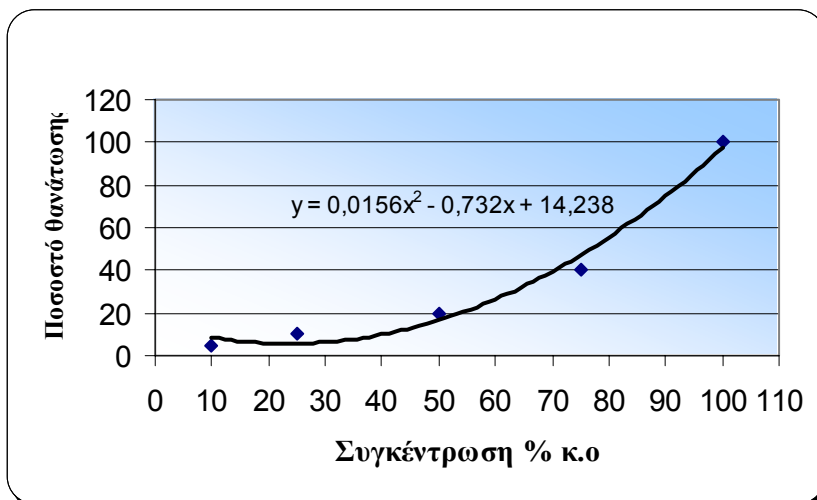
$$Q_{waste} = Q_{in} + Q_{inH2O} + Q_{bwater} - Q_{gas} - Q_{out}$$

**7.7 Τεστ Τοξικότητας**

Για να υπολογιστεί ο δείκτης  $LC_{50}$  (Lethal Concentration 50%), δημιουργείται το διάγραμμα του ποσοστού θανάτωσης σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των τεσσάρων test τοξικότητας που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος.

**7.7.1 1ο Τεστ τοξικότητας –Απρίλιος 2005**

Στο διάγραμμα 7-19 που ακολουθεί παρουσιάζεται η καμπύλη που προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα του πρώτου τεστ τοξικότητας που πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο του 2005.



Διάγραμμα 7-19: Καμπύλη ποσοστού θανάτωσης –συγκέντρωσης υγρού δείγματος για το 1<sup>ο</sup> τεστ τοξικότητας- Απρίλιος 2005

Η εξίσωση που αντιπροσωπεύει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα είναι η:  $y=0,0156x^2-0,73x+14,238$ , βάζοντας όπου  $y$  το 50 και επιλύοντας την δευτεροβάθμια εξίσωση από την οποία προκύπτουν δυο λύσεις μια αρνητική που απορρίπτεται γιατί αναφερόμαστε σε συγκεντρώσεις και δεν έχει νόημα η αρνητική τιμή και μια θετική που είναι και το ζητούμενο. Συνεπώς για τα συγκεκριμένα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει  $x=76,78\%$ . Άρα η συγκέντρωση που μπορεί να προκαλέσει θάνατο στο 50 % των οργανισμών είναι 76,78%. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, γιατί το ποσοστό θανάτωσης 50% είναι μεταξύ του 100% και του 40% και από τα αποτελέσματα το ποσοστά αυτά αντιστοιχούν σε συγκεντρώσεις 100% και 75 %

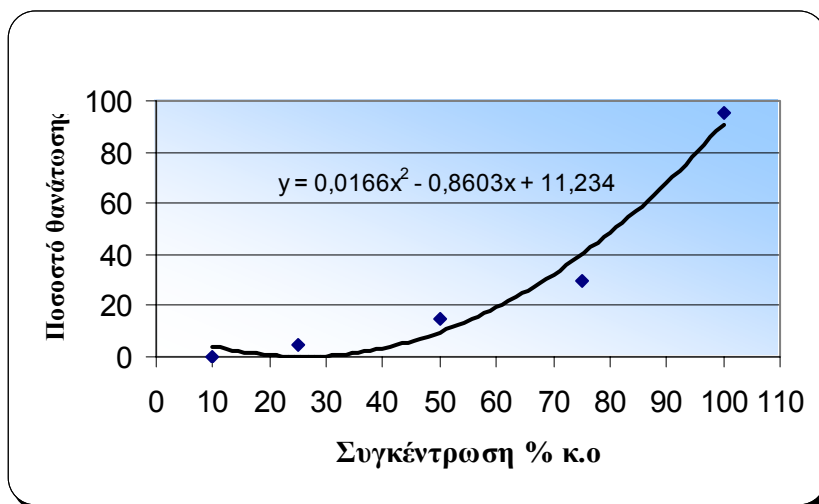
Η τιμή αυτή δε μπορεί να γενικευτεί γιατί τα πειράματα αφορούν συγκεκριμένο τύπο οργανισμών, *Daphnia magna*. Αυτός ο τύπος μικροοργανισμών ενδείκνυται για τον προσδιορισμό τοξικότητας σε υγρά δείγματα.

#### Υπολογισμός κατώτερου ορίου συγκέντρωσης TLV (Threshold Limit Value)

Ο υπολογισμός του κατώτερου ορίου της συγκέντρωσης των στραγγισμάτων που προκαλεί αρνητική επιρροή στον εξεταζόμενο πληθυσμό γίνεται μέσω της γραφικής παράστασης που παρουσιάστηκε παραπάνω. Το κατώτερο όριο (TLV) είναι το σημείο που αρχίζει η καμπύλη να αποκλίνει. Η τιμή αυτή προσεγγιστικά από τη γραφική είναι περίπου 0,3. Άρα η συγκέντρωση των στραγγισμάτων στην οποία εάν εκτεθούν οι μικροοργανισμοί δεν θα υποστούν σημαντική βλάβη είναι 30%.

### 7.7.2: 2ο Τεστ τοξικότητας –Αύγουστος 2005

Στο παρακάτω διάγραμμα (7-20) παριστάνεται η καμπύλη που δείχνει την μεταβολή του ποσοστού θανάτωσης των μελετούμενων μικροοργανισμών σε σχέση με την αραίωση των στραγγισμάτων.



Διάγραμμα 7-20: Καμπύλη ποσοστού θανάτωσης –συγκέντρωσης υγρού δείγματος για το 2<sup>ο</sup> τεστ-Αύγουστος 2005

Από την επίλυση της εξίσωσης:  $y=0,0166x^2-0,8603x-11,234$  και βάζοντας όπου  $y=50$  προκύπτουν δυο λύσεις:  $x_1$ (αρνητική) και  $x_2=80,75\%$ . Λόγω ύπαρξης συγκέντρωσης απορρίπτεται η αρνητική τιμή, συνεπώς η συγκέντρωση που μπορεί να προκαλέσει τον θάνατο στο 50 % των οργανισμών είναι 80,75%. Το αποτέλεσμα είναι λογικό, γιατί το ποσοστό θανάτωσης 50% είναι μεταξύ του 95% και του 45 %. Οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις για τα ποσοστά αυτά είναι 100% και 75 %.

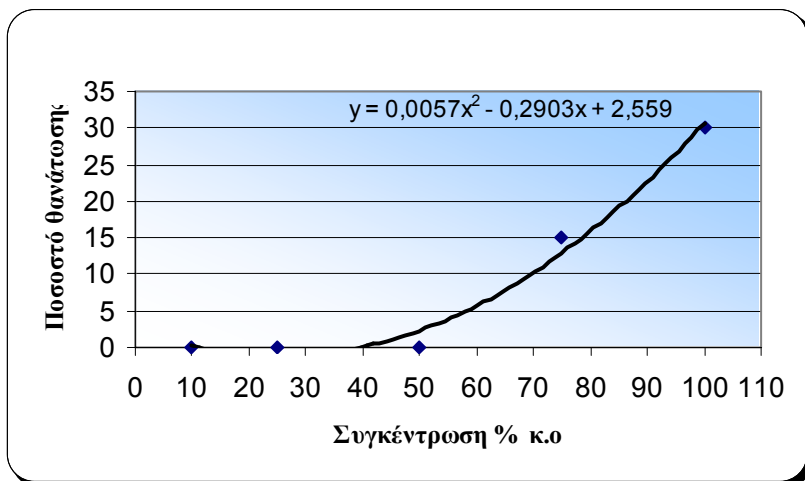
#### Υπολογισμός κατώτερου ορίου συγκέντρωσης TLV (Threshold Limit Value)

Το κατώτερο όριο (TLV) είναι το σημείο που αρχίζει η καμπύλη να αποκλίνει. Η τιμή αυτή από τη γραφική είναι περίπου 0,38. Άρα η συγκέντρωση των στραγγισμάτων στην οποία εάν εκτεθούν οι μικροοργανισμοί δεν θα υποστούν σημαντική βλάβη είναι 38%.



### 7.7.3: 3ο Τεστ τοξικότητας –Νοέμβριος 2005

Στο διάγραμμα 7-21 που ακολουθεί παρουσιάζεται η καμπύλη που προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα του τρίτου τεστ τοξικότητας που πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 2005.



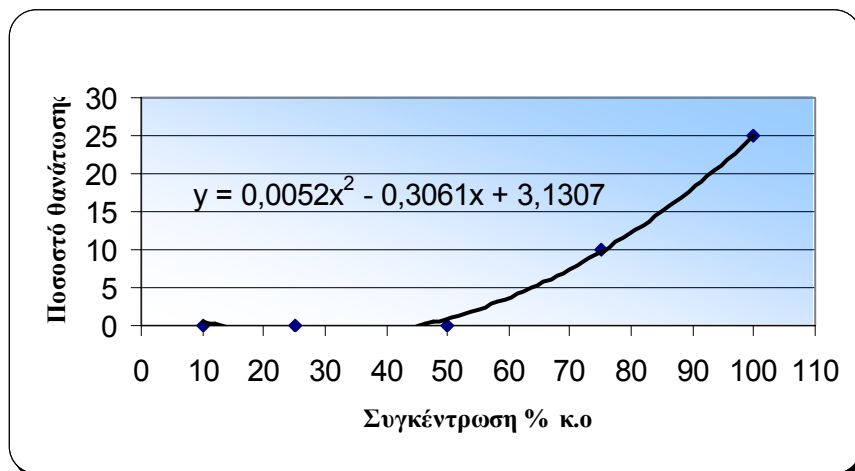
Διάγραμμα 7-21: Καμπύλη ποσοστού θανάτωσης –συγκέντρωσης υγρού δείγματος για το 3<sup>ο</sup> τεστ-Νοέμβριος 2005.

Από την εξίσωση  $y=0,0057x^2-0,29x+2,6$ , βάζοντας όπου y το 50 προκύπτει θετική λύση  $x=120$ . Άρα η συγκέντρωση που μπορεί να προκαλέσει θάνατο στο 50 % των οργανισμών είναι πάνω από 100%. Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει ότι θα έπρεπε να έχουμε ακόμα πιο πυκνό διάλυμα στραγγισμάτων για να προκληθεί θάνατος στο 50% του πληθυσμού των *Daphnia Magna*.

Το κατώτερο όριο (TLV) είναι το σημείο που αρχίζει η καμπύλη να αποκλίνει. Η τιμή αυτή προσεγγιστικά από τη γραφική είναι περίπου 0,42. Άρα η ελάχιστη συγκέντρωση έκθεσης των *Daphnia magna* χωρίς να υποστούν βλάβη είναι 42%.

### 7.7.4: 4ο Τεστ τοξικότητας –Φεβρουάριος 2006

Στο παρακάτω διάγραμμα (7-22) παριστάνεται η καμπύλη που δείχνει την μεταβολή του ποσοστού θανάτωσης των μελετούμενων μικροοργανισμών σε σχέση με την αραιώση των στραγγισμάτων.



Διάγραμμα 7-22: Καμπύλη ποσοστού θανάτωσης–συγκέντρωσης υγρού δείγματος για το 4<sup>ο</sup> τεστ-Φεβρουάριος 2006

Από την εξίσωση  $y=0,0052x^2-0,3061x+3,131$ , βάζοντας όπου  $y$  το 50 προκύπτει  $x_1=124$ . Άρα η συγκέντρωση που μπορεί να προκαλέσει θάνατο στο 50 % των οργανισμών είναι 124%. Με βάση αυτή την τιμή προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα στραγγίσματα είναι ελάχιστα τοξικά για τους *Daphnia magna*.

Το κατώτερο όριο (TLV) είναι το σημείο που αρχίζει η καμπύλη να αποκλίνει. Η τιμή αυτή προσεγγιστικά από τη γραφική είναι περίπου 0,5. Άρα η συγκέντρωση είναι 50%.

Με βάση τα παραπάνω διαμορφώνεται ο συγκεντρωτικός πίνακας 7-12 που ακολουθεί:

Πίνακας 7-12: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Αριθμός Τέστ τοξικότητας	LC <sub>50</sub> %	TLV %
1 <sup>ο</sup>	76.8	30
2ο	80.8	38
3ο	120	42
4ο	124	50

### Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δυο πρώτων τεστ τοξικότητας που έλαβαν χώρα για τα στραγγίσματα του αερόβιου αντιδραστήρα, την άνοιξη και το καλοκαίρι του 2005, προέκυψε ότι η συγκέντρωση που προκαλεί θανάτωση στο 50% του μελετούμενου πληθυσμού ήταν 76,7% και 80,75% αντίστοιχα. Συνεπώς τα στραγγίσματα ήταν λιγότερο τοξικά κατά το δεύτερο τεστ τοξικότητας, εφόσον απαιτείται μεγαλύτερη συγκέντρωση για να προκληθεί θανάτωση στο 50% των μικροοργανισμών. Επιλέον η τιμή του κατώτερου ορίου (TLV) ήταν μεγαλύτερη στο δεύτερο τεστ σε σύγκριση με το πρώτο. Δηλαδή η συγκέντρωση των στραγγισμάτων στην οποία εάν εκτεθούν οι μικροοργανισμοί δεν θα υποστούν σημαντική βλάβη είναι 30% την περίοδο της άνοιξης και 38% την περίοδο του καλοκαιριού.

Για το 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> τεστ προέκυψε ότι τα στραγγίσματα ήταν ελάχιστα τοξικά για τους μικροοργανισμούς που μελετάμε γι' αυτό και κατά τον υπολογισμό της συγκέντρωσης που προκαλεί τον θάνατο στο 50% των *Daphnia Magna* η τιμή που προκύπτει είναι πάνω από 100%. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι για το 3<sup>ο</sup> τεστ τα στραγγίσματα με συγκέντρωση 100% προκαλούν θανάτωση στο 30% του πληθυσμού και για το 4<sup>ο</sup> τεστ προκαλούν θανάτωση στο 25%. Συνεπώς τα ποσοστά είναι πολύ μικρά και τα στραγγίσματα του βιοαντιδραστήρα ήταν μη τοξικά για τους μικροοργανισμούς που μελετήσαμε υπό τις συνθήκες που επικρατούσαν. Για το TLV οι τιμές που προέκυψαν είναι 42% και 50% αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα παραπάνω όσο λιγότερο τοξικό είναι το δείγμα που μελετάμε τόσο πιο «πυκνό» στράγγισμα απαιτείται ώστε να προκληθεί θανάτωση στο 50% του πληθυσμού των μικροοργανισμών και τόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη συγκέντρωση του υγρού δείγματος στην οποία θα μπορούσε να εκτίθεται ένας συγκεκριμένος οργανισμός κάθε μέρα χωρίς σημαντική βλάβη. Τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα εφόσον τα στραγγίσματα για τα δυο τελευταία τεστ προέρχονται από έναν βιοαντιδραστήρα που έχει αρχίσει να σταθεροποιείται.

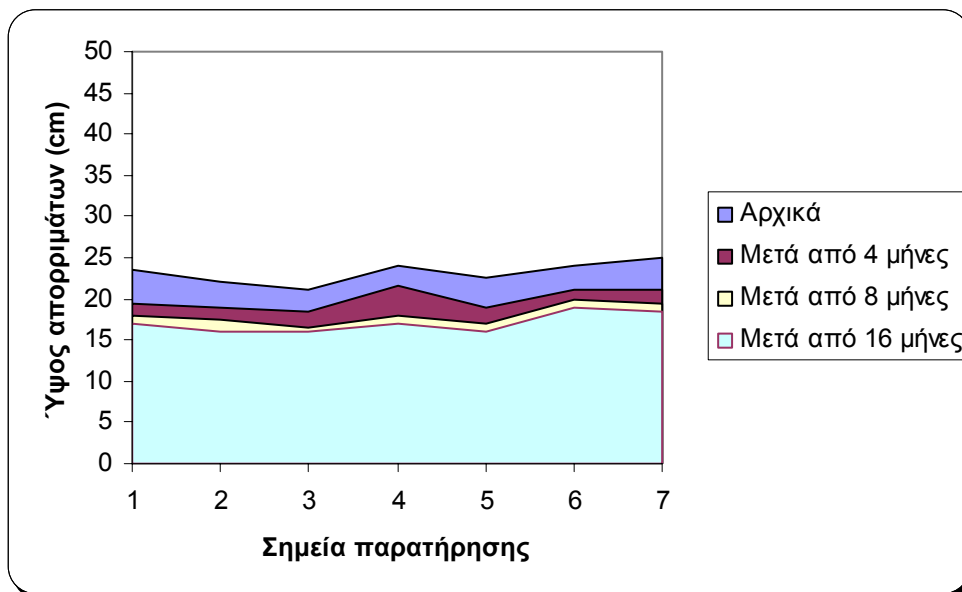
## 7.8 Καθίζηση

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας 7-13 στον οποίο περιλαμβάνονται τα ποσοστά (%) καθίζησης για κάθε ένα από τα 7 σημεία παρατήρησης:

**Πίνακας 7-13: Ποσοστό καθίζησης σε όλη την διάρκεια λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα**

Σημεία παρατήρησης	Καθίζηση (%)
1	27,66
2	27,27
3	23,81
4	29,17
5	28,89
6	20,83
7	26,00
<b>Μέση καθίζηση</b>	<b>26.23</b>

Στο ακόλουθο γράφημα (7-23) παρουσιάζεται σε τομή το ύψος των απορριμάτων σε κάθε ένα από τα σημεία παρατήρησης καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος.

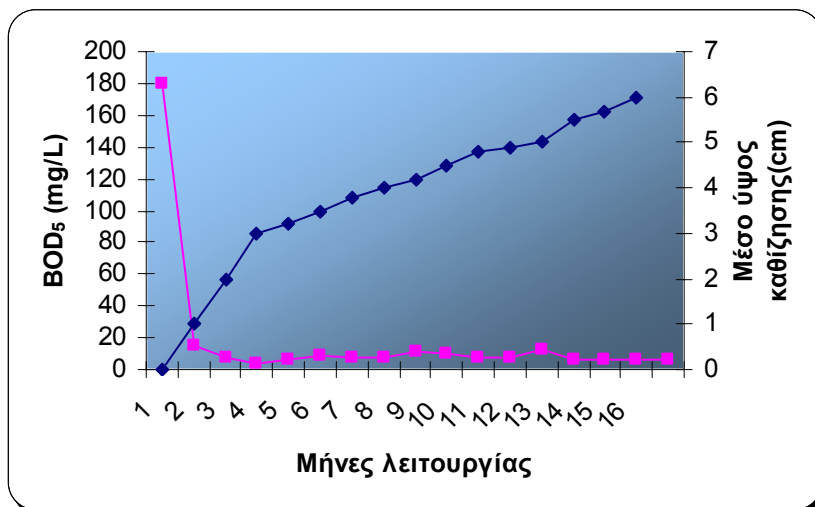


**Διάγραμμα 7-23: Καθίζηση απορριμματικής μάζας για επτά διαφορετικά σημεία περιμετρικά του βιοαντιδραστήρα.**

### Σχολιασμός

Ο ρυθμός καθίζησης όπως παρατηρείται ήταν μεγαλύτερος κατά τους πρώτους μήνες λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Σε όλη την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος η απορριμματική μάζα παρουσίαζε καθίζηση με μειούμενο ωστόσο ρυθμό κατά το δεύτερο οκτάμηνο της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Η μείωση του ρυθμού καθίζησης οφείλεται στην μείωση του διαθέσιμου προς βιοαποδόμηση οργανικού κλάσματος. Το φαινόμενο της καθίζησης είναι αναμενόμενο σ' ένα βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων με ταυτόχρονο αερισμό και ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Επιπλέον η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων πέρα από το γεγονός ότι εξασφαλίζει τα απαραίτητα επίπεδα υγρασίας για να λάβουν χώρα αποτελεσματικά οι αερόβιες διεργασίες, προκαλεί και πρόσθετη καθίζηση λόγω του βάρους των ανακυκλοφορούντων στραγγισμάτων. Οι παράμετροι λειτουργίας, αερισμός και ανακυκλοφορία σχετίζονται με τον βαθμό καθίζησης εφόσον σχετίζονται και επιδρούν στον ρυθμό βιοαποικοδόμησης.

Στον υπό μελέτη βιοαντιδραστήρα οι επικρατούσες συνθήκες είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για την ανάπτυξη και την δράση αερόβιων μικροοργανισμών και συνεπώς επιταχύνεται η βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρύπων της απορριμματικής μάζας. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό καθίζησης των απορριμμάτων (Διάγραμμα 7-24).



Διάγραμμα 7-24: Συσχέτιση καθίζησης και BOD

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα που προέκυψε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, το ύψος καθίζησης αυξανόταν συνεχώς, τους πρώτους μήνες περισσότερο από ό,τι τους υπόλοιπους. Παράλληλα το BOD<sub>5</sub> που είναι παράμετρος κλειδί για τον προσδιορισμό του ρυθμού βιοαποικοδόμησης του βιοαντιδραστήρα μειωνόταν. Η παραπάνω γραφική παράσταση δηλαδή επιβεβαιώνει το γεγονός της συσχέτισης μεταξύ καθίζησης και βιοαποικοδόμησης και για τον μελετούμενο εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα. Συγκεκριμένα η παρατηρούμενη καθίζηση μπορεί να αποδοθεί στην βιοαποδόμηση εφόσον σύμφωνα με τον M.Fadel (1998) το παραγόμενο CO<sub>2</sub> μπορεί να συσχετιστεί με οργανική μάζα ίση με την μέση καθίζηση που παρατηρείται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### Συμπεράσματα

Σύμφωνα με την μελέτη της αερόβιας λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα αποδόμησης στερεών αποβλήτων προέκυψαν τα εξής:

- ❖ Ο αερισμός του βιοαντιδραστήρα εξασφάλιζε το απαιτούμενο  $O_2$  στους αερόβιους μικροοργανισμούς βιοαποικοδόμησης. Για το διάστημα των οκτώ πρώτων μηνών η αύξηση στην παροχή του αέρα προκαλούσε αύξηση στον ρυθμό βιοαποικοδόμησης των οργανικών ρύπων ( $k_B$ ).
- ❖ Η μείωση του οργανικού κλάσματος του βιοαντιδραστήρα με την πάροδο του χρόνου ήταν καθοριστικός παράγοντας για τις αντιδράσεις βιοαποικοδόμησης. Για τον λόγο αυτό μετά τους οκτώ πρώτους μήνες λειτουργίας του συστήματος η μεταβολή της παροχής του εισερχόμενου αέρα δεν είχε επίδραση στον ρυθμό βιοαποικοδόμησης.
- ❖ Οι ρυθμοί βιοαποικοδόμησης των οργανικών ρύπων υπολογίστηκαν για κάθε εποχή του έτους μέσω περιοδικών τεστ αναπνοής. Τους καλοκαιρινούς μήνες η μικροβιακή δραστηριότητα ήταν στο μέγιστο ενώ τους χειμερινούς μήνες ήταν στο ελάχιστο της δυναμικότητας της. Το καλοκαίρι του 2005 ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης υπολογίστηκε ίσος με 2.13 mg/Kgday ενώ το χειμώνα του 2006 ήταν 1.22 mg/Kgday. Η μείωση αυτή οφείλεται στην μείωση του βιοαποικοδομήσιμου οργανικού κλάσματος του συστήματος αλλά και στις θερμοκρασιακές διαφορές των δυο εποχών.
- ❖ Το πρώτο τετράμηνο λειτουργίας του συστήματος το ύψος καθίζησης της απορριμματικής μάζας του βιοαντιδραστήρα ήταν 3.36cm κατά μέσο όρο. Το δεύτερο τετράμηνο λειτουργίας το μέσο ύψος καθίζησης αυξήθηκε κατά 1,71cm και το τελευταίο τετράμηνο η επιπλέον καθίζηση ήταν 1 cm. Σύμφωνα με την παρούσα μελέτη η καθίζηση συσχετίζεται με την βιοαποικοδόμηση. Η μέγιστη καθίζηση του σώματος των απορριμμάτων παρατηρήθηκε κατά το πρώτο τετράμηνο λειτουργίας που οι ρυθμοί βιοαποικοδόμησης ήταν μεγαλύτεροι.

- ❖ Η σχετική υγρασία των απορριμάτων διατηρήθηκε σε σταθερά επίπεδα καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Ο ρυθμός ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων ρυθμιζόταν με στόχο την διατήρηση της σχετικής υγρασίας σε εύρος 40-44%. Επιπλέον γινόταν προσθήκη κατάλληλης ποσότητας απιονισμένου νερού όταν η ανακυκλοφορία δεν επαρκούσε για την διατήρηση σταθερής στάθμης στο δοχείο αποθήκευσης των στραγγισμάτων.
- ❖ Τα BOD<sub>5</sub> και το COD των στραγγισμάτων μειώθηκαν κατά την διάρκεια της αερόβιας λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα σε ποσοστό 99.3% και 91% αντίστοιχα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η μεγαλύτερη μείωση αυτών των περαμέτρων πραγματοποιήθηκε μέσα στο πρώτο τετράμηνο της λειτουργίας. Συγκεκριμένα στο διάστημα αυτό παρατηρήθηκε 98% μείωση για το BOD<sub>5</sub> και 81% για το COD. Ο λόγος των δυο αυτών παραμέτρων (BOD<sub>5</sub>/COD) κατά την τελευταία μέτρηση ήταν 0.02. Η τιμή αυτή αποτελεί απόδειξη της σταθεροποίησης των παραγόμενων διασταλαγμάτων.
- ❖ Οι συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων που μετρήθηκαν στα στραγγίσματα ήταν σε χαμηλά επίπεδα και παρουσίαζαν μια μικρή τάση μείωσης.
- ❖ Η τοξικότητα των στραγγισμάτων προσδιορίστηκε με βάση τα περιοδικά τεστ τοξικότητας που πραγματοποιήθηκαν. Ελαφρά τοξικά ήταν τα στραγγίσματα για τους *Daphnia Magna*, σύμφωνα με τα τεστ τοξικότητας που πραγματοποιήθηκαν τον Απρίλιο και τον Αύγουστο του 2005. Τα LC<sub>50</sub> για τα τεστ αυτά υπολογίστηκαν ίσα με 76.8% και 80.8% αντίστοιχα. Η τοξικότητα των στραγγισμάτων οφείλεται στα σχετικά υψηλά επίπεδα COD εκείνων των περιόδων αλλά και στην παρουσία βαρέων μετάλλων σε αυτά. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δυο τελευταίων τεστ τοξικότητας που έλαβαν χώρα τον Νοέμβριο του 2005 και τον Φεβρουάριο του 2006 τα παραγόμενα στραγγίσματα ήταν ελάχιστα τοξικά για τους συγκεκριμένους μικροοργανισμούς. Το γεγονός της μείωσης της τοξικότητας των στραγγισμάτων οφείλεται κυρίως στην παρατηρούμενη μείωση του COD αλλά και στην μείωση των βαρέων μετάλλων.
- ❖ Η ολοκλήρωση της αερόβιας διεργασίας της νιτροποίησης στον βιοαντιδραστήρα, επιβεβαιωνόταν από την αύξηση της συγκέντρωσης των NO<sub>3</sub><sup>-</sup> και την μείωση της συγκέντρωσης των NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Επιπλέον, λόγω οξείδωσης των ενώσεων του θείου παρατηρήθηκε αύξηση στις συγκεντρώσεις των SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>.



❖ Σύμφωνα λοιπόν, με όλα τα παραπάνω, η νέα πολλά υποσχόμενη τεχνολογία διαχείρισης απορριμμάτων που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία δίνει ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Η κατάλληλη εισαγωγή αέρα στο σώμα των αποβλήτων και η ταυτόχρονη ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων είχε σαν αποτέλεσμα, την αποτελεσματική βιοαποικοδόμηση των οργανικών ρύπων και την σταθεροποίηση της απορριμματικής μάζας του βιοαντιδραστήρα σε διάστημα 17 μηνών.

## Προτάσεις

### Για την βελτιστοποίηση του συστήματος προτείνονται τα εξής:

- Ακριβής προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση των παραγόμενων υδρατμών με στόχο την βελτιστοποίηση του υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου.
- Σύστημα διαρκούς προσθήκης απιονισμένου νερού και όχι σχεδόν στιγμιαίας ώστε να αποφεύγεται η απότομη αραίωση των στραγγισμάτων.
- Μόνωση του βιοαντιδραστήρα ώστε να μην υπάρχει επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας ή του ηλεκτρικού φωτισμού στους αερόβιους μικροοργανισμούς. Επιπλέον μόνωση θα χρησίμευε και στην αποφυγή οποιασδήποτε ανταλλαγής θερμότητας του βιοαντιδραστήρα με το περιβάλλον.
- Υπολογισμός νιτροδών ιόντων και ολικού αζώτου με στόχο την ολοκληρωμένη μελέτη της νιτροποίησης.
- Υπολογισμός του διαλυμένου οξυγόνου για τον έλεγχο της ύπαρξης ή μή αερόβιων συνθηκών στο δοχείο αποθήκευσης των στραγγισμάτων.

### Για μελλοντική εργασία προτείνονται τα εξής:

- Προτείνεται ο σχεδιασμός και η λειτουργία εργαστηριακού αναερόβιου βιοαντιδραστήρα ίδιας σύστασης και ίδιου μεγέθους, ώστε να συγκριθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Η αναερόβια λειτουργία μπορεί είτε να περιλαμβάνει την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων είτε όχι. Με αυτό τον τρόπο θα γίνει σύγκριση του ρυθμού σταθεροποίησης της μάζας των αποβλήτων μεταξύ αερόβιου και αναερόβιου βιοαντιδραστήρα υπό ίδιες συνθήκες. Επιπλέον θα πραγματοποιηθεί έλεγχος της επίδρασης της ανακυκλοφορίας στην αναερόβια βιοαποικοδόμηση των απορριμάτων.
- Προτείνεται η συνέχιση της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα υπό αναερόβιες συνθήκες, με ή χωρίς ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Με αυτό τον τρόπο θα μελετηθεί η μελλοντική τύχη των μετρούμενων φυσικοχημικών παραμέτρων καθώς και η επιπλέον σταθεροποίηση του σώματος των αποβλήτων και ο ρυθμός με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτή. Μέσω της αναερόβιας λειτουργίας θα λάβουν χώρα αντιδράσεις που πιθανότατα θα έχουν επίδραση στην σύσταση των παραγόμενων στραγγισμάτων.

- Σχεδιασμός κατασκευή και λειτουργία ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων, μεγαλύτερης κλίμακας σε συνθήκες περιβάλλοντος με σκοπό την σύγκριση των αντιστοίχων αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό θα φανούν τα πρακτικά προβλήματα της τεχνολογίας του βιοαερισμού που στο εργαστήριο ήταν περιορισμένα. Επιπλέον θα έχουμε επίδραση των κλιματολογικών φαινομένων που θα επιδρούν καταλυτικά στην λειτουργία του βιοαντιδραστήρα.
- Προτείνεται η κατάλληλη επεξεργασία των παραγόμενων στραγγισμάτων ώστε να είναι δυνατή η διάθεση ή χρήση τους για εποικοδομητικό σκοπό.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ****Ελληνική βιβλιογραφία:**

1. Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., «Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών και υπογείων υδάτων από επικίνδυνους ρύπους», Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη, 2005
2. Γιδαράκος Ε., «Επικίνδυνα απόβλητα, Διαχείριση-Επεξεργασία-Διάθεση», Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη, 2006.
3. Γκούσκος Ζ., «Εκτίμηση ιδιοτήτων αστικών απορριμμάτων και ποσότητας διασταλαγμάτων που προκύπτουν από χώρο υγειονομικής ταφής, Μεταπτυχιακή διατριβή, Οκτώβριος 2005,
4. ΚΥΑ 69728/824/ ΦΕΚ 358/17-5-1996, Μέτρα και όροι για την διαχείριση των στερεών αποβλήτων.
5. Μακρυπόδης Γ., «Σχεδιασμός και εγκατάσταση εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα αποδόμησης στερεών αποβλήτων, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Ιανουάριος, 2005.
6. Μύρκου Κ., « Εξέλιξη ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των ΑΣΑ του Ν.Χανίων», Διπλωματική εργασία, Οκτώβριος 2006.
7. Ν.Νικολαΐδης, «Υδατική Χημεία Θεωρία -Μοντέλα- Εφαρμογές» Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 2005.
8. Ντζαμίλης Π., Χάβας Γ., «Ποιοτική και Ποσοτική Ανάλυση Αστικών Απορριμμάτων Περιφέρειας Κρήτης», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μάρτιος 2004.
9. Παναγιωτακόπουλος Δ. «Βιώσιμη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων», Εκδόσεις ΖΥΓΟΣ, 2002.
10. Σκορδίλης Α., «Ελεγχόμενη εναπόθεση Στερεών μη επικίνδυνων αποβλήτων», Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 2001.

## Ξένη βιβλιογραφία

- 1.B.Inanc, Y.Inoue, M.Yamada, Y.Ono και M.Kawasaki, Heavy metal leaching from aerobic and anaerobic landfill bioreactors of co-disposed municipal solid waste incineration bottom ash and shedded low-organic residues, 2005.
- 2.P.He, Z.Xiao,L.Shao, J. Yu, D.Lee, 2005, In situ distributions and characteristics of heavy metals in full-scale landfill layers.
- 3.J. K Oygard, E.Gjengedal, A. Mage, 2004, Mass balance estimation of heavy metals and selected anios at a landfill receiving MSWI bottom ash and mixed construction wastes.
- 4.Coelho, R. A., 2003. Facultative Bioreactor Landfill: An Environmental and Geotechnical Study., Ph.D Thesis. University of New Orleans.
- 5.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.
- 6.Kaiser, J., 1996. Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach., Ecological Modelling, 91, 25–37.
- 7.Reinhart, 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.
- 8.Reinhart, D. R., Townsend, T. G., 1997. Landfill Bioreactor Design and Operation., Lewis Publishers, New York, NY.
- 9.Reinhart, D., Townsend, T., 1998. Landfill Bioreactor Design and Operation., CRC Press.
10. Stessel, Murphy, 1992, A lysimeter study of the aerobic landfill concept.
11. Jeremy O'Brien, A summary of the SWANA Applied Research Foudation 's findings.
12. J. K Oygard, E.Gjengedal, A. Mage,Estimation of the mass balance of selected metals in four sanitary landfills in Western Norway with emphasis on the heavy metal content of the deposited waste and the leachate Water Res .
13. K.Kylefors, Division of waste Science &Technology LTU,2002 ,Predictions of leaching from MSW and measures to improve leachate management at landfills.

14. Ruo He and Dong-sheng Shen Nitrogen removal in the bioreactor landfill system with intermittent aeration at the top of landfilled waste, February, 2006.
15. E. W.Repa, October 2003, Bioreactor Landfills:Aviable Technology.
16. N.Themelis,Y.Kim, 2002, Material and energy balances in a large-scale aerobic bioconversion cell.
17. R. Cossu, A. Pivato, R. Raga, The mass balance :a supporting tool for a sustainable landfill management.
18. M.EL.Fadel, April 1998, Leachate recirculation effects on settlement and bioreactor rates in MSW Landfills.
19. G.le Roux Guidelines for leachate control.
20. Augenstein, D., Yazdani, R., Moore, R., Dahl, K., 1997. Yolo County Controlled Landfill Project, Proceedings SWANA Landfill Symposium.
21. Borglin, S. E., Hazen, 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.
22. 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.
23. K.Kylefors, LTU, 2002, Predictions of leaching from MSW and measures to improve leachate management at landfills.
24. Paris Honglay Chen, 1995, Assessment of leachates from sanitary landfills :Impact of age, rainfall and treatement.
25. A.Tatsi, 2002, A field investigation of the quantity and quality of leachate from the municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate, (Thessaloniki,Greece)
26. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., 1993. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, Irwin McGraw-Hill.
27. U.S. EPA., 2002. State of the Practice for Bioreactor Landfills. EPA Publication, EPA/625/R-01/012.
28. B. Mertoglu, B. Calli, B. Inanc, I. Ozturk, June 2006, Evaluation of in situ ammonia removal in an aerated landfill bioreactor.

29. N. D.Berge, Debra R.Reinhart, John Dietz, Tim Townsend, February 2006, In situ ammonia removal in bioreactor landfill leachate.
30. Leeson, A., Hinchee, R. E., 1996, Principles and practices of bioventing. Volume II Bioventing design.
31. M. Ritzkowski, K.-U. Heyer b, R. Stegmann, 2006, Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills.
32. M. Ritzkowski, M. Schlegelmilch, R. Stegmann, I. Kö rner\*, J. Braukmeier, J. Herrenklage, K. Leikam. Investigation and optimization of composting processes test systems and practical examples,2002.
33. March, J.,Hudgins, M., Chauhan, S.Hazen, T.,2001. Successful Implementation of an Aerobic Landfill Bioreactor.
34. Sowers, G. F., 1973. Settlement of Waste Disposal Fills.,Proceedings Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foudation Engineering.
35. M.Ritzkowski., R. Stegmann, 2005, Mechanisms affecting the leachate quality in the course of landfill in situ aeration. Proceedings Tenth International Waste management and landfill Syposium.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΠΙΝΑΚΕΣ

Ακολουθούν οι πίνακες με τα πειραματικά δεδομένα:

Πίνακας Ι-1 :Μέσες μηνιαίες τιμές μετρούμενων παραμέτρων

Μήνας	Tair (°C)	Pair (KPa)	Tin (°C)	RH (%)	Tenv (°C)
Ιανουάριος 2005	14,5	99,7	18,5	40,0	17,8
Φεβρουάριος	16,1	100,2	17,7	40,5	19,1
Μάρτιος	17,2	100,4	18,8	43,0	20,7
Απρίλιος	16,9	100,5	20	41,4	20,2
Μαΐος	20,1	100,5	21,7	43,0	23,6
Ιούνιος	21,2	100,3	22,7	45,0	25,0
Ιούλιος	23,1	99,8	24,6	44,0	27,2
Αύγουστος	23,6	100,0	25,3	45,1	27,3
Σεπτέμβριος	23,7	100,7	23,8	44,8	27,3
Οκτώβριος	21,8	101,3	21,8	44,1	24,9
Νοέμβριος	18,6	100,5	19,1	44,0	22,0
Δεκέμβριος	17,6	101,1	17,5	45,0	21,3
Ιανουάριος 2006	15,6	100,8	15,5	43,0	18,4
Φεβρουάριος	18,0	100,4	20,0	40,0	20,0
Μάρτιος	18,9	100,3	19	42	20,5
Απρίλιος	20	100,1	19,4	41	20,8



**Πίνακας Ι-2: Μετρήσεις pH, οξειδοαναγωγικό δυναμικό, αγωγιμότητα, θερμοκρασία στραγγισμάτων**

<b>Ημερομηνία</b>	<b>pH</b>	<b>Redox(mv)</b>	<b>Αγωγιμότητα(ms)</b>	<b>Τστραγ</b>
28/12/2004	8,15	-48	11	<b>20</b>
10/1/2005	8,35	-49	10	<b>19</b>
10/2/2005	8	50	9	<b>21</b>
20/2/2005	6,66	213	6	24
26/2/2005	7,15	230	8,95	22
5/3/2005	7,45	324	12	25
9/3/2005	8,35	287	13,63	21
27/3/2005	8,17	279	14	22
6/4/2005	8,06	168	13,9	22,1
10/4/2005	8,1	180	15	23
18/4/2005	8,17	212	15,93	23
10/5/2005	8,1	245	12,6	20
25/5/2005	8,15	250	14,99	22
12/6/2005	8,2	210	16	21,5
22/6/2005	8,15	235	14,7	21
8/7/2005	8,5	250	14,99	22
21/8/2005	8	238	10,04	23
13/9/2005	8,2	258	20	22
25/9/2005	8,05	255	17,91	21,3
7/10/2005	8	190	15	23
20/10/2005	8,1	95	16	22,3
8/11/2005	8,05	100	18	21
25/11/2005	8,1	234	9,18	19,8
6/12/2005	8,2	220	12	19,8
22/12/2005	8,25	210	11,6	20
10/1/2006	8	198	10	20
21/1/2006	7,99	209	7,77	19
8/2/2006	8,2	105	7,88	18,9
19/2/2006	8,15	150	9	20
9/3/2006	8	200	12	21
20/3/2006	8,06	245	15	22
14/4/2006	8	220	15,6	20

Πίνακας Ι-3: COD και BOD<sub>5</sub> στραγγισμάτων βιοαντιδραστήρα

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	Μέτρηση COD(mg/l)	Μέτρηση BOD (mg/l)	BOD <sub>5</sub> /COD	Qair (L/min)	RPM
19/11/2004	3762	1050	0,279		
20/12/2004	730	180	0,247	8,5	8
21/1/2005	710	15	0,021	8,5	8
22/2/2005	700	11	0,011	8,5	8
15/3/2005	680	12	0,006	15	15
10/4/2005	630	12	0,010	15	15
17/5/2005	600	9	0,015	15	15
20/6/2005	576	8	0,014	15	15
24/7/2005	570	8	0,014	20	15
27/8/2005	544	11	0,021	20	25
25/9/2005	592	10	0,016	20	25
26/10/2005	426	9	0,019	20	25
25/11/2005	373	8	0,021	30	25
16/12/2005	429	8	0,031	30	25
21/1/2006	550	7	0,013	30	25
10/2/2006	484	7	0,014	20	35
12/3/2006	418	7	0,017	20	35
12/4/2006	352	7	0,020	20	35

**Πίνακας Ι-4 :Συγκέντρωση αμμωνιακών  
και νιτρικών, φωσφορικών και θειικών ιόντων στα στραγγίσματα**

<b>ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ</b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/L)</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P (mg/L)</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>-3</sup> (mg/L)</b>
9/1/2005	719	6	1,8	985
6/2/2005	500	10	1,95	1055
03/03/05	350	12	2	1100
04/04/05	150	12,6	2,1	1155
10/05/05	50	19	2,2	1160
13/06/05	35	28	2,5	1140
24/07/05	22	30	2,8	1200
21/08/05	3,8	33	2,7	1350
25/09/05	2,3	32	2,5	1575
26/10/05	4	30	1,78	1600
25/11/05	3	28	1,69	1650
16/12/05	3,9	24	1,75	1700
21/01/06	2,5	15,3	1,61	1650
10/02/06	3,3	12	1,5	1500
12/03/06	2	11	1,59	1450
14/4/2006	2	10,5	1,75	1400

**Πίνακας Ι-5: Υδατικό ισοζύγιο βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων**

Ημερομηνία μέτρησης	$Q_{air}$	RPM	$Q_{in}$ (L/d)	$Q_{inH2O}$ (L/d)	$Q_b$ (L/d)	$Q_{gas}$ (L/d)	$Q_{waste}$ (L/d)	$Q_{out}$ (L/d)
5/1/2005	8	8,5	2,9	0,25	1,2	0,2	1,25	2,9
6/2/2005	8	8,5	2,9	0,25	1,2	0,2	1,25	2,9
5/3/2005	15	15	5,8	0,25	2,35	0,2	2,4	5,8
4/4/2005	15	15	5,8	0,25	2,35	0,2	2,4	5,8
5/5/2005	15	15	5,8	0,25	2,35	0,2	2,4	5,8
13/6/2005	20	15	5,8	0,25	2,35	0,2	2,4	5,8
24/7/2005	20	25	9,2	0,5	3,23	0,2	3,73	9,2
21/8/2005	20	25	9,2	0,5	3,23	0,2	3,73	9,2
25/9/2005	20	25	9,2	0,5	3,23	0,2	3,73	9,2
26/10/2005	30	25	9,2	0,5	3,23	0,2	3,73	9,2
25/11/2005	30	25	9,2	0,5	3,23	0,2	3,73	9,2
16/12/2005	30	25	9,2	0,5	3,23	0,2	3,73	9,2
21/1/2006	20	35	12,8	0,7	4,67	0,2	5,15	12,8
10/2/2006	20	35	12,8	0,7	4,67	0,2	5,15	12,8
12/3/2006	20	35	12,8	0,7	4,67	0,2	5,15	12,8
13/4/2006	20	35	12,8	0,7	4,67	0,2	5,15	12,8

Πίνακας Ι-6: 1<sup>ο</sup> Test αναπνοής-Απρίλιος 2005 και 2<sup>ο</sup> Test αναπνοής-Αύγουστος 2005.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	Χρόνος (hr)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
6/4/2005	0	0,2	20,9	8/8/2005	0,2	20,9
6/4/2005	5	0,4	20,8	8/8/2005	0,4	20,7
6/4/2005	12	0,6	20,6	8/8/2005	0,6	20,3
7/4/2005	24	0,8	20,6	9/8/2005	0,8	20
7/4/2005	29	1	20,4	9/8/2005	1	19,8
7/4/2005	35	1,2	20,2	9/8/2005	1,2	19,6
8/4/2005	48	1,6	20	10/8/2005	1,2	19,2
8/4/2005	54	2	19,8	10/8/2005	1,4	19
8/4/2005	60	2	19,6	10/8/2005	1,4	18,8
9/4/2005	73	2,4	19,2	11/8/2005	1,6	18,6
9/4/2005	79	2,4	19	11/8/2005	1,8	18,2
9/4/2005	83	2,6	18,6	11/8/2005	2	18
10/4/2005	96	2,8	18,4	12/8/2005	2,4	17,8
10/4/2005	103	2,8	18	12/8/2005	2,6	17,8
10/4/2005	107	3	17,8	12/8/2005	2,6	17,6
11/4/2005	119	3,5	17,6	13/8/2005	2,8	17,4
11/4/2005	124	3,5	17,4	13/8/2005	3	17
11/4/2005	132	4	17,4	13/8/2005	3,5	16,8

Πίνακας Ι-7: 3<sup>ο</sup> Test αναπνοής-Νοέμβριος 2005 και 4<sup>ο</sup> Test αναπνοής-Φεβρουάριος 2006.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	Χρόνος (hr)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
18/11/2005	0	0,2	21	10/2/2005	0,2	20,9
18/11/2005	4	0,4	20,9	10/2/2005	0,4	20,6
18/11/2005	11	0,6	20,6	10/2/2005	0,6	20,8
19/11/2005	24	0,6	20,4	11/2/2005	0,6	20,4
19/11/2005	32	0,8	20,3	11/2/2005	0,8	20,5
19/11/2005	35	0,8	20,2	11/2/2005	1	20
20/11/2005	49	1	20	12/2/2005	1	20
20/11/2005	55	1,4	19,8	12/2/2005	1,2	19,8
20/11/2005	59	1,6	19,6	12/2/2005	1,4	19,8
21/11/2005	73	2	19,2	13/2/2005	1,6	19,6
21/11/2005	79	2,2	19	13/2/2005	1,8	19,4
21/11/2005	83	2,4	19	13/2/2005	2	19,4
22/11/2005	97	2,6	18,8	14/2/2005	2	19,2
22/11/2005	103	2,2	18,8	14/2/2005	2,2	19
22/11/2005	107	2,6	18,6	14/2/2005	2,6	19
23/11/2005	119	2,8	18,4	15/2/2005	2,8	18,8
23/11/2005	124	3,5	18,4	15/2/2005	3	18,8
23/11/2005	132	4	18	15/2/2005	3	18,6

Πίνακας Ι-8: Συγκεντρώσεις βαρέων μεταλλών- Δεκέμβριος 2004

Ονομασία	Συμβολισμός	Απορρόφηση	Συγκέντρωση	Μονάδες
Νικέλιο	Ni	0,2408	88,851	ppb
Κάδμιο	Cd	0,041	4,064	ppb
Μόλυβδος	Pb	0,032	54,972	ppb
Αρσενικό	As	0,041	9,299	ppb
Ψευδάργυρος	Zn	0,8034	9,436	ppm
Μαγνήσιο	Mg	1,34	57,643	ppm

Πίνακας Ι-9: Συγκεντρώσεις βαρέων μεταλλών-Ιούλιος 2005

Ονομασία	Συμβολισμός	Απορρόφηση	Συγκέντρωση	Μονάδες
Νικέλιο	Ni	0,2805	1.25	ppb
Κάδμιο	Cd	-	1.25	ppb
Μόλυβδος	Pb	-	17.075	ppb
Αρσενικό	As	0,041	1.885	ppm
Ψευδάργυρος	Zn	0,057	1.25	ppm
Μαγνήσιο	Mg	1,767	43.75	ppm

Πίνακας Ι-10: Συγκεντρώσεις βαρέων μεταλλών-Δεκέμβριος 2005

Ονομασία	Συμβολισμός	Απορρόφηση	Συγκέντρωση	Μονάδες
Νικέλιο	Ni	0,2805	<1	ppb
Κάδμιο	Cd	-	<1	ppb
Μόλυβδος	Pb	-	<1	ppb
Αρσενικό	As	-	2	ppm
Ψευδάργυρος	Zn	0,055	5	ppb
Μαγνήσιο	Mg	1,319	10,8	ppm

Πίνακας Ι-11: Συγκεντρώσεις χρωμίου και βρωμίου.

Ημερομηνία μέτρησης	Συγκέντρωση Cr(mg/l)	Br <sub>2</sub> (mg/L)
5/2005	0,33	
6/2005	0,27	4.79
7/2005	0,20	3
8/2005	0,15	2.4
9/2005	0,13	2
10/2005	0,05	1.2
11/2005	0,09	0.99
12/2005	0,04	1.14
1/2006	0,06	0.6
2/2006	0,03	0.91
3/2006	0,08	0.26
4/2006	0,08	0.39

Πίνακας Ι-12: Καθίζηση σώματος απορριμμάτων, από το αρχικό ύψος, για το διάστημα λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα

Σημείο παρατήρησης	Ύψος καθίζησης			
	Αρχικό ύψος	Μετά από 4 μήνες	Μετά από 8 μήνες	Μετά από 16 μήνες
1	23,5	4	5,5	6,5
2	22	3,5	4,5	6
3	21	3	4,5	5
4	24	2,5	6	7
5	22,5	3,5	5,5	6,5
6	24	3	4	5
7	25	4	5,5	6,5
	<b>23,14</b>	<b>3,36</b>	<b>5,07</b>	<b>6,07</b>

Το ύψος καθίζησης μετράται κάθε φορά από το αρχικό ύψος.



Πίνακας Ι-13:1<sup>ο</sup> τεστ τοξικότητας Άνοιξη 2005

Αριθμός Νεκρών οργανισμών						Ποσοστό θανάτωσης %
Δείγμα	A	B	Γ	Δ	M.O	
Τυφλό	0	0	0	0	0	0
A (100%)	5	5	5	5	1	100
B 75%)	3	2	1	2	0,4	40
Γ 50%)	1	1	1	1	0,2	20
Δ (25%)	1	0	1	0	0,1	10
E (10%)	0	0	1	0	0,05	5

Πίνακας Ι-14:2<sup>ο</sup> τεστ τοξικότητας Καλοκαίρι 2005

Αριθμός Νεκρών οργανισμών						Ποσοστό θανάτωσης %
Δείγμα	A	B	Γ	Δ	M.O	
Τυφλό	0	0	0	0	0	0
A(100%)	5	5	5	4	0,95	95
B 75%)	1	4	1	3	0,45	30
Γ 50%)	4	2	0	0	0,3	15
Δ (25%)	0	0	0	1	0,05	5
E (10%)	0	0	0	0	0	0

Πίνακας Ι-15:Πειραματικά αποτελέσματα 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> τεστ τοξικότητας ,Φθινόπωρο 2005- Χειμώνας 2006

Αριθμός Νεκρών οργανισμών							Αριθμός Νεκρών οργανισμών							
3 <sup>ο</sup> τεστ							4 <sup>ο</sup> τεστ							
Δείγμα							Α							Β
Τυφλό	0	0	0	0	0	0	Τυφλό	0	0	0	0	0	0	0
Α(100%)	2	1	3	2	0,4	40	Α(100%)	2	1	2	2	0,35	35	
Β 75%)	2	0	2	1	0,3	30	Β 75%)	1	2	1	1	0,25	25	
Γ 50%)	1	0	0	1	0,1	10	Γ 50%)	0	0	0	1	0,05	5	
Δ (25%)	0	0	0	0	0	0	Δ (25%)	0	0	0	0	0	0	
Ε (10%)	0	0	0	0	0	0	Ε (10%)	0	0	0	0	0	0	

Πίνακας Ι-16:Βαθμονόμηση αντλίας ανακυκλοφορίας

RPM	V(ml)	t(sec)	Q(ml/s)	Q(l/d)
8	10	292	0.034	2.9376
15	10	149	0.067	5.788
25	10	96	0.104	8.9856
40	10	59	0.17	14.688
50	10	47	0.213	18.4032
65	10	36	0.278	24.0192
70	10	34	0.294	25.402
80	10	34	0.330	28.512

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ



Εικόνα II-1: Ολική άποψη αερόβιου βιοαντιδραστήρα- Ιανουάριος 2005



Εικόνα II-2: Βιοαντιδραστήρας στερεών αποβλήτων -Φεβρουάριος 2006



**Εικόνα Π-3: Βιοαντιδραστήρας στερεών αποβλήτων**



**Εικόνα Π-4: Κεντρικός σωλήνας διασποράς στραγγισμάτων**



**Εικόνα Π-5: Απορριμματική μάζα βιοαντιδραστήρα -Ιανουάριος 2005**



**Εικόνα Π-6: Απορριμματική μάζα βιοαντιδραστήρα -Φεβρουάριος 2006**





**Εικόνα II-7: Αντλία ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων**



**Εικόνα II-8: Δοχείο αποθήκευσης στραγγισμάτων**



**Εικόνα II-9: Θερμοαντιδραστήρας και φωτόμετρο**



**Εικόνα II-10: Σύστημα αερισμού βιοαντιδραστήρα**

