



**ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ**

## **ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΧΩΡΩΝ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ**

**Επιμέλεια**  
**Κων/νος Τσαγκαράκης**



**ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ  
ΤΜΗΜΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ**

## **ΒΙΟΕΞΥΓΙΑΝΣΗ ΧΩΡΩΝ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ**

**Επιμέλεια  
Τσαγκαράκης Κων/νος**

**Συγγραφείς  
Αποστολάκη Μαρία  
Γενειατάκης Εμμανουήλ  
Διαλυνάς Εμμανουήλ  
Κεσανάκης Γεώργιος  
Μακρυπόδης Γεώργιος  
Μαυράκης Εμμανουήλ  
Μυρίλλα Αγγελική  
Τζαγκαράκη Ευαγγελία  
Χάβας Γεώργιος**

Οι συγγραφείς είναι υπεύθυνη ο καθένας για το κεφάλαιο που έχει συγγράψει.  
Το παρόν εγχειρίδιο και οι απόψεις των συγγραφέων δεν εκφράζουν κατά  
ανάγκη το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.

© ΤΕΕ/ΤΑΚ, 2005

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ ΤΜΗΜΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ  
Πρεβελάκη & Γρεβενών 71202  
Ηράκλειο Κρήτης  
Τηλ.: 2810-301442  
Fax: 2810 281128  
Email: [teetak@tee.gr](mailto:teetak@tee.gr)

ISBN 960-88711-1-5

# 1. Γενικές Αρχές Βιοεξυγίανσης / Βιοαποκατάστασης

**Γενειατάκης Εμμανουήλ**

Μηχανικός Περιβάλλοντος, M.Sc

## 1.1. Θεωρητικό υπόβαθρο βιοεξυγίανσης

### 1.1.1. Εισαγωγή

Η βιοεξυγίανση (bioremediation) είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της καταστροφής των ρυπαντών που βρίσκονται στο έδαφος, σε ιλύες ή στο υπόγειο νερό, μέσω βιολογικών μηχανισμών, με τη βοήθεια μικροοργανισμών (όπως μύκητες ή βακτήρια). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ενεργοποίηση των μικροοργανισμών, ώστε να αναπτυχθούν και να χρησιμοποιήσουν τους ρυπαντές ως πηγή ενέργειας και τροφής, με τη δημιουργία ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος. Γενικά, αυτό περιλαμβάνει τη συνδυαστική χρήση οξυγόνου, θρεπτικών ουσιών και υγρασίας με ταυτόχρονο έλεγχο της θερμοκρασίας και του pH.

Έχει αποδειχθεί ότι οι περισσότεροι οργανικοί ρυπαντές, φυσικοί και συνθετικοί, μπορούν να αποδομηθούν από μικροοργανισμούς, είτε από την απευθείας χρήση τους ως πηγή άνθρακα και ενέργειας, είτε μέσω διεργασιών συμμεταβολισμού (Freeman, 1997). Μετά την αποδόμηση των ρυπαντών, οι πληθυσμοί των μικροοργανισμών πεθαίνουν, έχοντας καταναλώσει όλη την πηγή τροφής τους. Η βιοεξυγίανση στηρίζεται είτε σε αυτόχθονους μικροοργανισμούς (αυτοί που υπάρχουν φυσικά στο πεδίο) είτε σε εξωγενείς μικροοργανισμούς (αυτοί που εισάγονται στο πεδίο). Σε κάθε περίπτωση, οι τεχνολογίες βιοεξυγίανσης βελτιστοποιούν τις συνθήκες του περιβάλλοντος, έτσι ώστε οι κατάλληλοι μικροοργανισμοί να αναπτυχθούν και να καταστρέψουν την πλειονότητα των ρυπαντών.

### 1.1.2. Μέθοδοι βιοεξυγίανσης

Με βάση την καταλληλότητα των μικροοργανισμών ή των περιβαλλοντικών συνθηκών, η βιοεξυγίανση μπορεί να χωριστεί στην εγγενή βιοεξυγίανση (intrinsic bioremediation), στη βιοδιέγερση (biostimulation), και στην βιοαύξηση (bioaugmentation). Και οι τρεις μέθοδοι βασίζονται στους μικροοργανισμούς για την αποδόμηση των ρυπαντών στο έδαφος ή στο υπόγειο νερό (Freeman, 1997).

Στην εγγενή βιοεξυγίανση, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και ο κατάλληλος τύπος και αριθμός μικροοργανισμών βρίσκονται στο πεδίο. Η μέθοδος αυτή είναι μια μορφή φυσικής εξυγίανσης, καθώς δεν προστίθεται οξυγόνο, υγρασία ή μικροοργανισμοί. Οι διεργασίες φυσικής εξυγίανσης συμβαίνουν ανεξαρτήτως εξωτερικής παρέμβασης, με την προϋπόθεση ότι τα μικρόβια δεν επηρεάζονται από την τοξικότητα και ότι υπάρχουν οι απαιτούμενες θρεπτικές ουσίες και οι δέκτες ηλεκτρονίων στο πεδίο. Η μέθοδος αυτή είναι οικονομικότερη σε σχέση με τις άλλες, αλλά και πιο βραδεία. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται αξιολόγηση και παρακολούθηση του πεδίου, ώστε να διασφαλίζεται εγγενής βιοεξυγίανση σε επίπεδα ικανά να καταστρέψουν τους ρυπαντές.

Εάν οι κατάλληλοι μικροοργανισμοί υπάρχουν στο πεδίο, αλλά οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι επαρκείς ή απαιτείται πιο ταχεία εξυγίανση της περιοχής, εφαρμόζεται η μέθοδος της βιοδιέγερσης. Στη μέθοδο αυτή, προστίθενται θρεπτικές ουσίες (άζωτο και φώσφορος) και

δέκτες ηλεκτρονίων, όπως για παράδειγμα οξυγόνο, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες των μικροοργανισμών για να μεγιστοποιηθεί η ικανότητα των μικροοργανισμών για αποδόμηση.

Η βιοαύξηση είναι η προσθήκη μη-αυτοχθόνων μικροοργανισμών στις διεργασίες της βιοεξυγίανσης, έτσι ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός της αποδόμησης των ρυπαντών. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν ειδικοί οργανισμοί αποδόμησης ανάλογα με το είδος της ρύπανσης. Ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορισμένα είδη που υπάρχουν στη φύση ή και στην ίδια την περιοχή, αφού παραχθούν σε μεγάλες ποσότητες σε ειδικές συσκευές ζύμωσης. Η μέθοδος αυτή έχει τα καλύτερα αποτελέσματα με τη χρήση βιοαντιδραστήρων, που οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι ελεγχόμενες. Τυπικά, οι οργανισμοί που εισάγονται στο περιβάλλον δεν μπορούν να συναγωνιστούν τους αυτόχθονους μικροοργανισμούς, με αποτέλεσμα να πεθαίνουν πριν αποδομήσουν μεγάλη ποσότητα του ρυπαντή. Συνεπώς, απαιτείται η διαμόρφωση κατάλληλων περιβαλλοντικών συνθηκών που θα ευνοούν τους εισαγόμενους μικροοργανισμούς, διαδικασία που απαιτεί υψηλό κόστος.

### 1.1.3. Συνθήκες προώθησης της βιοεξυγίανσης

Η βιοεξυγίανση μπορεί να λάβει χώρα κάτω από αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες. Κάτω από αερόβιες συνθήκες οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν οξυγόνο για να δράσουν. Στην υπεδάφεια επεξεργασία το οξυγόνο είναι συνήθως ο περιοριστικός παράγοντας της βιολογικής δραστηριότητας και όσο οξυγόνο υπάρχει καταναλώνεται άμεσα. Συνεπώς, πρέπει να εισαχθεί μοριακό οξυγόνο από την επιφάνεια με παθητικό αερισμό, είτε μέσω πηγαδιών στον βιοαερισμό (bioventing), είτε μέσω ψεκασμού στο υπόγειο νερό (biosparging). Μια άλλη πηγή οξυγόνου μπορεί να είναι το υπεροξείδιο του υδρογόνου ( $H_2O_2$ ). Το πλεονέκτημά του είναι η υψηλή του διαλυτότητα στο νερό σε σύγκριση με το μοριακό οξυγόνο.

Στις αναερόβιες συνθήκες, δεν υπάρχει οξυγόνο και οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν άλλους δέκτες ηλεκτρονίων, όπως νιτρικά ( $NO_3^-$ ), σίδηρο ( $Fe^{3+}$ ), μαγγάνιο ( $Mn^{2+}$ ), θειικά ( $SO_4^{2-}$ ). Όπου είναι εφικτό, προτιμάται η αερόβια επεξεργασία (Freeman, 1997) επειδή:

- Οι οργανικές ενώσεις, γενικά, αποδομούνται πλήρως σε  $CO_2$  και νερό, ενώ η αναερόβια αποδόμηση δεν είναι πλήρης.
- Η αερόβια αποδόμηση είναι γρηγορότερη από την αναερόβια.
- Κατά την αερόβια αποδόμηση δημιουργούνται λιγότερες οσμές, και συσσωρεύονται λιγότερα ενδιάμεσα προϊόντα.

Μερικές φορές όμως, προτιμάται η αναερόβια αποδόμηση όπως στην περίπτωση παρουσίας τετραχλωροαιθυλενίου (PCE) στο πεδίο, το οποίο δεν αποδομείται κάτω από αερόβιες συνθήκες.

### 1.1.4. Διαφορές *in situ* και *ex situ* βιοεξυγίανσης

Οι διεργασίες της βιοεξυγίανσης μπορεί να είναι *in situ* ή *ex situ* (Πίνακας 1). Στην *in situ* βιοεξυγίανση, το ρυπασμένο έδαφος ή νερό υφίσταται επεξεργασία εκεί όπου βρίσκεται. Στην *ex situ* βιοεξυγίανση, το ρυπασμένο έδαφος ή νερό υφίσταται επεξεργασία αφού μεταφερθεί σε άλλη περιοχή. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της *in situ* βιοεξυγίανσης είναι:

- χαμηλό κόστος,
- μόνιμη καταστροφή των ρυπαντών,
- εξάλειψη πιθανότητας μακροπρόθεσμου κινδύνου,
- ελάχιστη ενόχληση στην περιοχή,
- εξάλειψη του κόστους μεταφοράς και της επικινδυνότητας που περικλείει,

- κοινωνικά αποδεκτή τεχνολογία και
- χρησιμοποίηση της σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα της *in situ* βιοεξυγίανσης είναι:

- μερικές ουσίες δεν αποδομούνται στο πεδίο, ή αποδομούνται πολύ αργά,
- οι υδροφοβικές ενώσεις δεν είναι βιοδιαθέσιμες,
- δύσκολη επίτευξη των ορίων που καθορίζει η νομοθεσία,
- πιθανή παραγωγή επικίνδυνων παραπροϊόντων και
- απαιτούνται επιστημονικά πειράματα για τη δυνατότητα επίτευξης της βιοεξυγίανσης, επιστημονικός σχεδιασμός και λειτουργία της τεχνολογίας.

**Πίνακας 1.** Συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων βιοεξυγίανσης

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

### 1.1.5. Δημιουργία επιστρώσεων

Ένα μεγάλο πρόβλημα της *in situ* βιοεξυγίανσης είναι η δημιουργία επιστρώσεων (Fouling), είτε με χημικό είτε με βιολογικό τρόπο. Στο σημείο εισαγωγής των θρεπτικών ουσιών και του οξυγόνου στο υπέδαφος, οι μικροοργανισμοί μπορούν να αναπτύσσονται σε βέλτιστες

συνθήκες, προκαλώντας φράξιμο των φίλτρων στα πηγάδια εισαγωγής (injection well screens). Μια μέθοδος για την ελάττωση της βιολογικής δημιουργίας επιστρώσεων είναι η εισαγωγή θρεπτικών ουσιών και οξυγόνου σε διαφορετικές ή/και εναλλασσόμενες χρονικές στιγμές, ώστε να μην δημιουργούνται βέλτιστες συνθήκες στο σημείο εισαγωγής. Η μέθοδος αυτή απαιτεί καλή πληροφόρηση για την υδραυλική ροή, ώστε τα διαστήματα εισαγωγής να είναι σωστά συγχρονισμένα.

#### 1.1.6. Παράγοντες που επηρεάζουν τη δραστηριότητα των μικροβίων

Οι μικροοργανισμοί μπορούν να απομονωθούν σχεδόν από όλες τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα μικρόβια μπορούν να αναπτυχθούν και να προσαρμοστούν ακόμη και σε θερμοκρασίες κάτω του μηδενός, όπως επίσης και σε υψηλές θερμοκρασίες, σε συνθήκες ερήμου, μέσα στο νερό, με περίσσεια οξυγόνου ή σε αναερόβιες συνθήκες, παρουσία τοξικών συστατικών κ.α. Οι κύριες απαιτήσεις είναι σε ενέργεια και σε άνθρακα. Οι μικροοργανισμοί μπορούν να καταταχθούν στις ακόλουθες ομάδες (Vidali, 2001):

- Αερόβιοι (παρουσία οξυγόνου). Χαρακτηριστικά παραδείγματα μικροοργανισμών με αναγνωρισμένες δυνατότητες για αποδόμηση οργανικών ενώσεων είναι οι *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Sphingomonas*, *Rhodococcus* και *Mycobacterium*. Γι' αυτές τις ομάδες μικροβίων υπάρχουν πολλές αναφορές για διάσπαση μικροβιοκτόνων και υδρογονανθράκων, αλκανίων και πολυαρωματικών. Τα περισσότερα από αυτά τα βακτήρια χρησιμοποιούν τις ενώσεις σαν πηγή άνθρακα και ενέργειας.
- Αναερόβιοι (απουσία οξυγόνου). Τα αναερόβια βακτήρια δεν χρησιμοποιούνται το ίδιο συχνά με τα αερόβια. Υπάρχει όμως αυξητική τάση στην χρησιμοποίησή τους για διάσπαση των πολυχλωριωμένων διφαινυλίων (PCBs) στα ιζήματα ποταμών, για αποχλωρίωση του τριχλωροαιθυλενίου (TCE) και του χλωροφορμίου.
- Ligninolytic fungi. Μύκητες όπως ο *Phanaerochaete chrysosporium* έχουν την ιδιότητα να αποδομούν ένα μεγάλο εύρος ισχυρά τοξικών ρύπων. Τα πιο συνήθη υποστρώματα που χρησιμοποιούνται είναι το άχυρο και ο κώνος καλαμποκιού.
- Μεθυλότροφοι μικροοργανισμοί. Πρόκειται για αερόβια βακτήρια που αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας μεθάνιο σαν πηγή άνθρακα και ενέργειας. Το αρχικό ένζυμο στην πορεία για αερόβια αποικοδόμηση, η μονοξυγενάση του μεθανίου, έχει μεγάλο εύρος υποστρωμάτων στα οποία εμφανίζεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους ρύπους, μεταξύ των οποίων οι χλωριωμένοι αλιφατικοί υδρογονάνθρακες TCE και 1,2 DCE.

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

Το έδαφος περιέχει ένα μεγάλο αριθμό μικροοργανισμών, που συμπεριλαμβάνει αερόβια και αναερόβια βακτήρια, μύκητες και πρωτόζωα (Freeman, 1997). Οι μικροοργανισμοί έχουν συνήθως μεγάλες διαφορές στις φυσιολογικές τους ικανότητες και στις ικανότητες αποδόμησης και ο αριθμός τους μπορεί να φτάσει τους 10<sup>5</sup> μικροοργανισμούς ανά γραμμάριο εδάφους. Για να μπορούν αυτοί οι μικροοργανισμοί να βοηθήσουν στις διεργασίες της βιοεπεξεργασίας, το φυσικό τους περιβάλλον πρέπει να είναι κατάλληλο. Αυτό περιλαμβάνει:

- χαμηλή τοξικότητα της περιοχής,
- διαθεσιμότητα της αναγκαίας ποσότητας νερού,
- παρουσία των αναγκαίων δεκτών ηλεκτρονίων,
- ύπαρξη θρεπτικών όπως άζωτο και φώσφορος,
- το pH να βρίσκεται σε φυσιολογικά επίπεδα,
- η θερμοκρασία να βρίσκεται σε φυσιολογικά επίπεδα και
- το υπόστρωμα να είναι βιοδιαθέσιμο.

### **Τοξικότητα**

Πολλές οργανικές ενώσεις που θεωρούνται τοξικές μπορούν να βιοαποικοδομηθούν αν οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι κατάλληλες και η συγκέντρωση του υποστρώματος είναι τόσο χαμηλή ώστε να μην σκοτώσει ή να παρεμποδίσει τα μικρόβια. Ο καλύτερος τρόπος για να βρεθεί αν η περιοχή είναι πολύ τοξική για βιοεπεξεργασία είναι η διεξαγωγή δοκιμών τοξικότητας. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων για τη μέτρηση της τοξικότητας, συμπεριλαμβανομένων δοκιμών θνησιμότητας και τυποποιημένων σετ δοκιμών, όπως το Microtox®, στο οποίο χρησιμοποιούνται φωτοβόλα βακτήρια ως μικροοργανισμούς δείκτες.

### **Νερό**

Το νερό είναι απαραίτητο για τη μικροβιακή δραστηριότητα. Στην πραγματικότητα, σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις νερού (κάτω από 15% κατ' όγκο), τα βακτήρια που δεν σχηματίζουν σπόρια δεν επιζούν. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό της ικανότητας συγκράτησης νερού από το έδαφος. Η ικανότητα συγκράτησης νερού που κυμαίνεται από 25 – 100% είναι ισοδύναμη με 7 – 28% κατ' όγκο. Αν το έδαφος είναι κορεσμένο (πάνω από 35% κατ' όγκο) η διάχυση του οξυγόνου είναι περιορισμένη. Αν οι διεργασίες της βιοαποικοδόμησης απαιτούν αναερόβιες συνθήκες, το κορεσμένο έδαφος είναι αποδεκτό, αλλά για την αερόβια επεξεργασία σε κορεσμένα εδάφη θα χρειαστούν τεχνικές όπως ο βιοψεκασμός οξυγόνου (Air Sparging- Biosparging).

### **pH**

Αν και το βέλτιστο pH για τους περισσότερους μικροοργανισμούς είναι μεταξύ 6 και 8, η βιοαποικοδόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί και εκτός αυτού του εύρους τιμών, με μειωμένους όμως ρυθμούς. Για τους περισσότερους ρυπαντές και τις ρυπασμένες περιοχές, δεν χρειάζεται έλεγχος του pH, εκτός από την περίπτωση που οι ρυπαντές είναι γλωριωμένοι διαλύτες και η οξύτητα αυξάνεται.

### **Θρεπτικά**

Η ανάπτυξη και ο μεταβολισμός των μικροοργανισμών που αποδομούν τους ρυπαντές απαιτεί επαρκείς ποσότητες μάκρο- και μικρο- θρεπτικών, όπως άζωτο, φώσφορος, ίχνη μετάλλων και ορυκτών. Τα περισσότερα εδάφη έχουν αρκετά μικροθρεπτικά, αλλά τα επίπεδα των μακροθρεπτικών είναι γενικά χαμηλά. Μια εκτίμηση της ποσότητας των οργανικών ρυπαντών και της ποσότητας των διαθέσιμων ποσοτήτων φωσφόρου και αζώτου στο πεδίο, είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ποσότητας των θρεπτικών που πρέπει να προστεθούν. Γενικά, μια αναλογία άνθρακα / αζώτου / φωσφόρου της τάξεως του 100 / 10 / 1 είναι αρκετή για να διασφαλίσει τη βιοαποικοδόμηση. Στην περίπτωση που υπάρχει έλλειμμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και χημικά λιπάσματα όπως θειικό αμμώνιο.

### Θερμοκρασία

Η βιοαποικοδόμηση συνήθως πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες της τάξεως από 5 έως 30°C. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, οι ρυθμοί της βιοαποικοδόμησης μειώνονται δραστικά. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας στην *in situ* βιοαποικοδόμηση εφαρμόζεται σπάνια λόγω του κόστους. Αλλά τεχνικές όπως η κάλυψη μικρών περιοχών με μαύρες πλαστικές μεμβράνες μπορούν να εφαρμοστούν για την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους μέσω της ηλιακής θέρμανσης.

### Διαλυτότητα στο νερό και Βιοδιαθεσιμότητα

Μια και η αποδόμηση εκτελείται από μικροβιακά ένζυμα, οι ενώσεις προς αποδόμηση πρέπει να είναι σε επαφή ή να μεταφέρονται μέσα στο μικροβιακό κελί. Αν η ένωση είναι ελάχιστα διαλυτή στο νερό (υδροφοβική), ο ρυθμός αποδόμησης θα είναι χαμηλότερος καθώς εξαρτάται από το συντελεστή κατανομής οκτανόλης / νερού του ρύπου και το συντελεστή ρόφησης στο έδαφος.

### Δέκτες ηλεκτρονίων

Η βιοεξυγίανση μπορεί να λάβει χώρα κάτω από αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες. Κάτω από αερόβιες συνθήκες οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν οξυγόνο ως δέκτη ηλεκτρονίων. Στις αναερόβιες συνθήκες, δεν υπάρχει οξυγόνο και οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν άλλους δέκτες ηλεκτρονίων, όπως νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ), σίδηρο ( $\text{Fe}^{3+}$ ), μαγγάνιο ( $\text{Mn}^{2+}$ ), θειικά ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

#### 1.1.7. Επίδραση των εδαφικών χαρακτηριστικών στη βιοεξυγίανση

Οι εδαφικές συνθήκες της υπό εξυγίανσης περιοχής συχνά περιορίζουν την επιλογή της μεθόδου επεξεργασίας. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά που περιορίζουν τις διεργασίες εξυγίανσης, όπως το pH, η θερμοκρασία και η υγρασία, μπορούν να ρυθμιστούν. Σε άλλες περιπτώσεις όμως, μια τεχνολογία εξυγίανσης μπορεί αχρηστευθεί εξαιτίας της κατανομής μεγέθους εδαφικών σωματιδίων ή άλλων χαρακτηριστικών του εδάφους. Χαρακτηριστικά του εδάφους που επηρεάζουν την βιοεξυγίανση είναι:

- Η ομοιογένεια και ισοτροπία του εδάφους επηρεάζει την υπεδάφεια ροή ρευστών όπως ο αέρας, το νερό και τα θρεπτικά. Ακόμα, μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο της δημιουργίας καναλιών ροής (channeling) σε εναλλασσόμενα στρώματα πηλού και άμμου και να οδηγήσει σε ατελή επεξεργασία.
- Η συνολική πυκνότητα του εδάφους (bulk density), η οποία είναι το βάρος του εδάφους ανά μονάδα όγκου, συμπεριλαμβανομένου του νερού και των κενών.
- Η διαπερατότητα του εδάφους, ένας από τους παράγοντες που ελέγχουν την αποτελεσματικότητα όλων των *in situ* μεθόδων επεξεργασίας. Η χαμηλή διαπερατότητα παρεμποδίζει την κίνηση του αέρα, αλλά και των διαλυμάτων των θρεπτικών που εισάγονται στο έδαφος.
- Η υψηλή υγρασία του εδάφους η οποία ευνοεί τη βιοεξυγίανση, αλλά μετά από ένα ποσοστό εμποδίζει τη διάχυση του οξυγόνου.
- Το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Eh) του υλικού για το οποίο γίνεται αναφορά, όταν εμπλέκονται χημικές αντιδράσεις οξειδοαναγωγικού τύπου.
- Το Kow (συντελεστής κατανομής οκτανόλης / νερού), το οποίο είναι ο λόγος της συγκέντρωσης ενός χημικού στη φάση της οκτανόλης, προς τη συγκέντρωσή του στην υδατική φάση, σε ένα διφασικό σύστημα οκτανόλης νερού. Ο Kow είναι ένας παράγοντας «κλειδί» στην περιγραφή της τύχης ενός οργανικού χημικού σε

περιβαλλοντικά συστήματα. Έχει βρεθεί ότι σχετίζεται με την διάλυση των ουσιών στο νερό, τον συντελεστή προσρόφησης των εδαφών και τους παράγοντες βιοσυγκέντρωσης για υδατικά είδη. Η φυσική σημασία του Kow είναι η τάση ενός χημικού να κατανέμεται σε μια οργανική φάση και σε μια υδατική φάση. Χημικά με μεγάλο Kow ( $>10^4$ ) χαρακτηρίζονται υδροφοβικά και έχουν την τάση να συσσωρεύονται σε οργανικές επιφάνειες, όπως πάνω σε χουμικά εδάφη. Αντίθετα, χημικά με μικρό Kow ( $<10$ ) χαρακτηρίζονται υδροφιλικά και έχουν την τάση να βρίσκονται στην υδατική φάση.

- Το χουμικό περιεχόμενο του εδάφους (οργανικό κλάσμα) είναι το αποδομούμενο τμήμα του φυσικού οργανικού περιεχομένου του εδάφους. Το υψηλό χουμικό περιεχόμενο του εδάφους ελαττώνει την κινητικότητα των οργανικών ρυπαντών, αλλά προκαλεί μεγάλη απαίτηση οξυγόνου, γεγονός που δρα αρνητικά στην βιοεξυγίανση του εδάφους.
- Ο συνολικός οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon, TOC) ο οποίος αποτελεί μια ένδειξη του συνολικού οργανικού υλικού που υπάρχει στο έδαφος. Χρησιμοποιείται συνήθως σαν δείκτης (όχι μέτρο) της διαθέσιμης ποσότητας για βιοαποικοδόμηση.
- Η βιοχημική απαίτηση οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand, BOD) η οποία παρέχει μια εκτίμηση της αερόβιας βιολογικής αποδόμησης των οργανικών του εδάφους, μετρώντας την κατανάλωση οξυγόνου από το οργανικό υλικό που μπορεί εύκολα να βιοαποικοδομηθεί. Η χημική απαίτηση οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD) η οποία είναι ένα μέτρο του ισοδύναμου οξυγόνου του οργανικού ποσοστού ενός δείγματος που μπορεί να οξειδωθεί από ένα ισχυρό οξειδωτικό. Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο λόγος BOD/COD ως ένδειξη της βιολογικής επεξεργασίας. Τιμές του παραπάνω λόγου κοντά στη μονάδα μεταφράζονται με υψηλή βιοαποικοδομησιμότητα των ρύπων.

Οι βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες για την βιοαποικοδόμηση των ρύπων αναφέρονται στον Πίνακα 2.

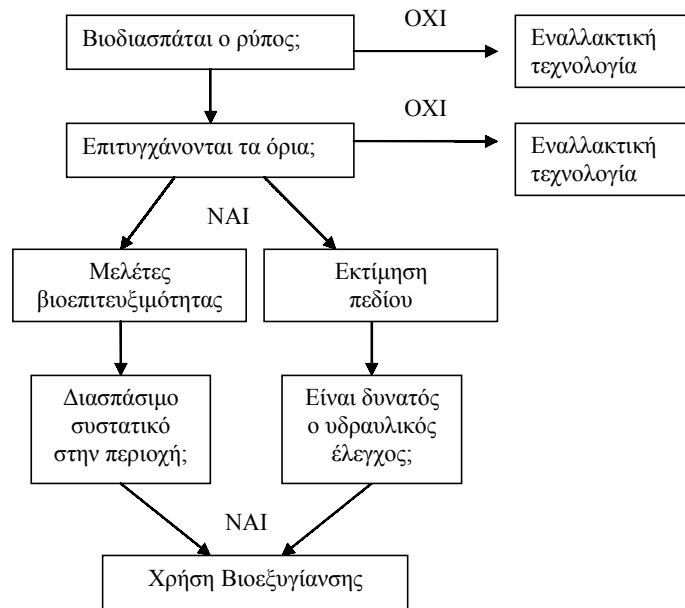
**Πίνακας 2.** Βέλτιστες συνθήκες βιοαποικοδόμησης (Vidali, 2001)

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

### 1.1.8. Επιλογή της βιοεξυγίανσης ως τεχνολογία επεξεργασίας

Ένα λογικό διάγραμμα (Σχ. 1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό του αν η βιοεξυγίανση είναι η πιο κατάλληλη επιλογή για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Η διαδικασία εκτίμησης λαμβάνει υπόψη της τον τύπο του ρυπαντή, τις υπεδάφειες συνθήκες, τη ροή του

υπογείου νερού, τις άδειες που απαιτούνται, τα κόστη και τα όρια που πρέπει επιτευχθούν (Freeman, 1997).



**Σχήμα 1.** Λογικό διάγραμμα επιλογής της βιοεξυγίανσης

#### *Εκτίμηση πεδίου (Site assessment)*

Η βιοεξυγίανση ενός ρυπασμένου πεδίου ξεκινά με την εκτίμηση του πεδίου, ώστε να διασφαλιστεί το ότι οι ενώσεις στην περιοχή είναι βιοαποικοδομήσιμες και ότι υπάρχουν ή μπορούν να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες που προωθούν την αποδόμηση των ρυπαντών από τους μικροοργανισμούς. Στην εκτίμηση της περιοχής πρέπει να απαντηθούν τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Είναι οι ρυπαντές βιοαποικοδομήσιμοι;
- Οι ρυπαντές χρησιμοποιούνται ως πρωτεΐον υπόστρωμα ή συμμεταβολίζονται;
- Τι περιβαλλοντικές συνθήκες απαιτούνται για την υποστήριξη των μικροβίων καθώς αποδομούν τους ρυπαντές;
- Τι δέκτες ηλεκτρονίων απαιτούνται;
- Είναι αναγκαία η προσθήκη άλλων μικροβίων ή προσθέτων για την ενίσχυση της βιοαποικοδόμησης;
- Υπάρχουν τοξικές ενώσεις που μπορεί να παρεμποδίσουν ή να αποτρέψουν τη μικροβιακή δραστηριότητα;
- Είναι πιθανή η δημιουργία τοξικών ενδιάμεσων προϊόντων από την αποδόμηση τα οποία είναι πιο επικίνδυνα από τους αρχικούς ρυπαντές; Θα πρέπει να παρακολουθούνται;
- Ποια είναι η δομή του εδάφους; Είναι δυνατή η εισαγωγή οξυγόνου, θρεπτικών, υγρασίας;
- Υπάρχει καμιά υπόγεια πηγή από το ρυπαντή που πρέπει να αφαιρεθεί πρώτα;
- Ο ρυπαντής βρίσκεται στην κορεσμένη ή στην ακόρεστη ζώνη;

- Κινείται ο ρυπαντής; Σε ποια κατεύθυνση; Χρειάζεται περιορισμός του ρυπαντή για την αποφυγή της κίνησης του προς το υπόγειο νερό ή την επιφάνεια;

### **Βιοεπιτευξιμότητα (Biofeasibility studies)**

Για να καθοριστεί αν η περιοχή είναι κατάλληλη για βιολογική επεξεργασία, γίνονται εργαστηριακές μελέτες βιοεπιτευξιμότητας. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Επισκόπηση της βιοαποικοδομησιμότητας των ρυπαντών.
- Έλεγχος για το αν υπάρχουν τα κατάλληλα μικρόβια για την αποδόμηση των ρυπαντών
- Έλεγχος της τοξικότητας του υποστρώματος στο εδάφος.
- Βελτιστοποίηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων για την ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας.

## **1.2. Πρακτική εφαρμογή βιοεξυγίανσης**

### **1.2.1. Ο βιοαντιδραστήρας στερεών αποβλήτων**

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

### **Θεωρητικό υπόβαθρο**

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

Η υπόθεση που γίνεται είναι ότι ένα διάστημα 30 χρόνων από την παύση της λειτουργίας του ΧΥΤΑ είναι το ελάχιστο απαιτούμενο για τον επαρκή έλεγχο των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των οργανικών ενώσεων, των αλάτων και των βαρέων μετάλλων που περιέχονται στους συμβατικούς «ξηρούς» χώρους ταφής απορριμμάτων. Ο περιορισμός που πραγματοποιείται σε αυτούς τους βιοαντιδραστήρες παρέχει αρχικά περιβαλλοντική προστασία. Παρόλα αυτά, μετά από το διάστημα των 30 χρόνων, είναι ενδεχόμενο να υπάρξει αστοχία του συστήματος, ιδιαίτερα στο σύστημα στεγανοποίησης (μεμβράνες στο άνω μέρος και στον πυθμένα των αποβλήτων). Το πρωτεύον περιβαλλοντικό ζήτημα που

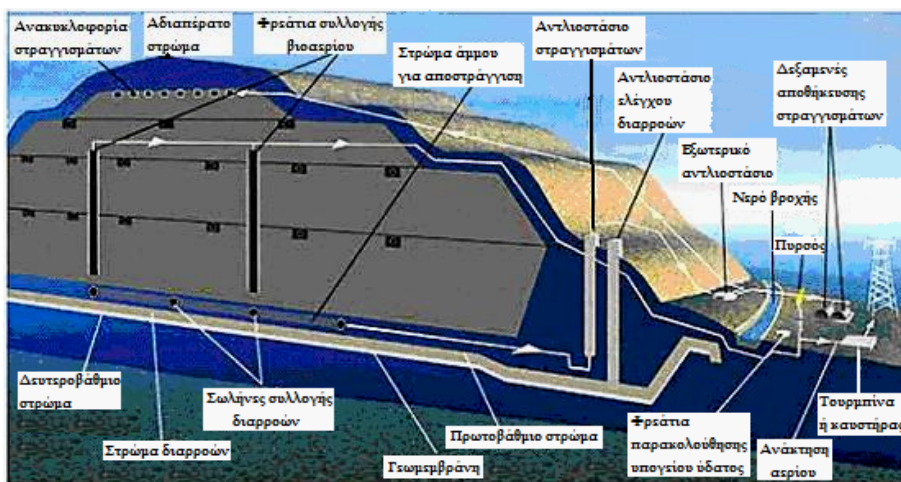
σχετίζεται με την πιθανή αστοχία του συστήματος και της διήθησης του νερού είναι η ενδεχόμενη αύξηση της παραγωγής βιοαερίου και στραγγισμάτων και οι συνεπακόλουθες επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Η φύση και το εύρος των επιδράσεων αυτών σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα του οργανικού κλάσματος που δεν έχει ακόμη αποδομηθεί.

### Διαφορές του ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρα με τον συμβατικό ΧΥΤΑ

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

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

Στην ουσία, ο βιοαντιδραστήρας είναι μια επέκταση της τεχνικής ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων (Σχ. 2). Παρόλα αυτά, απαιτείται προσθήκη αρκετής ποσότητας υγρασίας στον βιοαντιδραστήρα για να πλησιάσει τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Η ποσότητα των στραγγισμάτων 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.



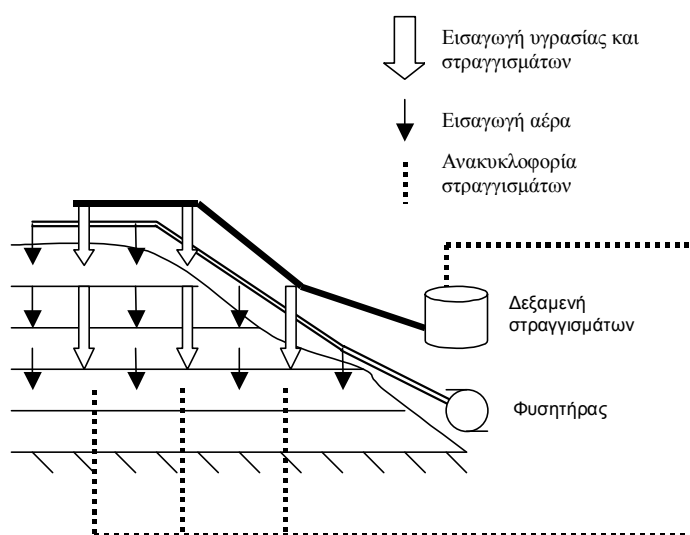
Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων.

Λίγο μετά το κλείσιμο του βιοαντιδραστήρα, η παραγωγή του βιοαερίου είναι μέγιστη (20 – 30 m<sup>3</sup>/tn MSW/yr). Τα επόμενα 5–10 χρόνια παρατηρείται σημαντική μείωση του ρυθμού μέχρι να λάβει μια σταθερή χαμηλή τιμή. Όμοια, λίγο μετά το κλείσιμο, οι συγκεντρώσεις των συστατικών των στραγγισμάτων από τις αρχικά υψηλές τιμές θα μειωθούν σε σημαντικό βαθμό, χαρακτηριστικό της παρατεταμένης σταθεροποίησης. Η ποσότητα των στραγγισμάτων θα είναι υπολογίσιμη, έτσι που θα είναι δυνατή η επεξεργασία τους εντός του ΧΥΤΑ. Στην περίπτωση της αστοχίας του τελικού καλύμματος μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ, η ποιότητα των στραγγισμάτων εξαιτίας της διήθησης του νερού θα είναι καλύτερη από τους συμβατικούς ΧΥΤΑ στους οποίους δεν εισάγεται νερό ή στραγγίσματα.

### Κατάταξη των βιοαντιδραστήρων στερεών αποβλήτων

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

- Αερόβιοι. Στους αερόβιους βιοαντιδραστήρες γίνεται εισαγωγή οξυγόνου (ή αέρα) στη μάζα των απορριμμάτων, μέσω οριζόντιων ή κατακόρυφων φρεατίων (Σχ. 3). Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται η αερόβια δραστηριότητα και επιταχύνεται η σταθεροποίηση των αποβλήτων. Τα στραγγίσματα οδηγούνται σε δεξαμενές αποθήκευσης και ανακυκλοφορούν στον ΧΥΤΑ με ελεγχόμενο τρόπο.



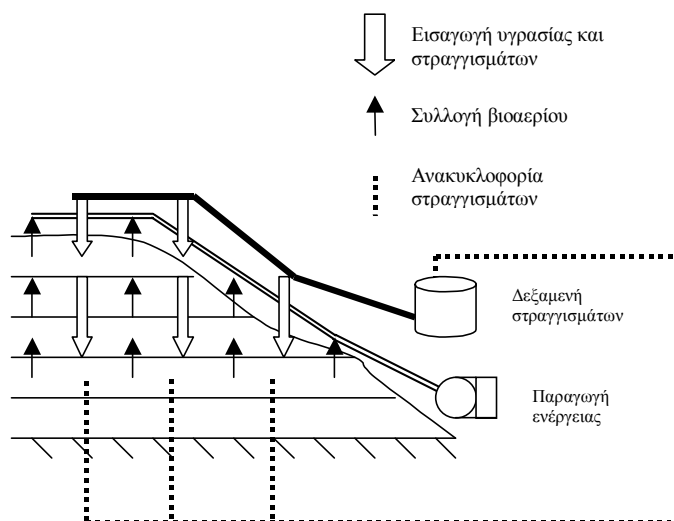
Σχήμα 3. Τομή αερόβιου βιοαντιδραστήρα.

- Αναερόβιοι. Σε έναν αναερόβιο αντιδραστήρα (Σχ. 4), προστίθεται υγρασία είτε με την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων είτε με κάποιο άλλο τρόπο, με σκοπό την βελτιστοποίηση της υγρασίας. Η βιοαποικοδόμηση συμβαίνει υπό αναερόβιες συνθήκες και παράγεται βιοαέριο. Το βιοαέριο, που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, μπορεί να ανακτάται για ενεργειακό λόγο αλλά και για έλεγχο των αέριων εκπομπών.
- 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 αέριο άζωτο). Τα

στραγγίσματα που έχουν υποστεί νιτροποίηση, ανακυκλοφορούν στην κυρίως μάζα των αποβλήτων και με την παρουσία του άνθρακα γίνεται η μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο.

#### Πιθανά οφέλη από τη λειτουργία ενός βιοαντιδραστήρα

Τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από τη λειτουργία ενός ΧΥΤΑ σαν βιοαντιδραστήρα ταξινομούνται σε περιβαλλοντικά, νομοθετικά, οικονομικά και κοινωνικά.



Σχήμα 4. Τομή αναερόβιου βιοαντιδραστήρα

Οφέλη από την άμεση μετατροπή/σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος

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

Οφέλη από τη μεγιστοποίηση της δέσμευσης του βιοαερίου για ανάκτηση ενέργειας

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

Οφέλη από την αυξημένη χωρητικότητα του ΧΥΤΑ λόγω της ταχύτερης καθίζησης

- Αύξηση στην ποσότητα των στερεών αποβλήτων που δύναται να διατεθούν στον ΧΥΤΑ (αύξηση της πυκνότητας).
- Αύξηση του χρόνου ζωής του ΧΥΤΑ μέσω της επιπρόσθετης εναπόθεσης απορριμμάτων.
- Η αύξηση της ποσότητας των απορριμμάτων δημιουργεί οικονομικό όφελος, που προκύπτει από τη διαφορά του κόστους κεφαλαίου που απαιτείται για τη χωροθέτηση, αδειοδότηση και κατασκευή ενός νέου ΧΥΤΑ.
- Αυξημένα δημόσια έσοδα από την παράταση της ζωής του ΧΥΤΑ.

Βελτίωση της επεξεργασίας και αποθήκευσης των στραγγισμάτων

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

Μείωση της ανάγκης για αποκατάσταση, της συντήρησης και του κινδύνου

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

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

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

### 1.2.2. Θέματα που σχετίζονται με το ΧΥΤΑ-Βιοαντιδραστήρα

Όσον αφορά το σχεδιασμό ενός βιοαντιδραστήρα, δεν υπάρχει συγκεκριμένη νομοθεσία στην Ελλάδα σε αντίθεση με άλλες χώρες όπου υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες που καθορίζουν τις βασικές παραμέτρους. Στα βασικά σχεδιαστικά μέρη περιλαμβάνεται η γεωμεμβράνη περιορισμού, οι εγκαταστάσεις συλλογής των στραγγισμάτων και βιοαερίου

και το τελικό κάλυμμα. Είναι οι ίδιες περίπου απαιτήσεις σχεδιασμού με αυτές που ισχύουν για κάθε μοντέρνο ΧΥΤΑ. Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται τα βασικά θέματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό των βιοαντιδραστήρων.

*Μέγεθος του κελιού.* Για οικονομικούς και θεσμικούς λόγους, μια νέα τάση που σχετίζεται με το σχεδιασμό ενός ΧΥΤΑ είναι η δημιουργία βαθιών κελιών (ή φάσεων), που ολοκληρώνονται μέσα σε 2-5 χρόνια. Αυτή η τάση αποτελεί μια δυναμική τεχνική για τον αντιδραστήρα. Η δομή αυτή εξυπηρετεί καλύτερα, καθώς μπορεί να την εκμεταλλευτεί ταχύτερα ο φορέας, παρά να χαθεί πολύτιμος χρόνος σε κάποιο άλλο σχεδιασμό, που ενδεχόμενα θα αποδειχτεί ανεπαρκής. Μόλις ολοκληρωθεί το κελί, οι συνθήκες μεθανογένεσης βελτιστοποιούνται και ευκολύνεται η παραγωγή και άντληση του βιοαερίου. Παρόλα αυτά, οι ΧΥΤΑ στους οποίους τα απορρίμματα έχουν σημαντικό ύψος (>15 m) μπορεί να έχουν τόσο μεγάλη πυκνότητα στα χαμηλότερα στρώματα που η ροή των στραγγισμάτων από την πολύ μικρή διαπερατότητα παρεμποδίζεται. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να περιοριστεί η προσθήκη απορριμμάτων και να μειωθεί η ανακυκλοφορία στα ανώτερα στρώματα ή να βελτιωθεί το σύστημα αποστράγγισης.

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

*Διαχείριση των υγρών.* Για το σύστημα διαχείρισης των στραγγισμάτων πρέπει να γίνει ένας υπολογισμός της προβλεπόμενης παροχής και να δημιουργηθούν οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης και οι συμπληρωματικές τους. Οι αποθηκευτικοί χώροι πρέπει να είναι επαρκείς για την περίπτωση μιας υπερβολικά υψηλής παραγωγής στραγγισμάτων. Επίσης, πρέπει στο σχεδιασμό να προβλέπεται η προσθήκη νερού, άλλων υγρών ή ιλύος που μπορεί να απαιτηθεί για την επίτευξη του στόχου αποκατάστασης. Η ποσότητα των υγρών που απαιτείται για την κάλυψη της χωρητικότητας του πεδίου μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη διεθνή εμπειρία, τις προβλέψεις μοντέλων ή κάποια μέτρηση στο συγκεκριμένο πεδίο. Εκφρασμένη σε μονάδες όγκου ανά μονάδα μάζας στερεών αποβλήτων, η ποσότητα των υγρών που προστίθεται ως τον πλήρη κορεσμό του πεδίου είναι μεταξύ 95–190 m<sup>3</sup>/1000 tn στερεών αποβλήτων (Reinhardt and Ham, 1974).

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

Μια άλλη επιλογή είναι η προσθήκη υγρασίας μετά την ταφή των απορριμμάτων, έτσι ώστε να ελέγχεται η παραγωγή του βιοαερίου. Η μέθοδος αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση επιφανειακών συστημάτων άρδευσης, με τη δημιουργία μικρών λιμνών εκμεταλλεζόμενοι την διήθηση, με φρεάτια εισαγωγής νερού και άλλες. Κατά την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι κλιματικές παράμετροι, οι ανεπιθύμητες οσμές, ο βαθμός έκθεσης των εργαζομένων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι απώλειες εξάτμισης, η αξιοπιστία της μεθόδου, η ομοιομορφία της ύγρανσης και η

αισθητική. Τα κατακόρυφα φρεάτια και οι τάφροι προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως τα μειωμένα μονοπάτια έκθεσης, την καλή απόδοση ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και την καλή αισθητική.

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

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

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

*Σταθερότητα του ΧΥΤΑ.* Η προσθήκη υγρασίας στα απορρίμματα προς ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας, αυξάνει το συνολικό βάρος τους επομένως και την πίεση στους πόρους. Το ζήτημα αυτό μπορεί να εκτιμηθεί και να επιλυθεί εύκολα με χρήση συγκεκριμένων γεωτεχνικών αναλύσεων (Maier, 1998), οι οποίες πρέπει να συμπεριλαμβάνουν και σεισμικές μελέτες.

*Καθίζηση του ΧΥΤΑ.* Ο ΧΥΤΑ που λειτουργεί σαν βιοαντιδραστήρας υφίσταται πιο άμεση και ολοκληρωτική καθίζηση απ' ό,τι ένας «ξηρός» αντιδραστήρας. Ο αυξημένος ρυθμός καθίζησης οφείλεται τόσο στον αυξημένο ρυθμό βιοαποικοδόμησης των στερεών αποβλήτων όσο και στην αυξημένη συμπίεση λόγω του μεγαλύτερου ειδικού βάρους των απορριμμάτων. Το φαινόμενο της καθίζησης, κατά το διάστημα λειτουργίας του ΧΥΤΑ μπορεί να επηρεάσει την επιφανειακή παροχέτευση, τους δρόμους, το σύστημα των

σωλήνων συλλογής αερίου και το σύστημα ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων. Εξαιτίας του αυξημένου ρυθμού καθίζησης, ο υπεύθυνος λειτουργίας μπορεί να επωφεληθεί του κερδισμένου χώρου προτού τοποθετηθεί το τελικό κάλυμμα. Εναλλακτικά, σημαντικό όφελος μπορεί να προκύψει και από την καθυστέρηση της τοποθέτησης του τελικού καλύμματος και των εγκαταστάσεων βελτίωσης-αξιοποίησης του ΧΥΤΑ, καθώς η γρήγορη καθίζηση συντελεί στην ανάκτηση πολύτιμου χώρου. Επειδή η καθίζηση θα είναι πλήρης λίγο διάστημα μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ, αποφεύγεται το μακροχρόνιο κόστος συντήρησης και η πιθανότητα αέριων εκπομπών στο περιβάλλον.

### **Λειτουργίες**

Ο ΧΥΤΑ-βιοαντιδραστήρας είναι ένα σύστημα επεξεργασίας αποβλήτων. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του απαιτείται περισσότερος έλεγχος της απόδοσής του απ' ό,τι σε ένα «ξηρό» ΧΥΤΑ. Η επιτυχής λειτουργία του βιοαντιδραστήρα εξαρτάται από τον έλεγχο και την παρακολούθηση των βιολογικών, χημικών και υδρολογικών διεργασιών που πραγματοποιούνται στον ΧΥΤΑ. Τα προγράμματα διαχείρισης και συντήρησης που αφορούν την καθίζηση, το βιοαέριο και τα διασταλαζόντα υγρά μπορούν να μειωθούν στο ελάχιστο μετά το πέρας της λειτουργίας του ΧΥΤΑ, που τα απόβλητα θα έχουν πλέον σταθεροποιηθεί σε μεγάλο βαθμό.

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

*Διαρροή στραγγισμάτων.* Η προσθήκη υγρών στα στερεά απόβλητα αυξάνει την πιθανότητα διαρροών, κάτι που πρέπει να αντιμετωπίζεται άμεσα. Τα στραγγίσματα δεν πρέπει να ρυπαίνουν τις επιφανειακές απορροές του ΧΥΤΑ. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται η παρακολούθηση του ΧΥΤΑ προς αποφυγή των διαρροών ή έλεγχό τους σε πιθανή εμφάνισή τους. Κάποια μέτρα που μπορούν να ληφθούν είναι τα χαντάκια στα πρανή, οι επιφανειακοί αναβαθμοί και οι στεγανές αυλακώσεις που μειώνουν την διήθηση του νερού από την επιφάνεια. Οι διαρροές μπορούν επίσης να περιοριστούν με τη σωστή διαχείριση του ρυθμού ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων, της ποσότητάς τους και του σημείου εφαρμογής τους.

*Ημερήσιο και ενδιάμεσο κάλυμμα.* Η χρήση του εδαφικού καλύμματος σε έναν βιοαντιδραστήρα απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Όταν για παράδειγμα είναι πιο διαπερατό από τα απόβλητα, τότε μπορεί να υπάρξουν διαρροές προς τα πρανή εκεί που τα στραγγίσματα πρέπει να συλλέγονται. Αντιθέτως, ένα ημερήσιο κάλυμμα χαμηλής διαπερατότητας μπορεί να εμποδίσει την ενεργή διήθηση μεταξύ νερού και στραγγισμάτων. Μπορεί επίσης να εμποδίσει τη διανομή των στραγγισμάτων και τη ροή του αερίου προς τα συστήματα συλλογής. Κατά τη χρήση εδάφους χαμηλής διαπερατότητας, επιδιώκεται η μείωση της

ικανότητάς του σαν φράγμα με τη δημιουργία τομών ή με μερική απομάκρυνσή του, πριν από την τοποθέτηση στερεών αποβλήτων πάνω από αυτό. Στο έδαφος χαμηλής διαπερατότητας που τοποθετείται εντός 15 m από τα πρανή, πρέπει να δημιουργούνται αναβαθμοί, ώστε τα στραγγίσματα να επιστρέφουν προς το κύριο τμήμα του αντιδραστήρα. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται οι διαρροές των διασταλαζόντων υγρών προς τα πρανή.

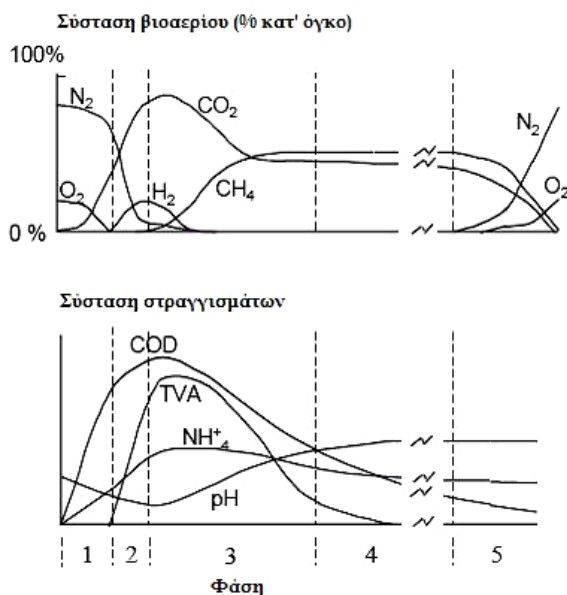
*Χρήση θρεπτικών και άλλων συστατικών.* Οι απαιτήσεις σε θρεπτικά συνήθως καλύπτονται από τα συστατικά των απορριμμάτων (Barlaz et al., 1990), ενώ οι ερευνητές τονίζουν ότι η προσθήκη θρεπτικών και άλλων χημικών και βιολογικών πρόσθετων ενισχύουν την μικροβιακή δραστηριότητα. Η προσθήκη τέτοιων ουσιών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

Το βέλτιστο pH για τους μεθανογενείς μικροοργανισμούς είναι περίπου από 6.8 έως 7.4. Σε εργαστηριακά πειράματα έχει αποδειχτεί ότι η εξουδετέρωση των στραγγισμάτων με σκοπό τη διατήρηση του pH σε αυτό το εύρος, βελτιώνει την παραγωγή του αερίου. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην τιμή του pH κατά τα πρώτα στάδια της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων. Η προσεκτική λειτουργία του βιοαντιδραστήρα αρχικά, μέσω της βραδείας εισαγωγής των υγρών ελαχιστοποιεί την ανάγκη για εξουδετέρωση.

### 1.3. Βιοαποικοδόμηση των αστικών στερεών αποβλήτων

#### 1.3.1. Φάσεις αποδόμησης των απορριμμάτων

Σε συμβατικούς ΧΥΤΑ, η βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων συμβαίνει σε πέντε χρονολογικές φάσεις που περιγράφονται παρακάτω (US EPA, 2000; Waste Management, 2002). Η εξέλιξη του ΧΥΤΑ όσον αφορά τη σύσταση των στραγγισμάτων και του βιοαερίου, σύμφωνα με τον Yuen (1999) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



**Σχήμα 5.** Θεωρητικές καμπύλες της εξέλιξης της σύστασης του βιοαερίου και των στραγγισμάτων (Yuen, 1999)

### **Φάση I (αερόβιας αποδόμησης)**

Εμφανίζεται αμέσως μετά την διάθεση των απορριμμάτων και με την παρουσία του οξυγόνου, όπου οι μικροοργανισμοί αποδομούν την οργανική ύλη σε CO<sub>2</sub>, νερό και άλλα οργανικά προϊόντα μερικής διάσπασης. Η θερμοκρασία της μάζας των αποβλήτων αυξάνει εξαιτίας της βιολογικής δραστηριότητας (παραγωγή θερμότητας) και τα υψηλά επίπεδα CO<sub>2</sub> κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Η φάση της αερόβιας αποδόμησης διαρκεί από μερικές ώρες έως και μία εβδομάδα στους συμβατικούς ΧΥΤΑ.

### **Φάση II (μεταβατική ή υδρολυτική φάση)**

Αποτελεί το μεταβατικό στάδιο της αερόβιας προς την αναερόβια φάση. Καθώς το οξυγόνο εξαντλείται, αρχίζει να ενισχύεται και τελικά να κυριαρχεί η αναερόβια αποδόμηση των απορριμμάτων (Qasim and Chiang, 1994). Η αντίδραση μεταξύ του νερού και του CO<sub>2</sub> που παράγονται από την προηγούμενη φάση δημιουργεί μεγάλες ποσότητες πτητικών λιπιδίων οξέων, όπως το οξικό οξύ. Τα οξέα αυτά μειώνουν το pH, κάτι που ενισχύει τη διάλυση ανόργανων ουσιών, που μαζί με τις υψηλές συγκεντρώσεις πτητικών οξέων (Total Volatile Acids, TVA) δημιουργούν μεγάλη ιοντική ισχύ. Τα υψηλά επίπεδα των πτητικών οξέων συντελούν επίσης στην αύξηση του COD, που συναντάται συνήθως σε αυτήν την φάση. Επίσης, το αέριο άζωτο μειώνεται, η κυτταρίνη αρχίζει να διασπάται, εμφανίζεται το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και τα επίπεδα του CO<sub>2</sub> μειώνονται. Σε αυτό το στάδιο δημιουργούνται γενικά στραγγίσματα υψηλής ισχύος.

### **Φάση III (όξινη αναερόβια φάση ή οξυγενής φάση)**

Στη φάση αυτή δρουν οι μικροοργανισμοί που δραστηριοποιήθηκαν μετά την κατανάλωση του οξυγόνου. Παράγονται οργανικά οξέα σε μεγάλες συγκεντρώσεις, αμμωνία, υδρογόνο και CO<sub>2</sub> ενώ ταυτόχρονα παράγεται θερμότητα. Το pH μειώνεται εξαιτίας του πολλαπλασιασμού των οξυγενών μικροοργανισμών. Σε μερικές περιπτώσεις, το χαμηλό pH του περιβάλλοντος κινητοποιεί κάποια μέταλλα από τα απορρίμματα προς τα στραγγίσματα. Η δεύτερη και τρίτη φάση διαρκούν από έναν έως έξι μήνες στους συμβατικούς ΧΥΤΑ.

### **Φάση IV (αναερόβια φάση μεθανογένεσης)**

Σε αυτό το στάδιο, αυξάνεται και κυριαρχεί ο πληθυσμός των μεθανογενών βακτηρίων. Συνεπώς, όλο και περισσότερο οξικό οξύ μετατρέπεται σε μεθάνιο, αυξάνοντας το pH (τα μεθανογενή βακτήρια είναι αυστηρά αναερόβια και αναπτύσσονται σε ουδέτερο pH (6.6–7.3) (Qasim and Chiang, 1994). Το δυναμικό οξειδοαναγωγής μειώνεται και τα νιτρικά ανάγονται σε αμμωνία. Η συγκέντρωση του μεθανίου είναι περίπου 50–60% κατ' όγκο και το CO<sub>2</sub> παράγεται επίσης σε μεγάλες ποσότητες. Η φάση αυτή διαρκεί από 8 έως 40 και άνω χρόνια στους συμβατικούς ΧΥΤΑ.

### **Φάση V (μετά-μεθανογενής φάση)**

Στη φάση αυτή μειώνεται η παραγωγή του μεθανίου και των άλλων αερίων του ΧΥΤΑ, σταθεροποιούνται οι συγκεντρώσεις των συστατικών των στραγγισμάτων, ενώ η βιοαποικοδόμηση των εναπομεινάντων υλικών είναι πολύ βραδεία.

### 1.3.2. Εξισώσεις αποδόμησης

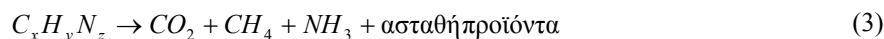
Η βιοαποικοδόμηση των αστικών στερεών απορριμμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε κάτω από αερόβιες είτε κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Η βασική εξίσωση αερόβιας αποδόμησης σύνθετων οργανικών ενώσεων της μορφής  $C_xH_yN_z$  είναι (Peirce *et al.*, 1997):



Όπως φαίνεται από την εξίσωση (1) το  $CO_2$  και το νερό είναι δύο από τα τελικά προϊόντα της αερόβιας αποδόμησης. Και τα δύο είναι σταθερά, χαμηλής ενέργειας και χρησιμοποιούνται από τα φυτά στη φωτοσύνθεση. Το οργανικό άζωτο οξειδώνεται τελικά σε νιτρικά ιόντα, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2):



Εξαιτίας αυτής της διαδοχής, το άζωτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης ποιότητας νερών. Η αναερόβια αποδόμηση πραγματοποιείται από διαφορετικό είδος μικροοργανισμών για τους οποίους το οξυγόνο είναι τοξικό. Η βασική εξίσωση της αναερόβιας αποδόμησης είναι:



Πολλά από τα τελικά προϊόντα της αναερόβιας αποδόμησης είναι βιολογικά ασταθή. Για παράδειγμα, το μεθάνιο, ένα υψηλής ενέργειας αέριο, είναι μεν σταθερό αλλά βιοαποικοδομείται εύκολα. Η αμμωνία ( $NH_3$ ) οξειδώνεται, ενώ το θείο διασπάται αναερόβια σε υδρόθειο ( $H_2S$ ).

### 1.3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την βιοαποδόμηση των στερεών αποβλήτων

Σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την βιοαποικοδόμηση των στερεών αποβλήτων, αρκετές έρευνες παρουσιάζουν τις βέλτιστες συνθήκες αλλά και τα προβλήματα που ενδέχεται να παρουσιαστούν. Στον Πίνακα 3 παρατίθεται μια περίληψη των παραγόντων αυτών (Yuen, 2001).

**Πίνακας 3.** Παράγοντες που επιδρούν στην βιοαποικοδόμηση των στερεών αποβλήτων

Παράγοντες επιρροής	Κριτήρια / Σχόλια
Υγρασία	Βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία: 60% και άνω (σε υγρή βάση)
Οξυγόνο	Ενισχύει την δραστηριότητα των αερόβιων βακτηρίων, εμποδίζει των αναερόβιων
pH	Βέλτιστο pH για μεθανογένεση: 6-8
Αλκαλικότητα	Βέλτιστη αλκαλικότητα για μεθανογένεση: 2000 mg/L Μέγιστη συγκέντρωση οργανικών οξέων για μεθανογένεση: 3000 mg/L Μέγιστος λόγος οξικού οξέως/αλκαλικότητας για μεθανογένεση: 0.8
Θερμοκρασία	Βέλτιστη θερμοκρασία για μεθανογένεση: 34-41°C
Υδρογόνο	Μερική πίεση οξυγόνου για οξυγένεση: κάτω από $10^{-6}$ Atm

Θρεπτικά	Γενικά αρκούν στους περισσότερους ΧΥΤΑ
Θειικά άλατα	Η αύξησή τους συντελεί στην μείωση της μεθανογένεσης
Περιοριστικοί παράγοντες	Συγκεντρώσεις κατιόντων που λειτουργούν περιοριστικά (mg/L): Νάτριο: 3500-5500 Κάλιο: 2500-4500 Ασβέστιο: 2500-4500 Μαγνήσιο: 1000-1500 Αμμωνία: 1500-3000 Βαρέα μέταλλα: Καμία σημαντική επίδραση Οργανικές ενώσεις: Μόνο σε μεγάλες συγκεντρώσεις

Οι τεχνικές που μπορούν να ενισχύσουν τη βιοεξυγίανση κατατάσσονται ως εξής (Yuen, 2001):

- Τεμαχισμός των αποβλήτων. Ο τεμαχισμός των αποβλήτων θεωρητικά μπορεί να συντελέσει στην ομογενοποίηση λόγω: (α) της μείωσης του μεγέθους και της ανάμιξης, (β) της αύξησης της ειδικής επιφάνειας των αποβλήτων και (γ) της αύξησης της διαπερατότητάς τους. Αντιθέτως, ο τεμαχισμός μπορεί να επιδράσει αρνητικά μέσω της ενίσχυσης της υδρόλυσης και του σχηματισμού οξέων. Με τον τρόπο αυτό εμποδίζεται η μεθανογένεση. Ο τεμαχισμός είναι ευεργετικός μόνο με ταυτόχρονο έλεγχο του pH.
- Έλεγχος του pH. Όταν το pH στα απόβλητα λαμβάνει χαμηλές τιμές εξαιτίας της παραγωγής οξέων, εμποδίζεται η ανάπτυξη των μεθανογενών βακτηρίων. Οι έρευνες αποδεικνύουν πάντως πως η προσθήκη μέσου εξουδετέρωσης έχει θετική επίδραση στη διαδικασία σταθεροποίησης των αποβλήτων.
- Προσθήκη λάσπης (ενεργού ιλύος). Θεωρητικά, η προσθήκη λάσπης μπορεί να ενισχύσει την δυνατότητα βιοαποικοδόμησης με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας, των θρεπτικών και των μικροοργανισμών στη μάζα των αποβλήτων. Παρόλα αυτά, οι έρευνες έχουν δείξει ότι η προσθήκη λάσπης κατά την περίοδο της μεθανογένεσης δεν έχει κανένα όφελος και πολλές φορές επιδρά και αρνητικά, όταν το pH της είναι χαμηλό (Leckie and Pacey, 1979).
- Προσθήκη ενζύμων. Η προσθήκη ενζύμων που παράγονται από βακτήρια ζύμωσης μπορεί να ελέγξει την διεργασία της υδρόλυσης σε ΧΥΤΑ που λειτουργούν υπό αναερόβιες συνθήκες. Αρκετοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι η προσθήκη ενζύμων εντείνει τις συνθήκες μεθανογένεσης και οξυγένεσης.
- Εισαγωγή αέρα/οξυγόνου. Η διεργασία αυτή περιλαμβάνει την ελεγχόμενη προσθήκη υγρασίας και αέρα εντός της μάζας των αποβλήτων μέσω ενός δικτύου οριζόντιων και κατακόρυφων φρεατίων. Η διαδικασία είναι λίγο σχετική με την υγρή κομποστοποίηση στην οποία τα συστατικά διασπώνται με τη χρήση αέρα, υγρασίας και της αυξημένης θερμοκρασίας που δημιουργείται από τη βιοαποικοδόμηση.
- Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μέθοδο σταθεροποίησης των στερεών αποβλήτων. Η ανακυκλοφορία αφορά επεξεργασμένα και μη απόβλητα. Η μέθοδος αυτή ενισχύει την βιοαποικοδόμηση μέσω της δημιουργίας βέλτιστων συνθηκών υγρασίας ενώ αποτελεί και έναν αποδοτικό μηχανισμό μεταφοράς μικροβίων, υποστρώματος και θρεπτικών. Επίσης, πραγματοποιείται αραίωση της συγκέντρωσης των περιοριστικών παραγόντων.

## 1.4. Σύνοψη

Στην περίπτωση των ΧΥΤΑ η αιφορία ορίζεται ως η ασφαλής ταφή των απορριμμάτων μέσα σε χώρους υγειονομικής ταφής και η επακόλουθη αποδόμησή τους μέχρι να αδραντοποιηθούν, στο μικρότερο δυνατό χρονικό διάστημα, με την πιο αποτελεσματική και συμφέρουσα μέθοδο και με τις λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Από τις παραπάνω τεχνικές βιοεξυγίανσης ΧΥΤΑ και τα αποτελέσματά τους, είναι πλέον ορατό πως η επίτευξη της αιφορίας δεν είναι κάτι το ακατόρθωτο.

Πιο συγκεκριμένα, με την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών επιτυγχάνεται αύξηση του ρυθμού αποδόμησης των απορριμμάτων, βελτίωση της ποιότητας των στραγγισμάτων, ελάττωση του όγκου των στραγγισμάτων προς επεξεργασία, ελάττωση της παραγωγής μεθανίου (αερόβια βιοεξυγίανση), αύξηση του ρυθμού παραγωγής μεθανίου για εκμετάλλευση (αναερόβια βιοεξυγίανση) και μείωση των οσμών που οφείλονται στην αμμωνία και το υδρόθειο (αερόβια βιοεξυγίανση). Συνεπώς κρίνεται επιτακτική η υιοθέτηση των παραπάνω τεχνολογιών εξυγίανσης για την ελάττωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον από την υγειονομική ταφή των απορριμμάτων.

## 1.5. Βιβλιογραφία

- Barlaz M.A., Ham R.K. and Schaefer D.M. (1990). Methane Production From Municipal Refuse: A Review of Enhancement Techniques and Microbial Dynamics, *Critical Reviews in Environmental Control*, **19(6)**: 557.
- Freeman H.M. (1997). *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*. McGraw-Hill.
- Harrison S. and Watkins, R.K. (1996). HDPE Leachate Collection Pipe Design by Fundamentals of Mechanics., *Proceedings Nineteenth International Madison Waste Conference, Municipal and Industrial Waste*, Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, September 25-26.
- Leckie J.O. and Pacey J.G. (1979). Landfill Management with Moisture Control, *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, **105 (EE2)**: 337.
- Maier T.B. (1998). Analysis Procedure for Design of Leachate Recirculation Systems. *Proceedings, SWANA, Landfill Symposium*.
- Peirce J., Weiner R. and Vesilind P. (1997). *Environmental Pollution and Control*. Fourth Edition, Butterworth-Heinemann Ed.
- Qasim S.R. and Chiang, W. (1994). *Sanitary Landfill Leachate. Generation, Control and Treatment*, Technomic Publishing Co.
- Reinhardt J.J. and Ham R.K. (1974). Solid Waste Milling and Disposal on Land Without Cover, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, PB-234 930.
- Repa E. (2003). *Bioreactor Landfills: A Viable Technology*, National Solid Wastes Management Association Research Bulletin, 03-02.
- US EPA. (2000). *Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 1998*, EPA Publication, EPA530-F-00-024.
- US EPA (2002). *State of the Practice for Bioreactor Landfills*, EPA Publication, EPA/625/R-01/012.
- Vidali M. (2001). Bioremediation. An overview, *Pure Appl. Chem*, **73(7)**: 1163-1172.
- Waste Management. (2002). *The Bioreactor Landfill. The Next Generation of Landfill Management*, W.M. Publication.
- Yuen S.T.S. (1999). *Bioreactor Landfills Promoted by Leachate Recirculation: A Full-Scale Study*. PhD thesis, University of Melbourne, Melbourne, Australia.
- Yuen S.T.S. (2001). Bioreactor Landfills: Do They Work? *Proceedings of the Geoenvironment 2001-2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics*, Newcastle, Australia.

## 2. Συστήματα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων

### Χάβας Γεώργιος

Μηχανικός Περιβάλλοντος, M.Sc.

### 2.1. Εισαγωγή

Στραγγίσμα ή διαστάλαγμα (leachate) ορίζεται το υγρό που έχει διέλθει μέσα από τα στερεά απορρίμματα στο Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), και έχει εκχυλίσει διαλυμένα ή αιωρούμενα συστατικά (Βουδριάς, 2000, 2001). Στους περισσότερους ΧΥΤΑ τα στραγγίσματα προέρχονται από το νερό της βροχής, την επιφανειακή απορροή, το υπόγειο νερό και τη διάσπαση των απορριμμάτων.

### 2.2. Παραγωγή στραγγισμάτων

Τα στραγγίσματα παράγονται κυρίως ως αποτέλεσμα των βροχοπτώσεων ή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων γενικότερα στην επιφάνεια ενός ενεργού ή κλειστού ΧΥΤΑ, παρόλο που και άλλοι παράγοντες συντελούν στην παραγωγή τους, όπως η ροή υπόγειου νερού, η επιφανειακή ροή νερού, η υγρασία που περιέχεται στα απορρίμματα και η βιολογική αποικοδόμηση. Η ποσότητα των στραγγισμάτων που παράγονται εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

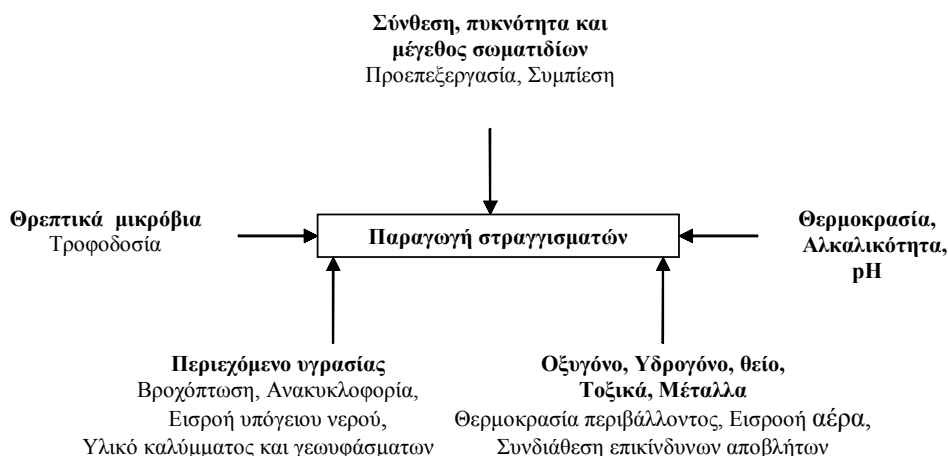
- ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα
- γεωμορφολογία της τοποθεσίας
- διείσδυση υπόγειου νερού
- διείσδυση επιφανειακού νερού
- σύνθεση των απορριμμάτων και περιεχόμενη υγρασία
- προεπεξεργασία απορριμμάτων (τεμαχισμός ή θρυμματισμός)
- σχεδιασμός καλύμματος
- βάθος απορριμμάτων
- κλιματικές συνθήκες
- παραγωγή αερίων και
- πυκνότητα απορριμμάτων.

Η παραγωγή στραγγισμάτων από νέες χωματερές λαμβάνει χώρα με σχετικά χαμηλούς ρυθμούς και αυξάνεται όσο τοποθετούνται απορρίμματα και ολοένα μεγαλύτερες εκτάσεις εκτίθενται στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Η παραγωγή στραγγισμάτων λαμβάνει μια μέγιστη τιμή, λίγο πριν το κλείσιμο και στη συνέχεια παρουσιάζει μια σημαντική πτώση με τη φροντίδα της επιφάνειας ή την τοποθέτηση του τελικού καλύμματος. Η παραγωγή στραγγισμάτων φαίνεται στο Σχήμα 1.

### 2.3. Σύνθεση και χαρακτηριστικά στραγγισμάτων

Αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά στραγγισμάτων για νέους και για παλαιούς ΧΥΤΑ παρουσιάζονται στο Πίνακα 1 (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Επειδή η διακύμανση των συγκεντρώσεων των συστατικών είναι μεγάλη, συνιστάται προσοχή τυπικών τιμών, ιδίως

για νέους ΧΥΤΑ. Η χημική σύνθεση των στραγγισμάτων ποικίλει, ανάλογα με την ηλικία του ΧΥΤΑ. Για παράδειγμα, στραγγίσματα που παράγονται στην όξινη φάση έχουν συγκριτικά χαμηλό pH και υψηλές συγκεντρώσεις BOD<sub>5</sub>, COD, TOC, θρεπτικών και βαρέων μετάλλων. Τα βαρέα μέταλλα που εμφανίζονται συνήθως στα στραγγίσματα είναι: υδράργυρος, νικέλιο, μόλυβδος, κάδμιο, χαλκός και ψευδάργυρος. Οι ποσότητες τους εξαρτάται από την ενεργό οξύτητα (pH) και την ταχύτητα ροής των στραγγισμάτων (Παναγιωτακόπουλος, 2002).



**Σχήμα 1.** Παράγοντες που επιδρούν στην παραγωγή στραγγισμάτων σε ΧΥΤΑ (El-Fadel *et al.*, 1997).

**Πίνακας 1.** Τυπικές τιμές περιεχόμενου. στραγγίσματος από νέους και ώριμους ΧΥΤΑ.

Συστατικά	Μονάδες	Νέοι ΧΥΤΑ ( < 2ετών)		Ωριμοί ΧΥΤΑ ( > 10 ετών)
		Διακύμανση	Τυπική Τιμή	Διακύμανση
BOD <sub>5</sub>	mg/L	2000 - 30000	10000	100 - 200
TOC	mg/L	1500 - 20000	6000	80 - 160
COD	mg/L	3000 - 60000	18000	100 - 500
Ολικά αιωρούμενα στερεά	mg/L	200 - 2000	500	100 - 400
Οργανικό Άζωτο	mg/L	10 - 800	200	80 - 120
Αμμωνιακό Άζωτο	mg/L	10 - 800	200	20 - 40
Νιτρικά	mg/L	5 - 40	25	5 - 10
Ολικός φώσφορος	mg/L	5 - 100	30	5 - 10
Ορθοφώσφορος	mg/L	4 - 80	20	4 - 8
Αλκαλικότητα σαν CaCO <sub>3</sub>	mg/L	1000 - 10000	3000	200 - 1000
pH		4,5 - 7,5	6	6,6 - 7,5
Ολική σκληρότητα σαν CaCO <sub>3</sub>	mg/L	300 - 10000	3500	200 - 500
Ασβέστιο	mg/L	200 - 3000	1000	100 - 400

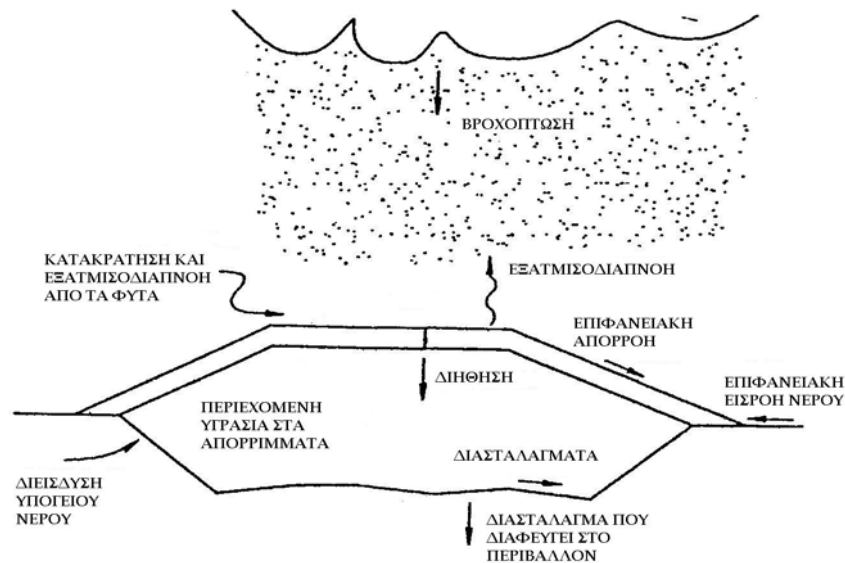
Μαγνήσιο	mg/L	50 - 1500	250	50 – 200
Κάλιο	mg/L	200 - 1000	300	50 – 400
Νάτριο	mg/L	200 - 2500	500	100 – 200
Χλώριο	mg/L	200 - 3000	500	100 – 400
Θειικά άλατα	mg/L	50 - 1000	300	20 – 50
Ολικός Σίδηρος	mg/L	50 -1200	60	20 – 200

Απεναντίας, στραγγίσματα που παράγονται στην φάση της μεθανογένεσης έχουν συγκριτικά υψηλότερο pH (6,5-7,5) και πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις BOD<sub>5</sub>, COD, TOC, θρεπτικών και βαρέων μετάλλων. Το pH εξαρτάται όχι μόνον από τις συγκεντρώσεις των λιπαρών οξέων, αλλά και από την μερική πίεση του CO<sub>2</sub> στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ. Η βιοαποικοδομησιμότητα του στραγγίσματος είναι συνάρτηση του χρόνου, όπως συνάγεται από τη μεταβολή του λόγου BOD<sub>5</sub>/COD. Αρχικά, η τιμή του λόγου αυτού είναι μεγαλύτερη ή ίση από 0,5, ενώ η διακύμανση στην περιοχή 0,4-0,6 εκλαμβάνεται ως ένδειξη ότι το οργανικό περιεχόμενο του στραγγίσματος είναι εύκολα βιοαποικοδομήσιμο. Σε παλαιούς ΧΥΤΑ, η τιμή του λόγου BOD<sub>5</sub>/COD είναι στην περιοχή 0,05-0,2 που αποτελεί ένδειξη χαμηλής βιοαποικοδομησιμότητας, λόγω μετατροπής της οργανικής ύλης σε φουλβικά και χουμικά οξέα.

Τέλος, η μεταβλητή σύνθεση των στραγγισμάτων δυσχεραίνει τον σχεδιασμό και λειτουργία των συστημάτων επεξεργασίας τους. Έτσι, το σύστημα που θα χρησιμοποιούνταν για επεξεργασία στραγγισμάτων νέου ΧΥΤΑ ενδεχομένως να διέφερε από αυτό για παλαιό (ώριμο) ΧΥΤΑ (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

## 2.4. Υδατικό ισοζύγιο

Ο πιθανός σχηματισμός στραγγισμάτων μπορεί να εκτιμηθεί με βάση το υδατικό ισοζύγιο ενός ΧΥΤΑ. Το υδατικό ισοζύγιο ενός ΧΥΤΑ συνίσταται στην πρόσθεση όλων των ποσοτήτων του ύδατος που εισέρχονται στον ΧΥΤΑ και αφαίρεση αυτών που καταναλώνονται σε χημικές και βιοχημικές αντιδράσεις ή διαφεύγουν σαν υδρατμοί. Η ποσότητα του ύδατος που υπερβαίνει την υδροχωρητικότητα των απορριμμάτων *in situ* αντιστοιχεί στην ποσότητα των σχηματιζόμενων στραγγισμάτων (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Τα συστατικά που αποτελούν το υδατικό ισοζύγιο παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Υδατικό Ισοζύγιο ενός ΧΥΤΑ (McBean *et al.*, 1995).

## 2.5. Κίνηση στραγγισμάτων

Κάτω από κανονικές συνθήκες, τα στραγγίσματα συγκεντρώνονται στη βάση του ΧΥΤΑ. Εάν η βάση δεν είναι μονωμένη, τα στραγγίσματα κινούνται προς τα κάτω. Παρατηρείται επίσης και πλευρική κίνηση, όταν την επιτρέπει η τοπική υδρογεωλογία. Η κατακόρυφη κίνηση είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή οδηγεί στη ρύπανση των υπογείων υδάτων.

### 2.5.1. Νόμος Darcy

Η ποσότητα των στραγγισμάτων που διαφεύγουν από τη βάση ενός ΧΥΤΑ μπορεί να υπολογισθεί με το νόμο του Darcy:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

όπου:

Q: ποσότητα στραγγισμάτων που διηθούνται από την βάση του ΧΥΤΑ στο υπέδαφος (m<sup>3</sup>/sec)

K: υδραυλική αγωγιμότητα (m<sup>3</sup>/sec)

A: επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της ροής μέσω της οποίας κινούνται τα στραγγίσματα (m<sup>2</sup>)

dh/dl: υδραυλική κλίση στη διεύθυνση της ροής (m/m)

Το αρνητικό σημείο χρησιμοποιείται για να προκύψει θετική παροχή, αφού η υδραυλική κλίση είναι αρνητική. Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι συνάρτηση τόσο του ρευστού όσο και του γεωλογικού μέσου:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2)$$

όπου:

- k: Ειδική διαπερατότητα υλικού (m<sup>2</sup>)
- ρ: Πυκνότητα ρευστού (kgf/m<sup>3</sup>)
- μ: Δυναμικό ιξώδες ρευστού (kgf/m)
- g: Επιτάχυνση βαρύτητας (= 9,81 m/sec<sup>2</sup>)

Η ειδική διαπερατότητα έχει διαστάσεις επιφάνειας και η τιμή της κυμαίνεται περισσότερο από 12 τάξεις μεγέθους από τα πολύ διαπερατά χαλίκια σε σχεδόν αδιαπέρατη άργιλο. Λόγω της συμπίεσης των απορριμμάτων στο ΧΥΤΑ, η ειδική διαπερατότητα είναι μικρότερη στην κατακόρυφη από ότι στην οριζόντια διεύθυνση. Ο νόμος Darcy ισχύει για συνθήκες στρωτής ροής δηλαδή για τιμές αριθμού Reynolds μεταξύ 1 και 10 (Bear, 1972).

### 2.5.2. Κίνηση συστατικών στραγγισμάτων

Η κίνηση των συστατικών των στραγγισμάτων στο υπέδαφος είναι αποτέλεσμα μίας σειράς διεργασιών και φαινομένων, όπως συναγωγή (Advection), διάχυση, διασπορά, προσρόφιση και χημικών ή/και βιολογικών αντιδράσεων. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή αυτών των διεργασιών.

#### Συναγωγή

Είναι η κίνηση των συστατικών, που οφείλεται στην ταχύτητα των στραγγισμάτων στο υπέδαφος (Freeze and Cherry, 1979). Η ταχύτητα αυτή υπολογίζεται με το νόμο του Darcy και, μεταξύ άλλων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογισθεί ο χρόνος διαρροής (breakthrough time) μέσω ενός μονωτικού υλικού, π.χ. αργιλικού φραγμού (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

#### Διάχυση

Είναι το φαινόμενο μεταφοράς μάζας που οφείλεται στην κινητική ενέργεια των μορίων, δηλαδή την κίνηση Brown. Λαμβάνει χώρα χωρίς να υπάρχει υδραυλική κλίση στο σύστημα (συναγωγή), από σημεία υψηλής συγκεντρώσεως σε σημεία χαμηλής συγκεντρώσεως. Το φαινόμενο περιγράφεται από τους δύο νόμους του Fick.

#### Μηχανική Διασπορά

Είναι μια διεργασία ανάμιξης που μικροσκοπικά οφείλεται σε τρεις μηχανισμούς:

- Διαφορά στην ταχύτητα του ρευστού, όπως κατανέμεται στην διατομή των πόρων. Η ταχύτητα στο μέσον του πόρου είναι μεγαλύτερη από ό,τι κοντά στα τοιχώματα.
- Η ροή γύρω από τους κόκκους του στερεού προκαλεί αλλαγές στη μέση ταχύτητα των διαφόρων πόρων
- Η πολυπλοκότητα του μέσου (tortuosity), που οφείλεται σε ένα πολύπλοκο σύστημα πόρων διαφόρων μεγεθών και σχημάτων, έχει ως αποτέλεσμα οι γραμμές ροής σε αυτούς να μην είναι παράλληλες προς τη διεύθυνση της μέσης ταχύτητας.

Ο συνδυασμός μοριακής διαχύσεως και μηχανικής διασποράς λέγεται υδροδυναμική διασπορά. Το αποτέλεσμα της υδροδυναμικής συμπεριφοράς είναι ότι κάποια μόρια νερού ή ρύπων θα κινούνται ταχύτερα από την μέση ταχύτητα του ρευστού και κάποια άλλα

βραδύτερα. Έτσι μπορεί να έχουμε την άφιξη ρύπων σε ένα σημείο νωρίτερα από ότι υπολογίζεται με την μέση ταχύτητα (Νόμος Darcy).

### **Ρόφηση**

Προσρόφηση είναι μια φυσική ή/και χημική διεργασία κατά την οποία μια ουσία συσσωρεύεται σε κάποια διεπιφάνεια. Είναι δηλαδή επιφανειακό φαινόμενο. Απορρόφηση είναι η αντίστοιχη διεργασία κατά την οποία μια ουσία συσσωρεύεται μέσα σε μια άλλη φάση και συνεπώς δεν είναι επιφανειακό φαινόμενο. Η μαθηματική σχέση μεταξύ της συγκεντρώσεως ενός ρύπου στο νερό και της συγκεντρώσεώς του στον προσροφητή σε σταθερή θερμοκρασία και συνθήκες ισορροπίας λέγεται ισόθερμος. Η ισόθερμος Freundlich είναι η επικρατούσα ισόθερμος σε προβλήματα ρυπάνσεως εδαφών και υπογείου ύδατος.

### **Χημικές / Βιολογικές αντιδράσεις.**

Πολλοί ρύποι υφίστανται χημικούς ή/και βιολογικούς μετασχηματισμούς στο υπόγειο περιβάλλον με αποτέλεσμα την ελάττωση της συγκεντρώσεώς τους. Εάν είναι γνωστή η κινητική των αντιδράσεων αυτών είναι δυνατόν να υπολογισθεί η συγκέντρωσή τους ως συνάρτηση του χρόνου.

## **2.6. Μέθοδοι διαχείρισης στραγγισμάτων**

Σε ένα ΧΥΤΑ, λαμβάνει χώρα παραγωγή βιοαερίου, μίγματος δηλαδή αερίων, πρωτίστως μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, προϊόντα αναερόβιας αποικοδόμησης της οργανικής ύλης των αποβλήτων, καθώς επίσης και παραγωγή στραγγισμάτων. Τα στραγγίσματα περιέχουν ποικιλία χημικών ουσιών που παράγονται από διάλυση υλικών και συστατικών των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (ΑΣΑ) και από τις χημικές και βιοχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μέσα στο ΧΥΤΑ. Πιθανή αστοχία στην προστατευτική στρώση του ΧΥΤΑ, ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα την κατείσδυση των διασταλαγμάτων στο υπέδαφος με επακόλουθο τη ρύπανση πιθανού υποκείμενου υδροφόρου ορίζοντα.

Το κλειδί για την αποφυγή ενός τέτοιου σημαντικότητας περιβαλλοντικού προβλήματος, είναι η ορθή διαχείριση των διασταλαγμάτων. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί μια σειρά εναλλακτικών μεθόδων, σημαντικότερες εκ των οποίων είναι η εξάτμιση, η επεξεργασία με βιολογικές, χημικές και φυσικές μεθόδους ακολουθούμενη από διάθεση, η διοχέτευση σε συστήματα συλλογής και επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων και η ανακυκλοφορία τους εντός της μάζας των αποτιθέμενων στερεών απορριμμάτων του ΧΥΤΑ.

Για την επεξεργασία των διασταλαγμάτων μέσω της εξάτμισης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ταμιευτήρων, με προστατευτική στρώση στον πυθμένα τους, που το στράγγισμα αφήνεται να εξατμιστεί. Σε περιοχές με υψηλή βροχόπτωση ο ταμιευτήρας καλύπτεται με προστατευτική γεωμεμβράνη για να εμποδίζεται η είσοδος ύδατος βροχόπτωσης. Στην επεξεργασία ακολουθούμενη από διάθεση, λαμβάνει χώρα προεπεξεργασία ή ολοκληρωμένη επεξεργασία αυτών, με μια σειρά βιολογικών ή φυσικοχημικών διεργασιών, οι οποίες επιλέγονται με βάση τους ρύπους που θα πρέπει να απομακρυνθούν. Στη διοχέτευση σε μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, το στράγγισμα απλά διοχετεύεται σε αγωγούς συλλογής υγρών αποβλήτων που καταλήγουν σε μονάδα επεξεργασίας. Πολλές φορές, πριν τη διοχέτευση αυτή, απαιτείται κάποια προεπεξεργασία τους για μείωση του οργανικού τους φορτίου. Στην ανακυκλοφορία στραγγισμάτων, όταν χρησιμοποιείται ως μέθοδος διαχείρισης τους, αυτά συλλέγονται και επαναδιοχετεύονται στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ. Ουσιαστικά, ο ΧΥΤΑ μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μη ελεγχόμενος αναερόβιος αντιδραστήρας, στο εσωτερικό του οποίου λαμβάνουν χώρα πλήθος βιολογικών

και φυσικοχημικών διεργασιών, οι οποίες συμβάλλουν αποτελεσματικά στη σταθεροποίηση του στραγγίσματος. Έχει αναπτυχθεί παγκοσμίως μια σειρά τεχνικών ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων. Οι κυριότερες είναι:

- η διάθεση με ψεκάσμο, που ειδικά ακροφύσια τοποθετημένα σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους, ψεκάζουν το στράγγισμα στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ. Το διαστάλαγμα με τον τρόπο αυτό υφίσταται επεξεργασία με τη βοήθεια του αερισμού κατά τη διάρκεια του ψεκάσμου και τη διήθηση διαμέσου του εδαφικού καλύμματος.
- η επιφανειακή διοχέτευση, που τάφροι ή λίμνες διήθησης χρησιμοποιούνται για να διανείμουν τα στραγγίσματα που αντλούνται από τη δεξαμενή αποθήκευσης
- η υποεπιφανειακή διοχέτευση, που το στράγγισμα διοχετεύεται σε κάθετα πηγάδια ή σε αγωγούς εντός οριζόντιων τάφρων στο εσωτερικό της μάζας των απορριμμάτων
- η προύγρανση, σύμφωνα με την οποία το στράγγισμα συλλέγεται σε ειδικά βυτιοφόρα οχήματα που διαθέτουν στο πίσω μέρος τους ειδικούς διαποτιστικούς σωλήνες που διαβρέχουν τα απορρίμματα κατά διάρκεια της απόθεσης.

## 2.7. Περιγραφή της μεθόδου ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων

Μια αποτελεσματική μέθοδος για την επεξεργασία των διασταλαγμάτων είναι να συλλέγονται και να επαναδιοχετεύονται στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ. Κατά τα πρώτα στάδια της λειτουργίας του ΧΥΤΑ, τα στραγγίσματα περιέχουν σημαντικές ποσότητες από TDS, BOD<sub>5</sub>, COD, θρεπτικά και βαρέα μέταλλα (Καλαμπούκας, 2001). Όταν τα διασταλάγματα επαναδιοχετεύονται, η συγκέντρωση των συστατικών ελαττώνεται εξαιτίας της βιολογικής δράσης και άλλων φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν μέρος μέσα σε ένα ΧΥΤΑ. Για παράδειγμα, τα απλά οργανικά οξέα που απαντώνται στα στραγγίσματα θα μετατραπούν σε CH<sub>4</sub> και CO<sub>2</sub>. Εξαιτίας της αύξησης του pH, όταν αρχίζει να παράγεται το CH<sub>4</sub> μέσα στο ΧΥΤΑ, τα μέταλλα κατακρημνίζονται και συγκρατούνται μέσα στο ΧΥΤΑ.

Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων είναι η ανάκτηση των παραγομένων αερίων που περιέχουν CH<sub>4</sub>. Τυπικά, ο ρυθμός παραγωγής αερίων είναι μεγαλύτερος όπου εφαρμόζονται συστήματα επανακυκλοφορίας διασταλαγμάτων. Προς αποφυγή της ανεξέλεγκτης απελευθέρωσης αερίων από το ΧΥΤΑ, όταν τα διασταλάγματα επαναδιοχετεύονται για επεξεργασία, ο ΧΥΤΑ θα πρέπει να εφοδιαστεί με ένα σύστημα ανάκτησης αερίων. Σε τελευταία ανάλυση, θα είναι απαραίτητο να συλλέγονται, να επεξεργάζονται και να διατίθενται οι ποσότητες των υπολειμματικών στραγγισμάτων. Επισημαίνεται ότι σε μεγάλες χωματερές θα ήταν απαραίτητο να εξασφαλίζονται δυνατότητες αποθήκευσης στραγγισμάτων.

Η επανακυκλοφορία των διασταλαγμάτων είναι μια από τις πιο απλές μεθόδους επεξεργασίας τους εντός του ΧΥΤΑ, και είναι δυνατό με την τεχνική αυτή να διεισδύσουν ξανά διαμέσου της μάζας των απορριμμάτων. Ουσιαστικά, η επανακυκλοφορία χρησιμοποιεί το ΧΥΤΑ σαν ένα μη ελεγχόμενο αναερόβιο αντιδραστήρα για αποτελεσματική αναερόβια επεξεργασία. Επαναδιοχετεύοντας τα διασταλάγματα, τα οργανικά συστατικά τους μπορούν να μειωθούν από τους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται με βιολογικό τρόπο. Χρησιμοποιώντας πειραματικές στήλες που εξομοιώνουν τις συνθήκες στους ΧΥΤΑ, ο Pohland (1972, 1975, 1980) και οι Pohland *et al.* (1990), βρήκαν ότι όταν τα διασταλάγματα συλλέγονται και επαναδιοχετεύονται στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό της μάζας των απορριμμάτων, το οργανικό φορτίο αυτών μειωνόταν σε ένα μικρό κλάσμα σε σχέση με τη μέγιστη τιμή (peak value) (για παράδειγμα από 2000 mg/L COD σε λιγότερο από 1000 mg/L) σε μια περίοδο λίγο μεγαλύτερη του ενός έτους.

Μια έρευνα των αποτελεσμάτων της επανακυκλοφορίας στραγγισμάτων χρησιμοποιώντας μια διάταξη πιλοτικής κλίμακας παρήγαγε όμοια αποτελέσματα (Pohlman, 1979). Οι Leckie *et al.* (1975, 1979), επίσης διεξήγαγαν δοκιμές πεδίου αυτής της μεθόδου και ανάφεραν αξιοσημείωτη σταθεροποίηση διασταλαγμάτων. Και οι δύο ερευνητικές ομάδες ανακοίνωσαν ότι η επανακυκλοφορία προτείνεται για μια ταχύτερη ανάπτυξη ενεργών αναερόβιων μεθανογόνων βακτηριακών πληθυσμών. Ο ρυθμός απομάκρυνσης οργανικών συστατικών ήταν πιο έντονος με αρχική προσθήκη λάσπης από βιολογικούς καθαρισμούς και έλεγχο του pH. Επιπρόσθετα με την ταχεία μείωση του COD των διασταλαγμάτων, παρόμοιες μειώσεις συγκεντρώσεων παρατηρήθηκαν για τα BOD, TOC, πτητικά οξέα, φωσφορικά άλατα, αμμωνιακά άλατα και TDS. Η μείωση του αζώτου και του φωσφόρου ήταν χαμηλή και τα επανακυκλοφορούντα στραγγίσματα παρέμεναν υψηλά σε ανόργανα συστατικά (Canziani and Cossu, 1989).

## 2.8. Πλεονεκτήματα της επανακυκλοφορίας στραγγισμάτων

Έχει διαπιστωθεί πως υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στην επεξεργασία των στραγγισμάτων μέσω της ανακυκλοφορίας τους καθώς επίσης και πολλά προκύπτοντα οφέλη για την παραγωγικότητα του ΧΥΤΑ καθώς το στράγγισμα υφίσταται επεξεργασία με τον τρόπο αυτό. Μερικά από τα κυριότερα πλεονεκτήματα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Οι ΧΥΤΑ που χρησιμοποιούν συστήματα επανακυκλοφορίας διασταλαγμάτων έχει διαπιστωθεί πως παρουσιάζουν μια μείωση στη συγκέντρωση των διασταλαγμάτων συγκρινόμενοι με τους ΧΥΤΑ που δεν εφαρμόζουν τέτοιου είδους συστήματα. Αυτό μειώνει τον απαιτούμενο βαθμό επεξεργασίας τους και επομένως το αντίστοιχο κόστος.
- Το αυξανόμενο ποσοστό υγρασίας μέσα στη μάζα των απορριμμάτων βελτιώνει τις συνθήκες του συστήματος για μεγαλύτερη απόδοση στη βιολογική αποικοδόμηση του οργανικού υλικού στο ΧΥΤΑ.
- Το οργανικό κλάσμα του στραγγίσματος, το οποίο απαιτεί επεξεργασία εκτός ΧΥΤΑ, επιδέχεται ολοένα και περισσότερη επεξεργασία κάθε φορά που αυτό ανακυκλώνεται διαμέσου του ΧΥΤΑ.
- Το περιβάλλον που αναπτύσσεται εντός του ΧΥΤΑ, συμβάλλει στην απομάκρυνση ανόργανων συστατικών από το στράγγισμα, μέσω της προσρόφησης αυτών από τα απορρίμματα.
- Η ανακυκλοφορία στραγγισμάτων σταθεροποιεί το βιολογικό σύστημα εντός του ΧΥΤΑ, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ενδεχόμενοι κίνδυνοι για το περιβάλλον όπως και οι ενέργειες παρακολούθησης κατόπιν του κλεισίματος του ΧΥΤΑ.
- Η επανακυκλοφορία στραγγισμάτων αυξάνει το ρυθμό με τον οποίο αποικοδομούνται τα απορρίμματα και αυτό αυξάνει το ρυθμό παραγωγής μεθανίου. Όπως είναι φανερό, κάτι τέτοιο καθιστά την ανάκτηση μεθανίου για ενεργειακή εκμετάλλευση πολύ εύκολη.
- Η επανακυκλοφορία στραγγισμάτων είναι μια τεχνική επεξεργασίας σχετικά απλή και οικονομική (Canziani and Cossu, 1989, Reinhart and Townsend, 1998, McBean *et al.*, 1995).

## 2.9. Μειονεκτήματα της επανακυκλοφορίας διασταλαγμάτων

Η επανακυκλοφορία στραγγισμάτων είναι μια διαδεδομένη μέθοδος διαχείρισης των στραγγισμάτων στον ελλαδικό χώρο. Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι για τη μέθοδο αυτή υπάρχει αρκετή σύγχυση καθώς η νομοθεσία δεν είναι σαφής (Αριθ. οικ. 114218 ΦΕΚ Β' 1016/17.11.97). Πιο συγκεκριμένα, η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων στο

απορριμματικό ανάγλυφο δεν επιτρέπεται εφόσον δεν πρόκειται για προεπεξεργασμένα στραγγίσματα που θα χρησιμοποιηθούν μόνο για την ελεγχόμενη διατήρηση της επιθυμητής υγρασίας στο ΧΥΤΑ. Αν παραβλέψουμε τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζεται η ανακυκλοφορία στραγγισμάτων στους ΧΥΤΑ στον ελληνικό χώρο έχοντας εμπειρία από εκείνους της Περιφέρεια Κρήτης τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι:

- Το στράγγισμα μπορεί να διέρχεται μέσω καναλιών βραχυκυκλώματος λόγω έντονης ετερογένειας του ΧΥΤΑ. Αυτό καθιστά δύσκολη τη διαβροχή όλης της μάζας των απορριμμάτων και της πλήρους επεξεργασίας του διασταλάγματος.
- Ο κίνδυνος της περιβαλλοντικής έκθεσης όταν το στράγγισμα διοχετεύεται στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ.
- Η έλλειψη πληροφοριών και συμπερασμάτων σχετικά με το αντικείμενο αυτό, αυξάνει το ενδεχόμενο αστοχίας της μεθόδου (Canziani and Cossu, 1989, Reinhart and Townsend, 1998, McBean *et al.*, 1995).

## 2.10. Περιγραφή τεχνικών ανακυκλοφορίας

Οι Tolman *et al.* (1978) παρέχουν πληροφορίες για σχεδιασμό και λειτουργία τεσσάρων τύπων συστημάτων επανακυκλοφορίας διασταλαγμάτων. Αυτά είναι:

### Διάθεση με ψεκασμό

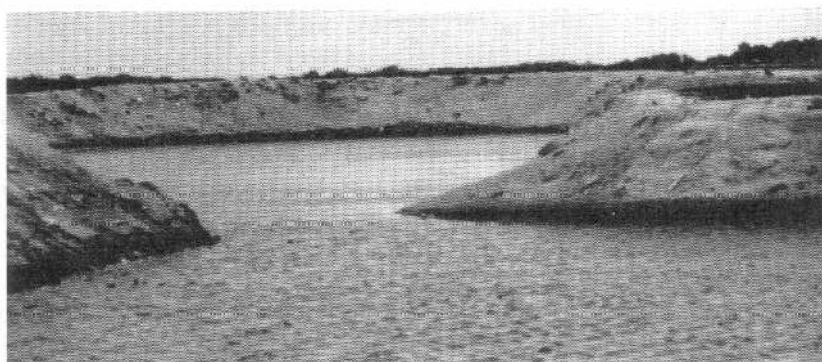
Η διάθεση των διασταλαγμάτων με ψεκασμό (Εικόνα 1) λαμβάνει χώρα με περιοδική άντληση συλλεγομένων εκροών και ψεκασμό αυτών με ειδικά συστήματα ψεκασμού (ακροφύσια) τοποθετημένα σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μερική επεξεργασία διασταλαγμάτων μπορεί να επιτευχθεί κατά τη διάρκεια του ψεκασμού σαν αποτέλεσμα του συνδυασμού της εξάτμισης, του αερισμού και της διήθησης διαμέσου του εδαφικού καλύμματος.



Εικόνα 1. Διάθεση με ψεκασμό (ΧΥΤΑ Αμαρίου).

### *Η επιφανειακή διοχέτευση*

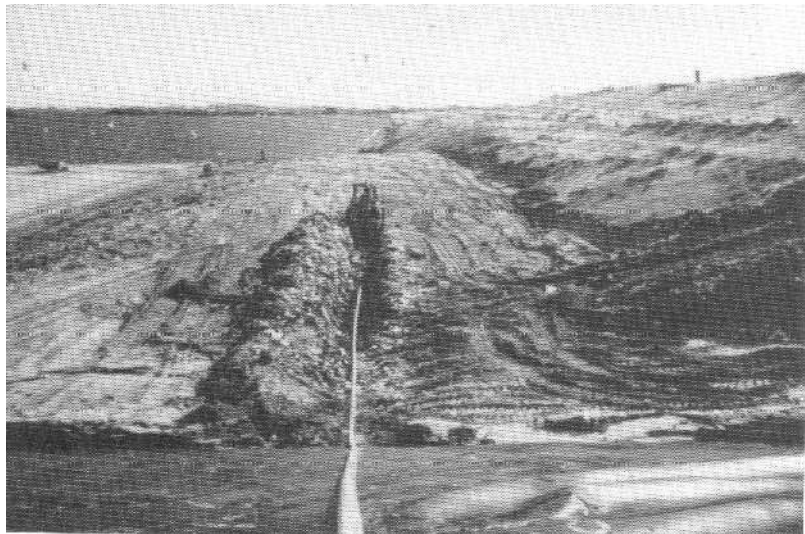
Η διάθεση των διασταλαγμάτων με επιφανειακή ροή είναι μια ακριβής και καλά ανεπτυγμένη τεχνική όπου τάφροι, λίμνες διήθησης ή διάτρητοι σωλήνες χρησιμοποιούνται για να διανείμουν την εκροή (Εικόνα 2). Τα στραγγίσματα αντλούνται περιοδικά στα συστήματα και αφήνονται να διεισδύσουν διαμέσου του εδαφικού καλύμματος. Και στα δύο προαναφερθέντα συστήματα, μια μικρή δεξαμενή αποθήκευσης στεγανής βάσης είναι απαραίτητη για να εξασφαλίζεται η αποθήκευση των στραγγισμάτων. Η επιφανειακή διοχέτευση σαν μια δυναμική διεργασία επεξεργασίας, είναι μια βιώσιμη μέθοδος επεξεργασίας διασταλαγμάτων.



**Εικόνα 2.** Λίμνη επανεισαγωγής στραγγίσματος στο εσωτερικό των απορριμμάτων του ΧΥΤΑ μέσω διήθησης (Alachua County, Florida, Southwest Landfill).

### *Η υποεπιφανειακή διοχέτευση*

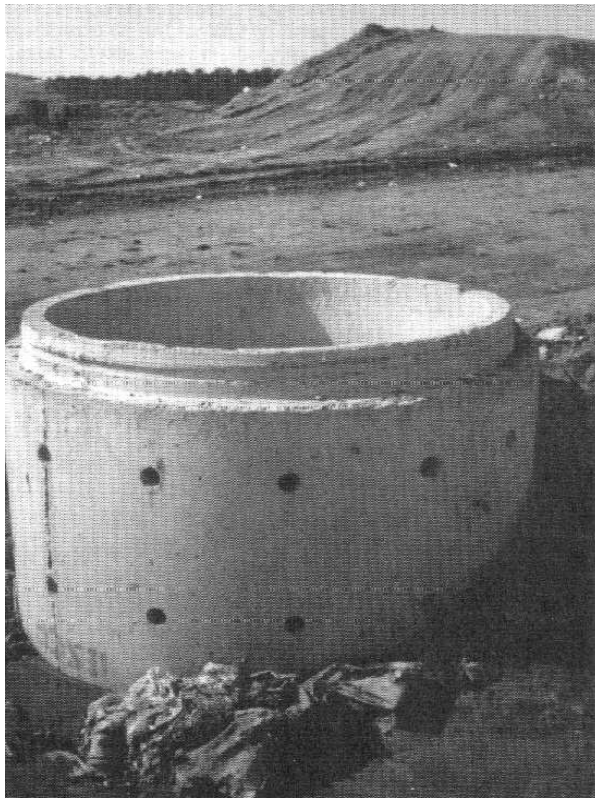
Η υποεπιφανειακή διοχέτευση θεωρείται επίσης μια μέθοδος που συμβάλλει στην επίτευξη μιας ομοιόμορφης σταθεροποίησης στο ΧΥΤΑ. Στην τεχνική αυτή τα στραγγίσματα τροφοδοτούνται στη μάζα των απορριμμάτων διαμέσου οριζόντιων υποεπιφανειακών τάφρων με πίεση (Εικόνα 3) ή καθέτων διάτρητων πηγαδιών με κλειστό το κάτω άκρο (στην περίπτωση αυτή το στράγγισμα διοχετεύεται εντός του πηγαδιού υπό πίεση και διαχέεται μέσω των οπών που βρίσκονται διάσπαρτες κατά μήκος αυτού) (Εικόνα 4). Η υποεπιφανειακή διοχέτευση πρέπει να γίνεται με συνεχή παροχή και έχει το πλεονέκτημα της αποφυγής τοπικών προβλημάτων οσμής.



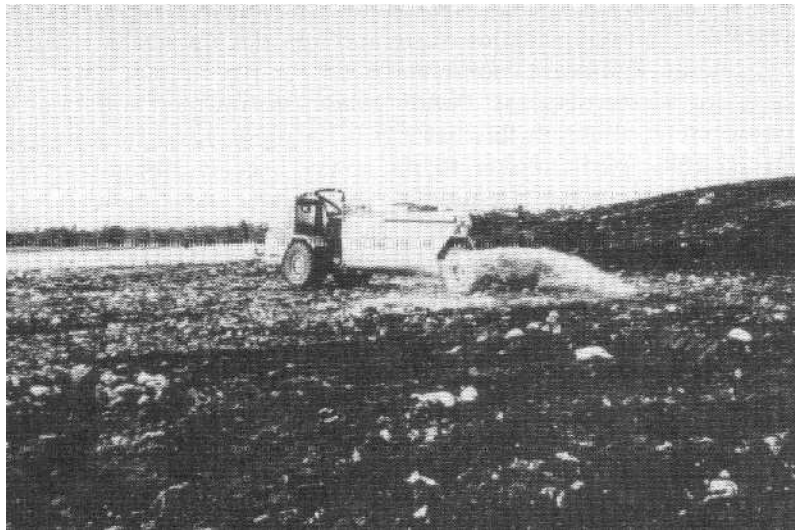
**Εικόνα 3.** Οριζόντια υποεπιφανειακή τάφρος με αγωγό σε φάση κατασκευής (Alachua County, Florida, Southwest Landfill).

#### *Η προϋγγραση*

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, το προς ανακυκλοφορία διαστάλαγμα, συλλέγεται σε ειδικά βυτιοφόρα φορτηγά οχήματα. Τα οχήματα αυτά διαθέτουν στο πίσω μέρος τους διάτρητους σωλήνες ποτίσματος, μέσω των οποίων διαβρέχουν τα στερεά απορρίμματα κατά τη διάρκεια της απόθεσής τους (Εικόνα 5). Η τεχνική αυτή διαθέτει τα πλεονεκτήματα της απλότητας, της δυνατότητας εξάτμισης του διασταλάγματος και της ομοιόμορφης ύγρανσης των απορριμμάτων. Η τεχνική της προϋγγρασης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κλειστούς ΧΥΤΑ στους οποίους έχει εναποτεθεί το τελικό κάλυμμα, και για το λόγο αυτό θα πρέπει να αντικαθίσταται από άλλη τεχνική. (Townsend, 1995, Canziani and Cossu, 1989, Reinhart and Townsend, 1998, McBean *et al.*, 1995, Aran *et al.*, 1999, Earle *et al.*, 1995, Townsend and Miller, 1994).



**Εικόνα 4.** Κάθετο πηγάδι (διάτρητο) επανεισαγωγής διασταλάγματος (Worcester County, Maryland, Landfill).



**Εικόνα 5.** Προϋγραση των απορριμμάτων με χρήση ειδικού βυτιοφόρου οχήματος.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προαναφερθέντων τεχνικών ανακυκλοφορίας, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2 (Καλαμπούκας, 2001).

**Πίνακας 2. Σύγκριση των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων τεχνικών ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων.**

Τεχνικές Ανακυκλοφορίας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
(1) Άρδευση με ψεκασμό (Spray Irrigation)	(α) Ευελιξία (β) Διευκολύνει την εξάτμιση	(α) Ενδεχόμενη υπερχειλίση του στραγγίσματος
(2) Επιφανειακές λίμνες διήθησης (Surface Ponds)	(α) Απλή κατασκευή και λειτουργία (β) Αποτελεσματική ύγρανση κάτω από τη λίμνη διήθησης (γ) Επιτρέπει την αποθήκευση στραγγισμάτων	(α) Συλλέγει νερό καταιγίδων (β) Μετά από κάποιο χρόνο λειτουργίας αρχίζουν να επιπλέουν τα απορρίμματα (γ) Εμφάνιση ανεπιθύμητων οσμών (δ) Περιορισμένη έκταση επιρροής (ε) Ασυμβατότητα με το κλείσιμο του ΧΥΤΑ
(3) i) Οριζόντιες υποεπιφανειακές τάφροι (Subsurface Horizontal Trenches)	(α) Χαμηλό κόστος υλικών (β) Μεγάλοι όγκοι στραγγίσματος μπορούν να ανακυκλωθούν	(α) Ενδεχόμενη αστοχία στη στατικότητα της τάφρου (β) Ενδεχόμενο φράξιμο από μικροοργανισμούς μπορεί να περιορίσει τους όγκους ανακυκλοφορίας (δ) Δυσκολία επισκευών
ii) Κάθετα πηγάδια έγχυσης (Vertical Injection Wells)	(α) Σχετικά μεγάλοι όγκοι στραγγίσματος μπορούν να ανακυκλωθούν (β) Χαμηλό κόστος υλικών (γ) Τεχνική εύκολης κατασκευής κατά την διάρκεια τοποθέτησης των απορριμμάτων (αλλά και μετέπειτα) (δ) Συμβατότητα με το κλείσιμο του ΧΥΤΑ	(α) Πρόβλημα καθίζησης (β) Περιορισμένη ακτίνα επιρροής (γ) Παρεμβάλλεται στις διαδικασίες τοποθέτησης των απορριμμάτων
(4) Προύγρυνση (Prewetting)	(α) Απλότητα (β) Συμβάλλει στην αυξημένη εξάτμιση	(α) Ανάγκη εντατικής παρουσίας προσωπικού (β) Ενδεχόμενη υπερχειλίση στραγγίσματος (γ) Επαυξάνει τη συμπίεση (δ) Ασυμβατότητα με το κλείσιμο του ΧΥΤΑ

## 2.11. Μέθοδοι επεξεργασίας στραγγισμάτων

Κάθε περίπτωση διαχείρισης στραγγισμάτων είναι μοναδική και σε πολλές περιπτώσεις η σύσταση των στραγγισμάτων προκαλεί προβλήματα. Το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής ποικίλουν και διαφέρουν μεταξύ τους μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη επιλογή διάθεσης για μια περιοχή ενδέχεται να είναι ακατάλληλη για εφαρμογή σε κάποια άλλη. Επομένως δεν είναι συνετό να προσπαθήσουμε να προτείνουμε ειδικούς

τρόπους διάθεσης για συγκεκριμένους επικίνδυνους ρυπαντές. Στη συνέχεια θα αναφερθούν εναλλακτικές περιπτώσεις επεξεργασίας και διάθεσης που χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές πραγματικές εφαρμογές ή εξετάστηκαν σε πιλοτική κλίμακα. Οι μέθοδοι αυτοί συνοψίζονται Πίνακα 3.

Σε κάθε περίπτωση υπάρχει η πιθανότητα η εφαρμογή μιας μεθόδου για την εξυγίανση των στραγγισμάτων να έχει δευτερεύουσες επιπτώσεις π.χ. στην αέρια ρύπανση. Σύμφωνα με τους Kevin J *et al.* (1997) ρυπαντές όπως το βενζόλιο βρέθηκε να είναι πάνω από τα όρια στην περιοχή που γινόταν συλλογή των στραγγισμάτων ενώ στην περιοχή που δεν εφαρμόζονταν συλλογή στραγγισμάτων δεν παρατηρήθηκαν αντίστοιχες υψηλές τιμές.

### 2.11.1. Αφαίρεση από τον ΧΥΤΑ των ανεπεξέργαστων στραγγισμάτων

Μπορεί να είναι αποδεκτό σε μερικές περιπτώσεις να επιτρέπεται η υποεπιφανειακή διάθεση των στραγγισμάτων. Αυτό έχει εφαρμοστεί στο παρελθόν χωρίς να προκαλεί ιδιαίτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση είτε σε περιοχές όπου βρίσκονται ακατάλληλα προς χρήση υδροφόρα στρώματα (π.χ. υφάλμυρα / αλμυρά νερά) ή όπου υπάρχουν αρκετές ενδείξεις για ικανοποιητική φυσική αποδόμηση των συστατικών των στραγγισμάτων (Natural Attenuation). Εντούτοις, έχει παρουσιαστεί ζημιά στους υδάτινους πόρους, την ανθρώπινη υγεία και τα οικολογικά συστήματα ως αποτέλεσμα της απελευθέρωσης των επικίνδυνων στραγγισμάτων. Η αντίληψη του μεγέθους των κινδύνων και οι εξαιρετικά υψηλές δαπάνες για διορθωτικά μέτρα είναι πιθανό να ελαχιστοποιήσουν τον αριθμό των περιπτώσεων που η επιλογή υποεπιφανειακής διάθεσης θα επιτραπεί στο μέλλον για περιοχές που δέχονται επικίνδυνα απόβλητα.

**Πίνακας 3.** Επισκόπηση των τεχνολογιών για διάθεση/επεξεργασία των στραγγισμάτων από ΧΥΤΑ (Coleman, 1985)

---

1.	Απομάκρυνση του ανεπεξέργαστου στραγγίσματος από τον ΧΥΤΑ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Υποεπιφανειακή διαρροή</li> <li>• Απόρριψη σε επιφανειακά νερά</li> <li>• Απομάκρυνση με βυτιοφόρα σε:           <ul style="list-style-type: none"> <li>(i) Αποχετευτικές εγκαταστάσεις</li> <li>(ii) Διάθεση στην θάλασσα</li> <li>(iii) Σύνδεση με το αποχετευτικό δίκτυο</li> </ul> </li> </ul>
2.	Επί τόπου επεξεργασία ακολουθούμενη από απόρριψη σε αποχετευτικό δίκτυο ή επιφανειακά νερά
	Φυσικοχημική <ul style="list-style-type: none"> <li>• κροκίδωση/συσσωμάτωση/καθίζηση</li> <li>• Έλεγχος pH, αερισμός και εκφύσηση με αέρα</li> <li>• Προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα</li> <li>• Οξειδωση με ClO<sup>+</sup></li> </ul>
	Βιολογική <ul style="list-style-type: none"> <li>• Αερόβια</li> <li>• Trickling filter</li> <li>• Ενεργή ιλύς</li> <li>• Αεριζόμενες λίμνες</li> <li>• Περιστρεφόμενους βιολογικούς δίσκους</li> <li>• Σύστημα δεξαμενών SBR</li> </ul>
	Αναερόβια
3.	Επεξεργασία εδάφους

---

Η άμεση απόρριψη στα επιφανειακά νερά έχει εφαρμοστεί και σε μερικές περιπτώσεις με την συγκατάθεση των αρχών, αλλά μόνο σε περιπτώσεις όπου η ηλικία και η διάλυση έχουν μειώσει την ισχύ των στραγγισμάτων σε αβλαβή επίπεδα. Πάντως μελέτες (Hielmar, 1994, Hielmar *et al.*, 2000) έχουν δείξει ότι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να μπορούμε να διαθέσουμε τα στραγγίσματα στα υπόγεια νερά χωρίς επεξεργασία είναι εξαιρετικά μεγάλος (300 – 600 χρόνια για ΧΥΤΑ επικινδύνων αποβλήτων) και ξεπερνά ακόμα και τον χρόνο κατά τον οποίο συνήθως προβλέπεται να εφαρμόσουμε κάποιο είδος επεξεργασίας (~50-100 χρόνια). Στον Πίνακα 4 φαίνονται τα αποτελέσματα της μελέτης που μόλις αναφερθήκαμε.

**Πίνακας 4.** Εκτιμώμενος χρόνος (έτη) για την ασφαλή διάθεση στραγγισμάτων σε υπόγεια νερά.

Ρυθμός παραγωγής στραγγισμάτων	Εκτιμώμενος χρόνος για την ασφαλή διάθεση σε υπόγεια νερά (έτη)			
	ΧΥΤΑ επικ. αποβλήτων	ΧΥΤΑ αστικών αποβλήτων	ΧΥΤΑ μη επικινδύνων και χαμηλών οργανικών	Ανόργανα Απόβλητα
Μέσος 200 mm/yr	600	300	150	100
Υψηλός 400 mm/yr	300	150	75	50

Η πιο κοινή μέθοδος διάθεσης εκτός περιοχής ήταν είτε μέσω βυτιοφόρων φορτηγών οχημάτων είτε μέσω άντλησης μεταφορά των στραγγισμάτων σε μια μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (ΜΕΥΑ). Ο βαθμός στον οποίο αυτό μπορεί να γίνει εξαρτάται πάρα πολύ από τα τοπικά χαρακτηριστικά, όπως η φύση των στραγγισμάτων και η εγγύτητα και δυναμικότητα επεξεργασίας της ΜΕΥΑ. Μια έρευνα από τον Barber (1982) σε διάφορες ΜΕΥΑ στο Ηνωμένο Βασίλειο έδειξε ότι ενώ σε μερικές ΜΕΥΑ η επεξεργασία των στραγγισμάτων δεν προκάλεσε σημαντικά προβλήματα αν και συντελούσε στο 50% του συνολικού οργανικού φορτίου, σε άλλες ΜΕΥΑ πολύ χαμηλότερες τιμές στραγγισμάτων προκαλούσαν σημαντικά προβλήματα όπως αφρισμό, χαμηλή καθιζησιμότητα, οσμές H<sub>2</sub>S, και υψηλές εκροές αμμωνίας. Συνήθως οι αρχές επιτρέπουν την περιοδική διάθεση στραγγισμάτων γνωστής σύστασης φοβούμενες ότι μια υψηλότερη παροχή επικινδύνων συστατικών σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι δυνατό να θέσει σε κίνδυνο όλη την ΜΕΥΑ. Συνήθως επιλέγουν την προεπεξεργασία πριν την διάθεση σε ΜΕΥΑ για την αφαίρεση συστατικών όπως τα σουλφίδια.

### 2.11.2. Φυσικοχημική επεξεργασία

Η προσθήκη απλών χημικών ουσιών που ακολουθούνται από μια ακολουθία μίξης, κροκίδωσης, συσσωμάτωσης και καθίζησης μπορεί να είναι χρήσιμη είτε πριν είτε μετά από άλλες διαδικασίες επεξεργασίας (Πίνακας 5). Αυτός ο τύπος επεξεργασίας έχει μελετηθεί ευρέως σε εργαστηριακή κλίμακα (bench-scale) και έχει ενσωματωθεί σε μερικές από τις λίγες πραγματικού μεγέθους εφαρμογές της επεξεργασίας στραγγισμάτων.

**Πίνακας 5.** Προσθήκη χημικών κατακρημνιστηρίων στην επεξεργασία στραγγισμάτων.

Χημικό προσθήκης	Δόση (kg/m <sup>3</sup> )	Καθοριστικός παράγοντας	Εισροή	Εκροή	% μείωση	Σχόλια
Lime	0,5-2,5	TOC colour	452	360	20-85	Σταθεροποιημένο στραγγίσμα συνδιάθεσης, απομάκρυνση ανεξάρτητη

						της δόσης
		COD	18500	7200	61	
		BOD	10 900	5200	52	
Lime	2,3-4,4	SS	1 044	239	77	85% αστικά και ~15% βιομηχανικά + κάποια υγρά
		Fe	312	3,8	99	
		Zn	21	0,6	97	
	7	TOC			20	
	6	χρώμα			82	
	4	χρώμα			47	
Lime	2	χρώμα			7	Εκροή από αναερόβια επεξεργασία στραγγίσματος αστικών απορριμμάτων
	6	θολερότητα			-98	
	4	θολερότητα			-83	
	2	θολερότητα			-58	
	6	TOC	9850	9250	6	
Lime		COD	22900	20 700	10	Μικτός ΧΥΤΑ
		Fe	200-2000	4	>99	βιομηχανικών αποβλήτων
		θολερότητα	130 NTU	2,2	98	
	2-3	TOC	5200	2740	47	
		COD	14000	9200	34	
	0,05-0,25	Fe	47	0,7	99	
Lime +		Mn	10	0,04	>99	Αστικά απορρίμματα
ozone		Zn	12	0,003	>99	
		χρώμα	2500	100	96	
		θολερότητα	69	2	97	
Lime	0,45	COD	2820	2370	26	Αστικά απορρίμματα

Οι στόχοι για τους οποίους έχει υιοθετηθεί ή έχει μελετηθεί περιλαμβάνουν:

- Μείωση των συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα στις επόμενες βιολογικές διαδικασίες, να ελαχιστοποιήσει τα προβλήματα με το φράξιμο σωλήνων, βαλβίδων, κ.λπ., να αποτρέψει το φράξιμο των στηλών ενεργοποιημένου άνθρακα.
- Καθίζηση του σιδήρου, του μαγγανίου, του ανθρακικού άλατος του ασβεστίου και των βαρέων μετάλλων, να προστατεύσει τις φυσικές εγκαταστάσεις και να αποτρέψει την τοξικότητα και την συγκέντρωση ανόργανων στερεών στις βιολογικές διαδικασίες.
- Αφαίρεση της θολότητας και του χρώματος από τις εκροές.
- Μερική αφαίρεση του οργανικού φορτίου.
- Οι ακόλουθες χημικές ουσίες έχουν εξεταστεί, και έχουν χρησιμοποιηθεί σε μερικές περιπτώσεις στην πράξη είναι Υδράσβεστος, Quick lime, NaOH, MgOH, Alum, Χλωριούχος σίδηρος, Θειούχος σίδηρος και Διάφορα πολυμερή.

Η χρήση  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  έχει αποδειχτεί αρκετά αποτελεσματική και οικονομική, όπως επίσης και η χρήση alum και τα διάφορα πολυμερή που έχουν χρησιμοποιηθεί στην τελική επεξεργασία της εκροής. Τα αποτελέσματα διάφορων μελετών που χρησιμοποιούν το lime έδειξαν ότι η αφαίρεση των μετάλλων και της θολότητας είναι πολύ αποτελεσματική, η αφαίρεση του χρώματος είναι συγκρατημένα αποτελεσματική και η αφαίρεση του οργανικού άνθρακα μόνο μερικώς αποτελεσματική. Κάποια μεταβλητότητα είναι προφανής στην

ικανότητα αφαίρεσης COD σε υψηλής ισχύος στραγγίσματα και στις δόσεις που απαιτούνται για να επιτύχουν καλή αφαίρεση χρώματος σε σταθεροποιημένα στραγγίσματα. Αν και πολλά στραγγίσματα είναι γνωστό ότι περιέχουν οργανικά μέσα που βοηθούν την δημιουργία συμπλόκων, δεν φαίνεται να προκαλούν σοβαρά προβλήματα με την αφαίρεση των μετάλλων στα παραδείγματα που παρουσιάζονται. Εντούτοις bench-scale δοκιμές πρέπει πάντα να γίνονται για να αξιολογηθούν οι βέλτιστες δόσεις που απαιτούνται σε οποιαδήποτε ιδιαίτερη περίπτωση. Είναι πιθανό ότι η σημαντικότερη χρήση στην προεπεξεργασία των στραγγισμάτων θα είναι να αφαιρεθούν τα μέταλλα, τα αιωρούμενα στερεά και η θολότητα παρά η αφαίρεση οργανικών μολυσματικών φορτίων.

Μια περαιτέρω χρήση του lime στη γενική διαχείριση στραγγισμάτων ήταν στη μείωση των εκπομπών οσμών από τις δεξαμενές συλλογής στραγγισμάτων. Οι οσμές σουλφιδίων μειώνονται επειδή η άνοδος στο pH μειώνει το ποσό του  $H_2S$  που μπορεί να ελευθερωθεί. Μυρωδιές από λιπαρά οξέα έχουν προκαλέσει επίσης προβλήματα και μπορούν επίσης να περιοριστούν κατ' αυτό τον τρόπο, δεδομένου ότι σε τιμές pH επάνω από 9 συναντώνται σε μορφή ιόντων και έτσι είναι αδύνατο να εξατμιστούν. Οι δόσεις lime που απαιτούνται για την επίτευξη  $pH=10$  κυμαίνονται από  $0,5 \text{ kg/m}^3$  για σταθεροποιημένα στραγγίσματα έως  $6 \text{ kg/m}^3$  ή περισσότερο για υψηλής ισχύος στραγγίσματα (Steiner *et al.*, 1979). Εντούτοις, μια συχνή παρατήρηση πειραματικών δοκιμών δείχνει ότι ο αερισμός προκαλεί συχνά μια γρήγορη άνοδο του  $pH>9$  ακόμη και για υψηλής ισχύος στραγγίσματα.

### 2.11.3. Εκφύσηση αμμωνίας

Η μέθοδος αυτή έχει βρεθεί ότι είναι τεχνικά εφικτή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε πριν είτε μετά από την βιολογική επεξεργασία. Σε μια μονάδα που δέχεται 15% βιομηχανικά στερεά και υγρά απορρίμματα η χρήση αεριζόμενης δεξαμενής με χρόνο παραμονής ~10 μέρες και  $pH>10,5$  ήταν ικανή να μειώσει την τιμή  $NH_3-N$  από  $890 \text{ mg/L}$  σε  $412 \text{ mg/L}$ . Η μείωση της αμμωνίας που επιτεύχθηκε και η ικανότητα ομογενοποίησης μέσα στην δεξαμενή μείωσαν σημαντικά τα προβλήματα που παρουσιάζονταν σε επόμενα στάδια βιολογικής επεξεργασίας του στραγγίσματος.

Η εκφύσηση με αέρα είναι ακριβός τρόπος να μειωθεί η συγκέντρωση αμμωνίας σε χαμηλά επίπεδα. Η ποσότητα αέρα που απαιτείται είναι συχνά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που θα απαιτούνταν για βιολογική νιτροποίηση. Συνεπώς, η παροχή αέρα είναι μια σημαντική παράμετρος κόστους. Βέβαια σε περιπτώσεις πολύ χαμηλών θερμοκρασιών ή αδυναμίας ανάπτυξης μικροβιακής δραστηριότητας δεν υπάρχουν πολλές εναλλακτικές λύσεις και επομένως το υψηλό κόστος της εκφύσησης μπορεί να θεωρηθεί λογικό. Η χρήση πύργων εκφύσησης δεν φαίνεται να μπορεί να εφαρμοστεί στα περισσότερα στραγγίσματα εξαιτίας προβλημάτων κλίσης, φραξίματος και παγώματος κατά την διάρκεια του χειμώνα.

### 2.11.4. Προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα

Η μέθοδος αυτή έχει συχνά χρησιμοποιηθεί στην επεξεργασία βιομηχανικών εκροών (Πίνακας 6). Η χρήση της στην επεξεργασία στραγγισμάτων συνίσταται σε: απομάκρυνση επικίνδυνων οργανικών συστατικών από βιομηχανικά επικίνδυνα απόβλητα και αφαίρεση χρώματος και TOC, COD από τα σταθεροποιημένα στραγγίσματα.

Μια σημαντική παράμετρος είναι η εκτίμηση της επικινδυνότητας κατά την διάρκεια της θερμικής αναγέννησης του ενεργού άνθρακα. Βρέθηκε ότι με μετα-καυστήρες όλα τα επικίνδυνα συστατικά καταστρέφονταν και δεν εκπέμπονταν επικίνδυνα αέρια.

**Πίνακας 6.** Αφαίρεση οργανικών ουσιών από τον ενεργοποιημένο άνθρακα (Coleman, 1985).

Τύπος στραγγίσματος	Παράμετρος	Είσοδος (mg/L)	Έξοδος (mg/L)	Αφαίρεση (%)	Δόση άνθρακα(Kg/m <sup>3</sup> )	έξοδος (g/kg)
Σταθεροποιημένη συν-διάθεση	TOC	407	130	68	5	55
Αερόβια επεξεργασία αστικών	COD	184	18,4	90	4	41
Αερόβια επεξεργασία αστικών	COD	260-530	-	80	1-20	265

Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής στο Love Canal είχε την εξής απόδοση (Coleman, 1985):

- Ποσότητα ενεργού άνθρακα που απαιτούνταν: 1kg/m<sup>3</sup> (μέση τιμή)
- Εισροή TOC: 780 mg/L μέση τιμή, (120-1960 mg/L)
- Εκροή TOC: 98 mg/L μέση τιμή, (50-180 mg/L)
- % απομάκρυνση: 87% (79-95%)
- Απορρόφηση TOC από τον ενεργό άνθρακα: ~680 gr TOC/kg άνθρακα.

Η ποσότητα άνθρακα που απαιτούνταν για την απομάκρυνση του TOC είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που θα περίμενε κανείς για την περίπτωση επεξεργασίας στραγγισμάτων από αστικά απορρίμματα. Επίσης, δεν υπάρχει πάντα ανάγκη για περαιτέρω επεξεργασία των στραγγισμάτων αυτών εκτός και αν μελέτες τοξικότητας ή αισθητικές προδιαγραφές το απαιτούν. Η μέθοδος της προσρόφησης σε ενεργό άνθρακα είναι μια ακριβή επιλογή για την τελική επεξεργασία στραγγισμάτων από τυπικά αστικά απόβλητα. Παρόλα αυτά, η ιδιαιτερότητα της αυξημένης ισχύος των στραγγισμάτων από επικίνδυνα απόβλητα καθιστά την μέθοδο αυτή πολλές φορές ως την μόνη εφικτή επιλογή επεξεργασίας.

#### 2.11.5. Οξειδωση με υποχλωριώδες άλας

Το υποχλωριώδες άλας έχει προσελκύσει την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας για δύο κύριους λόγους στην επεξεργασία στραγγισμάτων. Αυτοί είναι η οξειδωση της υπολειπόμενης αμμωνίας και η απολύμανση της εκροής των επεξεργασμένων αποβλήτων. Σε μια περίπτωση, οι διαδικασίες νιτροποίησης ήταν ανίκανες να ανταποκριθούν στις προδιαγραφές απομάκρυνσης αμμωνίας κατά τη διάρκεια χαμηλών θερμοκρασιών. Η χορήγηση δόσης υποχλωριώδους άλατος νατρίου σε ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 115 ως 186 mg/L (ως Cl<sub>2</sub>) μείωσε τις συγκεντρώσεις αζώτου αμμωνίας από ~160mg/L σε 30 mg/L.

Η απολύμανση επεξεργασμένων στραγγισμάτων (COD 150 mg/L, NH<sub>3</sub>- N 1,8 mg/L, pH 7,4) μπόρεσε να επιτευχθεί (Polprasert and Carlson, 1977) χρησιμοποιώντας παρόμοιες δόσεις υποχλωριώδους άλατος (10 έως 140 mg/L NaOCl). Υψηλότερες δόσεις απαιτήθηκαν για να επιτύχουν ένα επίπεδο αδρανοποίησης για τους ιούς από ότι για τα κολοβακτηρίδια και σε όλες τις περιπτώσεις η έκταση της αδρανοποίησης εξαρτήθηκε ιδιαίτερα και από τη δόση και από το χρόνο της επαφής. Οι χρόνοι επαφής κυμαίνονταν από 2 έως 100 min. Το υποχλωριώδες άλας νατρίου είναι πιθανό να έχει περιορισμένη εφαρμογή στην επεξεργασία επικίνδυνων αποβλήτων. Η απολύμανση δεν απαιτείται πάντα και το υποχλωριώδες άλας πάσχει από δύο μειονεκτήματα: (α) μπορεί σημαντικά να αυξήσει τις διαλυμένες συγκεντρώσεις στερεών και (β) υπάρχει κίνδυνος μερικές οργανικές ενώσεις να

διαμορφώσουν χλωριωμένα παράγωγα που μπορούν να είναι περισσότερο επικίνδυνα από τις αρχικές ενώσεις. Άλλα οξειδωτικά είναι: το όζον, το υπερμαγγανικό κάλιο και διαδικασίες όπως η υγρή οξείδωση με αέρα. Αν και μερικά από αυτά έχουν ερευνηθεί σχετικά με την επεξεργασία στραγγισμάτων δεν έχει αποδειχθεί να έχουν οποιαδήποτε σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων.

### 2.11.6. Βιολογική επεξεργασία

Οι τεχνικές βιολογικής επεξεργασίας είναι σημαντικό μέρος πολλών συστημάτων διαχείρισης στραγγισμάτων, ακόμη και για περιοχές δεχόμενες επικίνδυνα απόβλητα. Σε πολλές τέτοιες περιοχές τα στραγγίσματα περιέχουν ακόμα υψηλές συγκεντρώσεις διασπάσιμων ενώσεων άνθρακα, ή αμμωνία ή και τα δύο. Για αυτά τα συστατικά οι βιολογικές τεχνικές προσφέρουν την πιο αξιόπιστη και οικονομική επεξεργασία. Επίσης μπορούν να επηρεάσουν την ικανότητα αφαίρεσης σιδήρου, μαγγανίου και άλλων μετάλλων, αλλά δεν σχεδιάζονται για αυτό το σκοπό. Πολλές βιολογικές διαδικασίες είναι επίσης ικανές να επεξεργαστούν, ή να ανεχτούν, συγκεκριμένα επικίνδυνα συστατικά όπως τα κυανίδια, οι φαινόλες και τα φυτοφάρμακα, αλλά πάλι, δεν σχεδιάζονται γι' αυτό το σκοπό.

Σε αυτό το τμήμα θα δούμε την εφαρμογή των αερόβιων και των αναερόβιων τεχνικών στην επεξεργασία των στραγγισμάτων. Περισσότερη προσοχή έχει δοθεί στις αερόβιες από ότι στις αναερόβιες διαδικασίες. Αυτό οφείλεται εν μέρει στη μεγαλύτερη οικειότητα των περισσότερων εργαζομένων με την πρακτική και τις αρχές των αερόβιων διαδικασιών από ότι με τις αναερόβιες. Εντούτοις, οι αερόβιες διαδικασίες, παρά τα αυξημένα λειτουργικά κόστη, έχουν μερικά πρακτικά πλεονεκτήματα. Είναι γενικά ευκολότερο να ελεγχθούν, πιο ανεκτικές σε διακυμάνσεις και λιγότερο ευαίσθητες στην τοξική παρεμπόδιση. Επιπλέον, η αφαίρεση αμμωνίας από τα στραγγίσματα δεν μπορεί να επιτευχθεί με αναερόβιες διαδικασίες.

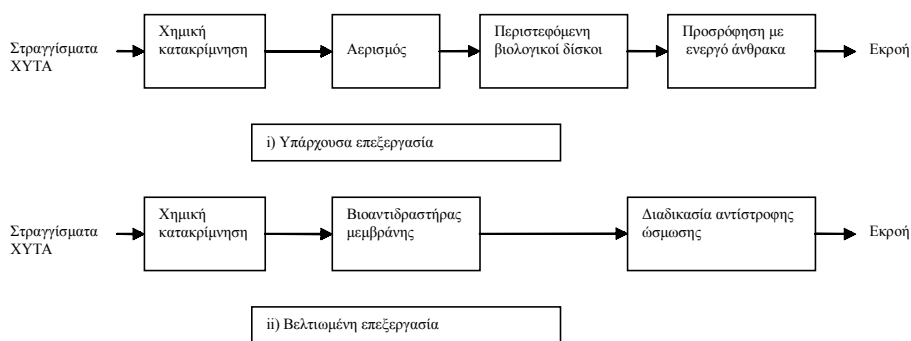
### 2.11.7. Αερόβιες διαδικασίες

Δύο σημαντικοί τύποι στραγγισμάτων μπορούν να εξεταστούν: (α) αυτά στα οποία οι υψηλές και μέσες συγκεντρώσεις του διασπάσιμου οργανικού άνθρακα αντιμετωπίζονται με την αφαίρεση του συνόλου ή μέρους της αμμωνίας λόγω νέας κυτταρικής αύξησης και (β) τα σταθεροποιημένα στραγγίσματα στα οποία η αμμωνία είναι ο βασικός μολυσματικός παράγοντας και στα οποία πρέπει να επιτευχθεί η νιτροποίηση.

Πολλές έρευνες έχουν αναφερθεί για τον πρώτο τύπο και πολύ λίγες για τον δεύτερο. Κοινή για όλους, εντούτοις ήταν η παρατήρηση ότι τα στραγγίσματα είναι σταθερά όσον αφορά την επάρκεια σε φώσφορο. Χορήγηση δόσης με φώσφορο για την επίτευξη του λόγου Συνολική Απαίτηση Οξυγόνου/Φώσφορο ίσου με 100/1 έχει βρεθεί γενικά να είναι ικανοποιητική. Θα εξετάσουμε πρώτα την αφαίρεση του διασπάσιμου οργανικού άνθρακα. Διάφορες προσπάθειες έχουν γίνει χρησιμοποιώντας σταλακτικά φίλτρα (trickling filters) για την επεξεργασία στραγγισμάτων. Σχεδόν πάντα έχουν εμφανιστεί προβλήματα λόγω της καθίζησης και της συγκέντρωσης ανόργανων στερεών. Σε ένα παράδειγμα (Shwer, 1974) χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο δύο σταδίων που περιείχε 176.5 m<sup>3</sup> πλαστικών μέσων σε τυχαία τοποθέτηση. Το εγχείρημα έλαβε χώρα κατά τη χειμερινή περίοδο, κάτι που δεν βοήθησε καθόλου και εμφανίστηκαν προβλήματα με τη συγκέντρωση υδροξειδίου του σιδήρου. Εντούτοις, μια ποσότητα στραγγισμάτων 164 m<sup>3</sup>/d και BOD ~ 2100 mg/L αντιμετωπίστηκαν τελικά σε ικανοποιητικά επίπεδα, σε επίπεδα οργανικού φορτίου έως 2 kg BOD/m<sup>3</sup>.

Παρόμοια προβλήματα με την απόφραξη έχουν εμφανιστεί και σε άλλα φίλτρα. Σε μερικές περιπτώσεις η βασική αιτία είναι ανθρακικό άλας του ασβεστίου παρά το υδροξείδιο του σιδήρου. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να αποφευχθούν, είτε με προεπεξεργασία είτε με δημιουργία ανοικτών λιμνοδεξαμενών μεγάλου χρόνου παραμονής πριν από την επεξεργασία. Αυτές επιτρέπουν στα ιζήματα του ασβεστίου και του σιδήρου να σχηματιστούν και να καθιζάνουν προτού εισαχθεί το στραγγίσμα στην εγκατάσταση. Η ενεργός ιλύς και οι αεριζόμενες λιμνοδεξαμενές έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγαλύτερη επιτυχία από τα σταλακτικά φίλτρα αν και έχουν παρουσιαστεί και σε αυτά λειτουργικά προβλήματα. Στις εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος έχει αποδειχθεί ότι δεν είναι πάντα εύκολο να διατηρηθεί η βιομάζα στο σύστημα. Εν μέρει αυτό οφείλεται σε φτωχό σχεδιασμό και λειτουργία της διαύγασης και των συστημάτων ανακυκλοφορίας των στερεών. Στις περιπτώσεις που δεν εφαρμόστηκε προεπεξεργασία στα στραγγίσματα για την απομάκρυνση του σιδήρου και του ασβεστίου υπήρχε μια τάση για σχηματισμό ανόργανων στερεών μέσα στο μίγμα του αντιδραστήρα. Στην περίπτωση επεξεργασίας στραγγισμάτων τα πτητικά αιωρούμενα στερεά θα είναι περίπου 50% των συνολικών στερεών στον αντιδραστήρα. Σε μερικές περιπτώσεις η συγκέντρωση των ανόργανων στερεών συνεχίστηκε σε τέτοιο σημείο που απαιτήθηκε ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας χρησιμοποιώντας λάσπη από μια κοντινή ΜΕΥΑ. Αυτό βέβαια μπορεί να αποδειχθεί φτηνότερο σε μικρές μονάδες από την εφαρμογή προεπεξεργασίας για την αφαίρεση των ανόργανων στερεών.

Σε ένα άλλο παράδειγμα (Jenkins *et al.*, 2003 Bohdziewicz *et al.*, 2001), η υπάρχουσα διαδικασία βελτιστοποιήθηκε με την ενσωμάτωση ενός βιοαντιδραστήρα μεμβράνης (Membrane Bio Reactor, MBR) και διαδικασίας αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis, RO) (Σχήμα 2). Σε αυτήν την περίπτωση το πρόβλημα ήταν ότι ο ΧΥΤΑ ήταν αρκετός ώριμος και τα στραγγίσματα πλέον χαρακτηρίζονταν από χαμηλή βιο-αποικοδομησιμότητα. Επιπλέον δύσκολη ήταν και η απονιτροποίηση. Ο MBR αντιδραστήρας (5 m<sup>2</sup>, 0,1μm) αύξησε την ικανότητα απομάκρυνσης της βιο-αποικοδομήσιμης οργανικής ύλης και τον ρυθμό απονιτροποίησης ενώ η RO (6,7 m<sup>2</sup>, 99% NaCl rejection) χρησιμοποιήθηκε για την φυσική απομάκρυνση των εναπομείναντων νιτρικών ιόντων και της μη βιο-αποικοδομήσιμης οργανικής ύλης.



**Σχήμα 2.** Διάγραμμα ροής της υπάρχουσας και της βελτιστοποιημένης διαδικασίας.

Η τεχνολογία των μεμβρανών χρησιμοποιήθηκε και από άλλους με σκοπό την βιολογική επεξεργασία στραγγισμάτων (Stegman, 1982). Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν υβριδικά συστήματα:

- ενεργός ιλύς - χημική οξείδωση,
- ενεργός ιλύς – υπερδιήθηση - χημική οξείδωση,

- ενεργός ιλύς - υπερδιήθηση – αντίστροφη ώσμωση.

Από τις παραπάνω διεργασίες αυτή με την βέλτιστη απόδοση ήταν ο συνδυασμός της βιολογικής επεξεργασίας με τεχνικές μεμβρανών υπό πίεση (pressure driven membrane techniques) όπως η υπερδιήθηση και η αντίστροφη ώσμωση. Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου είχε τόσο καλά αποτελέσματα που κατέστη δυνατή η διάθεση των επεξεργασμένων στραγγισμάτων κατευθείαν στον υδάτινο αποδέκτη. Γενικά, έχουν υπάρξει λίγα προβλήματα στον εγκλιματισμό της ιλύος με τα στραγγίσματα. Τα ανόργανα στερεά έχουν προκαλέσει επίσης προβλήματα απόφραξης των σωλήνων παροχής αέρα. Ο αφρισμός είναι μια σοβαρή ενόχληση για τις μονάδες ενεργού ιλύος που χρησιμοποιούν συστήματα αερισμού διάχυσης, αν και λιγότερο όπου χρησιμοποιούνται επιφανειακοί αεριστήρες. Τα ανταφρώδη μέσα μπορούν να βοηθήσουν στο πρόβλημα αλλά μια οικονομικότερη εναλλακτική λύση είναι ο ψεκασμός των στραγγισμάτων πάνω στον αφρό. Αυτή η προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στη Γερμανία (Maris *et al.*, 1983).

Πολλά στραγγίσματα είναι διαβρωτικά σε απροστάτευτους σωλήνες και εγκαταστάσεις. Κυρίως ως αποτέλεσμα της υψηλής αλατότητας τους, ο χάλυβας, ο γαλβανισμένος χάλυβας και τα στοιχεία με αλουμίνιο έχουν υποστεί φθορές. Αυτά τα υλικά πρέπει είτε να αποφευχθούν είτε να προστατευθούν. Εάν τα στραγγίσματα περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών διαλυτών τότε οποιοδήποτε συνθετικό υλικό πρέπει να εξεταστεί πριν χρησιμοποιηθεί. Εντούτοις, για στραγγίσματα από αστικά απορρίμματα αλλά και από ΧΥΤΑ υλικά συνδιάθεσης όπως το PVC και το πολυπροπυλένιο έχουν αποδειχθεί πολύ κατάλληλα.

Οι αεριζόμενες λίμνες έχουν αποδειχθεί πολύ απλές σε λειτουργία και μπορούν να αποφύγουν πολλά από τα προβλήματα των μονάδων ενεργού ιλύος, ιδιαίτερα εάν χρησιμοποιούνται σε μια βάση batch. Απλές μονάδες έχουν κατασκευαστεί σε περιοχές χρησιμοποιώντας συνθετικές μεμβράνες ως φραγμούς και ως μέσα για τον αερισμό. Υδραυλικοί χρόνοι παραμονής 10 έως 20 ημερών έχουν αποδειχθεί συχνά επαρκείς στις αεριζόμενες λίμνες.

Αρκετά λεπτομερή στοιχεία όσον αφορά την απόδοση της διεργασίας σε πραγματική ή πιλοτική κλίμακα ώστε να αναπτυχθούν κινητικές σταθερές έχουν παρουσιαστεί μόνο σε λίγες μελέτες. Στη συνέχεια (Πίνακας 7) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μια σημαντική μελέτη στην Μεγάλη Βρετανία (de Bekker and Kaspers, 1981, Fraser and Tyler, 1983) μαζί με μερικά περιορισμένα στοιχεία διαθέσιμα από άλλες μελέτες. Τα ποσοστά οργανικού φορτίου και οι ρυθμοί παραγωγής στερεών έχουν εκφραστεί χρησιμοποιώντας το COD παρά το BOD. Τα αποτελέσματα από αυτά και πολυάριθμες bench-scale μελέτες έχουν δείξει ότι οι πραγματικές απομακρύνσεις COD υπερβαίνουν την τιμή BOD που μετρείται στα εισρέοντα στραγγίσματα. Για τα υψηλής ισχύος στραγγίσματα με υψηλή αναλογία BOD/COD, το COD είναι καλύτερος δείκτης από το BOD της συγκέντρωσης του βιολογικά οξειδώσιμου υλικού που θα αφαιρεθεί κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.

**Πίνακας 7.** Επεξεργασία υψηλής ισχύος στραγγισμάτων με ενεργό ιλύ / αεριζόμενες λίμνες.

	6°C	12,6 °C	20 °C	Αύγουστος - Μάιος	Ιούλιος - Αύγουστος
Είδος ΧΥΤΑ	Αστικά Απόβλητα			Συνδιάθεση	
<i>Εισροή</i>					
COD	11741	11585	16175	6481	9783
BOD	9220	8980	9686	3564	5966
NH <sub>3</sub> N	279	320	535	286	738

SS	294	791	9736	147	663
<i>Εκροή</i>					
COD	215	460	471	939	1088
BOD	20	19	29	118	464
NH <sub>4</sub> N	6	37	3	80	6.3
SS	42	123	119	101	478
<i>Φορτίο</i>					
kgCOD/kgVSS.d	0.17*	0.24	0.33	-	-
kgCOD/m <sup>3</sup> day (at 4000 mg/L VSS)	0.68	0.96	1.32	3.5	2.5
<i>Παραγωγή στερεών</i>					
kgVSS/kg COD	0.22*	0.25	0.27	-	-
kgSS/kg COD (at 55% VSS)	0.40	0.45	0.49	-	-
Χρόνος παραμονής στερεών, θ <sub>c</sub> (d)	27	17	11.5	-	-

Concentrations in mg/L

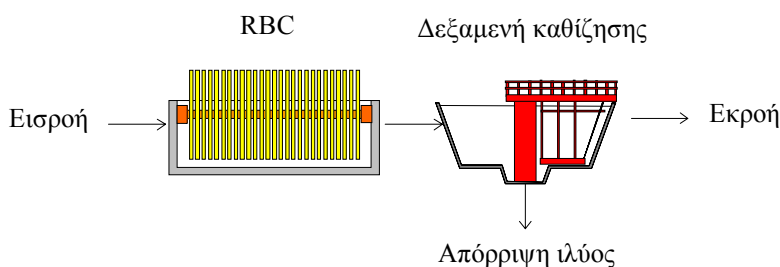
\* Βασισμένο σε εκτιμώμενη τιμή MLVSS = 55% x MLSS

Έχουν δημοσιευθεί ανεπαρκή αποτελέσματα για την παροχή λεπτομερούς γνώσης των σχέσεων μεταξύ των οργανικών φορτίων, της θερμοκρασίας και της ποιότητας εκροής για αυτόν τον τύπο στραγγισμάτων. Οι αφαιρέσεις οργανικών που πραγματοποιούνται είναι υψηλές έναντι πολλών υγρών αποβλήτων και το BOD της εκροής είναι αρκετά χαμηλό για διάθεση. Δοκιμές Bench-scale έχουν δείξει ότι πλήρης αφαίρεση αμμωνίας θα επιτυγχανόταν σε στραγγίσματα με λόγο BOD/N ίσο ή υψηλότερο από 28:1, καθαρά λόγω της απαίτησης αζώτου για την αύξηση κυττάρων. Εντούτοις, στις πειραματικές και πραγματικού μεγέθους μονάδες, τα αποτελέσματα είναι ακανόνιστα. Υπάρχει μια ανάγκη για περαιτέρω μελέτη της αφαίρεσης αζώτου σε στραγγίσματα μέσης ισχύος όπου υπάρχει η δυνατότητα για νιτροποίηση/απονιτροποίηση. Τα αιωρούμενα στερεά μπορεί να είναι ένα πρόβλημα στην εκροή από οποιοδήποτε σύστημα επεξεργασία στραγγισμάτων. Οι συγκεντρώσεις στην εκροή είναι μεγαλύτερες από 100 mg/L.

Η εμπειρία μέχρι τώρα δείχνει ότι κάποια μορφή περαιτέρω επεξεργασίας μπορεί να απαιτηθεί για να ικανοποιούνται τα εκάστοτε όρια για διάθεση σε έναν αποδέκτη, ιδιαίτερα όσον αφορά την αμμωνία και τα αιωρούμενα στερεά. Η προσθήκη πολυηλεκτρολυτών για τη βελτίωση της αφαίρεσης στερεών, ο ψεκασμός του εδάφους και οι λίμνες ωρίμανσης είναι όλες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην πράξη. Εάν η δοκιμή τοξικότητας των στραγγισμάτων επικίνδυνων αποβλήτων δείξει ότι περαιτέρω επεξεργασία είναι απαραίτητη εκτός της φυσικής ή χημικής επεξεργασίας, τότε ίσως απαιτηθεί επεξεργασία με ενεργοποιημένο άνθρακα. Συστήματα ενεργού ιλύος έχουν χρησιμοποιηθεί συχνά στις βιομηχανικές εφαρμογές όπου οι εκροές περιλαμβάνουν επικίνδυνες οργανικές ενώσεις όπως οι φαινόλες. Η ενεργός ιλύς μπορεί να μεταχειριστεί πράγματι ένα ευρύ φάσμα οργανικών συστατικών, υπό τον όρο ότι η συγκέντρωσή τους δεν είναι πάρα πολύ υψηλή και ότι ελαχιστοποιείται η πιθανότητα απότομης φόρτωσης. Πάντως στραγγίσματα που περιέχουν επικίνδυνα συστατικά, κάτω από μερικές προϋποθέσεις μπορούν να επεξεργαστούν από τις εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος.

### 2.11.8. Nitrification

Η χρήση περιστρεφόμενων βιολογικών δίσκων (Rotating Biological Conductor, RBC's, Σχήμα 3) χρησιμοποιούνται για τη νιτροποίηση (nitrification). Τα RBC's αποτελούνται από μέσο προσκόλλησης στερεωμένο σε ένα οριζόντιο άξονα που τοποθετείται σε ημικυλινδρικές δεξαμενές. Η γενική αρχή που τα διέπει είναι να επιτρέπεται η ροή των υγρών αποβλήτων στη δεξαμενή και συγχρόνως να περιστρέφεται το μέσο προσκόλλησης στα απόβλητα, ώστε εναλλασσόμενα να εκθέτει το μέσο προσκόλλησης (και την προσκολλούμενη βιομάζα) στον αέρα και στο υγρό.



**Σχήμα 3.** Διάγραμμα ροής για RBC's

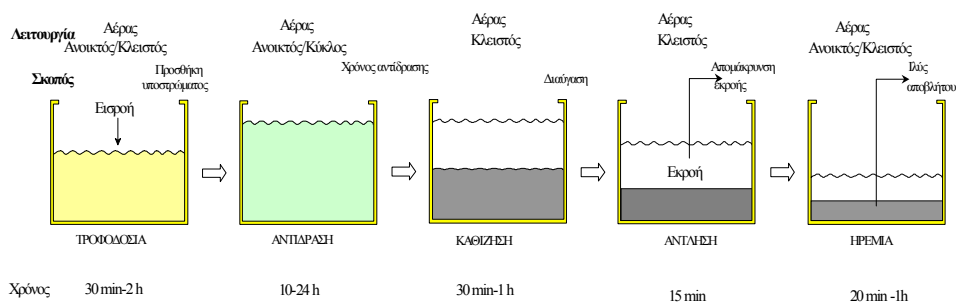
Οι τιμές σχεδιασμού για την οργανική φόρτιση για τους βιολογικούς περιστρεφόμενους δίσκους είναι από 0,5 έως 1,0 kg BOD5 m<sup>3</sup>·d και όταν είναι επιθυμητή η νιτροποίηση από 0,16 έως 0,24 kg BOD5 m<sup>3</sup>·d. Οι τιμές σχεδιασμού για την υδραυλική φόρτιση κυμαίνονται από 0,03 έως 0,16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d επιφάνειας προσκόλλησης για δευτεροβάθμια επεξεργασία και από 0,01 έως 0,08 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d μέσου επιφάνειας προσκόλλησης όταν είναι επιθυμητή η νιτροποίηση (Wang *et al.*, 1986b). Τα λειτουργικά πλεονεκτήματα είναι οι χαμηλότερες ενεργειακές δαπάνες, χαμηλότερες απαιτήσεις επάνδρωσης και λιγότερα προβλήματα με τη θολότητα της εκροής. Οι κύριες δαπάνες είναι συγκρίσιμες με αυτές της ενεργού ιλύος.

### 2.11.9. Σύστημα δεξαμενών εναλλασσόμενης λειτουργίας

Το σύστημα δεξαμενών εναλλασσόμενης λειτουργίας (Sequencing Batch Reactors, SBR) αποτελεί παραλλαγή του συστήματος ενεργού ιλύος και πραγματοποιείται στην ημισυνεχή λειτουργία της μονάδας. Η μέθοδος επεξεργασίας των στραγγισμάτων με την τεχνολογία SBR, αποτελεί σχετικά πρόσφατη εξέλιξη και έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στο εξωτερικό σε αντίστοιχα έργα. Η ενεργός ιλύς καθορίζεται ως η διασπορά μικροοργανισμών, ζωντανών και μη, στα υγρά απόβλητα. Η μέθοδος της ενεργού ιλύος περιλαμβάνει δύο μεμονωμένες διεργασίες: αερισμό και καθίζηση, οι οποίες πραγματοποιούνται συνήθως σε ξεχωριστές δεξαμενές. Οι ίδιες διεργασίες εφαρμόζονται και κατά τη μέθοδο του SBR, με τη διαφορά ότι πραγματοποιούνται διαδοχικά εντός της ίδιας δεξαμενής. Κατά την διάρκεια αερισμού των αποβλήτων πραγματοποιείται ανάμιξη και παροχή οξυγόνου, το οποίο ενεργοποιεί τους μικροοργανισμούς που υπάρχουν στο μίγμα. Κατά τη φάση αυτή οι οργανικές ουσίες μεταβολίζονται και παράγονται τα τελικά προϊόντα και νέα βιομάζα. Η ανάμιξη πρέπει να επαρκεί ώστε να εμποδίζεται η καθίζηση των μικροοργανισμών και να επιτυγχάνεται πλήρης ανάμιξη του υγρού. Η δεύτερη διεργασία που λαμβάνει χώρα, είναι ο διαχωρισμός της βιομάζας και άλλων αιωρούμενων στερεών από το υγρό, με καθίζηση.

Όπως αναφέρθηκε, οι παραπάνω βασικές διεργασίες σε ένα σύστημα SBR πραγματοποιούνται σε μία δεξαμενή, εφαρμόζοντας χρονικά διακριτές φάσεις λειτουργίας ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα επεξεργασίας. Οι φάσεις λειτουργίας του

συστήματος SBR (Σχήμα 4) είναι οι εξής: (α) φάση τροφοδοσίας στραγγισμάτων, (β) φάση αερισμού (αντίδραση), (γ) φάση καθίζησης, (δ) φάση απομάκρυνσης επεξεργασμένων στραγγισμάτων (ε) φάση αναμονής για νέα τροφοδοσία. Τα στάδια περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω:



Σχήμα 4. Διάγραμμα ροής αντιδραστήρα SBR (Metcalf and Eddy, Inc., 1991)

### Φάση τροφοδοσίας

Ο σκοπός της φάσης αυτής είναι η προσθήκη υποστρώματος (ανεπεξεργαστα στραγγίσματα) στον αντιδραστήρα. Κατά τη φάση αυτή, ο αντιδραστήρας μπορεί να λειτουργεί είτε υπό αερόβιες είτε αναερόβιες συνθήκες είτε με συνδυασμό και των δύο και η διάρκειά της ανέρχεται από 30 min έως 2 ώρες. Σε περίπτωση λειτουργίας υπό αναερόβιες συνθήκες επιτυγχάνεται απονιτροποίηση των νιτρικών προς αέριο άζωτο λόγω της ύπαρξης επαρκούς ποσότητας οργανικού άνθρακα που απαιτείται κατά τη διεργασία αυτή. Σημειώνεται ότι ο αντιδραστήρας κατά τη φάση αυτή είναι γεμάτος κατά 25% περίπου από τον αμέσως προηγούμενο κύκλο διεργασιών. Ο όγκος των υγρών που προστίθεται στη δεξαμενή καταλαμβάνει το άλλο 60% του όγκου της. Συνεπώς, η δεξαμενή πληρώνεται κατά περίπου 85% του όγκου.

### Φάση αερισμού (αντίδρασης)

Κατά τη φάση αυτή στον αντιδραστήρα επικρατούν αερόβιες συνθήκες με την εφαρμογή ανάμιξης και αερισμού. Η διάρκεια της φάσης αυτής είναι τόση ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα βιοαποικοδόμησης του οργανικού φορτίου (υπόστρωμα) και νιτροποίησης του περιεχόμενου αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικά και νιτρώδη. Η διάρκεια της φάσης αυτής εξαρτάται από την ποιότητα των εισερχόμενων στραγγισμάτων και τις απαιτήσεις της επεξεργασίας και κυμαίνεται από 10 - 24 ώρες ημερησίως.

### Φάση καθίζησης

Κατά τη φάση αυτή διακόπτεται η ανάμιξη και ο αερισμός με αποτέλεσμα την δημιουργία συνθηκών ηρεμίας στον αντιδραστήρα που επιτρέπουν την καθίζησή της βιομάζας στον πυθμένα της δεξαμενής. Με τη διεργασία το υπερκείμενο υγρό που προκύπτει είναι καθαρό από διαλυμένα στερεά. Στα συστήματα SBR, η διεργασία αυτή είναι πιο αποτελεσματική από ότι σε συστήματα συνεχούς ροής, γιατί στη φάση καθίζησης τα περιεχόμενα του αντιδραστήρα βρίσκονται σε πλήρη ηρεμία. Η διάρκεια αυτής της φάσης είναι περίπου 30 min με 1 ώρα. Επίσης κατά τη φάση αυτή, λόγω διακοπής του αερισμού πραγματοποιείται σταδιακή κατανάλωση του διαλυμένου οξυγόνου με δημιουργία τελικά ανοξικών συνθηκών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνέχιση των βιολογικών διεργασιών που περιλαμβάνουν την

απονιτροποίηση του οργανικού αζώτου και την περαιτέρω διάσπαση του οργανικού φορτίου κάτω από αναερόβιες συνθήκες.

#### **Φάση απομάκρυνσης/άντλησης**

Τα επεξεργασμένα υγρά, μετά την καθίζηση της βιομάζας, απομακρύνονται από τον αντιδραστήρα και η φάση αυτή διαρκεί περίπου 15 min. Η απομάκρυνση των επεξεργασμένων υγρών πραγματοποιείται μέσω κατάλληλης δικλείδας και η ποσότητα που απομακρύνεται ισούται με την ποσότητα που τροφοδοτείται στην πρώτη φάση.

#### **Φάση ηρεμίας**

Κατά τη φάση αυτή ο αντιδραστήρας είναι σε αναμονή ώστε να δεχθεί τη νέα τροφοδοσία στραγγισμάτων και το περιεχόμενο παραμένει σε αναερόβιες συνθήκες ώστε να διατηρεί τη σύστασή του. Ανάλογα με τη διάρκεια της φάσης αυτής, εφαρμόζεται στον αντιδραστήρα αερισμός για περίπου 20 min ανά 4 ώρες. Ο αερισμός εφαρμόζεται ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση βλαβερών ουσιών. Εξάλλου, υπάρχει και η φάση της απομάκρυνσης ποσότητας της καθιζάνουσας ύλης, ίσης με την καθαρή παραγωγή. Η απομάκρυνση αυτή προτείνεται να γίνεται 1 με 2 φορές της εβδομάδα μέσω κατάλληλου συστήματος που θα διοχετεύει απευθείας σε βυτιοφόρο φορητό όχημα.

#### **Πλεονεκτήματα του SBR**

Γενικά, έχει αποδειχθεί ότι το σύστημα SBR προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, ειδικά για στην περίπτωση της επεξεργασίας στραγγισμάτων. Με την τεχνολογία αυτή επιτυγχάνονται οι υψηλές αποδόσεις που χαρακτηρίζουν τα συστήματα ενεργού ύλης, δεδομένου ότι είναι εφικτή η αύξηση της περιεχόμενης βιομάζας στα επιθυμητά επίπεδα. Σημειώνεται δε ότι στη μέθοδο αυτή, οι υψηλές συγκεντρώσεις οργανικού φορτίου (που χαρακτηρίζουν τα στραγγίσματα) έχουν σαν συνέπεια υψηλούς ρυθμούς αντίδρασης. Επίσης, υπάρχει εξοικονόμηση χώρου και επενδυτικού κόστους γιατί δεν απαιτείται επιπλέον δεξαμενή καθίζησης για τη διαύγαση των υγρών. Εκτιμάται, ότι το SBR σύστημα ικανοποιεί επαρκώς τις απαιτήσεις σχετικά με τις εκροές των επεξεργασμένων στραγγισμάτων και χαρακτηρίζεται από τα εξής πρόσθετα πλεονεκτήματα:

- Επειδή η λειτουργία του συστήματος είναι ημισυνεχής (batch) προσαρμόζεται ευκολότερα στις σχετικά ισχυρές διακυμάνσεις της ποιότητας των στραγγισμάτων καθώς και στις διακυμάνσεις της δυσκολίας όσον αφορά τη βιοαποδομησιμότητα των συστατικών των στραγγισμάτων.
- Η ημισυνεχής λειτουργία του συστήματος επιτρέπει την προσαρμογή της μεθόδου επεξεργασίας ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σχετικά με την ποιότητα των εκροών. Αυτό πραγματοποιείται με απλή ρύθμιση κατάλληλων χρονοδιακοπών.
- Ένα σύστημα SBR απαιτεί λιγότερη προσοχή κατά τη λειτουργία και συντήρηση από ό,τι οι συμβατικές μονάδες ενεργούς ύλης.
- Τα λειτουργικά έξοδα συντήρησης του συστήματος είναι μειωμένα, λόγω της απαίτησης για λειτουργία των συστημάτων αερισμού για μικρότερη διάρκεια.
- Το σύστημα SBR παρέχει την δυνατότητα ταυτόχρονης νιτροποίησης και απονιτροποίησης με κατάλληλο έλεγχο των επιμέρους φάσεων που συνιστούν τη διεργασία. Η νιτροποίηση επιτυγχάνεται με πρόσθετο αερισμό των στραγγισμάτων, ενώ η απονιτροποίηση με την παράταση της διάρκειας διακοπής αερισμού του συστήματος (φάση καθίζησης) ώστε να επικρατούν αναερόβιες συνθήκες. Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί (Dockhorn *et al.*, 1997), ενδέχεται να απαιτείται έλεγχος του pH των στραγγισμάτων και να γίνεται προσθήκη οργανικού

άνθρακα για μεγιστοποίηση της απόδοσης των αντιδράσεων νιτροποίησης - απονιτροποίησης. Τα παραπάνω εξηγούνται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο.

- Επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση της καθίζησης λόγω του ότι επικρατούν πλήρεις συνθήκες ηρεμίας με παρέχεται μεγάλη επιφάνεια καθίζησης.

### 2.11.10. Αναερόβια επεξεργασία

Οι αναερόβιες διαδικασίες μπορούν να είναι ιδανικές για την αρχική επεξεργασία των υψηλής ισχύος στραγγισμάτων. Εντούτοις, έχουν λάβει πολύ λιγότερη προσοχή από την αερόβια επεξεργασία.

Μικρής κλίμακας μελέτες έχουν εξάγει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, όπως συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 8). Είναι εμφανές ότι καλής ποιότητας εκροή (δηλ. χαμηλό COD) μπορεί να επιτευχθεί μόνο με χαμηλότερους ρυθμούς παροχής και η αφαίρεση αμμωνίας είναι συνήθως αμελητέα. Εντούτοις ογκομετρικές παροχές πάνω από 6 kgCOD/m<sup>3</sup> μπορούν να αντιμετωπιστούν δίνοντας σημαντικά ποσοστά απομάκρυνσης. Η αερόβια επεξεργασία της εκροής σε επόμενο στάδιο θα είχε σημαντικά χαμηλότερες ενεργειακές ανάγκες από ότι θα απαιτούνταν για τα ακατέργαστα στραγγίσματα.

**Πίνακας 8.** Αποτελέσματα από την αναερόβια επεξεργασία σε μικρή κλίμακα στραγγισμάτων.

Τύπος αντιδραστήρα	Μέγεθος αντιδραστήρα (L)	T (°C)	Φορτίο COD (kg/m <sup>3</sup> ,day)	COD (mg/L) Εισροή Εκροή	Παραγωγή στερεών	Αναφορές
Upflow sludge blanket	2,5	20-33	4,9 4,0	31600 9420 25000 1980	0,24 kgSS/kgCOD 0,24 kgSS/kgCOD	(Chiu-Yue Lin <i>et al.</i> , 2000, Cameron and Koch, 1980)
Stirred reactor	14	29-38	1,08 0,54 0,26	23585 8255 23550 7324 23550 4875	0,1kgVSS/kgBOD	(Chian and Dewalle, 1977)
Upflow packed bed	55	25	6,3 4,1 1,8	32000 8000 - 1750 - 1100		(Newton, 1979)

Τα βαρέα μέταλλα τείνουν να συσσωρεύονται στη λάσπη αλλά δεν έχει προκύψει κανένα πρόβλημα με την παρεμπόδιση της μικροβιακής ανάπτυξης ως αποτέλεσμα αυτού. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες που απαιτούνται για την αποδοτική αναερόβια επεξεργασία μπορούν να διατηρηθούν με τη χρησιμοποίηση του αερίου μεθανίου που παράγεται στη διαδικασία. Έχει υπολογιστεί ότι θα απαιτούνταν COD εισροής >7000 mg/L ώστε η διαδικασία να παράγει αρκετή ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών της.

Η παραγωγή στερεών είναι σημαντικά λιγότερη απ' ό,τι στην αερόβια επεξεργασία παρόμοιων στραγγισμάτων. Σε ένα παράδειγμα (Newton, 1979), χρησιμοποιήθηκαν σε σειρά εργαστηριακοί αντιδραστήρες, (lab-scale anaerobic sequencing batch reactors, ASBR), για την αναερόβια επεξεργασία στραγγισμάτων. Το αποτέλεσμα ήταν το 83% του οργανικού φορτίου που απομακρύνθηκε να έχει μετατραπεί σε μεθάνιο. Η αναερόβια επεξεργασία στραγγισμάτων νεαρής ηλικίας επιτρέπει με αυτόν τον τρόπο την συνέχιση της αναερόβιας σταθεροποίησης που είχε ξεκινήσει στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ αλλά διακόπηκε με την συλλογή του στραγγίσματος.

### 2.11.11. Εδαφική επεξεργασία

Η εδαφική επεξεργασία περιλαμβάνει την αργή ροή του στραγγίσματος σε μια κεκλιμένη κατά προτίμηση με φυτά επιφάνεια και συνδυάζει το όφελος της εξατμισοδιαπνοής, της φυσικο-χημικής επεξεργασίας (π.χ. καθίζηση, προσρόφηση, οξειδωση, διήθηση) και της βιολογικής επεξεργασίας (π.χ. οξειδωση των οργανικών ουσιών, νιτροποίηση/απονιτροποίηση). Οι ρόλοι των διάφορων σχετικών μηχανισμών δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί επαρκώς, αλλά η τεχνική έχει βρεθεί να λειτουργεί σε πολλές εφαρμογές με στραγγίσματα από ΧΥΤΑ (Rowe, 1979, King, 1981, US EPA). Η απορροή από το βρεχόμενο έδαφος είναι συχνά κατάλληλης ποιότητας για την διάθεση χωρίς περαιτέρω επεξεργασία και η επεξεργασία εδάφους έχει συνήθως αποδειχτεί να είναι σημαντικά φτηνότερη από άλλες επιλογές διάθεσης.

Οι εφαρμοζόμενες ροές ποικίλουν αρκετά και πρέπει να υπολογιστούν για κάθε μεμονωμένη περίπτωση, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του εδάφους και τη φύση των στραγγισμάτων. Τυπικές τιμές εφαρμογής είναι μέχρι 45 m<sup>3</sup>/ha·day (ή 4,5 mm/d). Υψηλότερες τιμές έχουν δοκιμαστεί για μικρές χρονικές περιόδους σε μερικές περιπτώσεις. Έχουν χρησιμοποιηθεί κλίσεις μεταξύ 1:10 και 1:30. Η χρήση σωλήνων με σχισμές μπορεί να είναι κατάλληλη για πιο απότομες κλίσεις αλλά οι ψεκαστές ή τα ακροφύσια ψεκασμού μπορούν να προσφέρουν το πιο οικονομικό σύστημα διανομής σε πιο επίπεδο έδαφος. Οι πτυχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό των συστημάτων και τη λήψη απόφασης σχετικά με τους ρυθμούς εφαρμογής είναι: ποιότητα αποβλήτων, επίδραση στη βλάστηση, επίδραση στο χώμα, επίδραση στα υπόγεια νερά και οσμές, αεριοποίηση και κατανομή του ψεκασμού.

Μερικές βελτιώσεις μπορούν να επιτευχθούν στην ποιότητα των στραγγισμάτων από την άποψη του BOD, της NH<sub>3</sub>, των μετάλλων και των αιωρούμενων στερεών. Για πολλά μη επεξεργασμένα στραγγίσματα εν τούτοις, είναι απίθανο η επεξεργασία εδάφους να μπορεί από μόνη της να παρέχει αρκετή βελτίωση εκτός αν χρησιμοποιηθούν πολύ χαμηλά ποσοστά φόρτισης. Παραδείγματος χάριν, η δέσμευση αζώτου από τα διάφορα φυτά, που παρουσιάζεται στο Πίνακα 9 (US EPA, 1980). Για ένα ποσοστό δέσμευσης π.χ. 250 kg N/ha από μερικές χλόες λιβαδιού, στράγγισμα που περιέχει 300 mg NH<sub>3</sub>-N/L απαιτεί ρυθμούς εφαρμογής τόσο χαμηλούς όσο 2-3 m<sup>3</sup>/ha·day. Η νιτροποίηση/απονιτροποίηση στο χώμα θα μπορούσε να αυξήσει τα ποσοστά αφαίρεσης, αλλά μόνο ένα δευτερεύον ποσοστό της αμμωνίας θα αφαιρούνταν σε ποσότητες 45 m<sup>3</sup>/ha·day για στραγγίσματα υψηλής ισχύος. Οδηγίες σχετικά με την εδαφική επεξεργασία των εκροών από ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών έχει δημοσιευθεί στις ΗΠΑ. Εντούτοις, λίγες πληροφορίες είναι διαθέσιμες για την αφαίρεση των συγκεκριμένων επικίνδυνων συστατικών από τα στραγγίσματα ΧΥΤΑ.

**Πίνακας 9.** Απομάκρυνση θρεπτικών από διάφορες καλλιέργειες φυτών.

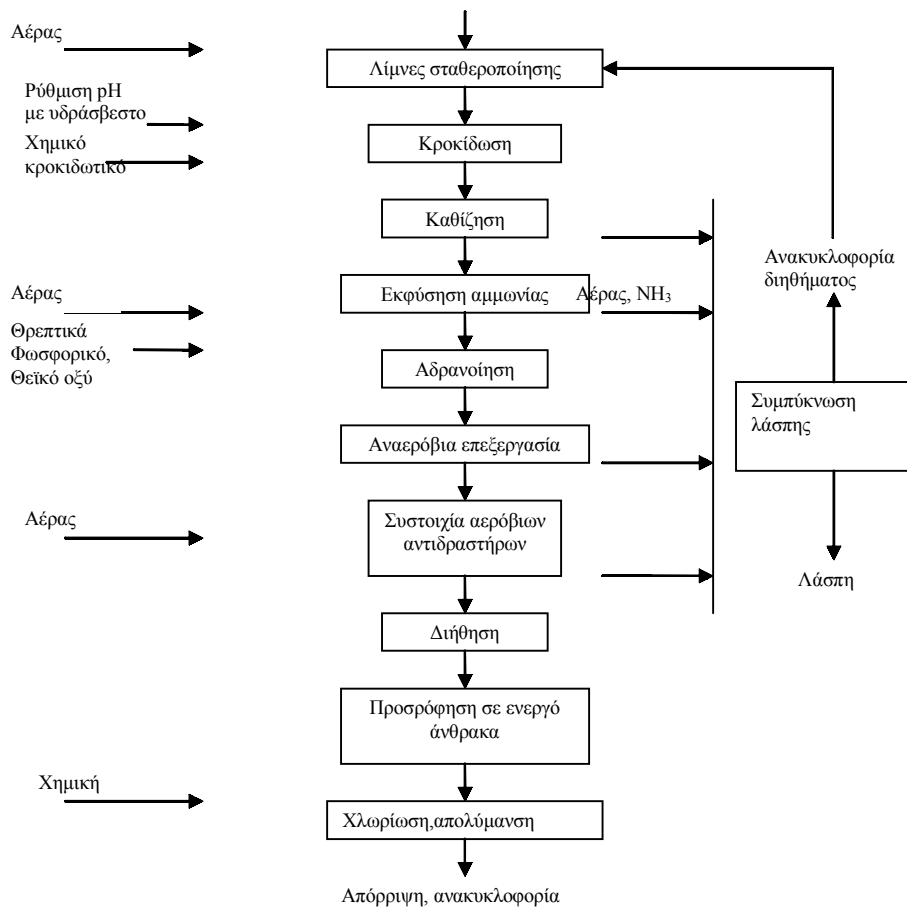
	Nitrogen uptake (kg/ha)
Συγκομιδές λιβαδιών	
Παράκτια χλόη των Βερμούδων	538-672
Χλόη καλάμων canary	253-402
Βέργα	308
Αλφάλφα	174-246
Γλυκό τριφύλλι	177
Κόκκινο τριφύλλι	86-141
Lespedeza σανός	146

	<i>Nitrogen uptake (kg/ha)</i>
<b>Συγκομιδές αγρών</b>	
Καλαμπόκι	174
Φασόλια σόγιας	105-127
Ιρλανδικές πατάτες	121
Βαμβάκι	74-112
Αραβόσπορος Milo	91
Σίτος	56-85
Γλυκές πατάτες	84
Ζαχαρότευτλα	82
Κριθάρι	71
Βρώμες	59
<b>Δασικές συγκομιδές</b>	
Νέα φυλλοβόλα (μέχρι 5 έτη)	112
Νέα αειθαλή (μέχρι 5 έτη)	67
Μέσα και ώριμα φυλλοβόλα	34-56
Μέσα και ώριμα αειθαλή	22-34

Τα στραγγίσματα μπορούν να βλάψουν και την εδαφολογική δομή και τη βλάστηση. Η καθίζηση των ανόργανων στερεών που περιέχουν οξείδια σιδήρου, ανθρακικό άλας ασβεστίου και ενδεχομένως βαρέα μέταλλα έχει προκαλέσει το στιγματισμό της βλάστησης και την ανάπτυξη μιας στεγανής κρούστας στην επιφάνεια των ΧΥΤΑ. Η υψηλή αλατότητα μερικών στραγγισμάτων τείνει επίσης να προκαλεί προβλήματα. Κάποιο είδος βλάστησης έχει αποδειχθεί να μην αντέχει την αλατότητα των στραγγισμάτων και είναι πιθανό να υπάρξουν πλεονεκτήματα στην επιλογή ειδών ανεκτικών στην αλατότητα για χρήση σε εφαρμογές στραγγισμάτων. Οι υψηλές συγκεντρώσεις των ιόντων νατρίου και καλίου μπορούν επίσης να αλλάξουν την εδαφολογική δομή ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων ανταλλαγής ιόντων με τα αργίλικα μεταλλεύματα. Πάντως, η μακροπρόθεσμη συγκέντρωση μετάλλων και τα αποτελέσματα στην εδαφολογική δομή δεν έχουν αξιολογηθεί λεπτομερώς στις εφαρμογές στραγγισμάτων ΧΥΤΑ.

Η απελευθέρωση των οσμών και η ενόχληση από την διασπορά του ψεκασμού είναι ένα θέμα που πρέπει να εξεταστεί. Εάν τα στραγγίσματα περιέχουν ιδιαίτερα επικίνδυνα συστατικά, οι κίνδυνοι από τη χρησιμοποίηση ακροφυσίων ψεκασμού μπορούν να θεωρηθούν πάρα πολύ μεγάλοι. Συνολικά, η κύρια χρήση της εδαφικής επεξεργασίας στην διαχείριση στραγγισμάτων είναι πιθανό να είναι στη τελική επεξεργασία (φινίρισμα), για να μειώσει το BOD, την NH<sub>3</sub> και ιδιαίτερα τα αιωρούμενα στερεά σε αποδεκτά επίπεδα. Τέλος παραθέτουμε ένα διάγραμμα ροής (Σχήμα 5) για ένα υποθετικό σύστημα επεξεργασίας στραγγισμάτων ΧΥΤΑ (Mutasem *et al.*, 1997).

Στραγγίσματα από το σύστημα συλλογής



Σχήμα 5. Διάγραμμα ροής για υποθετικό σύστημα επεξεργασίας στραγγισμάτων

## 2.12. Βιβλιογραφία

- ΦΕΚ Β' 1016/17.11.97, Κατάρτιση Πλαισίου Προδιαγραφών και Γενικών Προγραμμάτων Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων. Αριθ. οικ. 114218
- Βουδριάς Ε. (2000). *Υγειονομική Ταφή Απορριμμάτων*. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εκδ. Εταιρεία Αξιοποίησης και Διαχείρισης Περιουσίας Δημοκρίτειου Πανεπιστήμιου Θράκης, Ξάνθη.
- Βουδριάς Α. (2001). *«Διαχείριση Επικινδύνων Αποβλήτων»*. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Δ.Π.Θ., Εκδ. Εταιρεία Αξιοποίησης και Διαχείρισης Περιουσίας Δημοκρίτειου Πανεπιστήμιου Θράκης, Ξάνθη.
- Καλαμπούκας Ι. (2001). *Επεξεργασία Διασταλλαγμάτων στο ΧΥΤΑ Ξάνθης με την μέθοδο της οριζόντιας έκχυσης*. Διπλωματική εργασία, ΔΠΘ, Πολυτεχνική Σχολή Ξάνθης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Παναγιωτακόπουλος Δ. (2002). *Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων*. Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη.
- Barber, C. (1982). *Harwell Leachate Symposium*. UK, May.
- de Bekker, P.H. and Kaspers, H.M.C. (1981). *5th European Sewage and Refuse Symposium*, 621-639, Munich, Germany.

- Bohdziewicz, J., Bodzek, M., and Gońska, J. (2001). Application of pressure-driven membrane techniques to biological treatment of landfill leachate. *Process Biochemistry*, **36**, 641–646.
- Cameron, R.D. and Koch, F.A. (1980). *JWPCF*, **52**, No.2, 282-292
- Chian, E.S.K. and Dewalle, F.B. (1977). *USEPA Report* No. EPA-600/2-77-186b.
- Chiu-Yue Lin, Feng-Yuan Chang, Chun-Hao Chang, (2000). Co-digestion of leachate with septage using a UASB reactor. *Bioresource Technology*, **73**, 175-178.
- Coleman A.K. (1985). *Alternatives to Landfill*. Hazardous Waste Management Handbook, ed. Andrew Porteous, Butterworths,.
- El-Fadel, M., Findikakis, A.N., and Leckie, J.O. (1997). Environmental impacts of solid waste landfilling. *Journal of Environmental Management*, **50**, 1–25.
- Fraser, J.A.L. and Tyler, N. (1983). *Effl. Wat. Treat. J*, 149-156, April.
- Hjelmar, O. (1994). Stofudvaskning fra granulære materialer: Slagger fra affaldsforbrændingsanlæg. [Leaching from granular materials: Slag from solid waste incinerators] In: Udvaskning fra slagger, jord og affald. Academy of the Technical Sciences, Lyngby. (In Danish).
- Hjelmar, O., Andersen L., and Bjerre Hansen, J. (2000). *Leachate Emissions from Landfills*. AVR Report 265. Naturvårdsverket, Stockholm.
- Jenkins, B.M., Mannapperum, J.D., and Bakker, R.R. (2003). Biomass leachate treatment by reverse osmosis. *Fuel Processing Technology*, **81**, 223– 246.
- King, T. (1981). *Surveyor*, **19-20**, March 12.
- Maris, P.J., Harington, D., and Chismon, G.L. (1983). *Inst. Wat. Poll. Con. Meeting*, Cambridge, November.
- McBean, E.A., Rovers, F.A., and Farguhar, G.J. (1995). *Solid Waste Landfill Engineering and Design*. Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- Newton, J.W. (1979). *Solid Wastes*, 254-265, June.
- Polprasert, C. and Carlson, D.A. (1977). *3<sup>rd</sup> Mid Atlantic Int. Waste Conf.*, 176-187.
- Rowe, A. (1979). *Solid Wastes*, **69(12)**, 603-623.
- Shwer, M. (1974). *Surveyor*, 30-33, May 17.
- Stegman, R. (1982). *Harwell Leachate Symposium*, UK, May.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S (1993). *Integrated Solid Waste Management*, McGraw-Hill, New York.
- Steiner, R.L., Keenan, J.D., and Fungaroli, A.A. (1979). *USEPA Report* EPA-SW-758 May.
- Timour and Zturk, I.O. (1999). Anaerobic sequencing batch reactor treatment of landfill leachate. *Wat. Res.*, **33(15)**, 3225-3230.
- USEPA Publication No.EPA-625/4-76-010.
- USEPA, (1980). *Hazardous Waste Land Treatment*, Report SW-874, September.

#### ΔΕΝ ΑΝΑΦΕΡΕΤΑΙ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bear, 1972
- Freeze and Cherry, 1979
- Pohland (1972, 1975, 1980)
- Pohland *et al.*(1990)
- Leckie *et al.* (1975, 1979)
- Canziani and Cossu, 1989
- Reinhart and Townsend, 1998
- Tolman *et al.* (1978)
- Aran *et al.*, 1999
- Earle *et al.*,1995
- Townsend and Miller,1994
- Kevin J *et al.*
- Wang *et al.*, 1986b
- Metcalf and Eddy, Inc., 1991
- Dockhorn *et al.*, Sardinia '97
- Mutasem *et al.*,1997

### 3. Σχεδιασμός συστημάτων αερόβιας βιοεξυγίανσης (βιοαερισμός)

#### Μακρυπόδης Γεώργιος

Μηχανικός Περιβάλλοντος, M.Sc.

#### 3.1. Εισαγωγή

Οι βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας εδαφών και υδάτων βασίζονται στην ικανότητα των μικροοργανισμών να καταστρέφουν τους ρύπους, ή να μειώνουν την τοξικότητά τους. Τα πλεονεκτήματα των χημικών και φυσικών μεθόδων επεξεργασίας αντισταθμίζονται από το γεγονός ότι το πρόβλημα της ρύπανσης μεταφέρεται σε άλλο μέσο όπου και θα εξακολουθεί να υπάρχει το ζήτημα της επεξεργασίας. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στις βιολογικές διεργασίες. Επίσης, είναι δυνατή η επεξεργασία μεγάλων εκτάσεων με σχετικά χαμηλότερο κόστος και μικρότερη παρέμβαση στο περιβάλλον. Περιγράφεται στη συνέχεια η μικροβιακή κινητική και οι περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν τον βιοαερισμό. Εκτός από τα εδάφη, η μέθοδος αυτή έχει υιοθετηθεί και στην αποκατάσταση των Χώρων Διάθεσης Απορριμμάτων μέσω της δημιουργίας ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων (Yazdani *et al.*, 2002).

#### 3.2. Μικροβιακές διεργασίες που επηρεάζουν το βιοαερισμό

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



Με βάση την εξίσωση (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 αρχικά να κατανοηθεί η κινητική της αντίδρασης κατανάλωσης του υποστρώματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κατανάλωση υποστρώματος συνδέεται άμεσα με τις ανάγκες για άνθρακα και ενέργεια των μικροοργανισμών. Παρόλα αυτά, πολλές φορές παρουσιάζονται και περιπτώσεις μεταβολισμού (όπως η ρύπανση από καύσιμα και τριχλωροαιθυλένιο-TCE). Η πρωτογενής κατανάλωση υποστρώματος περιγράφεται από την εμπειρική σχέση του Monod:

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

όπου:

S: συγκέντρωση του υποστρώματος (g<sub>s</sub>/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 ημίσειας ρυθμού του Monod (g<sub>s</sub>/L).

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

Η κινητική Monod έχει εφαρμοστεί στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων όπου τα προς απομάκρυνση συστατικά είναι βιοδιαθέσιμα και βιοδιασπάσιμα. Ο μέγιστος ρυθμός βιοαποικοδόμησης (k) στον βιοαερισμό εδάφους είναι γενικά πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο 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. Η μείωση αυτή ίσως να μην είναι ενδεικτική της κινητικής πρώτης τάξεως, αλλά αποτέλεσμα μιας επιλεκτικής απομάκρυνσης των ευκολότερα βιοδιασπάσιμων ενώσεων, όπως για παράδειγμα του βενζολίου.

### 3.3. 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 και η συγκέντρωση των ρύπων.

Κάθε μια από αυτές τις παραμέτρους επηρεάζει με ξεχωριστό τρόπο, που όμως είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, καθώς λαμβάνουν χώρα φαινόμενα συνέργιας. Κατά τον υπολογισμό του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου (τεστ αναπνοής) μπορούν να προσδιοριστούν ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί η επίδραση στην

μικροβιακή ανάπτυξη. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται η σπουδαιότητα κάθε μιας από τις παραμέτρους αυτές.

### 3.3.1. Οι συνθήκες των δεκτών ηλεκτρονίων

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

### 3.3.2. Περιεχόμενη υγρασία

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

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

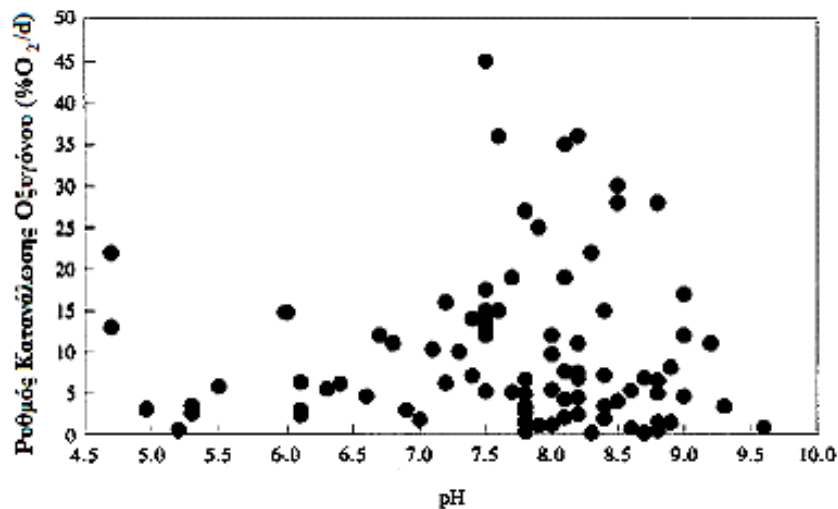
Σε μια περιοχή της Καλιφόρνια (US EPA, 1995), η υγρασία του εδάφους επηρέαζε αρνητικά την μικροβιακή δραστηριότητα. Η υγρασία ήταν μεταξύ 2 και 4% κ.β και, παρόλο που η περιοχή ήταν ρυπασμένη με καύσιμο, δεν παρατηρήθηκε περιορισμός του οξυγόνου. Για την ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας, είχε εγκατασταθεί στην περιοχή ένα σύστημα άρδευσης. Η άρδευση κράτησε μία εβδομάδα και στη συνέχεια λειτούργησε το σύστημα του βιοαερισμού για ένα μήνα, προτού πραγματοποιηθεί το τεστ αναπνοής. Οι ρυθμοί αναπνοής που μετρήθηκαν μετά την άρδευση ήταν σημαντικά υψηλότεροι από αυτούς πριν την άρδευση. Επίσης, πριν την άρδευση δεν παρατηρήθηκε κατανάλωση οξυγόνου όταν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου ήταν κάτω από το 17%. Μετά την άρδευση, η μικροβιακή δραστηριότητα συνεχίστηκε έως ότου η συγκέντρωση του οξυγόνου έφτασε το 1%. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι στις ακραίες συνθήκες, η αύξηση της υγρασίας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του βιοαερισμού μέσω της βελτίωσης της μικροβιακής δραστηριότητας.

Ένα ζήτημα που παρουσιάζεται συχνά είναι το ενδεχόμενο ο αέρας που εισάγεται να ξηράνει το έδαφος σε σημείο που θα είναι επιζήμιο για τους μικροοργανισμούς. Παρόλα αυτά, αποδεικνύεται ότι σε ένα χρονικό διάστημα 3 ετών, η απώλεια υγρασίας είναι ελάχιστη. Η ξηρασία και η απώλεια υγρασίας παρουσιάζονται κατά τον βιοαερισμό μόνο κοντά στο φρεάτιο ή αν η παροχή αέρα είναι πολύ μεγάλη. Εξάλλου, υπάρχουν μηχανισμοί

όπως η βροχή, το χιόνι και το νερό που παράγεται σαν παραπροϊόν (βλ. εξίσωση 1), που διατηρούν σε καλά επίπεδα την υγρασία του εδάφους.

### 3.3.3. Το pH του εδάφους

Το pH του εδάφους είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την βιοαποκατάσταση, καθώς οι μικροοργανισμοί απαιτούν συγκεκριμένο εύρος pH για να επιζήσουν. Τα περισσότερα βακτήρια λειτουργούν καλύτερα σε pH μεταξύ 5 και 9 με την βέλτιστη τιμή ελαφρώς πάνω του 7. Μια αλλαγή στην τιμή του μπορεί να αλλάξει τη σύνθεση των μικροοργανισμών, επειδή κάθε είδος παρουσιάζει βέλτιστη ανάπτυξη σε συγκεκριμένο pH. Σε πολλές περιπτώσεις έχει αποδειχτεί ότι δεν επηρεάζει την *in situ* βιοαποκατάσταση, παρά μόνο όταν η ρύπανση συντελεί στην μεταβολή του υπάρχοντος pH (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου και του εδαφικού pH (US EPA, 1995).

### 3.3.4. Η θερμοκρασία του εδάφους

Η μικροβιακή δραστηριότητα έχει διαπιστωθεί σε θερμοκρασίες από -12 ως 100°C (Ong *et al.*, 1994). Παρόλα αυτά, το βέλτιστο εύρος για την βιοαποικοδόμηση των περισσότερων ρύπων είναι στην πραγματικότητα πολύ μικρό και διαφορετικό για κάθε είδος. Για παράδειγμα, μπορεί οι μικροοργανισμοί σε ένα υπο-αρκτικό περιβάλλον να παρουσιάζουν βέλτιστη ανάπτυξη στους 10°C, ενώ οι μικροοργανισμοί σε υποτροπικό περιβάλλον στους 30°C. Έχει παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης διπλασιάζεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 10°C, έως ένα απαγορευτικό σημείο. Η εξίσωση των van't Hoff-Arrhenius, εκφράζει τη σχέση αυτή ποσοτικά:

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

όπου:

$k_T$ : θερμοκρασιακά διορθωμένος ρυθμός βιοαποικοδόμησης (%O<sub>2</sub>/d),  
 $k_D$ : βασικός ρυθμός βιοαποικοδόμησης (%O<sub>2</sub>/d),  
 $E_a$ : ενέργεια ενεργοποίησης (cal/mol),  
 $R$ : παγκόσμια σταθερά των αερίων (1,987 cal/°K·mol) και  
 $T_{abs}$ : απόλυτη θερμοκρασία (°K).

Η ενέργεια ενεργοποίησης ( $E_a$ ) υπολογίστηκε ίση με 8–13 kcal/mol για *in situ* βιοαποικοδόμηση καυσίμου (Miller, 1990). Στο διάστημα από 17–27 °C, η εξίσωση (3) προβλέπει με μεγάλη ακρίβεια τους ρυθμούς βιοαποικοδόμησης.

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

### 3.3.5. Τα θρεπτικά συστατικά

Για να διατηρηθεί η μικροβιακή ανάπτυξη πρέπει να είναι διαθέσιμα κάποια βασικά συστατικά σε ορισμένες ποσότητες. Μερικά από αυτά είναι το ασβέστιο, ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγνήσιο, το μαγγάνιο, το μολυβδαίνιο, το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, το νάτριο, το θείο και ο ψευδάργυρος. Το άζωτο και ο φώσφορος απαιτούνται σε μεγαλύτερες ποσότητες και είναι πολύ πιθανό κάποιο από αυτά να υπάρχει μεν αλλά σε μικρή συγκέντρωση. Τα υπόλοιπα συστατικά καλούνται ιχνοστοιχεία διότι απαιτούνται σε πολύ μικρότερες ποσότητες. Τα θρεπτικά στοιχεία είναι συστατικά της μικροβιακής βιομάζας. Η ανάγκη για αυτά είναι διαφορετική από την ανάγκη για άνθρακα ή ενέργεια. Τα θρεπτικά δεν καταστρέφονται αλλά ανακυκλώνονται στο οικοσύστημα. Επίσης, αντίθετα από το οξυγόνο, δεν απαιτείται σταθερή προσθήκη θρεπτικών στο έδαφος προκειμένου να λειτουργήσει η βιοαποικοδόμηση. Μια προσέγγιση της απαίτησης σε θρεπτικά είναι και η ακόλουθη που βασίζεται στην μικροβιακή κινητική (US EPA, 1995):

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

όπου:

$X$ : βιομάζα (mg βιομάζας/kg εδάφους),  
 $k_B$ : ρυθμός βιοαποικοδόμησης (mg υδρογονανθράκων/kg εδάφους · d),  
 $Y$ : συντελεστής κυττάρων (mg βιομάζας/mg υδρογονανθράκων) και  
 $k_d$ : ρυθμός ενδογενούς αναπνοής (d<sup>-1</sup>).

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

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

και με επίλυση:

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

Πολύ λίγα είναι γνωστά για τους ρυθμούς ενδογενούς αναπνοής ή τους συντελεστές “Y”, μπορούν όμως να αντληθούν από τη διεθνή βιβλιογραφία (Metcalf and Eddy, 2003). Στα περισσότερα εδάφη, τα θρεπτικά στοιχεία είναι σε περίσσεια και για το λόγο αυτό στις ήδη διαθέσιμες εφαρμογές πεδίου δεν έχει απαιτηθεί προσθήκη αυτών. Τα θρεπτικά συνήθως προστίθενται όταν είναι επιθυμητή η αύξηση του ρυθμού αποδόμησης, χωρίς να έχει εξακριβωθεί απόλυτα η σχέση αυτή. Έτσι, ακόμα και στην περίπτωση που οι λόγοι άνθρακα, αζώτου και φωσφόρου δεν είναι στα βέλτιστα επίπεδα, ο ρυθμός αναπνοής διατηρήθηκε σε πολύ καλό βαθμό. Γενικά πάντως δεν υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού αποδόμησης και της συγκέντρωσης θρεπτικών, όταν το οξυγόνο (περιοριστικός παράγοντας) επαρκεί. Στον υπολογισμό του ρυθμού αναπνοής υπάρχει το ενδεχόμενο σφάλματος στην περίπτωση που το έδαφος είναι πλούσιο σε σίδηρο. Αυτό συμβαίνει γιατί μια ποσότητα οξυγόνου δεσμεύεται από τον σίδηρο σχηματίζοντας οξειδία του σιδήρου.

### 3.3.6. Η συγκέντρωση του ρύπου

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

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

### 3.3.7. Βιοδιαθεσιμότητα και σχετική βιοαποικοδομησιμότητα

Άλλη μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την βιοαποικοδόμηση είναι η βιοδιαθεσιμότητα του ρύπου. Η βιοδιαθεσιμότητα είναι μια γενικότερη έννοια που περιγράφει την προσβασιμότητα του ρύπου στον μικροβιακό πληθυσμό. Η βιοδιαθεσιμότητα περιέχει μια φυσική ερμηνεία που σχετίζεται με την κατανομή των φάσεων και τη μεταφορά μάζας και μια φυσιολογική ερμηνεία που σχετίζεται με την καταλληλότητα του ρύπου σαν υπόστρωμα. Οι ενώσεις που έχουν μεγάλη διαλυτότητα στο νερό και μικρή έλξη με τα υγρά μη υδατικής φάσης (Non Aqueous Phase Liquids-NAPLs) ή μικρή τάση προσρόφησης στο έδαφος, είναι αυτές που μπορούν να είναι βιοδιαθέσιμες στους μικροοργανισμούς και

ευκολότερα βιοαποικοδομήσιμες. Τα “BTEX” για παράδειγμα αποδομούνται ευκολότερα από άλλες ενώσεις των καυσίμων καθώς είναι περισσότερο διαλυτές στο νερό και επομένως βιοδιαθέσιμες.

### 3.4. Φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν τον βιοαερισμό

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

#### 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 25% έως 50% του όγκου των πόρων ανά ημέρα.

Η διαπερατότητα του εδάφους είναι συνάρτηση της δομής του εδάφους, του μεγέθους των σωματιδίων και της υγρασίας του. Τυπικά, διαπερατότητα πάνω από 0,1 Darcy ( $10^{-9}$  cm<sup>2</sup>) είναι αρκετή για την επαρκή οξυγόνωση των εδαφών (USACE, 2002). Κάτω από αυτό το επίπεδο, μπορεί να εφαρμοστεί ο βιοαερισμός μόνο που θα πρέπει να διεξαχθούν πειράματα στο πεδίο προκειμένου να διασφαλιστεί η μεταφορά του αέρα. Όταν η διαπερατότητα του εδάφους είναι κάτω από 0,01 Darcy, τότε η ροή στο έδαφος πραγματοποιείται μόνο είτε μέσω του δευτερεύοντος πορώδους είτε μέσω άλλων ρηγματώσεων του εδάφους. Για το λόγο αυτό, η επιτευξιμότητα του βιοαερισμού σε χαμηλής διαπερατότητας εδάφη είναι συνάρτηση της κατανομής των μονοπατιών ροής και της διάχυσης του αέρα από και προς τα μονοπάτια αυτά εντός της ρυπασμένης περιοχής. Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα επιτυχούς εφαρμογής της μεθόδου σε εδάφη μικρής διαπερατότητας όπως στην Αεροπορική Βάση Eielson, Alaska (US EPA, 1994).

Σε εδάφη με καλή τιμή διαπερατότητας, ακόμα και στην περίπτωση που τα μονοπάτια ροής απέχουν 0,6–1,2 m από την ρυπασμένη περιοχή, μπορεί να πραγματοποιηθεί η βιοαποικοδόμηση εξαιτίας της διάχυσης του οξυγόνου. Παρόλα αυτά, ο βαθμός επεξεργασίας είναι διαφορετικός σε κάθε περιοχή.

Το οξυγόνο γενικά κατανέμεται πολύ καλά σε περιοχές όπου η διαπερατότητα υπερβαίνει τα 0,1 Darcy (Γιδαράκος, 2003). Ενδεχομένως η συγκέντρωσή του σε κάποια σημεία παρακολούθησης να είναι χαμηλή. Συνήθως όμως ο αριθμός των σημείων αυτών είναι μικρός. Από τους πιο σημαντικούς παράγοντες περιορισμού του βιοαερισμού είναι η υψηλή υγρασία. Ο συνδυασμός υψηλής υγρασίας και λεπτόκοκκου εδάφους πιθανόν να αποτελέσει πρόβλημα. Η ετερογενής φύση των περισσότερων εδαφών που περιέχουν φακούς και άλλες παρόμοιες δομές, συνεισφέρουν θετικά στην καλύτερη διανομή του αέρα.

#### 3.4.1. Κατανομή του ρύπου

Επειδή ο βιοαερισμός είναι ουσιαστικά ένα σύστημα διανομής του αέρα σχεδιασμένο 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 της ακόρεστης ζώνης, στη φάση των ατμών της ακόρεστης ζώνης, σε ελεύθερη μορφή επιπλέοντας στον υδροφόρα σαν κατάλοιπο κορεσμού και στην υγρή φάση διαλυμένος στο νερό των πόρων ή στο υπόγειο ύδωρ (Σχήμα 2).

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



Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση της κατανομής της ρύπανσης (Alaska DEC, 2004)

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

$$C_v = \chi \cdot C_{vsat} \quad (7)$$

όπου:

- $C_v$ : συγκέντρωση του ρύπου στην αέρια φάση (g/L),
- $\chi$ : ποσοστό κατανομής του ρύπου (αδιάστατο μέγεθος) και
- $C_{vsat}$ : συγκέντρωση κορεσμού της αέριας φάσης (g/L).

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

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

όπου:

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

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

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

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

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

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

όπου:

$C_W$  = συγκέντρωση του ρύπου στην υδατική φάση (g/L<sub>aqueous</sub>),

$s_x$  = διαλυτότητα του καθαρού ρύπου στο νερό (g/L<sub>water</sub>).

Η ρόφηση των ρύπων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει διάφορα φαινόμενα όπως τις δυνάμεις Coulomb, τις δυνάμεις Van der Waals, τους δεσμούς υδρογόνου, τις δυνάμεις δίπολου-δίπολου και τις υδροφοβικές δυνάμεις. Για παράδειγμα, οι υδρογονάνθρακες λόγω της μη πολικής φύσης τους προσροφούνται εξαιτίας των δεσμών υδροφοβικού χαρακτήρα με την οργανική ύλη. Η υδροφοβικότητα είναι από τις κύριες ιδιότητες που επηρεάζουν την τύχη των οργανικών ενώσεων στο υπέδαφος. Ο βαθμός ρόφησης εξαρτάται από το οργανικό περιεχόμενο του εδάφους και από τον συντελεστή κατανομής οκτανόλης/νερού του συγκεκριμένου συστατικού. Οι ισόθερμες ρόφησης είναι τριών ειδών: τύπου Langmuir, τύπου Freundlich ή γραμμικές (Σχήμα 3). Η ισόθερμη Langmuir περιγράφει την γραμμική αρχικά αύξηση της προσροφημένης ποσότητας του ρύπου ως προς τη συγκέντρωσή του, που στη συνέχεια φτάνει σε ένα άνω όριο και τείνει προς την οριζόντια. Αυτό συμβαίνει λόγω της σταδιακής πλήρωσης των ελεύθερων θέσεων. Η ισόθερμη αυτή περιγράφει πλήρως την προσρόφηση στην περιοχή όπου η συγκέντρωση του ρύπου είναι υψηλή, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην πηγή της ρύπανσης. Στην ισόθερμη Freundlich υποτίθεται ότι τα σημεία πλήρωσης είναι άπειρα, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα σημεία που βρίσκονται μακριά από την πηγή όπου η συγκέντρωση είναι χαμηλή. Η μαθηματική έκφραση περιέχει έναν παράγοντα χημικά καθορισμένο που μεταβάλλει την γραμμικότητα της ισόθερμης. Η γραμμική ισόθερμη είναι σχετικά απλή και ισχύει στην περίπτωση διαλυμένων συστατικών κατά το μισό της διαλυτότητάς τους. Τυπικά ισχύει για την περιγραφή της ρόφησης των υδρογονανθράκων. Η γραμμική ισόθερμη εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

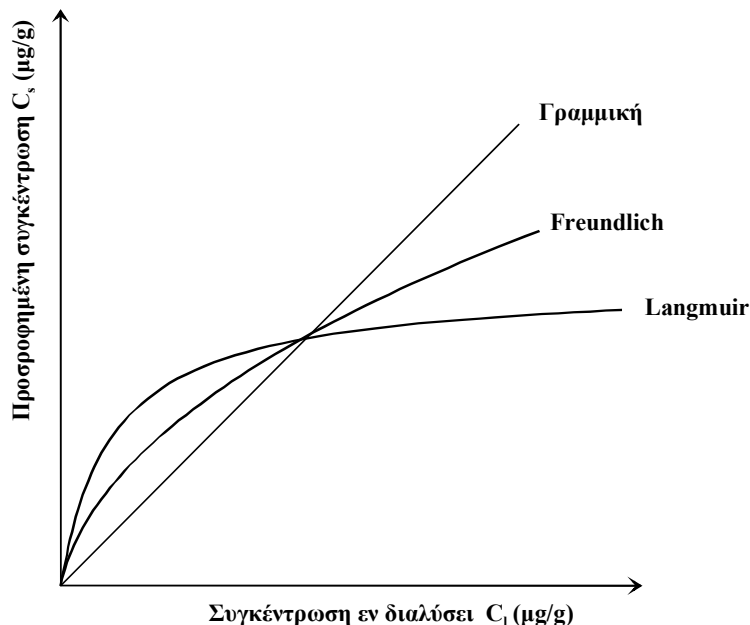
$$C_S = K_d \cdot C_W \quad (10)$$

όπου:

$C_s$  = ποσότητα του ρύπου που είναι προσροφημένη στα σωματίδια του εδάφους ( $\text{g/g}_{\text{soil}}$ ),

$K_d$  = συντελεστής ρόφησης ( $L_{\text{aqueous}}/\text{g}_{\text{soil}}$ ),

$C_w$  = συγκέντρωση του ρύπου στην υγρή φάση ( $\text{g}/L_{\text{aqueous}}$ ).



**Σχήμα 3.** Ισόθερμες ρόφησης (US EPA, 1995)

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

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

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

Η σχέση αυτή ακολουθεί τυπικά μια καμπύλη τύπου Langmuir. Αν η συγκέντρωση στο έδαφος είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα που μπορεί να προσροφηθεί, τότε οι συγκεντρώσεις της υγρής και της αέριας φάσης καθορίζονται από το νόμο του Raoult και είναι ανεξάρτητες της συγκέντρωσης της ουσίας στο έδαφος. Για παράδειγμα, σε αμμώδες έδαφος το ελεύθερο προϊόν μπορεί να φτάσει και να υπερβεί μια συγκέντρωση 25.000 mg/kg. Παρόλα αυτά, μια πιθανή αποκατάσταση κατά 99%, δηλαδή 250 mg/kg, δεν θα επηρεάσει τις συγκεντρώσεις ισορροπίας στο αέριο του εδάφους ή στο υπόγειο ύδωρ.

Οι δυσκολίες ως προς την εφαρμογή του βιοαερισμού παρουσιάζονται στην περίπτωση ύπαρξης μεγάλων ποσοτήτων ρύπου στην ζώνη τριχοειδών ή εντός του υδροφορέα, εξαιτίας των διακυμάνσεων της στάθμης του υπογείου ύδατος. Για την περίπτωση αυτή, προτείνεται η προεπεξεργασία της ζώνης τριχοειδών φαινομένων και η εγκατάσταση φίλτρων στα

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

### 3.4.2. Ακτίνα επίδρασης του οξυγόνου

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

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

Σε εδάφη με φακούς μικρής διαπερατότητας πάνω από εδάφη μεγαλύτερης διαπερατότητας η ακτίνα επίδρασης του οξυγόνου αυξάνεται. Σε περιοχές όπου η ρύπανση είναι σε μικρά βάθη, η ακτίνα επίδρασης αυξάνεται όταν στην επιφάνεια υπάρχει άσφαλτος ή τσιμέντο. Στην περίπτωση όμως λιθόστρωτων δρόμων δεν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο. Η μικροβιακή δραστηριότητα επηρεάζει την ακτίνα επιρροής. Καθώς αυξάνεται η μικροβιακή δραστηριότητα, μειώνεται η ακτίνα. Για το λόγο αυτό, προτείνεται ο υπολογισμός της ακτίνας και ο σχεδιασμός του συστήματος σε περιόδους μέγιστης μικροβιακής δραστηριότητας.

### 3.5. Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση συστήματος βιοαερισμού

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση ενός συστήματος βιοαερισμού σε πλήρη κλίμακα. Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις της βιοφυσητικής μεθόδου έχουν καθοριστεί μετά από μακροχρόνια εφαρμογή διαπιστώσεις σε πιλοτικές και πλήρους κλίμακας μονάδες. Τα κυριότερα βήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό ενός βιοφυσητικού συστήματος είναι:

Καθορισμός του τρόπου λειτουργίας του συστήματος (εισαγωγή αέρα, άντληση αέρα ή και τα δύο).

- Καθορισμός της απαιτούμενης παροχής αέρα για την δεδομένη περιοχή.
- Καθορισμός της διάταξης των φρεατίων.
- Καθορισμός της πτώσης πίεσης του συστήματος.
- Κατάλληλη επιλογή του φυσητήρα (blower).
- Σχεδιασμός των φρεατίων και των σωληνώσεων.
- Καθορισμός των σημείων παρακολούθησης και σχεδιασμός τους.

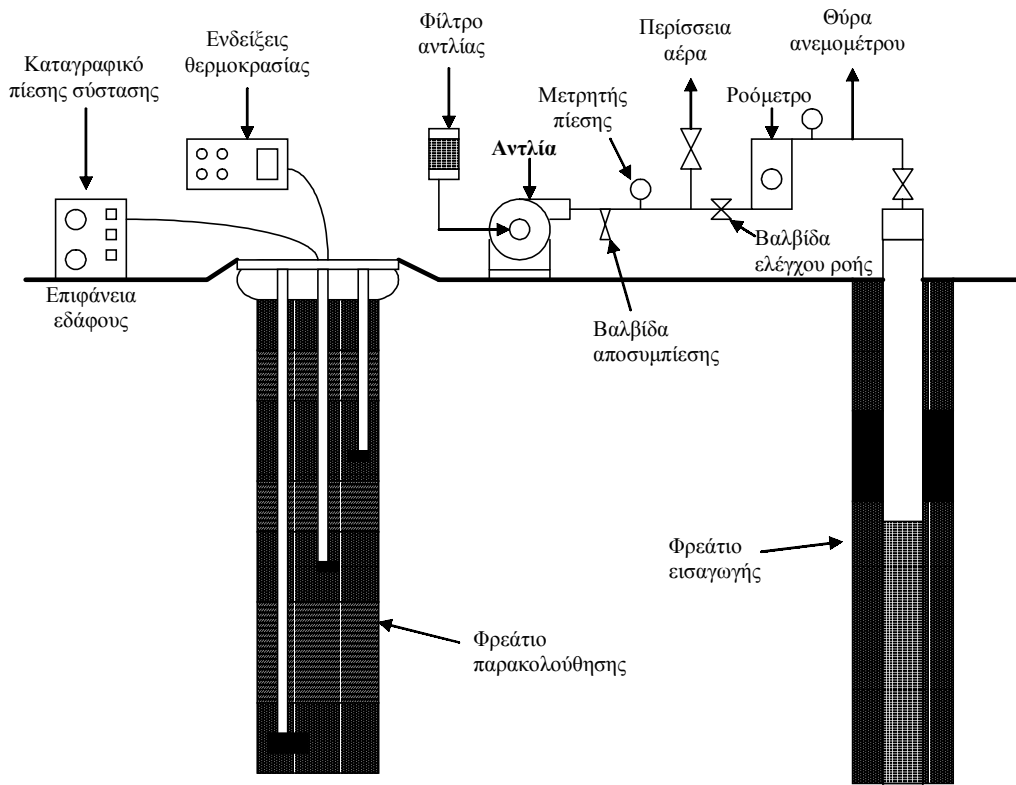
### 3.5.1. Καθορισμός του τρόπου λειτουργίας του συστήματος

Γενικά, αν είναι ασφαλές και εφικτό, είναι προτιμότερη η εισαγωγή αέρα για βιοφυσητικά συστήματα πλήρους κλίμακας. Αν ο σχεδιασμός είναι σωστός, τότε με την εισαγωγή αέρα επιτυγχάνονται χαμηλότερα επίπεδα εκροών προς την ατμόσφαιρα πτητικών οργανικών ενώσεων (Kampbell, 1993). Επίσης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι χαμηλότερο από τα αντίστοιχα στα συστήματα άντλησης αέρα εδάφους (SVE).

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

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

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη ενός συστήματος βιοαερισμού. Είναι γενικά απλό και περιλαμβάνει μια αντλία (blower), ένα σύστημα διασποράς του αέρα, τα απαραίτητα όργανα μέτρησης-ελέγχου, τα φρεάτια εισαγωγής αέρα και τα σημεία δειγματοληψίας. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα δεν δημιουργεί ιδιαίτερα προβλήματα αερίων εκπομπών ενώ δεν απαιτείται επιφανειακός εξοπλισμός επεξεργασίας εκπομπών (US EPA, 1995).



Σχήμα 4. Τυπική διάταξη συστήματος βιοαερισμού (NFESC, 1996)

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

### 3.5.2. Καθορισμός της απαιτούμενης παροχής αέρα

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

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

$$Q_s = \frac{k_o \cdot V \cdot \theta_a}{(20,9\% - 5\%) \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}} \quad (12)$$

όπου:

$Q_s$ : παροχή αέρα για την περιοχή ( $\text{m}^3/\text{min}$ ),

(20,9% - 5%): μεταβολή στη συγκέντρωση του οξυγόνου,

$k_o$ : ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου (%/hr),

$V$ : όγκος του ρυπασμένου εδάφους ( $\text{m}^3$ ) όπου περιοριστικός παράγοντας είναι το οξυγόνο,

$\theta_a$ : τμήμα του πορώδους που περιέχει αέρα (τυπικό εύρος 0,2-0,3).

Για έλεγχο των υπολογισμών, ο ρυθμός εισαγωγής αέρα υπολογίζεται ως η παροχή που απαιτείται για την αντικατάσταση του όγκου του περιεχομένου των πόρων ( $V\theta_a$ ) μια φορά την ημέρα (Καλογεράκης, 2003). Αυτή η χονδρική εκτίμηση βασίζεται στην υπόθεση της συνεχούς ροής (plug flow) και σε ένα ρυθμό κατανάλωσης οξυγόνου της τάξεως του 0,6625%/hr.

Η παροχή σχεδιασμού πρέπει να είναι τουλάχιστον 40% μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται από την εξίσωση (12) για την περίπτωση της μη επαρκούς διανομής του αέρα και για τη ρύθμιση του ισοζυγίου αέρα σε κάθε φρεάτιο κατά το διάστημα έναρξης λειτουργίας του συστήματος.

### 3.5.3. Καθορισμός της διάταξης των φρεατίων

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

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

Η ακτίνα μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις μετρήσεις πίεσης κατά τη διάρκεια του τεστ διαπερατότητας. Πρόκειται για συνηθισμένη πρακτική κατά τον αερισμό του εδάφους και είναι μια γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδος. Από την πίεση που υπολογίζεται *in situ* κατά τη διάρκεια της εισαγωγής του αέρα σε φρεάτιο δημιουργείται το διάγραμμα του λογάριθμου των πιέσεων ως προς την ακτινική απόσταση από το πηγάδι εισαγωγής. Η ακτίνα επιρροής είναι ίση με την απόσταση μέχρι την οποία η αύξηση της πίεσης λόγω της εισαγωγής αέρα παραμένει πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο. Χρησιμοποιώντας τα 25 Pa (0,1 inches  $\text{H}_2\text{O}$ ) σαν όριο για την μετρούμενη αύξηση της πίεσης στο δεδομένο σημείο μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα επιρροής με συντηρητικό τρόπο και ικανοποιητικό αερισμό.

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

διαπερατότητας μπορεί η παροχή του αέρα να αρκεί για τη σωστή οξυγόνωση ακόμα και όταν η μεταβολή της πίεσης είναι πολύ μικρή ή μη μετρήσιμη.

Ο υπολογισμός της παροχής αέρα και του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου είναι μέρη μιας επαναληπτικής διαδικασίας για την κατάλληλη χωροθέτηση των φρεατίων. Η μέθοδος της μεταβολής της πίεσης απαιτείται για τον υπολογισμό μιας αρχικής ακτίνας επιρροής. Ο αριθμός των φρεατίων πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή του αέρα στην περιοχή ρύπανσης, με την απόσταση μεταξύ των φρεατίων να είναι ίση με 1,4 – 2 φορές της ακτίνας επιρροής (Σχήμα 5). Η παροχή αέρα τότε για κάθε φρεάτιο ( $Q_w$ ) υπολογίζεται διαιρώντας την συνολική παροχή  $Q_s$  (βλ. εξίσωση 12) με τον αριθμό των φρεατίων. Με χρήση του “ $Q_w$ ” και του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου, η εξίσωση (13) που ακολουθεί παρέχει την ακτίνα επιρροής. Υποθέτοντας ότι τα φρεάτια εγκαθίστανται κατακόρυφα έτσι που η ροή του αέρα να περιγράφεται με κυλινδρικές συντεταγμένες και ότι η ακτίνα επιρροής είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακτίνα του φρεατίου τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση που ακολουθεί:

$$R_I = \sqrt{\frac{Q_w \cdot (20,9\% - 5\%) \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}}{\pi \cdot h \cdot k_o \cdot \theta_a}} \quad (13)$$

όπου:

$R_I$ : ακτίνα επιρροής (m)

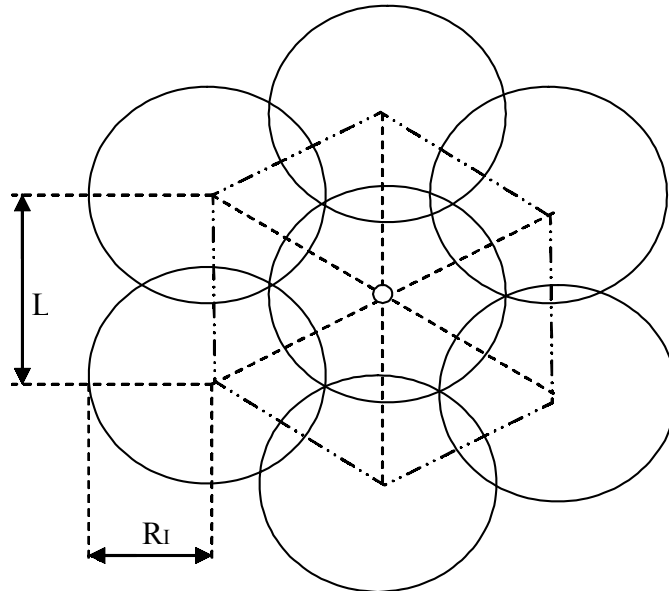
$Q_w$ : παροχή αέρα ανά φρεάτιο ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

(20,9% - 5%): μεταβολή στη συγκέντρωση του οξυγόνου (%)

$k_o$ : ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου (%/hr)

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

$h$ : πάχος αερισμού (m)



**Σχήμα 5.** Διάταξη φρεατίων στο επίπεδο. Διακρίνονται οι περιοχές επικάλυψης (Delleur, 1999)

Ο αριθμός των φρεατίων ή η παροχή του αέρα είναι χαρακτηριστικά που ενδέχεται να πρέπει να αυξηθούν λαμβάνοντας υπόψη την ακτίνα που υπολογίζεται με τη μέθοδο της πτώσης πίεσης και την ακτίνα από την Εξίσωση 13. Ο συνδυασμός αυτός ισχύει και για τους τρεις παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή του αέρα σε φρεάτιο, δηλαδή την πτώση πίεσης, την παροχή του αέρα και την κατανάλωση οξυγόνου. Πολλές φορές η ακτίνα λαμβάνεται με εμπειρικό τρόπο. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιες γενικές κατευθύνσεις. Στην απλούστερη περίπτωση, η ακτίνα που υπολογίζεται από την Εξίσωση 13 θα διαφέρει κατά 25% περίπου από αυτήν που λαμβάνεται με τη μέθοδο της πτώσης πίεσης και δεν απαιτείται διόρθωση αυτής. Επίσης, στην περίπτωση που η ακτίνα της Εξίσωσης 13 είναι μεγαλύτερη από αυτήν της μεθόδου της πίεσης, τότε δεν απαιτείται κάποια διόρθωση. Αν όμως ισχύει το αντίστροφο, τότε πρέπει να αυξηθεί η παροχή σχεδιασμού του αέρα. Αυτό μπορεί να γίνει είτε προσθέτοντας φρεάτια με παροχή “ $Q_w$ ” για να καλυφθεί η προς εξυγίανση περιοχή είτε αυξάνοντας την παροχή ώστε να αυξηθεί η ακτίνα επιρροής και να πλησιάσει αυτήν που υπολογίζεται με τη μέθοδο της πτώσης πίεσης.

Μια πιλοτική εφαρμογή του βιοαερισμού άνω, θα δώσει την καλύτερη δυνατή προσέγγιση όσον αφορά την ακτίνα επιρροής. Η πιλοτική μονάδα απαιτεί την εγκατάσταση ενός φρεατίου, μιας αντλίας και σημείων παρακολούθησης και δειγματοληψίας. Η αντλία λειτουργεί με παροχή αέρα που υπολογίζεται με βάση την απαίτηση σε οξυγόνο και την ακτίνα επιρροής που καθορίζεται από τη μέτρηση της πίεσης. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα από τα σημεία δειγματοληψίας για τον καθορισμό του  $R_1$ .

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

Από τη στιγμή κατά την οποία καθορίζεται ο αριθμός των φρεατίων, πρέπει να οριστούν τα σημεία στα οποία θα διανοιχτούν τα φρεάτια. Αν ένα και μόνο φρεάτιο αρκεί για την οξυγόνωση όλης της ρυπασμένης περιοχής τότε το φρεάτιο αυτό τοποθετείται στο κέντρο της ρυπασμένης περιοχής. Κάποιες φορές η γεωλογική δομή του εδάφους μπορεί να είναι τέτοια που το σημείο στο οποίο εγκαθίσταται το φρεάτιο να είναι διαφορετικό.

Όταν χρησιμοποιούνται πάνω από ένα φρεάτια, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση που ασκεί το κάθε ένα από αυτά στα γειτονικά του. Θεωρητικά, ο αέρας κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από τα φρεάτια με τον ίδιο τρόπο (Σχήμα 5). Στην πράξη όμως, τα οριζόντια και κατακόρυφα μονοπάτια και οι διαφορές στους συντελεστές διάχυσης των διαφόρων σημείων μιας περιοχής δημιουργούν συνθήκες που αποκλίνουν από την θεωρία.

### 3.5.4. Καθορισμός της πτώσης πίεσης του συστήματος

Η πτώση πίεσης στο σύστημα των σωληνώσεων και των φρεατίων πρέπει να υπερκαλυφθεί προκειμένου να είναι δυνατή η παροχή της απαιτούμενης ποσότητας αέρα μέσω του βιοαερισμού. Η πτώση πίεσης είναι άθροισμα δύο παραμέτρων: της πτώσης πίεσης στις σωληνώσεις του συστήματος και της πίεσης στα φρεάτια εισαγωγής αέρα ή του κενού στα φρεάτια εξαγωγής αέρα.

Η πτώση πίεσης στις σωληνώσεις μπορεί να υπολογιστεί με την εφαρμογή των σχέσεων που διέπουν την μεταφορά αερίων σε αγωγούς και συνδέσμους αυτών. Δυστυχώς όμως, η πτώση πίεσης στο φρεάτιο συνεισφέρει σημαντικά στις συνολικές απώλειες και είναι πιο δύσκολο να υπολογιστεί. Η πιο ακριβής μέθοδος είναι να πραγματοποιηθεί πιλοτικό τεστ για τον υπολογισμό της πίεσης σαν συνάρτηση της παροχής αέρα, σε ένα φρεάτιο το οποίο είναι του ίδιου περιήπου μεγέθους και σχεδιασμού με αυτό το οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί στο πλήρες σύστημα. Λόγω όμως του υψηλού κόστους των πιλοτικών τεστ, η πτώση πίεσης μπορεί να υπολογιστεί με χρήση παρελθούσας εμπειρίας από τη βιβλιογραφία σε παρόμοιες συνθήκες εφαρμογής. Αν χρησιμοποιηθεί μια εσφαλμένη τιμή της πτώσης πίεσης, ενδέχεται να οδηγηθούμε σε υπερδιαστασιολόγηση της αντλίας (blower). Το κόστος αυτό της υπερδιαστασιολόγησης συνήθως είναι μικρότερο από το κόστος διεξαγωγής ενός πιλοτικού τεστ. Η αυξημένη παροχή αέρα από ένα υπερδιαστασιολογημένο σύστημα μπορεί να αποφευχθεί με χρήση μιας βαλβίδας παράκαμψης στον καταθλιπτικό αγωγό του.

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

### 3.5.5. Κατάλληλη επιλογή αντλίας

Η αντλία απαιτείται προκειμένου να προσδώσει στο σύστημα του βιοαερισμού την κατάλληλη ενέργεια για να κινηθεί ο αέρας μέσα στις σωληνώσεις. Για την επιλογή του μεγέθους της πρέπει να ληφθεί υπόψη η απαιτούμενη παροχή αέρα και η συνολική πτώση πίεσης του συστήματος. Οι πιο συνήθεις τύποι αντλίας είναι οι φυγοκεντρικοί.

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

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

Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής του βιοαερισμού, οι αντλίες που παρέχουν την απαιτούμενη ποσότητα αέρα και πίεση είναι της τάξης των 2-10 hp. Αντλίες μέσης δυναμικότητας διατίθενται στα 210 ή 240 V (μονοφασικές) ή 480 V (τριφασικές). Για το εύρος των 1,5 – 5 hp προτιμούνται οι αντλίες των 210 ή 240 V. Οι αντλίες των 480 V χρησιμοποιούνται σε ισχύ άνω των 5 hp, εξαιτίας της βελτιωμένης τους απόδοσης (NFESC, 1996). Παρόλα αυτά, οι αντλίες των 240 V μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όταν οι αντλίες των 480 V παρουσιάζουν δυσκολία στην εφαρμογή. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιαστής του

συστήματος πρέπει αρχικά να γνωρίζει την ενεργειακή δυνατότητα της δεδομένης περιοχής προτού επιλέξει το μοτέρ της αντλίας.

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

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

### 3.5.6. Σχεδιασμός των φρεατίων και των σωληνώσεων

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

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

- δυνατότητα μέτρησης της παροχής σε κάθε φρεάτιο
- σύστημα θερμικής προστασίας του μοτέρ της αντλίας
- βαλβίδα αποσυμπίεσης στον αγωγό εκροής της αντλίας
- σημεία δειγματοληψίας πριν και μετά τον εξοπλισμό επεξεργασίας αέρα (στο σύστημα εξαγωγής αέρα)
- μετρητής στάθμης νερού στη δεξαμενή νερού (στο σύστημα εξαγωγής αέρα)
- μετρητής πίεσης στο καταθλιπτικό τμήμα της αντλίας
- μετρητές πίεσης σε διάφορα σημεία των αγωγών του συστήματος
- βαλβίδα εκτόνωσης στην εκροή της αντλίας για προστασία από υπερθέρμανση

- υψηλής ακρίβειας βάνες και συναγερμοί για το συμπύκνωμα αερίων (στο σύστημα εξαγωγής αέρα) και
- μετρητής έκρηξης (στο σύστημα εξαγωγής αέρα, στην περίπτωση κατά την οποία οι πρόσφατες μετρήσεις των συγκεντρώσεων των εύφλεκτων ατμών είναι υψηλότερες από το 10% του κατώτατου ορίου έκρηξης (LEL)).

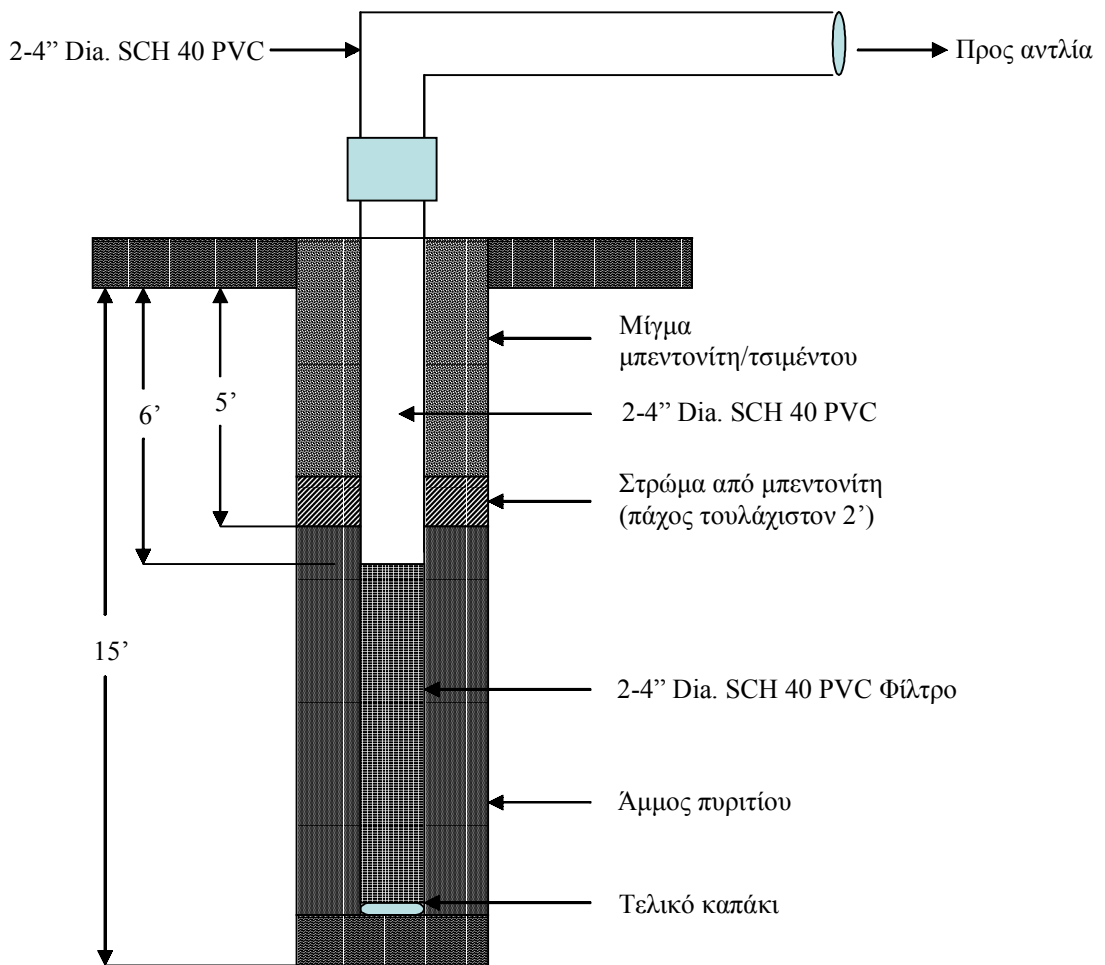
### 3.5.7. Κατασκευή του φρεατίου

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

Η διάμετρος του φρεατίου είναι τυπικά μεταξύ 50–100 mm (2–4 in), παρόλο που κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο μεγαλύτερες όσο και μικρότερες διαμέτροι με επιτυχία. Η διάμετρος καθορίζεται με βάση το είδος του εδάφους, την ευκολία διάνοιξης, την έκταση και το βάθος της ρύπανσης. Στα περισσότερο ρηχά και αμμώδη εδάφη, μια διάμετρος 50 mm (2 in) θα είναι αρκετή για να παρέχεται επαρκής ποσότητα αέρα στην ρυπασμένη περιοχή. Στις περιοχές που η ρύπανση εκτείνεται σε βάθη κάτω από τα 9 m ή σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας, προτείνεται η εγκατάσταση ενός φρεατίου διαμέτρου 76–100 mm (3–4 in), καθώς με τον τρόπο αυτό επιτρέπεται ο αερισμός μεγαλύτερου όγκου εδάφους. Καθώς αυξάνεται το βάθος του φρεατίου μειώνεται σημαντικά το κόστος κατασκευής του ανά μέτρο.

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

Η πιο συνήθης μέθοδος διάνοιξης φρεατίου είναι η δημιουργία κατακόρυφης γεώτρησης με τρυπάνι τύπου κοχλία. Παρόλα αυτά, ένα τρυπάνι σωληνοειδούς τύπου θεωρείται πιο κατάλληλο σε συμπαγή εδάφη. Υπάρχουν βέβαια και άλλες τεχνικές, όπως στην περίπτωση όχι τόσο συμπαγούς εδάφους όπου το επιθυμητό βάθος διάνοιξης είναι μικρό. Σε τέτοια περίπτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και χειροκίνητο τρυπάνι. Όποτε είναι δυνατόν, η διάμετρος της γεώτρησης πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα του φρεατίου. Το κενό διάστημα συμπληρώνεται με άμμο ή χαλίκι, ενώ το τμήμα πάνω από το φίλτρο καλύπτεται με τσιμέντο για να παρεμποδιστεί η διαφυγή του αέρα προς την επιφάνεια (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Σχηματική αναπαράσταση φρεατίου αερισμού (US EPA, 1995)

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

### 3.5.8. Καθορισμός των σημείων παρακολούθησης και σχεδιασμός τους

Η κατάλληλη επιλογή των σημείων παρακολούθησης είναι μια σημαντική παράμετρος για το σωστό υπολογισμό της πίεσης και της σύστασης του αερίου *in situ*. Τυπικά χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του διοξειδίου του άνθρακα και του οξυγόνου στην κλίμακα 0-25% και της συγκέντρωσης των υδρογονανθράκων πάνω από 100 ppm κατ' όγκο. Το υλικό κατασκευής πρέπει να είναι ανθεκτικό και αδρανές. Μεταξύ των καταλληλότερων περιλαμβάνεται το νάιλον και το Tygon. Η προσρόφηση και η αντίδραση των αερίων με το

υλικό δεν δημιουργούν ιδιαίτερα προβλήματα. Παρόλα αυτά, αν είναι επιθυμητή η μέτρηση της συγκέντρωσης συγκεκριμένων οργανικών στην χαμηλή κλίμακα (ppm, ppb), τότε είναι πιο κατάλληλο το “Teflon” και το ανοξειδωτο ατσάλι. Τα σημεία δειγματοληψίας κατασκευάζονται με βάση την τοποθεσία της ρύπανσης και τις παραμέτρους του εδάφους.

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

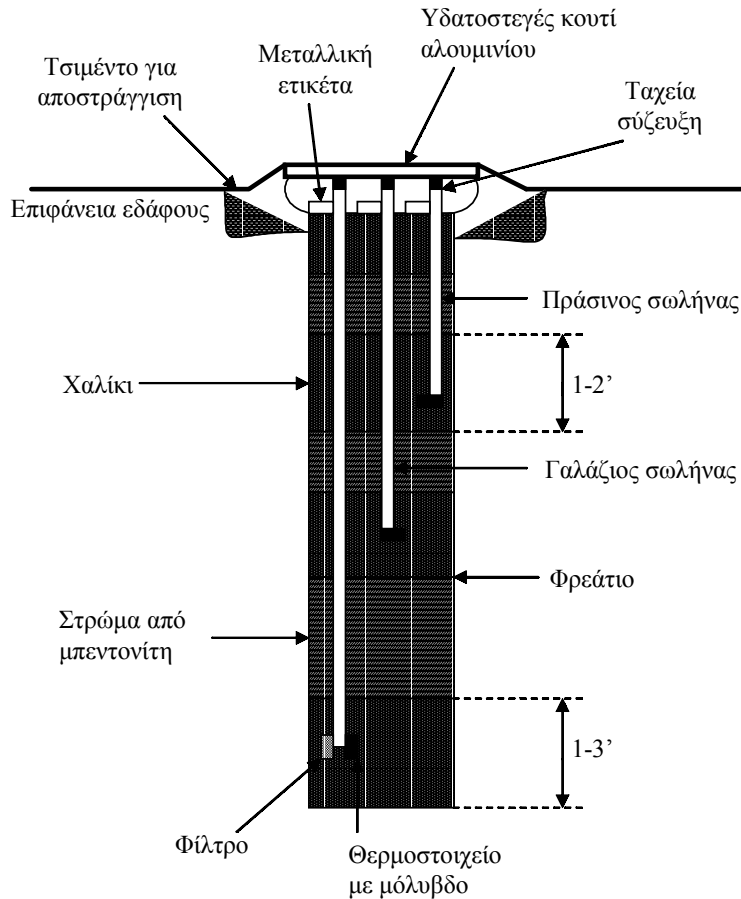
**Πίνακας 1.** Ενδεικτικές αποστάσεις των φρεατίων παρακολούθησης (US EPA, 1995).

Τύπος εδάφους	Βάθος από την κορυφή του φίλτρου (m)	Ακτινικές αποστάσεις των σημείων παρακολούθησης από φρεάτιο (m)
Χονδρόκοκκη άμμος	1,5	1,5 - 3 - 6
	3	3,0 - 9,0 - 15,0
	>4,5	6,0 - 9,0 - 21,0
Μεσαίου μεγέθους άμμος	1,5	3,0 - 9,0 - 15,0
	3	4,5 - 7,5 - 13,5
	>4,5	6,0 - 12,0 - 21,0
Λεπτή άμμος	1,5	3,0 - 6,0 - 12,0
	3	4,5 - 9,0 - 15,0
	>4,5	6,0 - 12,0 - 18,0
Λασπώδες	1,5	3,0 - 6,0 - 12,0
	3	4,5 - 9,0 - 15,0
	>4,5	6,0 - 12,0 - 18,0
Ελάχιστο διαπερατό	1,5	3,0 - 6,0 - 9,0
	3	3,0 - 6,0 - 12,0
	>4,5	3,0 - 7,5 - 15,0

Κάθε σημείο παρακολούθησης είναι συνήθως μια συστοιχία από τρεις σωλήνες δειγματοληψίας, που σε κάθε έναν καταλήγει ένα φίλτρο. Το φίλτρο αυτό επιτρέπει την είσοδο του εδαφικού αερίου στους σωλήνες, αλλά όχι και των σωματιδίων του εδάφους. Κάθε φίλτρο είναι τοποθετημένο σε διαφορετικό βάθος με διαφορετικού χρώματος σωληνώσεις που χρησιμοποιούνται για ένδειξη βάθους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κενό γύρω από τον σωλήνα δειγματοληψίας καλύπτεται από άμμο ενώ το διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων καλύπτεται από τσιμέντο. Για μερικά από τα σημεία παρακολούθησης, χρησιμοποιούνται καλώδια τύπου “J” ή “K” μαζί με τους σωλήνες δειγματοληψίας. Ο αισθητήρας που μετρά τη θερμοκρασία τοποθετείται στο επίπεδο του φίλτρου. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται κάποιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες των φρεατίων παρακολούθησης.

Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για τη δειγματοληψία τοποθετούνται έτσι ώστε να καλύπτουν όλο το βάθος του σημείου παρακολούθησης. Προτού επιλεγεί το βάθος, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές του υδροφόρου ορίζοντα και το είδος του εδάφους. Το πιο βαθύ φίλτρο τοποθετείται κοντά στον πυθμένα της ρύπανσης, αν βέβαια η ρύπανση παύει να υφίσταται πριν τον υδροφόρο. Αν η ρύπανση βρίσκεται εντός του υδροφόρου τότε το

βαθύτερο σημείο στο οποίο τοποθετείται το φίλτρο είναι τουλάχιστον 0,6–0,9 m πάνω από το υψηλότερο σημείο του υδροφορέα. Στα λιγότερο διαπερατά εδάφη, το φίλτρο τοποθετείται ακόμα υψηλότερα. Το μικρότερο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους στο οποίο τοποθετείται ένα φίλτρο είναι 0,9–1,5 m. Το ενδιάμεσο φίλτρο τοποθετείται περίπου σε κάποιο βάθος μεταξύ του κέντρου και του άνω ¼ του φίλτρου του φρεατίου. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι επιθυμητό να υπάρχουν πάνω από 3 σημεία δειγματοληψίας για πληρέστερη παρακολούθηση της ρυπασμένης ζώνης.



**Σχήμα 7.** Τυπική διάταξη φρεατίου παρακολούθησης (Πηγή: NFESC, 1996)

Στις περιοχές όπου υπάρχουν πάνω από ένα φρεάτια, δεν είναι αναγκαίο να δημιουργηθούν τρία σημεία δειγματοληψίας για κάθε φρεάτιο εισαγωγής αέρα. Ο επαρκής αριθμός σημείων είναι αυτός που εξασφαλίζει την ιδιότητα της αντιπροσωπευτικότητας των δειγμάτων. Ο λόγος του πλήθους των σημείων παρακολούθησης προς το πλήθος των φρεατίων εισαγωγής αέρα μειώνεται, όσο αυξάνεται το πλήθος των φρεατίων εισαγωγής αέρα. Παρόλα αυτά, προτείνεται τουλάχιστον ένας λόγος ενός σημείου παρακολούθησης ανά φρεάτιο εισαγωγής. Ο πραγματικός αριθμός καθορίζεται από την ιδιαιτερότητα κάθε περιοχής ως προς το μέγεθος της ρύπανσης και το κόστος εγκατάστασης πρόσθετων φρεατίων. Στη μέθοδο εισαγωγής αέρα, αρκετά σημεία παρακολούθησης πρέπει να

τοποθετούνται μεταξύ των φρεατίων εισαγωγής και άλλων στοιχείων που βρίσκονται εντός της ακτίνας επιρροής. Τα σημεία παρακολούθησης τοποθετούνται ώστε να εξασφαλίζεται ότι τα κτίρια για παράδειγμα βρίσκονται εκτός της ακτίνας επιρροής ή οι υδρογονάνθρακες της αέριας φάσης του εδάφους βιοδιασπώνται προτού φτάσουν σε αυτά.

### 3.6. Βιβλιογραφία

- Γιδαράκος Ε. (2003). *Τεχνολογίες Αποκατάστασης Εδάφους*. Διδακτικές Σημειώσεις, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Περιβαλλοντική & Υγειονομική Μηχανική, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καλογεράκης Ν. (2003). *Βιολογική Εξυγίανση Περιβάλλοντος*. Τεχνική Βιο-απορρύπανσης Περιβάλλοντος. Πολυτεχνικές Σημειώσεις, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Περιβαλλοντική & Υγειονομική Μηχανική, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Alaska Department of Environmental Conservation. (2004). *Environmental Cleanup Methods*. Free Publication Brochure [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.state.ak.us/dec/spar/faq.htm#csp](http://www.state.ak.us/dec/spar/faq.htm#csp)].
- Delleur, J. W. (1999). *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press, Springer, Florida, 873 p.
- Kampbell, D. (1993). U.S. EPA air sparging demonstration at Traverse City, Michigan. In: *Environmental Restoration Symposium*. Sponsored by the U.S. Air Force Center for Environmental Excellence, Brooks AFB, TX.
- Metcalf and Eddy (2003). *Wastewater engineering treatment, disposal, reuse*. 4<sup>th</sup> ed. New York, NY: McGraw-Hill.
- Miller R.N. (1990). *A field scale investigation of enhanced petroleum hydrocarbon biodegradation in the vadose zone combining soil venting as an oxygen source with moisture and nutrient additions*. Ph.D. Dissertation. Utah State University, Logan, UT.
- NFESC (1996). *Technical requirements to consider when preparing a scope of work for full-scale implementation of bioventing*. Naval Facilities Engineering Service Center. Technical Memorandum.-2186-ENV. California 93043-4370.
- Ong, S.K., A. Leeson, R.E. Hinchee, J. Kittel, C.M. Vogel, G.D. Sayles, and R.N. Miller. (1994). *Cold climate application of bioventing*. In: Hinchee, R.E., B.C. Alleman, R.E. Hoepfel, and R.N. Miller, eds. *Hydrocarbon bioremediation*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers. pp. 444-453.
- US ACE Army Corps of Engineers (2002). *Engineer Manual: Soil Vapour Extraction and Bioventing*. EM 1110-1-4001. US Army Corps of Engineers.
- US EPA (1994). *Bioventing of jet fuel spills I: Bioventing in a cold climate with soil warming at Eielson AFB, Alaska*. Presented at: *Symposium on Bioremediation of Hazardous Wastes: Research, Development and Field Applications* (June). EPA/600/R-94/075. Washington, DC. pp. 15-21.
- US EPA (1995). *Manual: Principles and Practices of Bioventing, Volume I: Bioventing Principles*. EPA/540/R-95/534a.
- US EPA (1995). *Manual: Principles and Practices of Bioventing, Volume II: Bioventing Design*. EPA/540/R-95/534a.
- Yazdani R., Kieffer J. and 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.

## 4. Συνδυαστικές μέθοδοι αερόβιας βιοεξυγίανσης

**Αποστολάκη Μαρία**

Μηχανικός Περιβάλλοντος, M.Sc.

### 4.1. Εισαγωγή

Η εξέλιξη της γνώσης σχετικά με τη συμπεριφορά των χώρων διάθεσης απορριμμάτων τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει προς την κατεύθυνση αναβάθμισης των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), από ένα χώρο απλής απόθεσης απορριμμάτων σε ένα τύπο κλειστού βιοαντιδραστήρα, δηλαδή σε ένα βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων. Στόχος της τεχνολογίας αυτής είναι η ελαχιστοποίηση της διαφυγής στραγγισμάτων στο υπέδαφος και η μεγιστοποίηση παραγωγής αερίων. Οι βιοαντιδραστήρες στερεών αποβλήτων κατασκευάζονται όπως οι συμβατικοί χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με καλύμματα στεγανοποίησης πυθμένα, συστήματα συλλογής των στραγγισμάτων και συστήματα διαχείρισης των αερίων. Η βασική διαφορά στους βιοαντιδραστήρες στερεών αποβλήτων οφείλεται στο γεγονός ότι λειτουργούν και ελέγχονται με σκοπό την επιτάχυνση της βιολογικής διαδικασίας, με την οποία αποικοδομούνται και σταθεροποιούνται τα απορρίμματα. Η επιτάχυνση αυτή συνοδεύεται συνήθως από την προσθήκη υγρασίας, έτσι ώστε η περιεχόμενη υγρασία να φτάσει στα επίπεδα του 35-50% (Warith, 2002).

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πειραματικοί έλεγχοι και έχουν κατασκευαστεί πιλοτικές μονάδες για την ανάπτυξη και βελτίωση των διαφόρων τεχνικών σχεδιασμού ΧΥΤΑ, με σκοπό τον έλεγχο των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων είναι η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, η προσθήκη θρεπτικών και υγρασίας, η εισαγωγή/άντληση αέρα ή συνδυασμός των παραπάνω. Επίσης, τεχνικές όπως ο έλεγχος της θερμοκρασίας και της περιεχόμενης υγρασίας έχουν αποδειχτεί κατάλληλες για την επιτάχυνση της βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων.

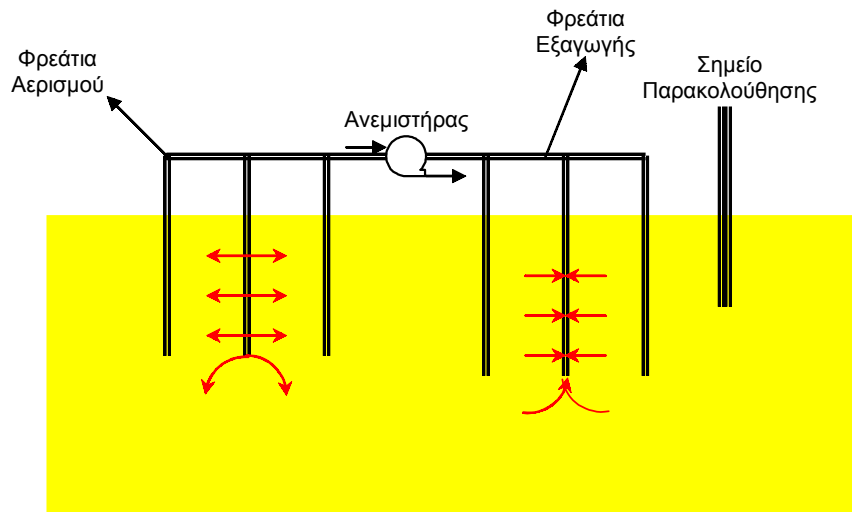
Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων είναι μια θεμελιώδης διαδικασία σε έναν βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων για την βιολογική επεξεργασία των απορριμμάτων. Στις Η.Π.Α. έχουν καταγραφεί περισσότεροι από 200 χώροι διάθεσης, στους οποίους η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων χρησιμοποιείται σαν μια μέθοδος διαχείρισής τους. Τα στραγγίσματα παράγονται σε ένα χώρο διάθεσης από την εισροή νερού στο σώμα των απορριμμάτων και την κίνησή του μέσα σε αυτόν και ενδέχεται να περιέχουν διαλυμένα ή αιωρούμενα υλικά που σχετίζονται με τα απορρίμματα, τοξικά και επιβλαβή συστατικά που περιέχονται στο σώμα των απορριμμάτων, καθώς επίσης και παραπροϊόντα των βιολογικών και χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα. Με την ανακυκλοφορία μειώνεται η ισχύς του φορτίου των στραγγισμάτων, μειώνοντας έτσι το κόστος επεξεργασίας και την πιθανότητα ρύπανσης του εδάφους και των υπόγειων υδάτων. Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων στο παρελθόν είχε περιορισμένη αποδοχή, λόγω της υπερβολικής φόρτισης του καλύμματος του πυθμένα, παρεμπόδισης του συστήματος διοχέτευσης και πιθανότητας διαρροής στο υπέδαφος και το υπόγειο νερό. Σήμερα, η μέθοδος αυτή έχει βελτιωθεί και συνδυάζεται με την εισαγωγή και άντληση αέρα, με σκοπό την ενίσχυση και επιτάχυνση της αερόβιας αποικοδόμησης των απορριμμάτων (Kelly, 2002).

Τα αέρια των χώρων διάθεσης παράγονται λόγω της βιολογικής αποσύνθεσης των απορριμμάτων και αποτελούνται κατά 50% από μεθάνιο. Τα προβλήματα με τα αέρια αυτά σχετίζονται με τον κίνδυνο έκρηξης, την παραγωγή οσμών και τοξινών όπως ο υδράργυρος και την μείωση του στρώματος του όζοντος από το μεθάνιο, που αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου (Kelly, 2002). Καθώς το μεθάνιο αποτελεί μια πολύτιμη πηγή ενέργειας, οι βιοαντιδραστήρες στερεών αποβλήτων έχουν τη δυνατότητα να παράγουν μεγάλες ποσότητες σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Δεδομένου ότι περίπου το 50%-70% των αστικών απορριμμάτων είναι βιοδιασπώμενο και μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αερίων, οι συνδυαστικές μέθοδοι αερόβιας βιοεξυγίανσης που παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρόν κεφάλαιο μπορούν να οδηγήσουν στην επιτάχυνση των βιολογικών διεργασιών στο σώμα των απορριμμάτων και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής μεθανίου. Οι μέθοδοι, οι οποίες αναλύονται παρακάτω είναι οι: (α) Αερόβια βιοεξυγίανση σε συνδυασμό με εξαγωγή ατμών, (β) σνακυκλοφορία στραγγισμάτων με εισαγωγή/άντληση αέρα, (γ) η μέθοδος Biopuster και (δ) η εισαγωγή ατμού.

## 4.2. Αερόβια βιοεξυγίανση σε συνδυασμό με εξαγωγή ατμών

Η εισαγωγή αέρα με τη μέθοδο Bioventing είναι η πλέον κατάλληλη μέθοδος βιοεξυγίανσης, ωστόσο η εξαγωγή αέρα ενδέχεται να είναι αναγκαία σε περιπτώσεις, όπου η κίνηση των ατμών και των αερίων είναι δύσκολο να ελεγχθεί. Το βασικό μειονέκτημα της εξαγωγής αέρα είναι ο περιορισμός της βιοαποικοδόμησης, καθώς ο ατμός δεν κινείται ανοδικά και έχει ως αποτέλεσμα να γίνεται λιγότερη βιοαποικοδόμηση και περισσότερη εξάτμιση. Γενικά, η αύξηση του ρυθμού εξαγωγής αυξάνει τους ρυθμούς εξάτμισης και βιοαποικοδόμησης μέχρι το σημείο πλήρους αερισμού του χώρου διάθεσης, πάνω από το οποίο ο ρυθμός βιοαποικοδόμησης δεν αυξάνεται άλλο. Ο βέλτιστος ρυθμός εισαγωγής και εξαγωγής αέρα είναι ο ελάχιστος που απαιτείται για την ικανοποίηση των αναγκών σε οξυγόνο. Βασική προϋπόθεση για την επιτυχία της μεθόδου αυτής είναι η κατασκευή ενός συστήματος για αερισμό του χώρου διάθεσης με μερική εξάτμιση. Η μέθοδος Soil Vapor Extraction (SVE) αποτελεί μια τέτοια τεχνολογία, κατά την οποία τα αέρια αντλούνται, με σκοπό την απομάκρυνση των ρυπαντών μέσω εξάτμισης. Αντιθέτως, η μέθοδος Bioventing έχει σκοπό την ελαχιστοποίηση της εξάτμισης και τη μεγιστοποίηση της βιοαποικοδόμησης (US EPA, 1995a).

Η μέθοδος Bioventing χρησιμοποιεί αυτόχθονες μικροοργανισμούς για την βιοαποικοδόμηση του οργανικού κλάσματος. Στη μέθοδο αυτή, η δράση των μικροοργανισμών ενισχύεται από την εισαγωγή αέρα ή οξυγόνου (με τη χρήση φρεατίων αερισμού) και αν κρίνεται απαραίτητο και θρεπτικών. Ωστόσο, ενώ στη μέθοδο SVE τα συστατικά απομακρύνονται κυρίως μέσω εξάτμισης, η μέθοδος Bioventing προωθεί την βιοαποικοδόμηση των συστατικών και ελαχιστοποιεί την εξάτμιση (χρησιμοποιώντας μικρότερους ρυθμούς ροής από την SVE). Στην πράξη, ο συνδυασμός των δύο μεθόδων παρέχει τον κατάλληλο βαθμό βιοαποικοδόμησης και εξάτμισης (US EPA, 2004a). Με σωστό σχεδιασμό μπορεί να συνδυαστεί η δημιουργία πεδίου φρεατίων τόσο για την εισαγωγή όσο και την εξαγωγή αέρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



**Σχήμα 1.** Συνδυασμός μεθόδων Bioventing και SVE (ανασχεδιασμένο από US EPA, 1995b)

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των δύο μεθόδων, της μεθόδου Bioventing και της μεθόδου SVE. Αν και οι δυο μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την βιοεξυγίανση ρυπασμένων εδαφών, στην περίπτωση των χώρων διάθεσης απορριμμάτων ισχύουν οι ίδιες αρχές.

#### 4.2.1. Περιγραφή της μεθόδου Bioventing

Το έδαφος περιέχει ένα πλήθος μικροοργανισμών. Σε καλά αεριζόμενα εδάφη, τα οποία είναι και τα πλέον κατάλληλα για την εφαρμογή της μεθόδου Bioventing, οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι κυρίως αερόβιοι, ενώ τα βακτήρια είναι εκείνα που υπερέχουν σε αριθμό και βιοχημική ενεργότητα, ιδιαίτερα σε χαμηλά επίπεδα οξυγόνου. Τα βακτήρια χρειάζονται μια πηγή άνθρακα για τη μικροβιακή ανάπτυξη και μια πηγή ενέργειας για τη λειτουργία του μεταβολισμού, που είναι απαραίτητη για την ανάπτυξή τους. Για τη μικροβιακή ανάπτυξη απαιτούνται επίσης θρεπτικά, κυρίως άζωτο και φώσφορος. Τα βακτήρια που αποικοδομούν υδρογονάνθρακες χρησιμοποιούν το οξυγόνο για να μεταβολίσουν το οργανικό κλάσμα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, μια διαδικασία που είναι γνωστή ως αερόβια αναπνοή. Για την αποικοδόμηση μεγάλων ποσοτήτων υδρογονανθράκων απαιτείται σημαντική ποσότητα βακτηρίων, τα οποία με τη σειρά τους απαιτούν οξυγόνο τόσο για τη διαδικασία του μεταβολισμού όσο και για την ανάπτυξη της μικροβιακού πληθυσμού. Οι σημαντικότεροι παράγοντες, που επηρεάζουν την απόδοση της μεθόδου Bioventing είναι:

- Η διαπερατότητα του εδάφους. Ο παράγοντας αυτός θα καθορίσει το ρυθμό παροχής οξυγόνου στους μικροοργανισμούς που αποικοδομούν τους υδρογονάνθρακες. Γενικά, η διαπερατότητα καθορίζεται από το είδος του εδάφους. Ψιλόκοκκα εδάφη, όπως τα αργιλοπηλώδη, έχουν μικρότερη διαπερατότητα από χονδρόκοκκα, όπως τα αμμώδη εδάφη και τα χαλίκια.
- Η ικανότητα βιοαποικοδόμησης των ρυπαντών. Ο παράγοντας αυτός θα καθορίσει τόσο το ρυθμό αποικοδόμησης όσο και το βαθμό, στον οποίο οι μικροοργανισμοί θα αποικοδομήσουν τους ρυπαντές. Η ικανότητα βιοαποικοδόμησης των ρυπαντών

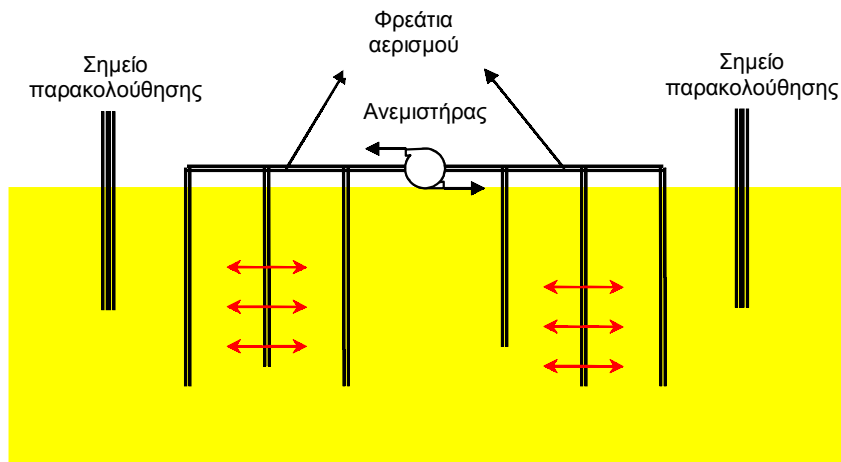
αποτελεί μέτρο της ικανότητάς τους να μεταβληστούν από τα βακτήρια που χρησιμοποιούν υδρογονάνθρακες και παράγουν διοξείδιο του άνθρακα και νερό ως παραπροϊόντα της μικροβιακής αναπνοής (US EPA, 2004a).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ικανότητα του εδάφους να διοχετεύει τον αέρα, που αποτελεί παράγοντα πρωταρχικής σημασίας στη μέθοδο Bioventing, μειώνεται από το περιεχόμενο στο έδαφος νερό, καθώς εμποδίζει τους εδαφικούς πόρους και μειώνει τη ροή αέρα.

#### 4.2.2. Σχεδιασμός του συστήματος Bioventing

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η διάταξη ενός τυπικού συστήματος Bioventing. Τα βασικά βήματα για το σχεδιασμό ενός συστήματος Bioventing είναι τα ακόλουθα:

- Καθορισμός του συστήματος ροής αέρα.
- Καθορισμός του ρυθμού ροής αέρα.
- Καθορισμός της ακτίνας επιρροής.
- Καθορισμός της απόστασης μεταξύ των φρεατίων.
- Λεπτομερής σχεδιασμός του ανεμιστήρα, των φρεατίων αερισμού και των σωληνώσεων.
- Καθορισμός των απαιτήσεων των φρεατίων αερισμού.
- Καθορισμός των απαιτήσεων στα σημεία παρακολούθησης (US EPA, 1995b)



Σχήμα 2. Το σύστημα Bioventing (ανασχεδιασμένο από US EPA, 2004a).

Πριν την εφαρμογή μεθόδων εξυγίανσης που βασίζονται σε βιολογικές διεργασίες, πρέπει να πραγματοποιηθούν πιλοτικοί έλεγχοι στο πεδίο για την επαλήθευση και την ποσοτικοποίηση της απόδοσης της μεθόδου και την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών για το σχεδιασμό του συστήματος. Ο σχεδιασμός της ακτίνας επιρροής αποτελεί μια εκτίμηση της μέγιστης απόστασης από ένα φρεάτιο εισαγωγής, στην οποία επαρκής ροή αέρα μπορεί να διατηρήσει τον επιθυμητό βαθμό αποικοδόμησης. Η ακτίνα επιρροής πρέπει να καθορίζεται από πιλοτικές μελέτες στο πεδίο, αλλά μπορεί επίσης να εκτιμηθεί από μοντέλα ροής αέρα ή άλλες εμπειρικές μεθόδους. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τη διαπερατότητα του εδάφους, τη χημική του σύσταση, την περιεχόμενη υγρασία και τον επιθυμητό χρόνο εξυγίανσης. Ο σχεδιασμός της ακτίνας επιρροής είναι σημαντικός για τον καθορισμό του πλήθους και της απόστασης μεταξύ των φρεατίων εισαγωγής. Σε εδάφη με έντονη ανομοιογένεια πρέπει να τοποθετηθούν φρεάτια παρακολούθησης σε αρκετά μεγάλο βάθος, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί σωστή εξυγίανση. Σε εδάφη με μεγάλη στρωμάτωση τα

φρεάτια παρακολούθησης πρέπει να τοποθετηθούν σε βάθος, το οποίο αντιστοιχεί σε ζώνες με μικρή διαπερατότητα, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ροή του αέρα στις περιοχές αυτές (NFESC, 1996).

Τα βακτήρια απαιτούν κατάλληλες συνθήκες υγρασίας εδάφους για την ανάπτυξή τους. Υπερβολική υγρασία εδάφους, ωστόσο, μειώνει την διαθεσιμότητα του οξυγόνου, καθώς περιορίζει τη ροή του αέρα μέσα από τους εδαφικούς πόρους. Η ιδανική υγρασία εδάφους είναι μεταξύ 40% και 85% της ικανότητας συγκράτησης νερού από το έδαφος. Γενικότερα, τα εδάφη που είναι κορεσμένα σε νερό εμποδίζουν τον αέρα να ρέει και το οξυγόνο να φτάσει στα βακτήρια, ενώ τα ξηρά εδάφη δεν διαθέτουν την απαραίτητη υγρασία για τη βακτηριδιακή ανάπτυξη. Η μέθοδος Bioventing ενισχύει την αφυδάτωση υγρών εδαφών μέσω της αυξημένης ροής αέρα, αλλά η υπερβολική αφυδάτωση εμποδίζει την απόδοση της μεθόδου και παρατείνει τον απαιτούμενο χρόνο εφαρμογής της. Η βέλτιστη τιμή του pH για τη βακτηριδιακή ανάπτυξη είναι περίπου 7, ενώ η αποδεκτή τιμή του pH του εδάφους για την εφαρμογή της μεθόδου Bioventing είναι μεταξύ 6 και 8. Σε εδάφη με διαφορετικές τιμές απαιτείται ρύθμιση του pH πριν και κατά την διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου. Τα βακτήρια απαιτούν ανόργανα θρεπτικά, όπως αμμώνιο και φώσφορο, για την ανάπτυξή τους και τις διαδικασίες βιοαποικοδόμησης. Τα θρεπτικά αυτά συνήθως βρίσκονται σε επάρκεια στο έδαφος, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις πρέπει να προστεθούν για να διατηρηθεί η βακτηριδιακή δράση (US EPA, 2004a).

#### 4.2.3. Περιγραφή της μεθόδου SVE

Η μέθοδος SVE αποτελεί μια *in situ* τεχνολογία εξυγίανσης για τη μείωση της συγκέντρωσης των πτητικών συστατικών. Στη μέθοδο αυτή εφαρμόζεται κενό μέσω φρεατίων, το οποίο προκαλεί ελεγχόμενη ροή αέρα για την απομάκρυνση των πτητικών και ορισμένων ημι-πτητικών συστατικών. Τα συστατικά αυτά εξατμίζονται και ο ατμός αντλείται από τα φρεάτια εξαγωγής. Ο εξαγόμενος ατμός επεξεργάζεται, συνήθως με προσρόφιση σε φίλτρα ενεργού άνθρακα, και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Τα φρεάτια μπορεί να είναι είτε κάθετα είτε οριζόντια. Στη μέθοδο SVE εφαρμόζεται κενό στο υπέδαφος μέσω των φρεατίων άντλησης, το οποίο δημιουργεί αρνητική πίεση και προκαλεί την κίνηση των ατμών προς τα φρεάτια. Τα πτητικά συστατικά που βρίσκονται στη φάση ατμού απομακρύνονται άμεσα μέσω των φρεατίων εξαγωγής. Ο εξαγόμενος ατμός επεξεργάζεται και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα ή επανεισέρχεται στο υπέδαφος. Μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της μεθόδου SVE είναι οι ακόλουθοι:

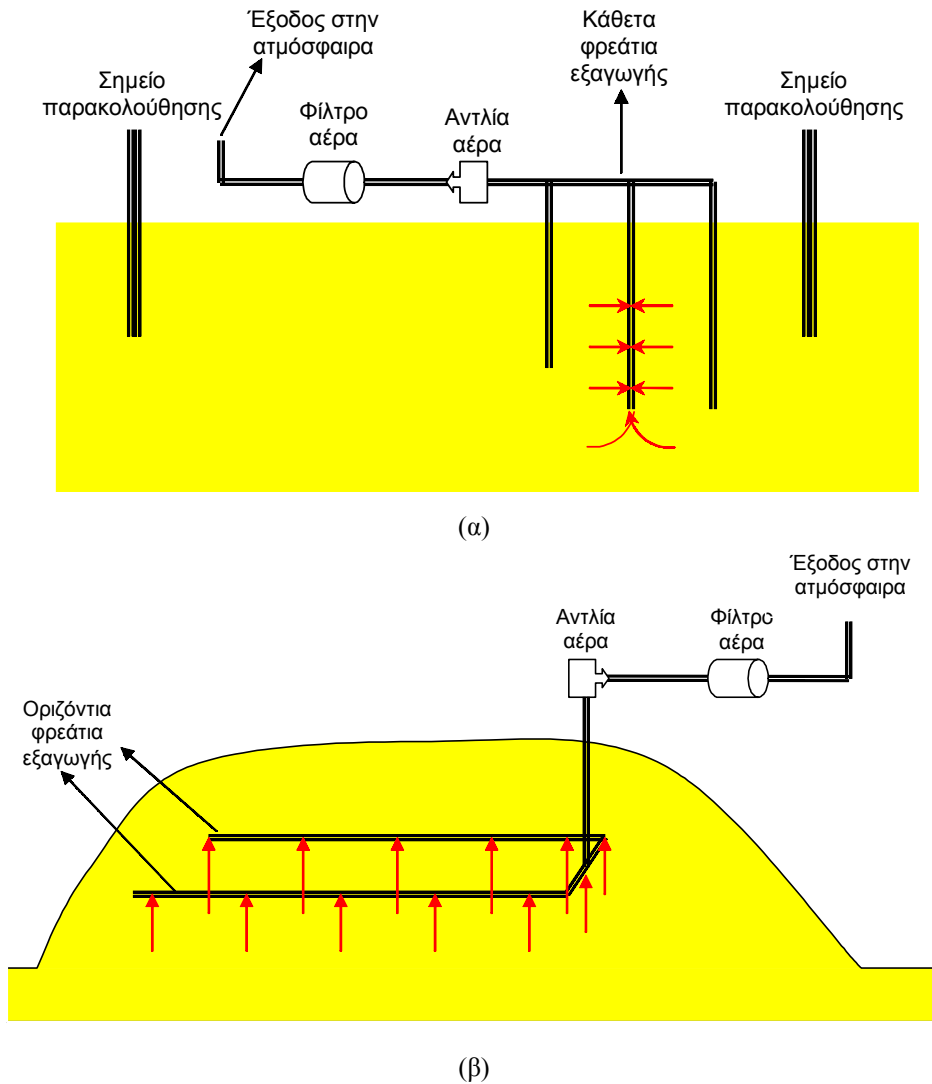
- Διαπερατότητα του εδάφους. Η διαπερατότητα του εδάφους επηρεάζει το ρυθμό μετακίνησης του αέρα και των ατμών. Μεγάλη διαπερατότητα συνεπάγεται ταχύτερη μετακίνηση αέρα και μεγαλύτερη ποσότητα εξαγόμενου ατμού.
- Δομή και στρωμάτωση του εδάφους. Η δομή και στρωμάτωση του εδάφους αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, καθώς επηρεάζουν τον τρόπο ροής και την κατεύθυνση ροής των ατμών μέσα στο έδαφος.
- Υγρασία εδάφους. Μεγάλη περιεκτικότητα εδαφών σε υγρασία μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διαπερατότητα του εδάφους και κατά συνέπεια την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, περιορίζοντας τη ροή του αέρα στους εδαφικούς πόρους (US EPA, 2004b).

#### 4.2.4. Σχεδιασμός του συστήματος SVE

Ο σχεδιασμός της ακτίνας επιρροής είναι ο πλέον σημαντικός παράγοντας στο σχεδιασμό ενός συστήματος SVE. Η ακτίνα επιρροής ορίζεται ως η μέγιστη δυνατή απόσταση από ένα φρεάτιο εξαγωγής, στο οποίο δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες κενού και ροής ατμού για επαρκή εξάτμιση και εξαγωγή των ρυπαντών από το έδαφος. Τα φρεάτια εξαγωγής πρέπει να τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε η αλληλοκάλυψη της ακτίνας επιρροής τους να καλύπτει πλήρως την περιοχή της ρύπανσης. Σε ένα σύστημα SVE ενδέχεται να χρειάζεται επιφανειακό κάλυμμα, ώστε να αποφευχθεί η διήθηση επιφανειακών υδάτων που μειώνουν το ρυθμό ροής του αέρα, να μειωθεί η διαφυγή ατμών ή να αποφευχθεί η οριζόντια ανακυκλοφορία του αέρα. Τα αποτελέσματα αυτά επιτυγχάνονται επειδή τα επιφανειακά καλύμματα αναγκάζουν φρέσκο αέρα να εξαχθεί από μεγαλύτερη απόσταση από το φρεάτιο εξαγωγής. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται επιφανειακό κάλυμμα, η μικρότερη κλίση της πίεσης προκαλεί μείωση της ταχύτητας ροής, με αποτέλεσμα να απαιτείται η εφαρμογή μεγαλύτερου κενού στο φρεάτιο εξαγωγής.

Για την άντληση των ατμών χρησιμοποιούνται συνήθως κάθετα φρεάτια (Σχήμα 3α) με βάθος 1,5 μέτρο ή και μεγαλύτερο (έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς και σε βάθη 90 μέτρων). Εκτός από τα κάθετα φρεάτια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οριζόντια (Σχήμα 3β) εγκατεστημένα σε τάφρους ή σε οριζόντια ορύγματα, αν το επιβάλουν οι συνθήκες της περιοχής. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν καταθλιπτικές αντλίες υπογείου νερού, για την αποφυγή ή την ελάττωση της ανόδου του υπογείου νερού που προκαλείται λόγω υποπίεσης. Η τεχνολογία της εξαγωγής ατμών είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη και συνεχώς βελτιώνεται. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η τάση ατμών των ρύπων είναι πολύ χαμηλή, είναι δυνατόν να αυξηθεί με τη θέρμανση του εδάφους είτε με την εισαγωγή ζεστού αέρα – ατμού είτε με την τοποθέτηση ηλεκτροδίων στο έδαφος.

Οι πιλοτικές μελέτες είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη φάση σχεδιασμού ενός συστήματος SVE, καθώς παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη συγκέντρωση των πτητικών ενώσεων που πρόκειται να απομακρυνθούν από το σύστημα και πληροφορίες σχετικά με τις σχεδιαστικές παραμέτρους και την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Οι πιλοτικές αυτές μελέτες βασίζονται στη λειτουργία ενός φρεατίου εξαγωγής για μικρό χρονικό διάστημα (1-30 ημέρες), στο οποίο εφαρμόζονται κενά και διάφοροι ρυθμοί εξαγωγής, με σκοπό να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Η συγκέντρωση των εξαγόμενων ατμών ελέγχεται δύο ή τρεις φορές, με σκοπό να εκτιμηθούν οι αρχικές συγκεντρώσεις των ατμών σε πλήρη κλίμακα. Η συγκέντρωση των ατμών, ο ρυθμός εξαγωγής τους και οι πληροφορίες σχετικά με το κενό που εφαρμόζεται χρησιμοποιούνται και για την επιλογή του εξοπλισμού για την εξαγωγή και την επεξεργασία του εξαγόμενου ατμού (US EPA, 2004b).



**Σχήμα3.** Διάταξη SVE (α) με κάθετο σύστημα φρεατίων και (β) με οριζόντιο σύστημα φρεατίων (ανασχεδιασμένο από US EPA, 2004b).

### 4.3. Ανακυκλοφορία στραγγισμάτων με εισαγωγή/ άντληση αέρα

Αν και σε περιορισμένο βαθμό, η ελεγχόμενη ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων χρησιμοποιείται από το 1980 σε ΧΥΤΑ στις Η.Π.Α. ως ένα εργαλείο διαχείρισης των στραγγισμάτων. Με την τεχνική της ανακυκλοφορίας μειώνεται τόσο η ποσότητα των στραγγισμάτων λόγω εξάτμισης όσο και το ρυπαντικό φορτίο λόγω βιολογικής (κυρίως αναερόβιας) και φυσικοχημικής δράσης μέσα στη μάζα των απορριμμάτων.

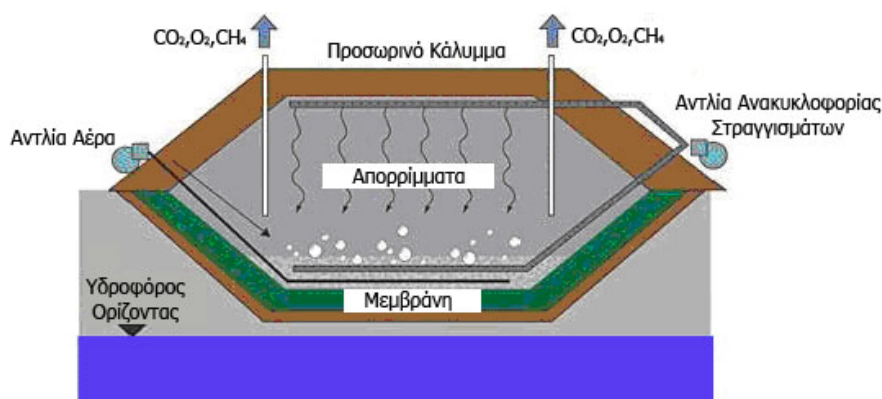
Παρόλα αυτά, μόλις τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, λόγω της δυνατότητας που παρέχει για καλύτερη και οικονομικότερη διαχείριση των θεμάτων που σχετίζονται με τους ΧΥΤΑ. Σε μερικές περιπτώσεις, η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων δεν έχει αυξήσει μόνο τους ρυθμούς

βιοδιάσπασης των απορριμμάτων, αλλά και την παραγωγή του μεθανίου για ανάκτηση ενέργειας. Επιπλέον, έχει μειώσει τα επίπεδα ορισμένων τοξικών ουσιών στα παραγόμενα στραγγίσματα. Σήμερα, η εφαρμογή της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων διαφέρει από ΧΥΤΑ σε ΧΥΤΑ. Σε ορισμένους εφαρμόζεται πιλοτικά με την ελπίδα να αυξηθεί η σταθεροποίηση των απορριμμάτων, να μειωθεί η ποσότητα των στραγγισμάτων που θα επεξεργαστούν και να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή μεθανίου. Σε άλλες εφαρμογές της ανακυκλοφορίας, που εκτελούνται κάτω από αερόβιες συνθήκες, χρησιμοποιείται οξυγόνο για την αύξηση του ρυθμού βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων και την ταχύτερη καθίζηση του χώρου (σε σύγκριση με την απλή ανακυκλοφορία στραγγισμάτων).

Σε πολλούς ΧΥΤΑ που εφαρμόζεται η ανακυκλοφορία, τα στραγγίσματα που συλλέγονται από το υπάρχον σύστημα συλλογής του ΧΥΤΑ, εκχύνονται ή τροφοδοτούνται με τη δύναμη της βαρύτητας από σωληνώσεις και τάφρους στη μάζα των απορριμμάτων (κάτω από αερόβιες συνθήκες, το οξυγόνο ή ο αέρας επίσης εκχύνονται στη μάζα των απορριμμάτων). Μετά την εισαγωγή τους, οι αυτόχθονες μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν την υγρασία και τα θρεπτικά που παρέχονται στα στραγγίσματα για το μεταβολισμό του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων με μεγαλύτερο ρυθμό. Μολονότι η ανακυκλοφορία βασίζεται σε πολύπλοκους βιολογικούς μηχανισμούς, η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια σε καινούριους και υπάρχοντες ΧΥΤΑ με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση της στη λειτουργία του χώρου και να μην παραβιάζονται οι κανονισμοί που διέπουν τους ΧΥΤΑ.

Είτε μέσω αερόβιων, είτε μέσω αναερόβιων διεργασιών, η US EPA (Υπηρεσία Περιβάλλοντος και Ρύπανσης των Η.Π.Α.) αναγνωρίζει πως η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων στους ΧΥΤΑ μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερη αποσύνθεση των απορριμμάτων, σε ταχύτερη σταθεροποίηση και καθίζηση, σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος όπως και σε χαμηλότερο κόστος μετά το κλείσιμο των χώρων, καθώς και σε επιμήκυνση της περιόδου λειτουργίας τους. Βλέποντας το θέμα από την άποψη του κύκλου ζωής, ένας ΧΥΤΑ μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά τη σταθεροποίηση του για εμπορικές δραστηριότητες ή, εάν εξορυχτεί, να ξαναχρησιμοποιηθεί ως ένας νέος ΧΥΤΑ (Read *et al.*, 2001).

Η διαδικασία της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων σε ένα κελί του χώρου διάθεσης προσομοιάζεται με τη λειτουργία ενός κλειστού βιοαντιδραστήρα. Η ανακυκλοφορία επιταχύνει το ρυθμό αποικοδόμησης των απορριμμάτων, μεταφέροντας τη διαδικασία της αποικοδόμησης βαθύτερα στον χώρο διάθεσης. Υπάρχουν δύο είδη βιοαντιδραστήρων απορριμμάτων: οι αερόβιοι και οι αναερόβιοι. Στους αερόβιους βιοαντιδραστήρες απορριμμάτων λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα ανακυκλοφορία στραγγισμάτων και εισαγωγή αέρα (Σχήμα 4), σε αντίθεση με τους αναερόβιους, που πραγματοποιείται μόνο ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων. Η αερόβια αποικοδόμηση πραγματοποιείται ταχύτερα, λόγω αύξησης του ρυθμού χώνευσης και οδηγεί σε ταχύτερη σταθεροποίηση των απορριμμάτων (Washington County Resource Recovery Project, 2004).



**Σχήμα 4.** ΧΥΤΑ που λειτουργεί ως αερόβιος βιοαντιδραστήρας (Washington County Resource Recovery Project, 2004).

#### 4.3.1. Αερόβια διαδικασία

Η αερόβια διαδικασία έχει σαν στόχο την επιτάχυνση της αποικοδόμησης των απορριμμάτων μέσω της βελτιστοποίησης των συνθηκών περιεχόμενης υγρασίας και οξυγόνου για τους αερόβιους μικροοργανισμούς. Οι αερόβιοι μικροοργανισμοί απαιτούν επαρκή ποσότητα νερού και οξυγόνο για την κυτταρική αναπνοή, κατά την οποία η ενέργεια παράγεται από τα οργανικά μόρια μέσω μιας διαδικασίας, όπου καταναλώνεται οξυγόνο και παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και μικρές ποσότητες αμμωνίας. Οι αερόβιοι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται ταχύτερα από τους αναερόβιους, καθώς η αερόβια αναπνοή είναι αποτελεσματικότερη στην παραγωγή ενέργειας από την αναερόβια, με συνέπεια η αερόβια αποικοδόμηση να λαμβάνει χώρα ταχύτερα. Μια επιπλέον συνέπεια είναι ότι η αερόβια αναπνοή παράγει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας μεταβολισμού, η οποία απαιτεί σημαντικές ποσότητες νερού.

Στους χώρους διάθεσης απορριμμάτων η αερόβια διαδικασία πραγματοποιείται με την εγκατάσταση ενός πλέγματος φρεατίων εισαγωγής αέρα και εισαγωγής νερού ή υγρασίας σε όλη την έκταση του ΧΥΤΑ. Συνήθως δημιουργείται υποπίεση στο σώμα των απορριμμάτων, με άντληση του αέρα μέσω ενός διαπερατού καλύμματος. Η πηγή της υγρασίας είναι τα στραγγίσματα που συλλέγονται από το σύστημα συλλογής στραγγισμάτων στον πυθμένα του χώρου διάθεσης και οδηγούνται σε μια δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης μέσω μιας γραμμής παροχής. Οι συσκευές ελέγχου, όπως οι ηλεκτρικές σωληνοειδείς βαλβίδες, μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτή τη γραμμή, έτσι ώστε να γεμίζει αυτόματα η δεξαμενή όποτε χρειάζεται. Ακόμα και η δεξαμενή όμως μπορεί να έχει αισθητήρες κατώτερου και/ή ανώτερου επιπέδου στάθμης, έτσι ώστε να ξεκινά και να σταματά αυτόματα το γέμισμα της. Στη δεξαμενή εγκαθίσταται και μια γραμμή προσθήκης, με σκοπό να προστίθενται στο σύστημα και άλλα υγρά όπως θρεπτικές ουσίες σε υγρή μορφή, διαμέσου της δεξαμενής προσωρινής αποθήκευσης. Επιπλέον, στο σύστημα μπορεί να συνδεθεί εναλλακτική παροχή νερού, στην περίπτωση που το σύστημα συλλογής των στραγγισμάτων δεν παρέχει αρκετή ποσότητα στραγγισμάτων για τη διατήρηση της υγρασίας στα επιθυμητά επίπεδα. Το ποσοστό υγρασίας στα απορρίμματα παρακολουθείται και διατηρείται σε ποσοστό από 40% έως 70%, προσθέτοντας επιπλέον νερό στη μάζα τους. Είναι προτιμότερο η εναλλακτική παροχή νερού να περιλαμβάνει έναν ταμιευτήρα ή μια λίμνη ειδικά για αυτό τον σκοπό. Η προσθήκη του νερού στη δεξαμενή ελέγχεται επίσης ηλεκτρονικά μέσω σωληνοειδών

βαλβίδων και αντλιών. Τα συστήματα ανακυκλοφορίας κατανέμουν τα στραγγίσματα ομοιόμορφα στο σώμα των απορριμμάτων, επιτρέπουν τη ρύθμιση και διατήρηση των επιπέδων υγρασίας καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας αποικοδόμησης και γι' αυτό αποτελούν το βασικότερο τμήμα της αερόβιας διαδικασίας (Fellin *et al.*, 1999).

Το ποσοστό του οξυγόνου στη μάζα των απορριμμάτων παρακολουθείται επίσης και εισάγεται οξυγόνο για να προωθήσει και να διατηρήσει κυρίως την αερόβια αποικοδόμηση. Το οξυγόνο εισάγεται στη μάζα των απορριμμάτων συνήθως υπό τη μορφή συμπιεσμένου αέρα, μέσω ειδικών φρεατίων εισαγωγής, έτσι ώστε το ποσοστό του οξυγόνου να διατηρείται πάνω από 0%. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η επαρκής παροχή οξυγόνου για τη διατήρηση της αερόβιας αποικοδόμησης.

Η ποσότητα του νερού και του οξυγόνου (σε μορφή συμπιεσμένου αέρα) που εισάγονται στη μάζα των απορριμμάτων ελέγχεται από ένα εξελιγμένο αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου, το οποίο δίνει εντολές με βάση τις τιμές θερμοκρασίας, του ποσοστού οξυγόνου και του ποσοστού υγρασίας που λαμβάνει από το σύστημα παρακολούθησης. Το σύστημα παρακολούθησης μπορεί εκτός των άλλων να παρακολουθεί τη δημιουργία ή την παραγωγή αερίων μέσα στο σώμα του ΧΥΤΑ, ως μια ένδειξη του τύπου της αποικοδόμησης που πραγματοποιείται. Για παράδειγμα, η παρουσία σε υψηλές συγκεντρώσεις μεθανίου στη μάζα των απορριμμάτων είναι μια ισχυρή ένδειξη του τύπου της μικροβιακής δραστηριότητας (Read *et al.*, 2001).

#### **4.3.2. Συστήματα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων**

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων σε ένα χώρο διάθεσης απορριμμάτων. Τα συστήματα ανακυκλοφορίας διακρίνονται σε κάθετα, οριζόντια, συστήματα ψεκασμού ή συνδυασμός των παραπάνω.

Τα κάθετα συστήματα αποτελούνται συνήθως από μεγάλης διαμέτρου φρεάτια, που εκτείνονται μέσα στο σώμα των απορριμμάτων. Τα στραγγίσματα εγγέονται μέσα στα φρεάτια και διηθούνται στα απορρίμματα. Τα κάθετα συστήματα ανακυκλοφορίας χρησιμοποιούνται ευρέως σε ερευνητικές μελέτες και συνήθως απέχουν 30-60 m το ένα φρεάτιο από το άλλο. Τα συστήματα αυτά εγκαθίστανται εύκολα είτε κατά τη λειτουργία του χώρου διάθεσης ή κατά τη μετασκευή του και έχουν σχετικά χαμηλό κόστος. Τα προβλήματα οσμών μπορούν να ελεγχθούν με κατάλληλη λειτουργία και οι ρυθμοί εισροής είναι υψηλοί εάν τα συστήματα αυτά δεν βρίσκονται κοντά σε πλευρικά τοιχώματα. Βασικό πλεονέκτημα των κάθετων συστημάτων αποτελεί το γεγονός, ότι η ποσότητα των στραγγισμάτων που μπορεί να ανακυκλοφορήσει είναι αρκετά μεγάλη. Μελέτες έχουν δείξει ωστόσο, ότι τα απορρίμματα που βρίσκονται κοντά στα κάθετα φρεάτια ανακυκλοφορίας τείνουν να φτάσουν σε σημείο υπερ-κορεσμού, εμποδίζοντας έτσι την ομοιόμορφη κατανομή των στραγγισμάτων, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ξηρές ζώνες σε περιοχές μικρότερου βάθους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα κάθετα συστήματα ανακυκλοφορίας να έχουν μικρή διάρκεια ζωής, περιορισμένη ακτίνα επίδρασης και περιορισμένη ικανότητα κατανομής των στραγγισμάτων πλευρικά.

Τα οριζόντια συστήματα ανακυκλοφορίας αποτελούνται από οριζόντιους σωλήνες τοποθετημένους σε τάφρους με προκαθορισμένο βάθος μέσα στα απορρίμματα, τα οποία είναι αποτελεσματικότερα στην κατανομή των στραγγισμάτων κατά τη λειτουργία του χώρου διάθεσης. Οι τάφροι είναι συνήθως επενδεδυμένοι με πορώδη υλικά, όπως χαλίκια, ρινίσματα γυαλιού ή τεμαχισμένα ελαστικά και κατασκευάζονται κατά την τοποθέτηση των απορριμμάτων. Η εμπειρία έχει δείξει, ότι τεμάχια ελαστικών συγκεκριμένων διαστάσεων συμπιέζονται κάτω από την επίδραση της κατακόρυφης πίεσης που δέχονται από χοντρά στρώματα απορριμμάτων (μεγαλύτερα από 15 m), με αποτέλεσμα τη μείωση της

διαπερατότητάς τους. Τα στραγγίσματα είτε αντλούνται μηχανικά στις τάφρους από μια δεξαμενή, είτε οι τάφροι τροφοδοτούνται μέσω βαρύτητας, είτε η εισαγωγή των στραγγισμάτων στο σώμα των απορριμμάτων γίνεται υπό υψηλή πίεση.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των οριζόντιων συστημάτων ανακυκλοφορίας είναι: (α) η μεγιστοποίηση της ομοιόμορφης κατανομής των στραγγισμάτων σε όλο το σώμα των απορριμμάτων, (β) οι αυξημένοι ρυθμοί εισόδου και (γ) η ελαχιστοποίηση των προβλημάτων λειτουργίας, καθώς τα σημεία εισόδου βρίσκονται εκτός των βασικών πεδίων λειτουργίας. Οι τάφροι απέχουν συνήθως 30-60 m οριζοντίως και 12 m καθέτως. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εγκατάσταση ενός οριζόντιου συστήματος ανακυκλοφορίας αποτελεί τη βέλτιστη λύση για ένα υψηλής ποιότητας βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων. Συχνά χρησιμοποιούνται τάφροι διπλής λειτουργίας για την εισαγωγή στραγγισμάτων και την παράλληλη εξαγωγή αέρα. Στην περίπτωση αυτή και όταν οι τάφροι τοποθετούνται στην κορυφή του χώρου διάθεσης, η οριζόντια μεταξύ τους απόσταση μειώνεται, με σκοπό την αύξηση της απόδοσης στην εξαγωγή αέρα και στη μείωση των οσμών. Τα οριζόντια συστήματα ανακυκλοφορίας δεν παρουσιάζουν τάσεις κορεσμού, όπως τα κάθετα, έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αλλά εμφανίζουν ευαισθησία κατά την κατασκευή και εγκατάσταση. Επιπλέον, τα οριζόντια συστήματα απαιτούν αυστηρότερο έλεγχο και παρακολούθηση της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων, για την αποφυγή διαρροών και αστάθειας των πλευρικών τοιχωμάτων (Fellin *et al.*, 1999).

Η πλέον συνήθης μέθοδος είναι τα συστήματα ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων μέσω ψεκασμού. Στα συστήματα ανακυκλοφορίας μέσω ψεκασμού είναι απαραίτητη η χρήση βυτιοφόρων οχημάτων, για τη μεταφορά των στραγγισμάτων από το χώρο προσωρινής αποθήκευσης στο χώρο διάθεσης. Τα απορρίμματα ψεκάζονται με τα στραγγίσματα πριν και κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγάλη απόδοση στον κορεσμό των απορριμμάτων και στην ομοιόμορφη κατανομή των στραγγισμάτων σε όλο το σώμα τους. Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται επίσης η απλότητα και η άμεση πρόσβαση στο σώμα των απορριμμάτων. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός, ότι ο ψεκασμός γίνεται μια μόνο φορά, με αποτέλεσμα να πρέπει να συνοδεύεται από βοηθητικά συστήματα, έτσι ώστε τα ήδη τοποθετημένα απορρίμματα να μπορούν να τροφοδοτούνται με τα στραγγίσματα. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά ενδέχεται να προκαλέσουν πρόβλημα οσμών, ενώ η ανάγκη χρήσης βυτιοφόρων οχημάτων μπορεί να περιορίσει την ποσότητα των στραγγισμάτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Εντούτοις, σε ιδιαίτερα ξηρές περιοχές, που απαιτούνται σημαντικές ποσότητες νερού προκειμένου να αποκτήσουν τα απορρίμματα το κατάλληλο περιεχόμενο σε υγρασία, συστήματα ψεκασμού νερού σε συνδυασμό με οριζόντια ή κάθετα συστήματα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων, μπορούν να αποδειχτούν ιδιαίτερα αποτελεσματικά (Washington County Resource Recovery Project, 2004).

#### 4.3.3. Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Η διαδικασία της αερόβιας βιοαποικοδόμησης είναι γρήγορη και συνήθως απαιτείται λιγότερο από δύο χρόνια εφαρμογής για την πλήρη βιοαποικοδόμηση. Ένα επιπλέον όφελος της ανακυκλοφορίας είναι το γεγονός, ότι ελαττώνεται σημαντικά το κόστος επεξεργασίας ή διάθεσης των συλλεγόμενων στραγγισμάτων. Η ποιότητα των στραγγισμάτων βελτιώνεται θεαματικά και πιο γρήγορα σε σχέση με τις αναερόβιες συνθήκες προσφέροντας αξιοσημείωτα οικονομικά οφέλη, καθώς δεν απαιτείται δευτερεύουσα επεξεργασία. Για ΧΥΤΑ που δε διαθέτουν σύστημα συλλογής των στραγγισμάτων μπορούν να τοποθετηθούν οριζόντια ή κάθετα φρεάτια ανάκτησης στραγγισμάτων στα σημεία που αναμένεται η συσσώρευση τους.

Με τη μέθοδο ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων μειώνεται η παραγωγή μεθανίου, ενός βασικού αερίου που συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και επομένως περιορίζεται το φαινόμενο αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη. Επιπλέον, επιτυγχάνεται ταχύτερη σταθεροποίηση των απορριμμάτων, καθιστώντας δυνατή την επιστροφή τους σε ολοκληρωμένους χώρους διάθεσης για άλλες χρήσεις σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Τέλος, η τεχνολογία της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων είναι αποδοτική από άποψη κόστους, απλή στην κατασκευή και στη λειτουργία, επιτρέποντας μία πληθώρα επιλογών όσον αφορά στα υλικά των σωληνώσεων και των εξαρτημάτων.

Βασικό μειονέκτημα της αερόβιας διαδικασίας αποτελεί ο αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιάς στο χώρο διάθεσης. Ωστόσο, η παρακολούθηση και ο έλεγχος της θερμοκρασίας, του περιεχομένου σε υγρασία και των επιπέδων οξυγόνου στο χώρο διάθεσης μπορούν να αποτρέψουν μια τέτοια πιθανότητα (Waste Management Inc., Houston).

#### 4.4. Η μέθοδος biopuster

Για όλα σχεδόν τα οργανικά συστατικά, η φυσική αποσύνθεση απαιτεί οξυγόνο. Βασικό πρόβλημα αποτελεί η ρύθμιση της διαθεσιμότητας του οξυγόνου, όπου αυτό είναι απαραίτητο για αποσύνθεση ή αποικοδόμηση. Πολλοί μικροοργανισμοί εξειδικεύονται στην αποσύνθεση υλικών που βιοδιασπώνται. Για το λόγο αυτό, οι διαδικασίες αποσύνθεσης λαμβάνουν χώρα μόνο υπό αερόβιες συνθήκες. Όταν το οξυγόνο προστίθεται στο περιβάλλον, οι μικροοργανισμοί αυτοί μπορούν να διασπάσουν τα βιοδιασπώμενα υλικά στα φυσικά τους στοιχειώδη τμήματα, που είναι βασικά διοξείδιο του άνθρακα και νερό (Μουσιόπουλος, 2002).

Ακόμα και χρόνια έπειτα από το κλείσιμο τους, στους χώρους διάθεσης απορριμμάτων παράγονται δύσοσμα, μερικές φορές τοξικά και εκρηκτικά αέρια. Επιπλέον, παράγονται στραγγίσματα ρυπασμένα σε μεγάλο βαθμό με οργανικές μολυσματικές ουσίες, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τους υπόγειους υδροφορείς. Αυτό συμβαίνει επειδή τα οργανικά απορρίμματα αποικοδομούνται στο χώρο διάθεσης από αναερόβιους μικροοργανισμούς. Η διαδικασία πραγματοποιείται με αργούς ρυθμούς και απελευθερώνει τα ανεπιθύμητα συστατικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ένα από τα βασικά προϊόντα της αναερόβιας αποικοδόμησης είναι το μεθάνιο, αέριο ιδιαίτερα εκρηκτικό. Αντιθέτως, η αποσύνθεση από αερόβιους μικροοργανισμούς είναι ταχύτερη και λιγότερο επιβλαβής, καθώς έχει σαν μοναδικά προϊόντα διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Για τη δημιουργία αερόβιων συνθηκών στο σώμα του χώρου διάθεσης απαιτείται η τεχνητή εισαγωγή αέρα ή οξυγόνου ομοιόμορφα σε ολόκληρη την έκτασή του (PORR Umwelttechnik GmbH, 2005).

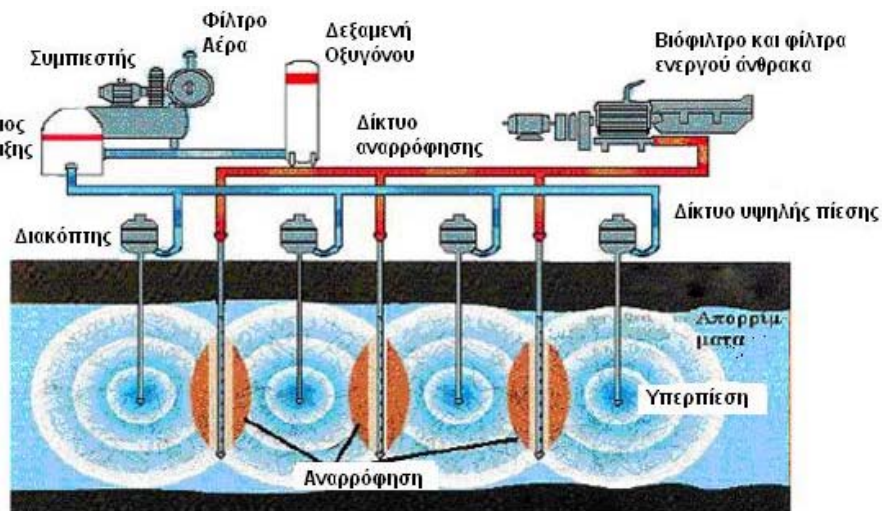
Στη μέθοδο Biopuster, αέρας ή οξυγόνο εισάγεται στο σώμα των απορριμμάτων και κατανέμεται ομοιόμορφα σε αυτό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία επαρκούς συγκέντρωσης οξυγόνου για τους αερόβιους μικροοργανισμούς. Σε αντίθεση με συστήματα, τα οποία διοχετεύουν συνεχώς αέρα στο σώμα των απορριμμάτων σε χαμηλή πίεση, με τη μέθοδο Biopuster ο αέρας εισάγεται σταδιακά μέσω σωληνώσεων σε πίεση μεταξύ 3-6 bar. Λόγω των συνθηκών ροής που δημιουργούνται με αυτό τον τρόπο, αέρας ή οξυγόνο διοχετεύεται ακόμα και στα πιο πυκνά γεμισμένα κελιά του χώρου διάθεσης, καθώς επίσης και στους πόρους των υλικών. Για την επιτάχυνση της αερόβιας αποικοδόμησης, στο ρεύμα συμπιεσμένου αέρα προστίθεται καθαρό οξυγόνο, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση οξυγόνου στο μίγμα αέρα-οξυγόνου να είναι περίπου 35%. Αυξάνοντας τη συγκέντρωση οξυγόνου στον συμπιεσμένο αέρα, το ποσό που εισάγεται στο χώρο διάθεσης μπορεί να διατηρηθεί σχετικά χαμηλό, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η ξήρανση και ψύξη των υλικών. Παράλληλα με τον αερισμό, αέρας εξάγεται από το χώρο διάθεσης μέσω αναρροφητικών σωλήνων και οδηγείται σε σύστημα φιλτραρίσματος. Δεδομένου ότι ο εξαγόμενος αέρας

είναι 30% μεγαλύτερος από τον εισαγόμενο, ο χώρος διάθεσης βρίσκεται μόνιμα υπό κενό, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται διαφυγή αερίων από την επιφάνειά του κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας (PORR Umwelttechnik GmbH, 2005).

Παρέχοντας στους μικροοργανισμούς που βρίσκονται οπουδήποτε στη φύση οξυγόνο, νερό και θρεπτικά μπορεί να υπάρξει εγγύηση για φυσική αποσύνθεση. Η μέθοδος Biopuster προκαλεί με εξαιρετική ταχύτητα τη φυσική αποσύνθεση του οργανικού κλάσματος, παρέχοντας την απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου (Μουσιόπουλος, 2002).

#### 4.4.1. Περιγραφή της μεθόδου

Το σύστημα Biopuster αποτελείται ουσιαστικά από δυο μονάδες σε παράλληλη λειτουργία. Η πρώτη μονάδα αποτελεί το σύστημα εισαγωγής συμπιεσμένου αέρα με διασυνδεδεμένο δίκτυο σωληνώσεων και αγωγών αερισμού, ενώ η δεύτερη μονάδα αποτελεί το δίκτυο σωληνώσεων και αγωγών αναρρόφησης. Ο συμπιεσμένος αέρας που παράγεται στο συμπιεστή εμπλουτίζεται με οξυγόνο στο θάλαμο ανάμειξης και φτάνει στους διάφορους προορισμούς μέσω δικτύου σωληνώσεων που λειτουργούν με αέρα. Το βασικότερο τμήμα της μεθόδου Biopuster είναι η βαλβίδα αερισμού ταχείας ενεργοποίησης, η οποία απελευθερώνει τον αέρα με έντονους ρυθμούς, εγχέοντάς τον στα απορρίμματα μέσω των οπών των αγωγών. Αν απαιτείται περαιτέρω υποστήριξη της αερόβιας διαδικασίας, στον συμπιεσμένο αέρα προστίθενται υγρασία και θρεπτικά. Ταυτόχρονα, ο αέρας εξάγεται από το σώμα των απορριμμάτων με τους αγωγούς αναρρόφησης και οδηγείται μέσω σωληνώσεων στο σύστημα φιλτραρίσματος, το οποίο αποτελείται από βιόφιλτρα που συνδέονται με φίλτρα ενεργού άνθρακα. Μια σχηματική απεικόνιση της παραπάνω διαδικασίας φαίνεται στο Σχήμα 5. Λόγω του κινδύνου έκρηξης των αερίων, το σύστημα αναρρόφησης και το δίκτυο των αντίστοιχων σωληνώσεων είναι κατασκευασμένα από υλικό ανθεκτικό σε εκρήξεις. Οι αγωγοί αερισμού και αναρρόφησης είναι τοποθετημένοι με τη μορφή πλέγματος. Τα κενά του πλέγματος, δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο αγωγών, εξαρτώνται από τη φύση και το βάθος του υπό επεξεργασία υλικού. Συνήθως, η απόσταση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 8-16 μέτρων. Οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι μέσα σε γεωτρήσεις. Στην περίπτωση που το βάθος του ΧΥΤΑ είναι μεγαλύτερο από 12 μέτρα, απαιτείται η τοποθέτηση σε σειρά διαφορετικών συστημάτων Biopuster διαφορετικού μήκους, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται επαρκής παροχή οξυγόνου σε όλο το βάθος (PORR Umwelttechnik GmbH, 2005).



**Σχήμα 5.** Το σύστημα Biopuster (MBU GmbH, 2002).**4.4.2. Πλεονεκτήματα της μεθόδου**

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου Biopuster είναι ποικίλα και αφορούν σε διάφορους τομείς. Στον οικονομικό τομέα, τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

- Σύντομος χρόνος επεξεργασίας, εξαιτίας της εισαγωγής οξυγόνου με τεχνητό τρόπο.
- Μείωση της μάζας των απορριμμάτων, καθώς μειώνεται η περιεχόμενη υγρασία.
- Ανάκτηση ανακυκλώσιμων υλικών με ταξινόμηση.
- Μείωση του χώρου διάθεσης.
- Επέκταση του χρόνου λειτουργίας του χώρου διάθεσης.
- Ελάχιστη απαίτηση σε μέτρα ασφαλείας.

Η μέθοδος αυτή της αερόβιας σταθεροποίησης εξασφαλίζει την πλήρη αδρανοποίηση των αποβλήτων με μικρή κατανάλωση ενέργειας. Η ανταλλαγή των αερίων εξασφαλίζεται μέσω φρεατίων αερισμού, τα οποία είναι εφοδιασμένα με αεραντλίες. Η επιπλέον ποσότητα αέρα διατρυπά και υγραίνει το χώρο. Τα εκπεμπόμενα αέρια συλλέγονται και επεξεργάζονται με σύστημα ελέγχου της αέριας ρύπανσης. Τα επιβλαβή αέρια απομακρύνονται με τη χρήση βιοφίλτρων, φίλτρων ενεργού άνθρακα ή καταλυτικές μεθόδους. Τα όρια των περιοχών που υφίστανται επεξεργασία και το υπέδαφος προστατεύονται από τις ανεξέλεγκτες εκπομπές βιοαερίου με οπές απορρόφησης. Οι οπές τοποθετούνται η μια δίπλα στην άλλη σε σημεία που αποτελούν φυσικά σύνορα μεταξύ του χώρου που υφίσταται επεξεργασία και του υπόλοιπου χώρου του ΧΥΤΑ. Ο αερισμός αυτής της ζώνης συμπεριφέρεται ως ένα φυσικό φίλτρο που προστατεύει τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα από το χώρο επεξεργασίας (Koelsch *et al.*, 1998).

Λόγω των διαφορών χαρακτηριστικών της, η μέθοδος Biopuster μπορεί να χρησιμοποιηθεί για *in situ* εξυγίανση με δύο τρόπους. Για τη σταθεροποίηση των οσμών, το σώμα των απορριμμάτων τίθεται προσωρινά σε σταθερή αερόβια κατάσταση για 4-6 εβδομάδες. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα στο χώρο διάθεσης να ανοιχτεί μετά το τέλος της επεξεργασίας χωρίς κίνδυνο για το προσωπικό, χωρίς πρόβλημα οσμών και κίνδυνο έκρηξης. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη, όταν για παράδειγμα τα απορρίμματα πρέπει να επανεγκατασταθούν ή στην περίπτωση που το σύστημα συλλογής των στραγγισμάτων και των αερίων πρέπει να τοποθετηθεί σταδιακά. Με τη μέθοδο Biopuster περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό τα πολυέξοδα μέτρα προστασίας για το προσωπικό και ταυτοχρόνως μειώνεται το κόστος μεταφοράς και επεξεργασίας, καθώς τα απορρίμματα ξηραίνονται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και μειώνεται το βάρος τους. Στην περίπτωση που η μέθοδος χρησιμοποιείται για παλιούς χώρους διάθεσης, απαιτούνται 6-12 εβδομάδες επεξεργασίας, προκειμένου να πραγματοποιηθεί επαρκής αερόβια αποσύνθεση του κλάσματος και να σταθεροποιηθεί το σώμα των απορριμμάτων. Μετά από την επεξεργασία παράγονται μικρές ποσότητες αερίου και τα στραγγίσματα μειώνονται σταδιακά (Μουσιόπουλος, 2002).

Μια επιπλέον ευρεία χρήση της μεθόδου Biopuster αφορά στην μηχανική-βιολογική επεξεργασία των απορριμμάτων. Προκειμένου να μειωθούν τόσο οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο χώρο διάθεσης όσο και το κόστος λειτουργίας του, τα απορρίμματα πρέπει να επεξεργαστούν πριν την απόθεσή τους. Η μηχανική-βιολογική μέθοδος αποτελεί μια αρκετά ανέξοδη μέθοδο επεξεργασίας. Η μέθοδος Biopuster μπορεί να χρησιμοποιηθεί *in situ* σαν την πλέον αποτελεσματική μέθοδο αερισμού στην αερόβια φάση της επεξεργασίας, καθώς καλύπτει μεγάλο εύρος απορριμμάτων που μπορούν να επεξεργαστούν (οικιακά απορρίμματα, βιομηχανικά απορρίμματα παρόμοιας σύστασης, ιλύς και στραγγίσματα) και, επιπλέον, η χρήση της επιτρέπει τη συσσώρευση των απορριμμάτων σε σωρούς με ύψος έως

και 8 μέτρα. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, στη μέθοδο Biopuster τα απορρίμματα δεν χρειάζεται να περιστρέφονται, που σημαίνει ότι δεν απαιτείται κονιορτοποίηση των απορριμμάτων πριν την επεξεργασία. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται μπορεί να φτάσει τους 80°C, δημιουργώντας κατάλληλες συνθήκες για τους μικροοργανισμούς να αποικοδομήσουν και τα πλέον ανθεκτικά οργανικά συστατικά. Στο τέλος μιας περιόδου αποσύνθεσης, η οποία διαρκεί 15-20 εβδομάδες, τα απορρίμματα είναι ξηρά και βιολογικά σταθερά και μπορούν να διαχωριστούν στο κλάσμα με υψηλή θερμιδική αξία, για θερμική εκμετάλλευση, και στο κλάσμα με χαμηλή θερμιδική αξία και μεγάλη περιεκτικότητα σε αδρανή υλικά και χούμο, για απευθείας απόθεση. Μετά την ολοκλήρωση της μεθόδου μπορούν επίσης να διαχωριστούν υλικά για ανακύκλωση (Μουσιόπουλος, 2002).

Η μέθοδος Biopuster έχει ήδη εφαρμοστεί σε διάφορες χώρες, όπως στον ΧΥΤΑ Stendal της Γερμανίας (Εικόνα 1). Μελέτες για την εφαρμογή της μεθόδου βρίσκονται υπό εξέλιξη σε διάφορες περιοχές της Βόρειας Αμερικής, όπως στον ΧΥΤΑ Anguilla στο St.Croix των Παρθένων Νήσων και σε δύο ακόμα στη Νέα Αγγλία (Koelsch *et al.*, 1998).



Εικόνα 1. Σύστημα Biopuster στο Stendal της Γερμανίας (Koelsch *et al.*, 1998).

#### 4.5. Εισαγωγή ατμού

Οι βιοαντιδραστήρες απορριμμάτων έχουν αυξηθεί σε αριθμό τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας της δυνατότητάς τους να μειώνουν το οργανικό περιεχόμενο των αστικών απορριμμάτων, αυξάνοντας το βαθμό καθίζησης και την παραγωγή του βιοαερίου. Επιπλέον, μειώνουν το χρόνο που ο ΧΥΤΑ μπορεί να αποτελεί κίνδυνο για το περιβάλλον και επιτρέπουν στην περιοχή να επαναχρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς. Ο χρόνος ζωής της κατώτερης μεμβράνης περιορισμού της ρύπανσης είναι περίπου 20 έτη, επομένως είναι σημαντικό το γεγονός ότι τα απορρίμματα σταθεροποιούνται σε μικρότερο χρονικό διάστημα από το χρόνο αστοχίας της γεωμεμβράνης. Οι περισσότεροι βιοαντιδραστήρες απορριμμάτων δημιουργούνται με εισαγωγή υγρασίας στα απορρίμματα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η βιοαποικοδόμηση και να παράγεται μεθάνιο. Ο κύριος σκοπός εισαγωγής υγρού στο χώρο

διάθεσης είναι η αύξηση της υγρασίας για την επιτάχυνση της βιοαποικοδόμησης, χωρίς να πραγματοποιηθεί κορεσμός των απορριμμάτων. Το υγρό εισάγεται με διάφορες μεθόδους διανομής, όπως πλημμύρα επιφάνειας, ψεκασμό, ή φρεάτια εγχύσεων. Εντούτοις, ένα βασικό πρόβλημα με τη χρησιμοποίηση υγρών για την αύξηση της υγρασίας είναι το κατά πόσον επιτυγχάνεται ομοιόμορφη διανομή, χωρίς κορεσμό των απορριμμάτων. Ο κορεσμός των απορριμμάτων μπορεί να οδηγήσει σε διάφορα προβλήματα, όπως:

- Αύξημένη παραγωγή στραγγισμάτων.
- Ανάγκη για πρόσθετη προστασία με μεμβράνες περιορισμού.
- Άνιση φόρτιση στα πρανή, που απαιτεί επιπλέον σχεδιασμό.
- Δυσκολίες στην εξαγωγή του αερίου, καθώς αυτό δεσμεύεται στο υγρό.
- Δυσκολία κίνησης στους κατώτερους αγωγούς από αιωρούμενα στερεά και ανθρακικό ασβέστιο, που φέρουν τα υγρά.
- Αύξηση της μάζας στον ΧΥΤΑ.

Ως σήμερα, η ποσότητα υγρού που εισάγεται σε έναν βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων βασίζεται στη χωρητικότητα των απορριμμάτων, δηλαδή στην περιεκτικότητα σε υγρασία πάνω από την οποία το υγρό θα αρχίσει να εκρέει λόγω των δυνάμεων βαρύτητας. Η χωρητικότητα αυτή μπορεί να είναι 40% κ.ο. και δεν είναι γνωστή ή εύκολα καθορισμένη για τα αστικά απορρίμματα. Δυστυχώς, καθώς το οργανικό υλικό βιοαποικοδομείται, η συνολική ικανότητα των απορριμμάτων να συγκρατούν υγρά μειώνεται, με αποτέλεσμα να απελευθερώνουν το υγρό και να του επιτρέπουν να μετακινηθεί (US EPA, 1998).

Μια μέθοδος, που θα βελτίωνε σημαντικά την κατανομή υγρασίας ελαχιστοποιώντας τα προβλήματα που απαριθμούνται παραπάνω, θα ήταν η μετατροπή του νερού σε ατμό πριν από την εισαγωγή του στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ. Αν και η πρώτη εντύπωση που σχηματίζεται για τον ατμό είναι ότι θα συμπυκνωθεί σε υγρό μόλις απομακρυνθεί από το φρεάτιο, οι νόμοι της φυσικής υπαγορεύουν άλλα. Ο ατμός μετατρέπεται σε υγρασία και έπειτα σε υγρό εάν η πτώση της θερμοκρασίας είναι κάτω από το σημείο δρόσου. Ο έλεγχος της παροχής των φρεατίων εισαγωγής, των συλλεκτών και της πίεσης του ατμού θα επεκτείνουν τη δράση του (STI Engineering Inc., 2000).

#### 4.5.1. Περιγραφή της μεθόδου

Η μέθοδος της εισαγωγής ατμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων για τη δημιουργία αερόβιων συνθηκών. Όταν εισέρχεται αέρας στο χώρο διάθεσης απομακρύνει την υγρασία που περιέχεται στο σώμα των απορριμμάτων. Αν αφαιρεθεί μεγάλη ποσότητα υγρασίας, τότε αυτόματα εκδηλώνεται καύση. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, εισάγεται συνήθως υγρό από την επιφάνεια στο σώμα των απορριμμάτων. Η ροή του υγρού ελέγχεται κυρίως από τη βαρύτητα και είναι αρχικά με κατεύθυνση προς τα κάτω και έπειτα πλευρικά υπό την πίεση του φορτίου. Το υγρό θα ακολουθήσει κατακόρυφη κατεύθυνση και θα κινηθεί σε στρώματα με μικρότερη αντίσταση, με αποτέλεσμα να μην παρέχει υγρασία σε ολόκληρο το σώμα των απορριμμάτων. Ο περιεχόμενος αέρας θα μεταφερθεί σε εκείνα τα σημεία των απορριμμάτων, που το υγρό δεν θα μπορεί να φτάσει. Αντιθέτως, αν εισαχθεί ατμός στο ρεύμα αέρα τότε η υγρασία θα διατηρηθεί στο σώμα των απορριμμάτων. Η ροή του ατμού ελέγχεται από την πίεση εκτόνωσης και τη διαφορά θερμοκρασίας, ενώ η κίνηση είναι προς όλες τις κατευθύνσεις. Επομένως, ο ατμός μπορεί να επεκταθεί σε πολύ μεγαλύτερη περιοχή μέσα στα απόβλητα και να αυξήσει την υγρασία τους (STI Engineering Inc., 2000).

Ο ατμός διογκώνεται κατά 1.600 έως 16.000 φορές από τον αρχικό του όγκο, ανάλογα με τη δυνατότητα διόγκωσής του, επομένως απαιτείται μόνο ένα μέρος του ύδατος για να επιτευχθεί η διανομή μέσα στα απόβλητα σε σύγκριση με την εφαρμογή ύδατος στην

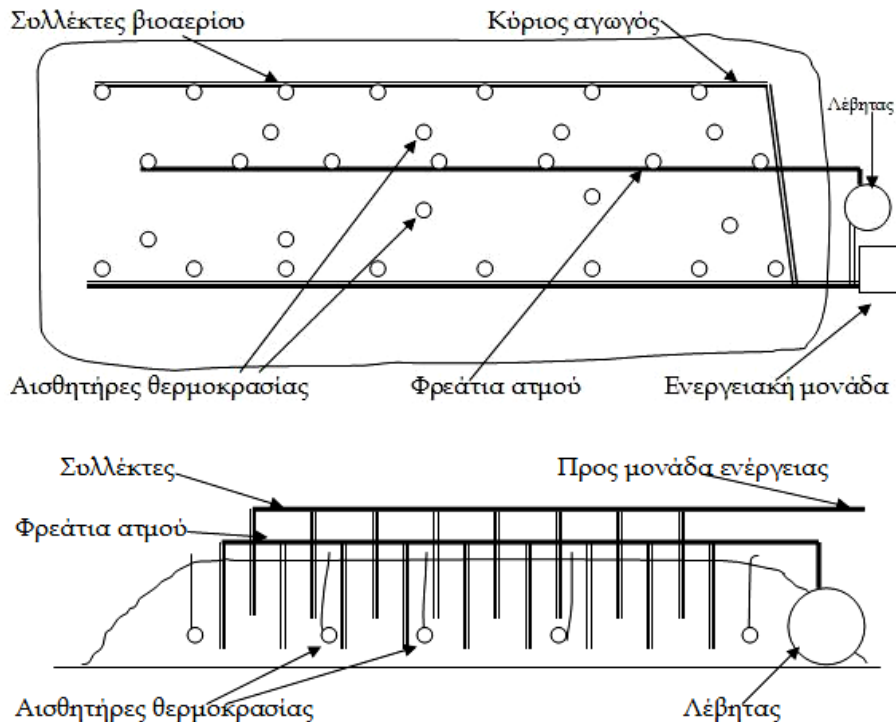
επιφάνεια. Χαρακτηριστικά αναφέρεται, ότι για κάθε 1.600 λίτρα ύδατος που χρησιμοποιούνται σε ένα συνηθισμένο βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί μόνο 1 λίτρο ύδατος μετατρεπόμενο σε ατμό και μάλιστα με καλύτερα αποτελέσματα κατανομής της υγρασίας. Η δυνατότητα διόγκωσης του ατμού ελέγχεται από το ρυθμό εισαγωγής προς το ρυθμό εφαρμογής του κενού από τους συλλέκτες βιοαερίου. Αυτό θα ελαχιστοποιήσει τη δυνατότητα των υγρών να μεταφέρονται στο κατώτατο σημείο των απορριμμάτων και στα υπόγεια νερά.

Η εξάτμιση και η υγρή έγχυση ψυχραίνουν τα απορρίμματα, επιβραδύνοντας τη διαδικασία της βιοαποικοδόμησης, έως ότου ανακτηθεί η θερμοκρασία. Κατά τους χειμερινούς μήνες, το υγρό που εισάγεται μπορεί να είναι πολύ κρύο και να ψύξει πραγματικά τα απορρίμματα. Αντιθέτως, ο ατμός προθεμαίνει τα απορρίμματα, διατηρεί τη θερμοκρασία των απορριμμάτων ακόμα και κατά τους χειμερινούς μήνες και ενισχύει τη βιοαποικοδόμηση. Η αποσύνθεση είναι πιο ενεργή όταν η θερμοκρασία διατηρείται γύρω στους 30°C. Τα απορρίμματα που βρίσκονται ελάχιστα μέτρα από το φρέατο θερμαίνονται περισσότερο από τη βέλτιστη θερμοκρασία, εμποδίζοντας τη βιοαποικοδόμηση, μόλις όμως μειωθεί ο ατμός και αυξηθεί η υγρασία στο επιθυμητό επίπεδο, η βιοαποικοδόμηση συνεχίζεται. Η διατήρηση μιας υψηλότερης εσωτερικής θερμοκρασίας στα απορρίμματα μετατρέπει επίσης και τα ελεύθερα υγρά σε ατμό και αυξημένη υγρασία. Η αύξηση του ρυθμού ροής στους κοντινούς συλλέκτες αερίου θα μπορούσε επίσης να βοηθήσει στον έλεγχο της θερμοκρασίας.

Όταν το οργανικό υλικό αποσυντίθεται δημιουργεί κενά στον όγκο των απορριμμάτων. Εάν το υγρό μεταφέρεται σε αυτά τα κενά ενδέχεται να εμποδίσει την καθίζηση των απορριμμάτων, καθώς το υγρό δεν είναι συμπιεστό. Ο ατμός κινείται εντός αυτών των κενών, αυξάνει το βαθμό βιοαποικοδόμησης/καθίζησης και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των διάκενων. Επιπλέον, ο ατμός δεν φέρει αιωρούμενα στερεά και ανθρακικό ασβέστιο, τα οποία μπορούν να αποφράζουν τους κατώτερους αγωγούς. Υπάρχει μικρότερη πιθανότητα για τα υγρά να υπερβούν τις μέγιστες επιτρεπόμενες πιέσεις της γεωσυνθετικής μεμβράνης, καθώς η εισαγωγή ατμού δεν δημιουργεί ανομοιόμορφη φόρτιση των μεμβρανών και, επομένως, όταν πραγματοποιείται η καθίζηση αναπτύσσεται μικρότερη πίεση στη μεμβράνη του πυθμένα και των πρανών (US EPA, 1998).

Ο ατμός μπορεί να παραχθεί σε ένα λέβητα που χρησιμοποιεί βιοαέριο σαν καύσιμο, σε έναν εναλλάκτη θερμότητας ή από τον ατμό που εκπέμπεται από μια εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας και να εισαχθεί στο σώμα των απορριμμάτων μέσω μιας σειράς κατάλληλα τοποθετημένων φρεατίων (Σχήμα 6). Οι συλλέκτες βιοαερίου (υπάρχοντες και προστιθέμενοι) εγκαθίστανται σύμφωνα με τα συμπεράσματα του πιεζο-πενετρομετρικού ελέγχου (Piezo-Penetrometer Test, PPT), όπως περιγράφεται παρακάτω. Ο ατμός χαμηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας (περίπου 115°C έως 120°C) εισάγεται κατά τη διάρκεια της φάσης της βιοαποικοδόμησης. Μετά από τη βιοαποικοδόμηση του οργανικού κλάσματος, εισάγεται ο ατμός υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας (περίπου 175°C έως 315°C) για να λειώσει ή να συρρικνώσει το πλαστικό που βρίσκεται στα απορρίμματα, κάτι που μπορεί να ανακτήσει τουλάχιστον 15%-20% περισσότερο διάκενο. Δεδομένου ότι ο ατμός λειώνει και συρρικνώνει το πλαστικό χωρίς να το καίει, δεν υπάρχει καμία τοξική εκπομπή αερίου. Συνίσταται αρχικά η εφαρμογή ατμού χαμηλής θερμοκρασίας στο βιοαποικοδομήσιμο οργανικό κλάσμα, στη συνέχεια η εφαρμογή ατμού υψηλής θερμοκρασίας για να συρρικνωθούν οι πλαστικές σακούλες σκουπιδιών και να επιτραπεί η εισαγωγή ατμού μέσα στα απορρίμματα και τελικά η εφαρμογή ατμού χαμηλής θερμοκρασίας για τη βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων που βρίσκονται μέσα στις σακούλες. Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να ανακτήσει μέχρι και το 50% των διάκενων, ανάλογα με το ποσοστό του πλαστικού στο σώμα των απορριμμάτων. Η εφαρμογή ατμού

υψηλής θερμοκρασίας μπορεί επίσης να γίνει στα απορρίμματα πριν την τοποθέτησή τους στο χώρο διάθεσης, μειώνοντας έτσι τον όγκο των απορριμμάτων και εξοικονομώντας περισσότερα διάκενα (STI Engineering Inc., 2000).



**Σχήμα 6.** Βιοαντιδραστήρας με εισαγωγή ατμού α) σε κάτοψη, β) σε τομή (STI Engineering Inc., 2000).

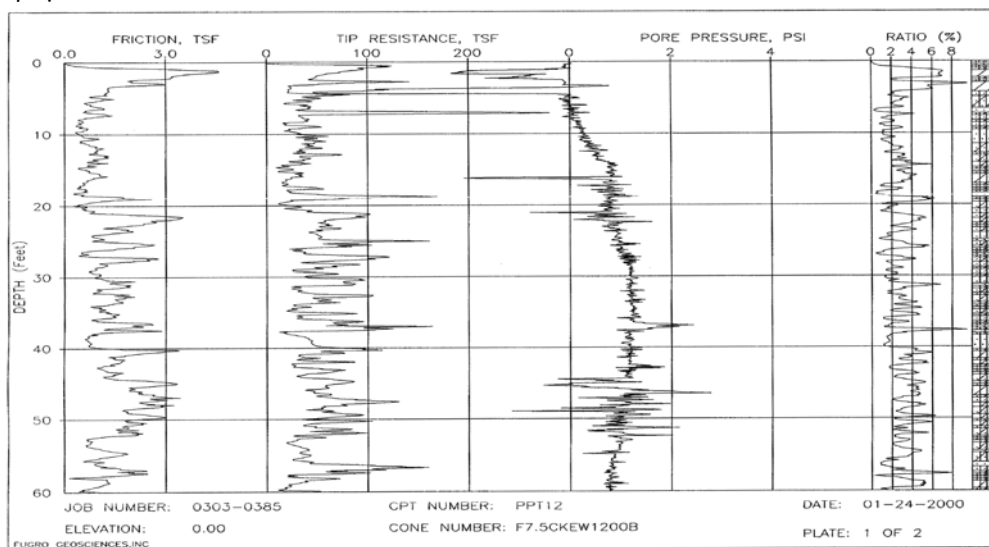
#### 4.5.2. Ο πιεζο-πενετρομετρικός έλεγχος (Piezo-Penetrometer Test, PPT)

Πριν από την εγκατάσταση του συστήματος εισαγωγής ατμού ή υγρού είναι σημαντικό να καθορίζονται τα σημεία τοποθέτησης των φρεατίων εισαγωγής και των συλλεκτών αερίου. Ο καλύτερος τρόπος για την απόκτηση των πληροφοριών αυτών είναι η υλοποίηση ενός πιεζο-πενετρομετρικού (PPT) ελέγχου στο χώρο διάθεσης των απορριμμάτων, με σκοπό την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου προφίλ του βιοαερίου. Ο έλεγχος αυτός θα καθορίσει την πίεση του αερίου, τα ανερχόμενα υγρά, τις ζώνες κενού, την ύπαρξη πυκνών στρωμάτων που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν σαν εμπόδια, καθώς επίσης και στρωμάτων χαμηλής πυκνότητας που θα μεταφέρουν τον ατμό σε ολόκληρο το σώμα των απορριμμάτων. Τα στοιχεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν για την τοποθέτηση και τον σχεδιασμό των συλλεκτών του αερίου και των φρεατίων εισαγωγής του ατμού. Με βάση τα δεδομένα αυτά, ο σχεδιασμός και η κατασκευή των συστημάτων συλλογής αερίου και εισαγωγής ατμού μπορεί να είναι σημαντικά πιο αποτελεσματικά και αποδοτικά.

Ο έλεγχος PPT αναπτύχθηκε προς το τέλος της δεκαετίας του '70 και αρχές της δεκαετίας του '80. Ο αρχικός σκοπός ήταν να μετρηθεί η πίεση των πόρων στο χώμα για να καθορισθεί το επίπεδο των υπόγειων υδάτων. Ο κώνος PPT ωθείται στο ΧΥΤΑ με υδραυλικούς μηχανισμούς τύπου εμβόλου, που τοποθετούνται σε ένα φορτηγό 20 τόνων. Ο κώνος προωθείται με προσθήκη μακρών ράβδων ώθησης 1 m, που έχουν περασμένο ένα καλώδιο,

συνδέοντας έτσι τον κώνο με έναν υπολογιστή, ο οποίος καταγράφει ψηφιακά και παρουσιάζει συνεχώς και σε πραγματικό χρόνο διάφορες παραμέτρους. Ο κώνος PPT μετρά την αντίσταση στο άκρο και την αντίσταση στην κυλινδρική επιφάνεια (μανίκια). Τα στοιχεία αυτά είναι χρήσιμα για τον καθορισμό του τύπου του εδάφους, τις δυνάμεις και το σχεδιασμό των σωρών. Το όργανο διαθέτει κλινόμετρο για να εξασφαλίζεται ότι ο κώνος παραμένει κάθετος κατά τη διάρκεια της προόδου του μέσα στην υπο-επιφάνεια του ΧΥΤΑ, το οποίο συμβάλλει στην ακρίβεια του ελέγχου του βάθους. Ο έλεγχος βάθους είναι ιδιαίτερα ακριβής και πραγματοποιείται μέσω μιας καλωδίωσης από έναν αποκωδικοποιητή, που συνδέεται με κάθε τμήμα των ράβδων ώθησης.

Το σχεδιάγραμμα PPT (Σχήμα 7) παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις ισχύουσες συνθήκες στον χώρο διάθεσης, πριν την εισαγωγή ατμού. Ο έλεγχος αυτός προσδιορίζει τα αποτελέσματα της εισαγωγής ατμού στο σώμα των απορριμμάτων και καθορίζεται αν χρειάζονται διορθώσεις και προσαρμογές στη διαδικασία. Επιπλέον, είναι δυνατόν να παρακολουθεί τη διαδικασία σταθεροποίησης, μετρώντας την απόσταση μεταξύ των πυκνών στρωμάτων.



Σχήμα 7. Παράδειγμα σχεδιαγράμματος PPT (STI Engineering Inc., 2000).

Το σχεδιάγραμμα PPT προσδιορίζει τις καλύτερες θέσεις για να τοποθετηθούν οι αισθητήρες θερμοκρασίας. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται για να ελέγξουν τη μεταφορά του ατμού μέσα στο σώμα των απορριμμάτων, ενώ είναι πιο αξιόπιστοι από τους αισθητήρες υγρασίας, οι οποίοι δεν λειτουργούν το ίδιο καλά στους ΧΥΤΑ. Μέσω της δημιουργίας μιας γεώτρησης PPT μπορούν να φτάσουν και να εγκατασταθούν οι συσκευές αυτές στα επιθυμητά βάθη. Τα σχεδιαγράμματα PPT που προκύπτουν, ελέγχουν την αποσύνθεση του οργανικού κλάσματος μέσω της σχέσης αντίστασης/πυκνότητας και της καθίζησης μεταξύ των πυκνών στρωμάτων. Καθώς ο όγκος των απορριμμάτων μεταξύ των πυκνών στρωμάτων μειώνεται, η ποσότητα του ατμού μειώνεται επίσης. Αυτό αποτρέπει οποιαδήποτε υγρή συσσώρευση στα πυκνά στρώματα. Η ανύψωση του επιπέδου του ΧΥΤΑ πρέπει να ερευνηθεί κατά τη διάρκεια της σκιαγράφησης PPT και μετά από την περίοδο εισαγωγής. Αυτά τα στοιχεία θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της καθίζησης των απορριμμάτων (STI Engineering Inc., 2000).

#### 4.6. Βιβλιογραφία

- Fellin K., Cuccinello M. and Cheadle B. (1999). *Leachate Recirculation*, Soil and Groundwater Pollution, Civil Engineering Dept. Virginia Tech.
- Kelly R.J. (2002). *Solid Waste Biodegradation Enhancements and the Evaluation of Analytical Methods Used to Predict Waste Stability*. Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfilment for the degree of Master of Science in Environmental Science and Engineering.
- Koelsch Florian, Richard T. Reynolds (1998). *Biological pretreatment of MSW as a measure to save landfill volume and deter birds*, Massachusetts Institute of Technology, CEE 1-176, USA.
- MBU Maschinenbau, Bau- und Umweltwesen Entwicklungs GmbH (2002), [www.mbu.at](http://www.mbu.at)
- NFESC (1996). *Technical Requirements to Consider when Preparing a Scope of Work for Full-Scale Implementation of Bioventing*, Naval Facilities Engineering Service Centre, Technical Memorandum (TM-2186-ENV), Port Hueneme, California 93043-4370.
- PORR Umwelttechnik GmbH (2005), [http://www.ptu.at/E1\\_144.html](http://www.ptu.at/E1_144.html)
- Read A. D., Hudgins M., Harper S., Phillips P., Morris J. (2001). The successful demonstration of aerobic landfilling: The potential for a more sustainable solid waste management approach? *Resources, Conservation and Recycling* **32**, 115–146.
- STI Engineering Inc (2000). *Steam Injection Landfill Bioreactors*, [www.landfillengineering.com](http://www.landfillengineering.com)
- US EPA (1995a). *Manual: Principles and Practices of Bioventing, Volume I: Bioventing Principles*. EPA/540/R-95/534a.
- US EPA (1995b). *Manual: Principles and Practices of Bioventing, Volume II: Bioventing Design*. EPA/540/R-95/534a.
- US EPA (1998). *Groundwater Issue: Steam injection for Soil and Aquifer Remediation*. EPA/540/S-97/505.
- US EPA (2004a). *How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter III: Bioventing*. EPA/510/R-04/002.
- US EPA (2004b). *How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. Chapter II: Soil Vapor Extraction*. EPA/510/R-04/002.
- Warith M. (2002). Bioreactor landfills: experimental and field results. *Waste Management* **22**, 7–17.
- Washington County Resource Recovery Project, *Updated Research Report on Bioreactor Landfills, Landfill Leachate Recirculation and Landfills with Methane Recovery*, Scope I.D.: 04R004, September 2004.
- Waste Management Inc., Houston, [www.wm.com](http://www.wm.com)
- Μουσιόπουλος, Ν. (2002). *Διαχείριση Απορριμμάτων*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής.

## 5. Παρακολούθηση της απόδοσης λειτουργίας συστημάτων βιοεξυγίανσης

**Διαλυνάς Εμμανουήλ**

Χημικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτορας Πολυτεχνείου Κρήτης

### 5.1. Εισαγωγή

Η παρακολούθηση της απόδοσης λειτουργίας συστημάτων βιοεξυγίανσης κρίνεται απαραίτητη σε κάθε εφαρμογή βιοεξυγίανσης και ειδικότερα στους ΧΥΤΑ βιοαντιδραστήρες. Το κόστος της παρακολούθησης είναι συνήθως υψηλό, σε σημείο που μπορεί μία εφαρμογή να θεωρείται μη βιώσιμη. Συνήθως ο αριθμός των φρεατίων παρακολούθησης ενός συστήματος, η συχνότητα παρακολούθησης, ο αριθμός και ο τύπος των χημικών παραμέτρων υπό παρακολούθηση είναι οι πιο σημαντικοί παράμετροι στην παρακολούθηση ενός συστήματος βιοεξυγίανσης. Επίσης, παρακολουθούνται οι καιρικές συνθήκες, η υγρασία, η θερμοκρασία, η ικανότητα καθίζησης του χώρου υπό βιοεξυγίανση, ενώ γίνεται δειγματοληψία στραγγισμάτων και αερίων. Η δειγματοληψία των υπογείων υδάτων κρίνεται απαραίτητη για την περίπτωση ανεπιθύμητων διαρροών από το σύστημα προς το περιβάλλον (Norris *et al.*, 1994). Η παρακολούθηση πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να παρέχει μία βάση αξιολόγησης. Επιπλέον, πρέπει να παρέχει δεδομένα που θα οδηγήσουν στην σταθεροποίηση ή αλλαγή του τρόπου λειτουργίας του συστήματος. Η παρακολούθηση παραμέτρων που δεν είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα παραπάνω είναι περιττή και πρέπει να αποφεύγεται. (Norris *et al.*, 1994).

### 5.2. Χημικοί παράμετροι και συχνότητα δειγματοληψίας

#### 5.2.1. Πλέγμα δειγματοληψίας

Είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί σχεδιαστικά ένα τρισδιάστατο πλέγμα στο χώρο του συστήματος βιοεξυγίανσης. Αυτό θα γίνει με το χωρισμό τμημάτων τόσο οριζοντίως όσο και καθέτως. Έτσι θα μπορεί να αποικονίζεται σχεδιαστικά το κάθε σημείο δειγματοληψίας στο χώρο καθώς και ο υπολογισμός αυτού. Ακόμη θα είναι δυνατό με την συγκέντρωση των αναλύσεων των παραπάνω παραμέτρων σε κάθε κόμβο του συστήματος να έχουμε εκτίμηση της διαστασιολόγησης και της ακριβής θέσης πολύ βεβαρημένων ρύπων και τυχών προβλήματα που μπορεί να δημιουργήσουν (Zhao *et al.*, 2003).

Τα κενά που θα χρειάζονται μεταξύ των γραμμών του πλέγματος πρέπει να είναι το 1/6 με 1/8 του βάθους του συστήματος. Για το μήκος και το πλάτος πρέπει να είναι το 1/5 με 1/6 αντίστοιχα (Zhao, 2003). Έτσι για ένα σύστημα βάθους 18 μέτρων και επιφάνειας 200x200 μέτρων το ελάχιστο κενό στο πλέγμα πρέπει να είναι 3 μέτρα κατά βάθος και 40 οριζοντίως και καθέτως.

#### 5.2.2. Συχνότητα και παράμετροι

Στα υγρά δείγματα του χώρου βιοεξυγίανσης (στραγγίσματα) πρέπει να μετρούνται είτε εργαστηριακά είτε στο πεδίο οι παράμετροι που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 (Vaidya,

2002). Στο υπό βιοεξυγίανση μέσο (έδαφος, απορρίμματα) οι παράμετροι είναι φυσικά διαφορετικοί. Οι δειγματοληψίες και μετρήσεις που πρέπει να γίνονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Στα παραγόμενα αέρια μετρούνται οι παράμετροι που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

**Πίνακας 1.** Συχνότητα δειγματοληψίας και παράμετροι υγρών δειγμάτων

Μηνιαία	Τριμηνιαία
COD	VOC
BOD	SVOC
pH	Συνολικό Kjeldahl Αζωτο (TKN)
Θερμοκρασία	Συνολικά διαλυμένα στερεά
Ολικά Πτητικά Στερεά (TVS)	Θειικά
Ολικός Φώσφορος (TP)	Χλωρικά
Αμμωνία	Κάλλιο
Νιτρώδη	Αγωγιμότητα
Νιτρικά	Βαρέα Μέταλλα

**Πίνακας 2.** Συχνότητα δειγματοληψίας και παράμετροι δειγμάτων εδάφους

Ετησίως
Οργανικά στερεά
Βιοχημική παραγωγή μεθανίου
Υγρασία
Λόγος κυτταρίνης/λιγνίτης
Πυκνότητα
Εμφάνιση γενικά

**Πίνακας 3.** Συχνότητα δειγματοληψίας και παράμετροι αερίων δειγμάτων

Εβδομαδιαία	Τριμηνιαία
Παραγωγή βιοαερίου	Μη μεθανικός οργανικός άνθρακας
Μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα στην περιοχή	Επικίνδυνες αέριες εκπομπές
Μεθάνιο στην περιοχή	Παρακολούθηση επιφανειακών εκπομπών
Οξυγόνο στην περιοχή	

Στην Εικόνα 1 φαίνεται ένας τυπικός μετρητής χειρός για CO, O<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub>. Λειτουργεί με NDIR απορρόφηση και είναι υψηλής ακρίβειας. Τέτοιες λύσεις είναι πολύ καλές για την επιτόπια μέτρηση αέριων εκπομπών. Η ανεξάρτηση από την διαδικασία της δειγματοληψίας και της εργαστηριακής ανάλυσης προσφέρει αμεσότητα και καλύτερο έλεγχο. Αντίστοιχες συσκευές είναι διαθέσιμες για την μέτρηση του μεθανίου (1).



**Εικόνα 1.** Αναλυτής χειρός μεθανίου. Παρόμοιοι αναλυτές είναι διαθέσιμοι για μετρήσεις CO, CO<sub>2</sub> και NOx (1).

### 5.2.3. Καιρικές συνθήκες

Στους χώρους βιοεξυγίανσης κατασκευάζονται συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής των καιρικών συνθηκών. Ο βασικός στόχος είναι να υπάρχουν ακριβή δεδομένα για τις βροχοπτώσεις και την υγρασία, έτσι ώστε να πετυχαίνετε ισοζύγιο νερού στο σύστημα. Ακόμη μετράται και καταγράφεται η θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους αλλά και η ισχύς της ακτινοβολίας του ήλιου (Zhao, 2003).

### 5.2.4. Διαλυμένο οξυγόνο

Το διαλυμένο οξυγόνο παρακολουθείται ως δείκτης αποικοδόμησης σε οργανικά. Ακόμη λειτουργεί ως δείκτης για τις περιοχές που έχουν μεγάλες ποσότητες βεβαρημένων αποβλήτων (Norris *et al.*, 1994). Γενικά το διαλυμένο οξυγόνο, αλλά και η συγκέντρωση των υδρογονανθράκων είναι πολύ χαμηλές σε τέτοιες περιοχές. Το διαλυμένο οξυγόνο μετράται με τη χρήση ηλεκτροδίων, αλλά και με μικρά κίτ που μεταφέρονται εύκολα. Η συλλογή δεδομένων για το διαλυμένο οξυγόνο στα υπόγεια νερά των περιοχών υπό βιοεξυγίανση αποτελεί πολύ δύσκολη διαδικασία, καθώς τα δείγματα δεσμεύουν οξυγόνο κατά τη περισυλλογή. Οι τιμές του διαλυμένου οξυγόνου, συνεπώς, δεν είναι σωστές. Συνήθως 1-2 mg/L διαλυμένου οξυγόνου προστίθενται στο δείγμα κατά τη δειγματοληψία. Για την αποφυγή του παραπάνω φαινομένου, πρέπει να εφαρμοστούν μέτρα με υψηλό κόστος (Norris *et al.*, 1994), όπως η πλήρωση του εσωτερικού των φρεατίων δειγματοληψίας με αδρανές αέριο (συνήθως Αργό). Στην Εικόνα 2 φαίνεται ένας μετρητής χειρός διαλυμένου οξυγόνου (DO) σε στραγγίσματα. Λειτουργεί με αισθητήρα που έχει πλατίνα στην κάθοδο και άργυρο στην άνοδο. Το εύρος μετρήσεως που προσφέρει είναι 0.00 – 19.99% mg/L (2).



Εικόνα 2. Μετρητής χειρός διαλυμένου οξυγόνου (2).

### 5.2.5. Νιτρικά και σίδηρος

Τα νιτρικά και ο σίδηρος παρακολουθούνται, καθώς δείχνουν τις αναερόβιες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στους υδρογονάνθρακες. Τα νιτρικά μπορεί να καταγραφούν με την κλασική δειγματοληψία και μεταφορά των δειγμάτων στο εργαστήριο για ανάλυση (Norris *et al.*, 1994). Η δειγματοληψία για τον σίδηρο είναι πιο δύσκολη, λόγω της ποσότητας του σιδήρου που υπάρχει στα αιωρούμενα στερεά, η οποία καθιζάνει κατά τη μεταφορά. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι να γίνει φίλτρανση των δειγμάτων επιτόπου στο χώρο δειγματοληψίας, και, αφού προστεθεί ένα πολύ συμπυκνωμένο οξύ, να αναλυθεί εργαστηριακά για τον σίδηρο (Norris *et al.*, 1994).

### 5.2.6. Διοξείδιο του άνθρακα

Η παρακολούθηση του διοξειδίου του άνθρακα, όπως και του pH, έχει να κάνει με το βακτηριδιακό πληθυσμό. Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται από την αναπνοή των αερόβιων βακτηριδίων. Οι τιμές πρέπει να χρησιμοποιούνται ενδεικτικά, καθώς οι ποσότητες του παραγομένου διοξειδίου του άνθρακα από αποδόμηση ανόργανων συστατικών είναι μεγάλες και δύσκολα υπολογίσιμες (Norris *et al.*, 1994). Ουσιαστικά, πρέπει να υπολογιστεί ο ρυθμός της μετατροπής του οξυγόνου σε διοξείδιο του άνθρακα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μετατροπή είναι εντελώς γραμμική (US EPA, 1995). Σε κάποιες περιπτώσεις στην αρχή παρατηρείται ένας πολύ γρήγορος ρυθμός μεταβολής και όταν το οξυγόνο μειωθεί στο 5-10 % έχουμε σταθεροποίηση του ρυθμού μετατροπής (US EPA, 1995).

### 5.2.7. Δυναμικό οξειδοαναγωγής

Η μέτρηση του δυναμικού οξειδοαναγωγής είναι σχετικά απλή διαδικασία. Η διαδικασία γίνεται με ένα κλασικό πεχάμετρο και ένα ηλεκτρόδιο από πλατίνα (Norris *et al.*, 1994). Σε περιοχές όπου το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι αρνητικό, η ποσότητα του υπόγειου νερού μειώνεται, το οποίο σημαίνει ότι έχουμε υψηλή βακτηριακή βιοαποδομησιμότητα. Σε περιοχές όπου το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι θετικό έχουμε οξειδώσεις και, συνεπώς, η αποδόμηση δεν έχει ξεκινήσει ακόμη (Norris *et al.*, 1994). Αυτές οι τιμές δεν μπορούν να φανούν χρήσιμες σε υπολογισμούς, όμως λειτουργούν ως ποιοτικοί δείκτες της λειτουργίας του συστήματος.

### 5.2.8. Μικροβιολογικές παράμετροι

Ανάλογα με την διαθέσιμη πηγή άνθρακα ο πληθυσμός μικροβίων διπλασιάζεται κάθε 45 λεπτά. Τα συνήθη εδάφη περιέχουν 100 με 1000 αερόβια μικρόβια στο γραμμάριο. Μέσα σε μία εβδομάδα ο αριθμός αυτός γίνεται  $10^5$  εάν υπάρχει αρκετός άνθρακας. Η πιο σημαντική παράμετρος για την σωστή μέτρηση των χημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων είναι η σωστή δειγματοληψία. Η μεταφορά των δειγμάτων και η διατήρηση αυτών είναι πολύ σημαντική, ειδικότερα εάν πρόκειται για μικροβιολογικές παραμέτρους. Οι βασικότερες κατηγορίες μικροβιολογικών παραμέτρων με την αναλυτική μεθοδολογία τους παρουσιάζονται παρακάτω.

- Αερόβια: R2A στους 37°C για 5 μέρες.
- Αναερόβια (Difco) Agar στους 37°C για 14 μέρες
- Βακτήρια μείωσης θείου: MPN στους 35°C για 14 μέρες
- Απονιτροποιητικά βακτήρια: MPN στους 35°C για 14 για
- Μεθανογεννή βακτήρια: MPN στους 37°C για 60 μέρες.

### 5.2.9. Χαρακτηριστικά δειγμάτων

Σε αυτό το σημείο γίνεται παρουσίαση διαφόρων αποτελεσμάτων από αναλύσεις και αποδεκτά επίπεδα εκπομπών όπως βρέθηκαν βιβλιογραφικά σε χώρους βιοεξυγίανσης των Η.Π.Α. Στον Πίνακα 4 φαίνονται οι αποδεκτές συγκεντρώσεις διαφόρων παραμέτρων. Σε δειγματοληψίες που έγιναν ένα μέτρο μακριά από μολυσμένα υπό βιοεξυγίανση εδάφη βρέθηκαν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

**Πίνακας 4.** Ποιοτικά χαρακτηριστικά ατμοσφαιρικού αέρα. Αποδεκτά επίπεδα εκπομπών (3).

Παράμετρος	Αποδεκτά επίπεδα
SO <sub>2</sub>	120 µg/m <sup>3</sup>
Διασπαρμένα στερεά	500 µg/m <sup>3</sup>
Μεθάνιο	<25% του χαμηλότερου ορίου (650 mg/m <sup>3</sup> )
Αμμωνία	0.4 mg/m <sup>3</sup>
CO	2 mg/m <sup>3</sup>

**Πίνακας 5.** Τυπικά χαρακτηριστικά δείγματος εδάφους, 1 μέτρο από τη μολυσμένη περιοχή (3).

Παράμετρος (μονάδες)	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Οργανικός Άνθρακας (%)	2.48	Μαγνήσιο (mg/Kg)	470.3
pH	6.5	Νάτριο (mg/Kg)	55.1
Συνολικό CaO (%)	0.082	Αλκαλικότητα	6.8
Συνολικό N (%)	0.109	Ποσοστό υγρασίας (%)	61
Συνολικό P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.081	Χαλκός (mg/Kg)	20.9
Συνολικό K <sub>2</sub> O (%)	0.052	Μόλυβδος (mg/Kg)	23.1
Αγωγιμότητα (µS/cm)	149.4	Ψευδάργυρος (mg/Kg)	28.2
Ασβέστιο (mg/Kg)	119.7	Αρσενικό (mg/Kg)	1.9

### 5.3. Λειτουργία ΧΥΤΑ βιοαντιδραστήρα

#### 5.3.1. Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός ΧΥΤΑ βιοαντιδραστήρα χρειάζεται προσοχή στα θέματα που σχετίζονται με την απόδοση του συνολικού συστήματος. Η επιτυχής λειτουργία βασίζεται στην παρακολούθηση και στον έλεγχο όλων των βιολογικών, χημικών και υδρολογικών παραμέτρων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικού του συστήματος. Όταν η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι σωστή, η συντήρηση ελαχιστοποιείται.

Οι ΧΥΤΑ βιοαντιδραστήρες χρειάζονται περισσότερη παρακολούθηση στην λειτουργία τους λόγω των περίπλοκων μηχανικών συστημάτων τους (γραμμές διανομής υγρών, γραμμές περισυλλογής στραγγισμάτων, γραμμές περισυλλογής βιοαερίου) (Repa, 2003). Το μεγάλο πρόβλημα στην παρακολούθηση της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος βιοεξυγίανσης είναι ότι οι συντηρητές δεν έχουν την δυνατότητα της οπτικής επαφής με το χώρο της βιοεξυγίανσης.

Η βέλτιστη μέθοδος παρακολούθησης είναι η εγκατάσταση αυτοματοποιημένου συστήματος. Η επιλογή των αναλυτικών οργάνων πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να χρειάζονται την ελάχιστη δυνατή συντήρηση και προσοχή ενώ παράλληλα να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα με σταθερές και προβλέψιμες αποκλίσεις. Στον Πίνακα 6 φαίνονται τα βασικά μεγέθη υδραυλικού χαρακτήρα υπό παρακολούθηση, καθώς και οι θέσεις των οργάνων παρακολούθησης.

**Πίνακας 6.** Εξοπλισμός παρακολούθησης (Repa, 2003)

Μέγεθος	Θέση	Όργανο
Παροχή	Φρεάτια εισόδου	Venturi
	Φυσητήρες	Στομίου Φτερωτής
Πίεση/Κενό	Φρεάτια εισόδου	
	Πριν και μετά τα φίλτρα	Μανόμετρο
	Πριν και μετά την επεξεργασία των αερίων Κατανεμητές	Magnehelic gauge
Δειγματοληψία	Στην κορυφή στα φρεάτια εισόδου	Λαστιχένια έξοδος
	Έξοδος φυσητήρα Κατανεμητές	
Ροή	Στην κορυφή στα φρεάτια εισόδου	Βαλβίδα μπίλιας Βαλβίδα θύρας
	Φυσητήρες	
	Κατανεμητές	
Θερμοκρασία	Φυσητήρες	Θερμοζεύγη
	Κατανεμητές	
Δειγματοληψία αέρα	Στην κορυφή στα φρεάτια εισόδου	Παγίδες αερίων Απορροφητικές σωλήνες/υλικά Απευθείας δειγματοληψία από τη γραμμή
	Κατανεμητές	
	Έξοδος φυσητήρα	

### 5.3.2. Προεπεξεργασία

Η λειτουργία ενός ΧΥΤΑ βιαντιδραστήρα είναι περισσότερο αποτελεσματική στην περίπτωση που τα αστικά στερεά απόβλητα έχουν υψηλό οργανικό περιεχόμενο και μεγάλη εκτιθέμενη επιφάνεια (Zhao *et al.*, 2003). Για αυτό το λόγο, η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος πρέπει να υποστηρίζεται από την προεπεξεργασία των αποβλήτων, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η υψηλή οργανική περιεκτικότητα. Αυτό μπορεί να συμβεί με το διαχωρισμό ανόργανων υλικών (μπάζα, μεταλλικά αντικείμενα κ.λ.π.). Είναι ακόμα θεμιτό να χρησιμοποιούνται μηχανικές μέθοδοι τεμαχισμού αυτών έτσι ώστε να αυξάνεται η εκτιθέμενη επιφάνεια.

### 5.3.3. Λιμνάσματα στραγγισμάτων

Η αύξηση υγρών στο σύστημα σημαίνει παράλληλη αύξηση των στραγγισμάτων. Ανάλογα με το σύστημα συλλογής και τη διάταξη και δυναμικότητα του, υπάρχει η πιθανότητα δημιουργίας λιμνάσματος στραγγισμάτων (Zhao *et al.*, 2003). Το συγκεκριμένο φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει σπασίματα στη γεωμεμβράνη. Η λειτουργία του ΧΥΤΑ βιοαντιδραστήρα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην παρουσιάζεται αυτό το φαινόμενο. Η εποπτεία για την πιθανή δημιουργία τέτοιων φαινομένων κρίνεται απαραίτητη. Τα κενά στην επιφάνεια πρέπει να συμπληρώνονται ώστε να πετυχαίνετε η ελάχιστη υδροπερατότητα στην επιφάνεια του συστήματος (Zhao *et al.*, 2003). Η συνεχής παρακολούθηση του ρυθμού ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων βοηθάει στη δημιουργία της ομαλής ροής των στραγγισμάτων μέσα στο χώρο του συστήματος χωρίς να δημιουργούνται ανοίγματα, μέσα στα οποία μπορούν να ρευσουν τα στραγγίσματα (Warith, 2002).

### 5.3.4. Θρεπτικά

Τα θρεπτικά συστατικά βρίσκονται συνήθως μέσα στα απόβλητα. Πρόσφατες έρευνες απέδειξαν ότι τα θρεπτικά, καθώς και άλλα βιολογικά και χημικά συστατικά, μπορούν να εμπλουτίσουν σημαντικά τη βιοαποδόμηση (Zhao *et al.*, 2003). Η ιδανική αναλογία για άνθρακα, άζωτο και φόσφορο είναι C/N/P: 120/10/1. Η απόδοση στη λειτουργία αυξάνεται σημαντικά, με αντίστοιχη όμως αύξηση του κόστους λειτουργίας (US EPA, 1995).

### 5.3.5. Τιμές του pH

Το εύρος κίνησης των τιμών του pH είναι από 5.5 μέχρι 8.5. Το απόλυτο pH για τους μεθανογενείς οργανισμούς είναι μεταξύ 6.8 και 7.4. Εργαστηριακά έχει αποδειχτεί ότι η διατήρηση του pH σε αυτά τα επίπεδα μπορεί να μεγιστοποιήσει την παραγωγή του βιοαερίου. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων κατά την πρώτη περίοδο λειτουργίας του συστήματος μιας και το pH επηρεάζεται πολύ εύκολα (US EPA, 1995). Η πτώση του pH κάτω από 5 ή άνοδος του πάνω από 9 σημαίνει αναστολή της βακτηριδιακής δραστηριότητας (Norris *et al.*, 1994).

### 5.3.6. Πλάνο διαχείρισης ΧΥΤΑ βιοαντιδραστήρα

Είναι πολύ σημαντικό να αναπτυχθεί από τους χειριστές του συστήματος ένα αναλυτικό πλάνο λειτουργίας το οποίο θα περιλαμβάνει: τους στόχους του συστήματος, το σχεδιασμό, τη λειτουργία και συντήρηση, την παρακολούθηση λειτουργίας, και τα απρόοπτα που μπορούν να συμβούν (US EPA, 1995). Είναι απαραίτητη η καταγραφή οποιοδήποτε προβλήματος και της μεθοδολογίας αντιμετώπισης του έτσι ώστε να υπάρχει μία βάση

δεδομένων για το παρελθόν του συστήματος καθώς και την άμεση λύση σε περίπτωση επανάληψης του ίδιου προβλήματος (US EPA, 1995).

### 5.3.7. Ποιοτικά χαρακτηριστικά στραγγισμάτων

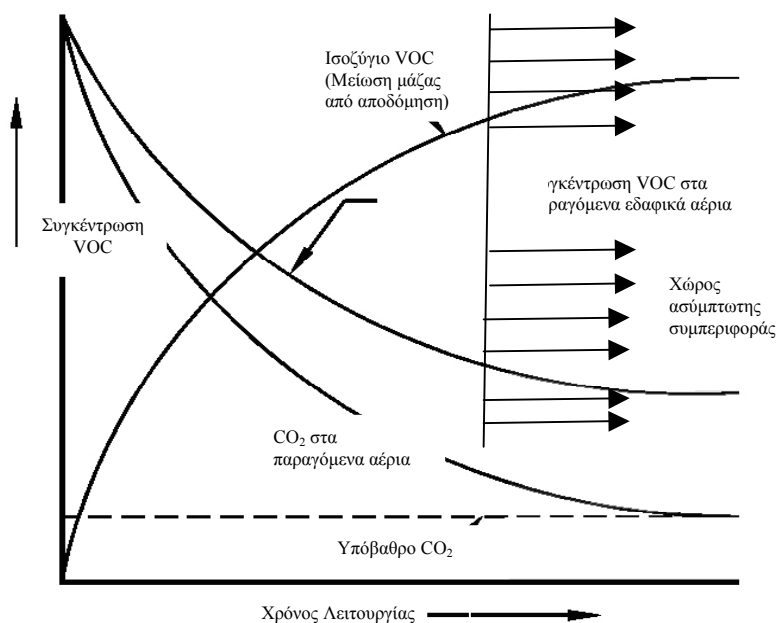
Τα στραγγίσματα των ΧΥΤΑ είναι από τα πλέον βεβαρημένα απόβλητα και για αυτό το λόγο υποβάλλονται σε επεξεργασία πολλών σταδίων πριν την διάθεση τους. Στον Πίνακα 7 δίδονται οι τυπικές συγκεντρώσεις επικύνδινων παραμέτρων ενός τυπικού στραγγίσματος αλλά και ενός πολύ βεβαρημένου.

**Πίνακας 7.** Χαρακτηριστικά στραγγισμάτων (4).

Παράμετρος (μονάδες)	Στράγγισμα ΧΥΤΑ	Επικίνδυνο στράγγισμα ΧΥΤΑ
Βενζόλιο (μg/L)	20	3110
Κάδμιο (mg/L)	0.05	
Χλωρικά (mg/L)	1,500-2,500	25,981
Μόλυβδος (mg/L)	0.6	321
1,4 Διχλωροβενζόλιο (μg/L)	10	5
Διχλωρομεθάνιο(μg/L)	3,300	2457
Τολουόλιο (μg/L)	1,000	3326
Βινυλοχλωρίδιο (μg/L)	55	316

### 5.4. Παρακολούθηση λειτουργίας

Η παρακολούθηση λειτουργίας ενός συστήματος βιοεξυγίανσης αποσκοπεί στο αν το σύστημα πετυχαίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Ο ρυθμός βιοεξυγίανσης παρουσιάζει ασύμπτωτη συμπεριφορά σε σχέση με το οξυγόνο, τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (στα επεξεργαζόμενα αέρια) και τα πτητικά οργανικά στερεά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 (US EPA, 1995).



Σχήμα 1. Σχέση ρυθμού βιοεξυγίανσης, οξυγόνου και πτητικών στερεών (US EPA, 1995).

#### 5.4.1. Εκκίνηση

Η διαδικασία εκκίνησης περιλαμβάνει αρχικά 7 με 10 ημέρες πειραματικής λειτουργίας στην οποία γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις σε βάνες, βαλβίδες και κατανεμητές (US EPA, 1995). Το σύνολο των ρυθμίσεων πρέπει να στοχεύει στην ελεγχόμενη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και κατανάλωση οξυγόνου από το σύστημα. Πρέπει επίσης να ελαχιστοποιείται η πτητικότητα των ουσιών από τα φρεάτια. Αυτό μπορεί να γίνει με την εφαρμογή πίεσεως στα φρεάτια εισαγωγής των περιοχών με περισσότερα βεβαρημένα απόβλητα (US EPA, 1995). Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης θα πρέπει να καταγράφονται σε ημερήσια βάση οι παροχές, οι ενδείξεις πίεσεως, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα, και οι συγκεντρώσεις των πτητικών οργανικών στερεών. Αυτό πρέπει να γίνεται ξεχωριστά για κάθε φρεάτιο. Προσθήκη θρεπτικών δεν πρέπει να γίνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου της εκκίνησης λειτουργίας (US EPA, 1995).

Όταν η ασύμπτωτη συμπεριφορά ξεκινάει να λαμβάνει χώρο, τότε οι χειριστές πρέπει να εφαρμόσουν εναλλακτικές τακτικές που θα αυξήσουν την απόδοση της βιοεξυγίανσης. Τέτοιες μπορεί να είναι η αύξηση της παροχής στην εξαγωγή των αερίων και η αύξηση στην προσθήκη θρεπτικών στο σύστημα. Πιο δραστικές τακτικές θα ήταν η αύξηση των φρεατίων εισόδου και εξόδου (άνοιγμα νέων) και/ή ο εμβολιασμός συμπυκνωμένου διαλύματος βακτηρίων στο σύστημα (US EPA, 1995). Εάν η ασύμπτωτη συμπεριφορά είναι συνεχής για περιόδους μεγαλύτερους των 6 μηνών, ο σχεδιασμός και η λειτουργία του συστήματος πρέπει να τροποποιηθούν άμεσα (π.χ. η παροχή αέρα και η εξαγωγή των αερίων).

#### 5.4.2. Παρακολούθηση υπογείων υδάτων

Σε πολλά σημεία περιμετρικά του συστήματος πρέπει να υπάρχουν σταθμοί ελέγχου των υπογείων υδάτων. Πρόκειται για σωλήνες μικρής διαμέτρου, τοποθετημένες στο έδαφος και

φτάνουν το βάθος των υπογείων υδάτων, ώστε να γίνεται δειγματοληψία από αυτούς (Zhao *et al.*, 2003).

Χημικές αναλύσεις γίνονται σε κάθε δειγματοληψία έτσι ώστε να είναι σίγουρο ότι δεν υπάρχουν διαρροές. Πολύ σημαντική παράμετρος είναι η θερμοκρασία καθώς αδικαιολόγητη αύξηση της θερμοκρασίας των υπογείων υδάτων θα σήμαινε ότι αντιδράσεις βιοαποδόμησης και βιοδιάσπασης λαμβάνουν χώρο. Σε αυτήν την περίπτωση καταλαβαίνουμε ότι έχουμε διαρροή στραγγισμάτων. Διαρροές μπορούμε ακόμα να αντιληφθούμε εάν το pH των υπογείων υδάτων είναι πολύ όξινο (Zhao *et al.*, 2003).

### 5.4.3. Υγρασία

Το ποσοστό υγρασίας στα απορρίμματα είναι γνωστό ότι έχει να κάνει άμεσα με το ρυθμό βιοαποδόμησης. Η θερμοκρασία είναι ένας δείκτης της βιολογικής δραστηριότητας μετά την προσθήκη υγρασίας στο σύστημα (Zhao *et al.*, 2003). Η παρακολούθηση της εσωτερικής υγρασίας είναι μια δύσκολη διαδικασία λόγω της έλλειψης μεθόδων παρακολούθησης και των ετερογενών αποβλήτων. Η πιο συχνή μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι βαρομετρική. Είναι όμως πολύ δύσκολη, δαπανηρή και δείχνει μόνο μια γρήγορη ένδειξη της υγρασίας στο χώρο της δειγματοληψίας με υψηλό ποσοστό λάθους.

Για τη συνεχή παρακολούθηση της υγρασίας σε ένα σημείο χρειάζονται απλούστερες μέθοδοι. Μια πολύ καλή μέθοδος είναι η TDR (Time Domain Reflectometry), η οποία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της υγρασίας σε γεωργικά εδάφη και γήπεδα γκολφ (Εικ. 3, Zhao *et al.*, 2003). Βασίζεται στη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς του νερού. Επειδή η διηλεκτρική σταθερά του νερού, που είναι 80, είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με άλλα μέσα (η διηλεκτρική σταθερά του αέρα είναι 1, και του εδάφους 3-5), οι διαφορές σε αυτή μπορούν αν μας δώσουν την ποσότητα της υγρασίας μέσα σε ένα μέσω. Τα ηλεκτρόδια μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς μπαίνουν σε βάθος 1- 1,5 μέτρου αφού ανοιχτούν τρύπες και τοποθετηθούν με προσοχή με τα χέρια. Μετά οι τρύπες κλείνουν πάλι (Zhao *et al.*, 2003).



Εικόνα 3. Ηλεκτρόδιο μέτρησης υγρασίας της μεθόδου TDR (Zhao *et al.*, 2003).

### 5.4.4. Δειγματοληψία στραγγισμάτων και εδαφικού αέρα

Τα συστήματα δειγματοληψίας (Εικ. 4 και 5) υγρών και αερίων είναι πολλές φορές αυτοσχέδια. Ένα τέτοιο μπορεί να είναι βυθιζόμενο σε δοχείο κατασκευασμένο από πολυαιθυλένιο (μερικών λίτρων) με διάτρητο κάλυμμα, ώστε να μπορεί να αντλεί τα

παραγόμενα υγρά και αέρια. Περιμετρικά του δοχείου τοποθετείται χαλίκι, ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του. Το δοχείο λειτουργεί ως ένας αδρανές όγκος στον οποίο μπορούν να βρουν διέξοδο συγκέντρωσης τα παραγόμενα υγρά. Τα στραγγίσματα αυτά μπορούν να αντλούνται διαμέσου σωλήνα πολυαιθυλενίου μισής ίντσας με τη χρήση περισταλτικής αντλίας.



**Εικόνα 4.** Σύστημα δειγματοληψίας στραγγισμάτων πριν και μετά την επικάλυψη με χαλίκι (Zhao *et al.*, 2003).



**Εικόνα 5.** Σύστημα δειγματοληψίας εδαφικού αέρα, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την επικάλυψη του με χαλίκι (Zhao *et al.*, 2003).

Στην κορυφή του δοχείου και εφόσον έχει καλυφθεί πλήρως με χαλίκι, τοποθετείται ένα διάτρητος στην άκρη σωλήνας μισής ίντσας πολυαιθυλενίου, ο οποίος χρησιμεύει ως δειγματολήπτης των παραγόμενων αερίων. Ο εδαφικός αέρας ανεβαίνει δια μέσου του σωλήνα στην επιφάνεια από τις πιέσεις που δημιουργούν κατά την εκτόνωση από την συμπίεση τους. Το κομμάτι του σωλήνα επικαλύπτεται πλήρως με χαλίκι πριν κλειστεί το άνοιγμα που έχει δημιουργηθεί για τις ανάγκες της εγκατάστασης (Zhao *et al.*, 2003).

#### 5.4.5. Δειγματοληψίας εδάφους

Τα δείγματα εδάφους συλλέγονται από χειροκίνητους δειγματολήπτες. Έχουν την μορφή φτυαριού με καπάκι που ανοιγοκλείνει χειροκίνητα. Ο δειγματολήπτης πρέπει να καθαρίζεται καλά πριν και μετά τη χρήση. Αφού καθαριστεί με νερό και σαπούνι καλά, ξεπλένεται με απιονισμένο νερό και αφήνεται να στεγνώσει. Την ώρα της δειγματοληψίας η περιοχή καλύπτεται με πλαστική μεμβράνη. Προσοχή πρέπει να δίδεται στην ένταση και την κατεύθυνση του ανέμου.

#### 5.4.6. Δειγματοληψία επιφανειακών εκπομπών

Η δειγματοληψία επιφανειακών εκπομπών είναι απαραίτητη διαδικασία για τη σωστή παρακολούθηση της λειτουργίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι χημικές ενώσεις που φτάνουν στην επιφάνεια είναι αμελητέες. Δειγματοληψία γίνεται όταν υπάρχουν αισθητά προβλήματα, όπως έντονες οσμές, εμφάνιση φαινομένων τοξικών θανάτων στην πανίδα ή χλωρίδα της περιοχής.

Η βασική διάταξη ενός συστήματος δειγματοληψίας επιφανειακών εκπομπών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, αποτελείται από ένα τετράγωνο κουτί κατασκευασμένο από Teflon με εμβαδό 0,45 μ<sup>2</sup>. Στο κιβώτιο συνδέονται η είσοδος και η έξοδος του εργαστηριακού αέρα υψηλής καθαρότητας. Μέσα στο κιβώτιο υπάρχει ένα μάνιφολτ το οποίο κατανέμει ομοιόμορφα τον αέρα στην επιφάνεια του εδάφους. Έτσι, μετά την εφαρμογή του αέρα στο έδαφος δημιουργείται και ένα εξερχόμενο ρεύμα αέρα το οποίο κατευθύνεται στο κουτί δειγματοληψίας. Στο κουτί δειγματοληψίας υπάρχει ένας ανοξείδωτος σωλήνας με πορώδες υλικό στο εσωτερικό του που δύναται να συγκροτήσει χημικές ενώσεις από τον αέρα. Όλες οι σωληνώσεις πρέπει να είναι από Teflon με προτίμηση ατσάλι στους συνδέσμους για την καλύτερη απόδοση του συστήματος. Η αντλία πρέπει να βρίσκεται μετά το πορώδες για να μην μολύνει την δειγματοληψία. Για να υπολογιστεί η ακριβής εκπομπή των οργανικών ουσιών από την επιφάνεια του εδάφους στον αέρα, χρησιμοποιείται η επόμενη σχέση (US EPA, 1991):

$$F = \frac{C_v V_r}{A} \quad (1)$$

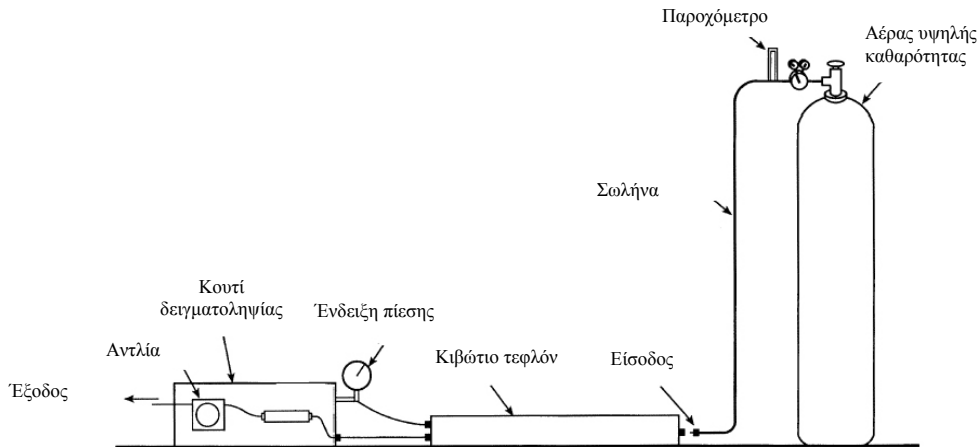
όπου:

F: ροή σε μάζα/επιφάνεια x χρόνο (g/m<sup>2</sup>min)

C<sub>v</sub>: συγκέντρωση του αερίου σε μάζα/όγκο (g/m<sup>3</sup>)

V<sub>r</sub>: ογκομετρική παροχή του εξερχόμενου αέρα (m<sup>3</sup>/min)

A: καλυπτόμενη επιφάνεια από το σύστημα (m<sup>2</sup>)



Σχήμα 2. Διάταξη δειγματοληψία επιφανειακών εκπομπών (US EPA, 1995).

## 5.5. Κατασκευή φρεατίων παρακολούθησης

Τα φρεάτια παρακολούθησης χρησιμοποιούνται τυπικά για την δειγματοληψία και ανάλυση εδαφικού αέρα (βλ. Κεφ. 3: *Σχεδιασμός Συστημάτων Αέριας Βιοεξυγίανσης*). Ακόμη, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πίεσεως των χαρακτηριστικών αυτού. Ο σωστός σχεδιασμός και κατασκευή των φρεατίων παρακολούθησης είναι απαραίτητα στοιχεία για την σωστή παρακολούθηση των συγκεντρώσεων διαφόρων ουσιών στον εδαφικό αέρα. Τα φρεάτια πρέπει να κατασκευάζονται σε σημεία που η συγκέντρωση των ρυπαντών είναι της τάξης των 1000 mg/KgT εδάφους. Η περατότητα του εδαφικού αέρα στο υπέδαφος όπου θα κατασκευαστεί το φρεάτιο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, καθώς σε εδάφη με χαμηλή περατότητα η παρακολούθηση είναι σχεδόν αδύνατη. Τα φρεάτια παρακολούθησης πρέπει να βρίσκονται σε μακρινές αποστάσεις από τα φρεάτια εισαγωγής αέρα για να αποφευχθούν φαινόμενα δημιουργίας καναλιών μεταξύ των.

Σε κάθε φρεάτιο τοποθετούνται αισθητήρες σε τρία επίπεδα. Το βαθύτερο επίπεδο πρέπει να είναι 0,1 μέτρα πάνω από το επίπεδο της υπόγειας στάθμης υδάτων. Η συνολική κατασκευή εδρεύει πάνω σε άμμο ή χαλίκι το οποίο εκτείνεται 0,3-0,6 μέτρα κάτω από το φρεάτιο. Σε εδάφη με χαμηλότερη περατότητα το ύψος του χαλικιού πρέπει να είναι ακόμη μεγαλύτερο. Για την στήριξη του χαλικιού τοποθετείται πηλός πάνω και κάτω από αυτό, πάχους 0,3 μέτρα. Σε εδάφη με υψηλή περατότητα η διάνοιξη μπορεί να γίνει εύκολα με κυλίνδρους που περιστρέφονται χειροκίνητα. Γενικότερα η κατασκευή και η δειγματοληψία είναι ευκολότερη σε τέτοια εδάφη.

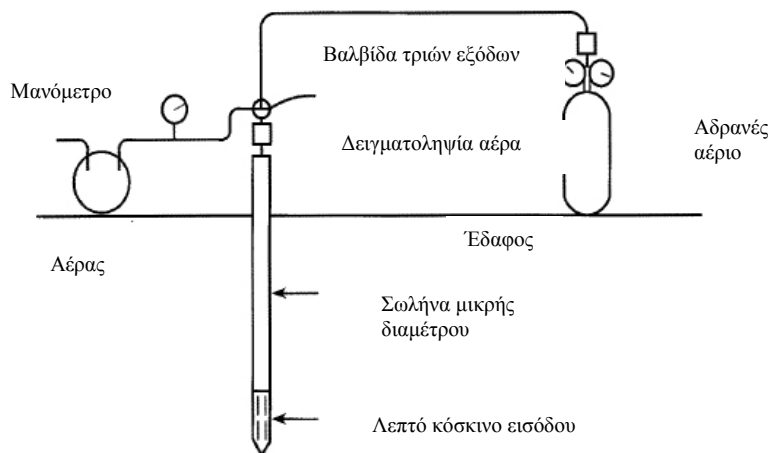
## 5.6. Τεστ *in situ* αναπνοής

### 5.6.1. Εισαγωγή

Το *in situ* τεστ αναπνοής είναι ουσιαστικά η εγκατάσταση μιας εφαρμογής σε ένα φρεάτιο παρακολούθησης στην ακόρεστη ζώνη της υπό βιοεξυγίανση περιοχής του εδάφους. Εφαρμόζεται συνήθως σε μολυσμένα εδάφη από ΒΤΕΧ, ΤΡΑ και γενικότερα οργανικούς ρύπους. Ο σκοπός του τεστ είναι να καθοριστεί η μικροβιακή δραστηριότητα και αν αυτή βρίσκεται υπό περιορισμό οξυγόνου. Η πιλοτική εφαρμογή αυτού του τεστ μπορεί να δείξει εάν σε μια περιοχή είναι δυνατόν εγκατασταθεί και να λειτουργήσει σύστημα βιοεξυγίανσης (Broschart *et al.*, 2003).

### 5.6.2. Διάταξη

Η διάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, αποτελείται από ένα σωλήνα μικρής διαμέτρου που είναι εφοδιασμένος στην κάτω άκρη με ένα πολύ λεπτό κόσκινο και είναι κάθετα τοποθετημένος στο φρεάτιο παρακολούθησης. Έξοδος δειγματοληψίας του εδαφικού αέρα υπάρχει ακόμη τοποθετημένος στην πάνω μεριά του συστήματος. Μία δεύτερη πανομοιότυπη εφαρμογή τοποθετείται σε ένα μη μολυσμένο σημείο της περιοχής (US EPA, 1995).



Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση του *in situ* τεστ αναπνοής (US EPA, 1995).

### 5.6.3. Περιγραφή

Αέρας με 1-3% ευγενές αέριο (συνήθως ήλιο) εμβολιάζεται διαμέσου του σωλήνα στο έδαφος. Αυτό διαρκεί για περίπου 24 ώρες με παροχή 1,7-2,85 m<sup>3</sup>/h. Μετά το πέρας του εμβολιασμού, γίνεται δειγματοληψία του εδαφικού αέρα αρχικά κάθε 2,4,6 και 8 ώρες και μετά κάθε 4-12 ώρες, ανάλογα με την απορροφητικότητα του οξυγόνου. Εάν η απορροφητικότητα του οξυγόνου είναι πολύ άμεση, τότε πρέπει να γίνεται δειγματοληψία συχνότερα. Το ήλιο χρησιμεύει ως αδρανές αέριο για να αποτιμηθεί ευκολότερα ο βαθμός διάχυσης στην αεριζόμενη περιοχή, ενώ επιβεβαιώνει ότι δεν υπάρχουν διαρροές στον εμβολιασμό (US EPA, 1995). Η παροχή του πρέπει να είναι 0,01-0,03 m<sup>3</sup>/h και η καθαρότητα του πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 99%.

Παράμετροι όπως το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, οι συνολικοί υδρογονάνθρακες, και το ήλιο μετρούνται πριν και μετά τον εμβολιασμό. Ο καλύτερος τρόπος μέτρησης και καταγραφής των αναλύσεων από τις δειγματοληψίες είναι η εγκατάσταση ηλεκτρονικών αναλυτών. Το αποδεχτό εύρος ποσοστιαίου λάθους πρέπει να είναι 0,01-0,5%. Η θερμοκρασία του εδάφους πριν και μετά τον εμβολιασμό είναι επίσης ένας σημαντικός δείκτης και πρέπει να καταγράφεται (Norris *et al.*, 1994). Υπάρχει πιθανότητα να δημιουργήσει προβλήματα στους υπολογισμούς του ισοζυγίου του οξυγόνου, για αυτό πρέπει να δίδεται προσοχή στη διεξαγωγή του τεστ (US EPA, 1995b).

Μετά το τεστ μετράται ξανά το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα έτσι ώστε να υπολογιστεί η συνολική κατανάλωση του οξυγόνου αλλά και η συνολική παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα (US EPA, 1995b). Καθώς τα φορτία του υπεδάφους μειώνονται, οι τιμές των μετρήσεων των χημικών παραμέτρων μειώνονται. Το τεστ πρέπει να γίνεται και σε περιοχές όπου δεν είναι μολυσμένες, έτσι ώστε να γίνεται καταγραφή αυτών και να συγκρίνονται με τις τιμές στις υπό βιοεξυγίανση περιοχές. Μετρήσεις πρέπει να γίνονται και να καταγράφονται συνεχώς κατά τη διάρκεια του εμβολιασμού. Το *in situ* τεστ αναπνοής είναι ο βασικός δείκτης της απόδοσης της βιοεξυγίανσης. Πολύ συχνή εφαρμογή του *in situ* τεστ αναπνοής δεν είναι θεμιτή μιας και ο ρυθμός βιοεξυγίανσης είναι γνωστός. Πρέπει λοιπόν να εφαρμόζεται μετά από χρονικά διαστήματα αντίστοιχα του ρυθμού βιοεξυγίανσης.

Το παραπάνω τεστ πρέπει να διακόπτεται όταν το οξυγόνο είναι περίπου 5% , ή μετά από 5 μέρες δειγματοληψίας (US EPA, 1995 και 1995b).

#### 5.6.4. Παράδειγμα υπολογισμού χρόνου βιοεξυγίανσης με το *in situ* τεστ αναπνοής

Να υπολογιστεί ο χρόνος βιοεξυγίανσης με βάση το *in situ* τεστ αναπνοής. Αποδεχόμαστε ρυθμό αξιοποίησης οξυγόνου της τάξης του 6%/d και συγκέντρωση TPH (συνολικούς πετρελαϊκούς υδρογονάνθρακες) 6,000 mg/Kg εδάφους.

*Λύση:*

Η αποδόμιση των υδρογονανθράκων με την αξιοποίηση του οξυγόνου είναι:  
 $C_6H_{14} + 9.5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 7H_2O$  με  $k_B = -0,68k_0$

Ένας ρυθμός αξιοποίησης του οξυγόνου της τάξης του 6%/d αντιστοιχεί σε ένα ρυθμό βιοαποδόμισης περίπου 4,1 mg/Kg·d. Με βάση την αρχική συγκέντρωση των υδρογονανθράκων 6,000 mg/Kg εδάφους έχουμε:

χρόνος αποκατάστασης =  $Co / k_B$

και:  $(6,000 \text{ mg/Kg}) / 4.1 \text{ mg/Kg} \cdot \text{d} = 1.500 \text{ d} \sim 4 \text{ yr.}$

### 5.7. Βιβλιογραφία

- Broschart, M. D., Canier, J. H., and Retkovsek, R., (2003), "Cost-effective strategy for installation and operation of a bio-venting system to remediate jet fuel contamination beneath the former refunding Apron at ? Air Force Base", *Federal Facilities Environmental Journal*, New York, published online in Wiley Interscience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)), DOI: 10.1002/FFEJ.10083.
- Coelho de Abrew, R., (1994), "Facultative bioreactor landfill: An environmental and geotechnical study. PhD Dissertation, University of New Orleans.
- Cookson, T. J., (1995), *Bioremediation Engineering Design and Application*, New York, McGraw Hill.
- Norris, D. R., et. al, (1994), *Handbook bioremediation*, CRC Press, U.S.A.
- Red, D.A., Hudgin, M., Harper, S., Phillips, P., Morris, J., (2001), "The successful demonstration of aerobic landfilling: *The potential for a more sustainable solid waste management approach*". *Resources Conservation*, vol. 32, pp. 115-146.
- Repa, E. W., (2003), Bioreactor Landfills: "a viable technology", *National Solid Wastes Management Association*, Research Bulletin 03-02.
- U.S. Environmental Protection Agency, (EPA), (1999), "Groundwater cleanup overview of operating"; *Experience at 28 sites, Solid Waste and Emergency Response*, EPA 542-R-99-006.
- US EPA. (1995). *Manual: Principles and Practices of Bioventing, Volume I: Bioventing Principles*. EPA/540/R-95/534a.
- US EPA. (1995). *Manual: Principles and Practices of Bioventing, Volume II: Bioventing Design*. EPA/540/R-95/534a.
- US EPA. (1995B). *Bioremediation Field Initiative Site Profile: Eielson Air Force Base Superfund Site* EPA/540/F-95/506B.
- U.S. EPA. (1991). Current and developing analytical technologies for quantifying biogenic gas emissions (June). EPA/600/3-91/044. Washington, DC
- Warith, M., (2002), "Bioreactor Landfill Experimental and field results, *Waste Management*, vol. 22, pp. 7-17.
- Zhao, X., Vocice, T. C., Khire, M., Mahr., S., Musleh, R., Iteerwam, P., and Hashasham, S., (2003), "Full-scale Evaluation of Bioreactor Landfill Technology. Presented at 8<sup>th</sup> Annual Landfill Symposium, Atlantic City, NJ, June 16-20, 2003.
- (1) <http://www.marvel.ro/db/Brochures/Madur/Doc/mad-Pmeter.htm>
- (2) <http://www.palintestusa.com/>
- (3) <http://www.kerala.gov.in/tudp/ProInfMem.pdf>

(4) <http://www.ene.gov.on.ca/envision/techdocs/4212e.htm#M3#M3>

**ΔΕΝ ΑΝΑΦΕΡΕΤΑΙ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**  
Vaidya, 2002

## 6. Κόστος εφαρμογής

### Τζαγκαράκη Ευαγγελία

Χημικός Μηχανικός, MSc.

#### 6.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οικονομικά δεδομένα για τα κόστη σχεδιασμού, κατασκευής, λειτουργίας και κλεισίματος ενός Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Αναλυτικότερα, το κόστος σχεδιασμού περιλαμβάνει την επιλογή τοποθεσίας, τη μελέτη, την πιλοτική εφαρμογή και τις απαραίτητες δοκιμές που πρέπει να γίνουν. Το κόστος κατασκευής αναφέρεται σε εργασίες διαμόρφωσης του χώρου, εσωτερική επικάλυψη με γεωμεμβράνη, κάλυψη των ενδιάμεσων επιπέδων με τεμαχισμένα ελαστικά αυτοκινήτων, χαλίκι και έδαφος. Επιπρόσθετα, στο κόστος κατασκευής συγκαταλέγονται το στήσιμο συστημάτων παρακολούθησης απορριμμάτων, συλλογής και απομάκρυνσης αερίου, ανακύκλωσης και άντλησης στραγγισμάτων, η εγκατάσταση ηλεκτρονικού συστήματος συλλογής δεδομένων και ελέγχου, καθώς και η τελική κάλυψη του χώρου με συνθετικό κάλυμμα. Τα έξοδα λειτουργίας αφορούν την παρακολούθηση, τη δειγματοληψία, τις απαιτήσεις σε ενέργεια και τα χημικά αναλώσιμα. Τέλος, τα έξοδα κλεισίματος και διατήρησης μετά το κλείσιμο, σχετίζονται με τους ελέγχους των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, των εκπομπών του μεθανίου και με τη συντήρηση του επιφανειακού στρώματος κάλυψης.

Πέρα από την παρουσίαση των οικονομικών δεδομένων, γίνεται σύγκριση μεταξύ συμβατικού ΧΥΤΑ και της μεθόδου βιοεξυγίανσης, καθώς και προβολή των οικονομικών δεδομένων της αερόβιας και αναερόβιας μεθόδου. Ο χρόνος βιοεξυγίανσης και το αντίστοιχο κόστος εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του κάθε ΧΥΤΑ. Σημαντικοί παράγοντες που διαφοροποιούν το κόστος σε κάθε εφαρμογή είναι τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η τοποθεσία και η κατανομή ρυπαντών, η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, η συγκέντρωση ρυπαντών, ο επιθυμητός χρόνος εξυγίανσης και οι εκπομπές αερίων.

#### 6.2. Γενικές πληροφορίες για το κόστος του βιοαερισμού

Η Αμερικανική Ένωση Προστασίας Περιβάλλοντος (US EPA) έχει εκδοθεί ένα εγχειρίδιο αρχών και πρακτικών βιοεξυγίανσης από την στο οποίο αναφέρονται οικονομικά δεδομένα για ρυπαντές καύσιμα, όπου η εφαρμογή είναι περισσότερο δαπανηρή από τα αστικά απορρίμματα. Σύμφωνα με δεδομένα που δίδονται για τα καύσιμα, το συνολικό κόστος *in situ* εξυγίανσης του εδάφους χρησιμοποιώντας την τεχνολογία του βιοαερισμού είναι 13 - 79 \$/m<sup>3</sup>. Σε χώρους όπου η επιφάνεια του μολυσμένου εδάφους ξεπερνά τα 7.700 m<sup>3</sup> το κόστος μπορεί να μειωθεί κάτω από 13 \$/m<sup>3</sup>. Κόστη μεγαλύτερα από 80 \$/m<sup>3</sup> αφορούν μικρότερους ΧΥΤΑ. Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης είναι εφικτό να μειωθούν όταν το προσωπικό μπορεί να κάνει απλούς ελέγχους του συστήματος και συντήρηση ρουτίνας. Στον Πίνακα 1 αναφέρονται λεπτομερώς τα κόστη για βιοεξυγίανση 3.823 m<sup>3</sup> εδάφους μολυσμένου με ρυπαντή καυσίμων σε περιεκτικότητα 3.000 mg/kg εδάφους.

**Πίνακας 1.** Κόστη αντιπροσωπευτικής μεθόδου βιοεξυγίανσης ολοκληρωμένης κλίμακας (Downey *et al.*, 1994).

Εργασία	Κόστος (\$)
Επίσκεψη, επιλογή, σχεδιασμός κατάλληλης τοποθεσίας	5.000
Προετοιμασία σχεδιαγράμματος εργασιών	6.000
Πιλοτική εφαρμογή και δοκιμές	27.000
Επίσημη έγκριση	3.000
Κατασκευή έργου	
Σχεδιασμός	7.500
Εκσκαφές <sup>1</sup> / Δειγματοληψία	15.000
Εγκατάσταση / Εκκίνηση	4.000
Παρακολούθηση για 2 έτη	6.500
Απαιτήσεις σε ενέργεια για 2 έτη	2.800
Δειγματοληψία εδάφους για 2 έτη	13.500
<b>Σύνολο</b>	<b>90.300</b>

<sup>1</sup> για τις εκσκαφές θεωρήθηκε ότι ανοίχθηκαν 4 πηγάδια αερισμού βάθους 4,6 m.

Στον Πίνακα 2 γίνεται σύγκριση τριών μεθόδων βιοεξυγίανσης με πραγματικά κόστη από εφαρμογές στην πόλη Traverse της πολιτείας Michigan. Παρόλο που η έκταση που εξυγιάνθηκε με βιοαερισμό είναι μεγαλύτερη από τις περιοχές όπου χρησιμοποιήθηκε υπεροξείδιο του υδρογόνου ή νιτρικό άλας, τα συνολικά κόστη για τον βιοαερισμό ήταν σημαντικά χαμηλότερα σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους.

**Πίνακας 2.** Σύγκριση κόστους για μεθόδους βιοεξυγίανσης εφαρμοσμένες σε χώρους απόρριψης καυσίμων (US EPA, 1995).

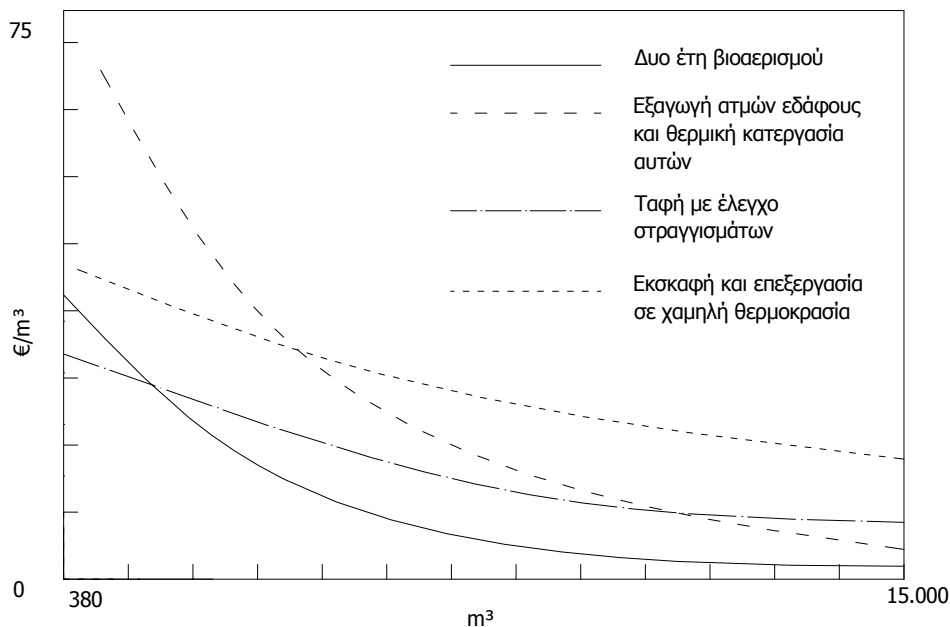
Εργασία	Συνολικό κόστος ανά μέθοδο (\$/m <sup>3</sup> μολυσμένου εδάφους)		
	Υπεροξείδιο του υδρογόνου	Νιτρικό άλας	Βιοαερισμός <sup>1</sup>
Κατασκευή <sup>2</sup>	45	118	26
Εργασία / Παρακολούθηση	72	96	40
Χημικά αναλώσιμα	500	30	0,44
Ηλεκτρική ενέργεια	24	12	6,8
<b>Σύνολο</b>	<b>641</b>	<b>256</b>	<b>73</b>

<sup>1</sup> οι τιμές αντιπροσωπεύουν τους 4 πρώτους μήνες πρακτικής εφαρμογής

<sup>2</sup> τα έξοδα κατασκευής υπολογίστηκαν για 5 χρόνια λειτουργίας των κτιρίων, μηχανημάτων.

Στο Διάγραμμα 1 συγκρίνονται τα μοναδιαία κόστη για διάφορες διαδεδομένες τεχνικές εξυγίανσης εδαφών μολυσμένων με παραπροϊόντα καυσίμων. Όλα τα κόστη έχουν

υπολογιστεί για έδαφος μολυσμένο με ρυπαντή καυσίμων σε περιεκτικότητα 3.000 mg/kg εδάφους. Αναλυτικά οι περιπτώσεις είναι: 2 έτη βιοαερισμός, 1 έτος εξαγωγή ατμών από το έδαφος και θερμική επεξεργασία τους, 1 έτος ταφής με έλεγχο στραγγισμάτων καθώς και εκσκαφή με χαμηλής θερμοκρασίας επεξεργασία. Το κόστος για τη διαμόρφωση της ανασκαμμένης περιοχής δεν περιλαμβάνεται. Σε περιπτώσεις που έχει αναπτυχθεί οικοδομική δραστηριότητα πάνω από χώρους που επιθυμούμε την εξυγίανση, ο βιοαερισμός είναι η μοναδική διαθέσιμη και οικονομικά αποδεκτή μέθοδος (US EPA, 1995).



**Διάγραμμα 1.** Σύγκριση κόστους για διάφορες μεθόδους εξυγίανσης εδαφών μολυσμένων με παραπροϊόντα καυσίμων (US EPA, 1995).

### 6.3. Αποτελέσματα από εφαρμογή στην πολιτεία της Γεωργίας (ΗΠΑ)

Ακολουθούν τα αποτελέσματα δύο εφαρμογών υπό αερόβιες συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν στην πολιτεία της Γεωργίας (ΗΠΑ). Συγκεκριμένα, στην κομητεία Κολούμπια σε μία έκταση 64.800 m<sup>2</sup> με μέσο βάθος απορριμμάτων 3 m λειτούργησε το πρώτο σύστημα για 21 μήνες και στο Live Oak εφαρμόστηκε το δεύτερο σύστημα για 9 μήνες σε κελί έκτασης 10.120 m<sup>2</sup>, που είχε μέσο βάθος απορριμμάτων 9 m και περιείχε 57.000 m<sup>3</sup> όγκο απορριμμάτων. Τα δύο αυτά συστήματα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων έδειξαν το οικονομικό όφελος που προκύπτει από τη μετατροπή της μεθόδου επεξεργασίας από αναερόβια σε αερόβια.

### 6.3.1. Προβλεπόμενα οικονομικά οφέλη από τη χρήση αερόβιων μεθόδων

#### 6.3.1.1. Παράταση του χρόνου λειτουργίας του χώρου ταφής

Η καθίζηση των αστικών στερεών αποβλήτων με αερόβια αποικοδόμηση έχει μετρηθεί περισσότερη του 30%, ενώ σε συμβατικό ΧΥΤΑ η καθίζηση που επιτυγχάνεται είναι 15%. Η εξοικονόμηση χώρου από την καθίζηση υπολογίζεται ως εξής:

$$A = v \cdot a \quad (1)$$

όπου:

- A: επιπλέον ωφέλιμος χώρος απόθεσης (m<sup>3</sup>)
- v: χωρητικότητα ΧΥΤΑ (m<sup>3</sup>)
- a: ποσοστό καθίζησης

Επομένως, σε έναν ΧΥΤΑ χωρητικότητας 1.000.000 m<sup>3</sup> θα μπορούσαν να αποτεθούν επιπλέον 150.000 m<sup>3</sup> αν εφαρμόζοταν αερόβια αποικοδόμηση.

Στην αερόβια αποικοδόμηση: A<sub>1</sub> = 300.000 m<sup>3</sup>

Στο συμβατικό ΧΥΤΑ: A<sub>2</sub> = 150.000 m<sup>3</sup>

Το οικονομικό όφελος από την επιπλέον καθίζηση είναι:

$$E_{\text{air}} = A \cdot \rho_w \cdot c_{\text{fee}} \quad (2)$$

όπου:

- E<sub>air</sub>: οικονομικό όφελος (\$)
- A: επιπλέον ωφέλιμος χώρος απόθεσης (m<sup>3</sup>)
- ρ<sub>w</sub>: συμπαγή πυκνότητα απορριμμάτων (tn/m<sup>3</sup>)
- c<sub>fee</sub>: μέσο κόστος απόθεσης σε χωματερή (\$/tn)

Υπόθεση: c<sub>fee</sub> = 24,5 \$/tn

(το μικτό κόστος είναι 32,5 \$/tn μείον το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 8 \$/tn)

ρ<sub>w</sub> = 0,5 tn/m<sup>3</sup>

Τα επιπλέον έσοδα υπολογίζονται σε:

$$E_{\text{air}} = (150.000 \text{ m}^3) \times (0,5 \text{ tn/m}^3) \times (24,5 \text{ \$/tn}) = 1.837.500 \text{ \$}$$

Αυτό το ποσό δεν περιλαμβάνει τα έσοδα από την πώληση ανακτημένων υλικών. Επιπλέον, αυτό το 15% σε ωφέλιμο χώρο μπορεί να παρατείνει το χρόνο λειτουργίας για περίπου ένα χρόνο αν δεχθούμε το ρυθμό που δέχεται μία χωματερή ως 250 tn/μέρα.

$$D = A \cdot \rho_w \cdot (1/R) \quad (3)$$

όπου:

- D: μέρες επιπλέον λειτουργίας της χωματερής
- R: ρυθμός απόθεσης απορριμμάτων στην χωματερή (tn/μέρα)

$$D = (150.000 \text{ m}^3) \times (0,5 \text{ tn/m}^3) \times (1/250 \text{ μέρα /tn}) = 300 \text{ μέρες}$$

### 6.3.1.2. Μείωση του κόστους διαχείρισης των στραγγισμάτων

Έχει παρατηρηθεί ότι οι συγκεντρώσεις των τυπικών οργανικών ουσιών που βρίσκονται στα στραγγίσματα μπορούν να μειωθούν ταχύτατα με τη χρήση αερόβιας μεθόδου. Επιπρόσθετα, μπορεί να μειωθεί και ο συνολικός όγκος των στραγγισμάτων. Το κόστος επεξεργασίας των στραγγισμάτων υπολογίζεται ως:

$$c_{\text{leact}} = g_{\text{leact}} \cdot c_{\text{leact tr}} \quad (4)$$

όπου:

$c_{\text{leact}}$ : κόστος επεξεργασίας των στραγγισμάτων (\$/έτος)

$g_{\text{leact}}$ : παραγωγή στραγγισμάτων (L/μήνα)

$c_{\text{leact tr}}$ : μοναδιαίο κόστος επεξεργασίας (\$/L)

$$c_{\text{leact}} = (450.000 \text{ L/μήνα}) \times (12 \text{ μήνες/έτος}) \times (0,0079 \text{ \$/L}) = 42.660 \text{ \$/έτος}$$

Σε ένα χώρο ταφής με παραγωγή στραγγισμάτων 450.000 L/μήνα και κόστος επεξεργασίας 0,0079 \$/L μπορεί να εξοικονομηθούν τουλάχιστον 21.400 \$/έτος με την υπόθεση ότι τα στραγγίσματα μειώνονται μόνο κατά 50%. Είναι βέβαιο ότι τα μελλοντικά κέρδη θα είναι πολύ περισσότερα εάν θεωρηθεί ως διάρκεια λειτουργίας τα 40 έτη (10 έτη λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα και 30 έτη μετά το κλείσιμο του χώρου ταφής όπου συνεχίζεται η επεξεργασία των στραγγισμάτων).

### 6.3.1.3. Εξοικονόμηση κόστους διαχείρισης αέριου μεθανίου

Σύμφωνα με τις παραπάνω εφαρμογές, η μέθοδος της αερόβιας επεξεργασίας ελαχιστοποιεί την παραγωγή μεθανίου κατά 90%. Ένα από τα άμεσα και εμφανή πλεονεκτήματα είναι ότι δεν απαιτείται μονάδα συλλογής, επεξεργασίας και διαχείρισης του μεθανίου. Μακροπρόθεσμα σημαντικά οφέλη προκύπτουν από τα μειωμένα μέτρα παρακολούθησης και ρύθμισης των εκπομπών του μεθανίου που γίνονται για τη συμμόρφωση με τη νομοθεσία. Είναι οικονομικά ωφέλιμο να επιτυγχάνονται τα όρια που έχουν θεσπιστεί για την εκπομπή αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

### 6.3.1.4. Μείωση κινδύνου μόλυνσης υπόγειων υδάτων και ατμόσφαιρας

Σε πολλούς ΧΥΤΑ έχουν παρατηρηθεί διαρροές τοξικών ουσιών στο υπέδαφος και στα υπόγεια νερά. Τα στραγγίσματα κατεισδύουν μέσα από ρωγμές της γεωμεμβράνης. Η αντιμετώπιση ενός τόσο σοβαρού προβλήματος για τη δημόσια υγεία είναι δαπανηρή και χρονοβόρα. Η διαδικασία αντιμετώπισης της μόλυνσης ξεκινάει αφού διαπιστωθεί η διαρροή, ανοίγονται πηγάδια άντλησης, γίνεται επεξεργασία με διάφορες μεθόδους, απαιτούνται ακριβές εργαστηριακές αναλύσεις, συνεχής παρακολούθηση και ρυθμιστικές ενέργειες. Όμως, με τη μέθοδο της αερόβιας βιοεξυγίανσης τα στραγγίσματα επεξεργάζονται πριν διαρρεύσουν, με αποτέλεσμα να μειώνεται η τοξικότητα τους και ταυτόχρονα ο κίνδυνος μόλυνσης του υπεδάφους. Συνεπώς, τα έξοδα επιπλέον εξυγίανσης του υπεδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα αποφεύγονται. Επιπρόσθετα, με τη μέθοδο αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η παραγωγή πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs-Volatile Organic Compounds), μία σημαντική κατηγορία ατμοσφαιρικών ρύπων. Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντικό οικονομικό πλεονέκτημα γιατί μειώνονται τα έξοδα για περιορισμό των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων.

### 6.3.1.5. Μείωση εξόδων κλεισίματος και διατήρησης μετά το κλείσιμο

Μία έρευνα στο πανεπιστήμιο του Οχάιο έδειξε ότι το μέσο κόστος κλεισίματος ενός χώρου ταφής απορριμμάτων είναι 16,6 \$/m<sup>2</sup>. Μετά το κλείσιμο, οι έλεγχοι των υπόγειων και επιφανειακών νερών, των εκπομπών μεθανίου καθώς και η συντήρηση του επιφανειακού στρώματος κάλυψης του χώρου είναι υποχρεωτικοί. Όλες οι παραπάνω απαιτήσεις ελέγχου μετά το κλείσιμο μειώνονται γιατί με τη μέθοδο της αερόβιας βιοεξυγίανσης σταθεροποιείται η ποιότητα των στραγγισμάτων και μειώνονται οι ποσότητες των αερίων. Υπάρχει και η περίπτωση της εμπορικής εκμετάλλευσης, όπου το χώμα που έχει παραχθεί αναλύεται και μετά χρησιμοποιείται είτε για γεωργικούς σκοπούς, είτε για την καθημερινή κάλυψη του χώρου ταφής. Τα εναπομείναντα μη αποδομημένα υλικά (γυαλί, πλαστικό, μέταλλα) μπορεί να έχουν κάποια εμπορική αξία. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση ενός προσωρινού καλύμματος για να σκεπάζονται τα απορρίμματα ενώ αποδομούνται και η αφαίρεσή του όταν γίνονται οι εργασίες εκμετάλλευσης των υλικών είναι μία οικονομικά ελκυστική λύση.

### 6.3.2. Γενικά σχόλια για σύγκριση κόστους διαφορετικών μεθόδων

Το συνολικό κόστος ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερο από το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ενός συμβατικού ΧΥΤΑ. Ενώ υπάρχουν πολλοί σχεδιαστικοί και λειτουργικοί παράγοντες που πρέπει να υπολογιστούν για την εφαρμογή ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα, ο αερόβιος βιοαντιδραστήρας αποτελεί μία ωφέλιμη επένδυση. Το αρχικό κόστος για το δίκτυο σωληνώσεων μπορεί να είναι το ίδιο με το σύστημα συλλογής του μεθανίου, όμως το μεγαλύτερο μέρος των δικτύων επαναχρησιμοποιείται σε κάθε επίπεδο στην αερόβια μέθοδο, οπότε το αρχικό κόστος ελαχιστοποιείται. Σύστημα ελέγχου αερίων απαιτείται σε κάθε περίπτωση, όμως στην αερόβια μέθοδο θα είναι αισθητά μειωμένο. Έχει υπολογιστεί ότι το κόστος για ένα πλήρες σύστημα στα 3 - 5 \$/tn. Ακόμα οικονομικότερη είναι η μέθοδος όταν εφαρμόζεται σε διαδοχικά κελιά, όταν δηλαδή ολοκληρώνεται η διαδικασία της βιοεξυγίανσης σε ένα κελί, ο εξοπλισμός μεταφέρεται σε διπλανό κελί και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Μόνο μια μικρή περιοχή κελιών απαιτείται για να ολοκληρωθεί ο κύκλος απόθεσης απορριμμάτων, αερόβια βιοδιάσπαση, ανάκτηση προϊόντων βιοδιάσπασης, επαναχρησιμοποίηση κελιού. Όσο μικρότερη είναι η έκταση που απαιτείται για τη διεργασία, τόσο μειώνεται και το αρχικό κόστος κατασκευής. Σε κάθε μία από τις τρεις εφαρμογές που μπορεί να έχει η αερόβια μέθοδος (σε διαδοχικά επίπεδα, σε υπάρχον ΧΥΤΑ, σε κελιά) το κόστος λειτουργίας και ελέγχου αρχικά (2-6 μήνες) είναι μέτριο και στη συνέχεια μειώνεται.

### 6.3.3. Μοντέλο κοστολόγησης: παράδειγμα οικονομικών ωφελειών

Σε έναν ΧΥΤΑ που δέχεται 73.000 tn αστικών στερεών αποβλήτων και δεν γίνεται αρχικός διαχωρισμός των απορριμμάτων, μπορούν να πραγματοποιηθούν οι ακόλουθες εξοικονομήσεις. Με την ανάπτυξη αερόβιων συνθηκών και την προσεκτική διαχείριση του ΧΥΤΑ μπορούν να διασπαστούν περισσότερα απορρίμματα λόγω της επιπλέον καθίζησης που δίνει ωφέλιμο χώρο απόθεσης και αυξάνει την ποσότητα των αποτιθέμενων απορριμμάτων κατά 15%.

$$M_{w \text{ ad air}} = M_w \cdot a \quad (5)$$

όπου:

$M_{w \text{ ad air}}$ : μάζα επιπλέον απορριμμάτων (tn)

$M_w$ : δυναμικότητα ΧΥΤΑ (tn)  
 $a$ : ποσοστό επιπλέον καθίζησης

$$M_{w \text{ ad air}}: (73.000 \text{ tn}) \times (0,15) = 10.950 \text{ tn}$$

Τα εναπομείναντα μη αποδομημένα υλικά (γυαλί, πλαστικό, μέταλλα) μπορούν να ανακτηθούν μετά από εκσκαφή και διαλογή. Μετά από τις ενέργειες αυτές, μπορούν να αποτεθούν περισσότερα απορρίμματα.

$$M_{w \text{ ad rec}} = M_w \cdot a_{\text{rec}} \quad (6)$$

όπου:

$M_{w \text{ ad rec}}$ : μάζα επιπλέον απορριμμάτων μετά από διαλογή (tn)  
 $M_w$ : δυναμικότητα ΧΥΤΑ (tn)  
 $a_{\text{rec}}$ : ποσοστό ανακτώμενων υλικών

Υπόθεση:  $a_{\text{rec}}$  στα αστικά στερεά απόβλητα = 68%.

$$M_{w \text{ ad rec}} = (73.000 \text{ tn}) \times (0,68) = 49.640 \text{ tn}$$

$$M_{w \text{ ad total}} = M_{w \text{ ad air}} + M_{w \text{ ad rec}} = (10.950 + 49.640 \text{ tn}) = 60.590 \text{ tn}$$

Συνολικά μπορεί να εξοικονομηθεί χώρος κατά 83%. Το κόστος μίας τέτοιας προσέγγισης (μόνο για εφαρμογή αερόβιας βιοεξυγίανσης) είναι 2,25 \$/tn. Δηλαδή, το συνολικό κόστος για τον παραπάνω ΧΥΤΑ είναι:

$$C_{\text{total bio}} = M_w \cdot c_{\text{air bio}} \quad (7)$$

όπου:

$C_{\text{total bio}}$ : συνολικό κόστος εφαρμογής αερόβιας βιοεξυγίανσης (\$)  
 $M_w$ : δυναμικότητα ΧΥΤΑ (tn)  
 $c_{\text{air bio}}$ : μέσο κόστος εφαρμογής αερόβιας βιοεξυγίανσης (\$/tn)

$$C_{\text{total bio}}: (73.000 \text{ tn}) \times (2,25 \text{ \$/tn}) = 164.250 \text{ \$}$$

Όμως ο ελεύθερος χώρος σε έναν ΧΥΤΑ εκτιμάται σε 20,10 \$/tn οπότε το οικονομικό όφελος λόγω της επιπλέον καθίζησης είναι:

$$E_{\text{air}} = M_{w \text{ ad air}} \cdot c_{\text{air sp}} \quad (8)$$

όπου:

$E_{\text{air}}$ : οικονομικό όφελος (\$)  
 $M_{w \text{ ad air}}$ : μάζα επιπλέον απορριμμάτων (tn)  
 $c_{\text{air sp}}$ : αξία ελεύθερου χώρου (\$/tn)

$$E_{\text{air}}: (10.950 \text{ tn}) \times (20,10 \text{ \$/tn}) = 220.095 \text{ \$}$$

Το καθαρό κέρδος εφαρμογής της μεθόδου ( $E_{\text{air f}}$ ) είναι:  
 $E_{\text{air f}} = E_{\text{air}} - C_{\text{total bio}} = (220.095 \text{ \$}) - (164.250 \text{ \$}) = 55.845 \text{ \$}$

$$E_{\text{per tn}} = E_{\text{air f}} / M_w \quad (9)$$

όπου:

$E_{\text{per tn}}$ : καθαρό κέρδος εφαρμογής της μεθόδου ανά τόνο απορριμμάτων

$$E_{\text{per tn}}: (55.845 \$) / (73.000 \text{ tn}) = 0,77 \$/\text{tn}$$

Υπολογίζονται τα εναπομείναντα απορρίμματα  $M_{\text{rem}}$

$$M_{\text{rem}} = M_w - M_{w \text{ ad air}} = (73.000 \text{ tn}) - (10.950 \text{ tn}) = 62.050 \text{ tn}$$

Αν στην ποσότητα αυτή χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ανάκτησης υλικών το συνολικό κόστος θα είναι:

$$C_{\text{total rec}} = M_{\text{rem}} \cdot c_{\text{rec}} \quad (10)$$

όπου:

$C_{\text{total rec}}$ : συνολικό κόστος εφαρμογής μεθόδου ανάκτησης των υλικών (\$)

$M_{\text{rem}}$ : εναπομείναντα απορρίμματα (tn)

$c_{\text{rec}}$ : μέσο κόστος εφαρμογής μεθόδου ανάκτησης των υλικών (\$/tn)

Υπόθεση:  $c_{\text{rec}} = 8 \$/\text{tn}$

$$C_{\text{total rec}} = (62.050 \text{ tn}) \times (8 \$/\text{tn}) = 496.400 \$$$

Από τα εναπομείναντα απορρίμματα το ποσοστό του εδάφους είναι 50% που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν επιφανειακό κάλυμμα του ΧΥΤΑ ή να πωληθεί.

$$M_{\text{soil}} = M_{\text{rem}} \cdot a_{\text{soil}} = (62.050 \text{ tn}) \times (0,5) = 31.025 \text{ tn}$$

όπου:

$M_{\text{soil}}$ : μάζα εδάφους που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν επιφανειακό κάλυμμα του ΧΥΤΑ ή να πωληθεί.

Τα ανακυκλώσιμα υλικά είναι εμπορεύσιμα και βρίσκονται σε ποσοστό 30% οπότε:

$$M_{\text{rec}} = M_{\text{rem}} \cdot a_{\text{rec}} = (62.050 \text{ tn}) \times (0,3) = 18.615 \text{ tn}$$

όπου:

$M_{\text{rec}}$ : μάζα ανακυκλώσιμων υλικών

Το υπόλοιπο 20% που δεν είναι ανακτήσιμο επαναποθετείται στον ΧΥΤΑ.

$$M_{\text{rest}} = M_{\text{rem}} \cdot a_{\text{rest}} = (62.050 \text{ tn}) \times (0,2) = 12.410 \text{ tn}$$

όπου:

$M_{\text{rest}}$ : μάζα μη αξιοποιήσιμων απορριμμάτων

Τα κέρδη από την ανάκτηση προϊόντων ως προς τον ελεύθερο χώρο ( $E_{\text{total air}}$ ) είναι:

$$E_{\text{total air}} = (M_{\text{rem}} - M_{\text{rest}}) \cdot c_{\text{air sp}} = (62.050 \text{ tn} - 12.410 \text{ tn}) \times 20,1 \$/\text{tn} = 997.764 \$$$

Συνδυάζοντας τη γρήγορη σταθεροποίηση των απορριμμάτων με την επαναδιαμόρφωση και επαναχρησιμοποίηση του ΧΥΤΑ, προάγεται η ιδέα ενός διατηρούμενου ΧΥΤΑ, μία προσέγγιση που φαίνεται περιβαλλοντικά και οικονομικά ελκυστική (Read *et al.*, 2000).

## 6.4. Αποτελέσματα από εφαρμογή στην κομητεία YOLO

Αναλυτικά το πρόγραμμα που έχει εφαρμοστεί στην πολιτεία του Yolo περιγράφεται στο κεφάλαιο των εφαρμογών. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει παρουσίαση των οικονομικών δεδομένων της εφαρμογής. Ο χώρος του ΧΥΤΑ έχει συνολική έκταση 80.940 m<sup>2</sup>. Στην πρώτη φάση της εφαρμογής θα κατασκευαστούν τρία κελιά το βορειοανατολικό αναερόβιο κελί, το δυτικό αναερόβιο κελί και το νοτιοανατολικό αερόβιο κελί συνολικής έκτασης 49.000 m<sup>2</sup>. Ανάλογα με τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης θα κατασκευαστεί η δεύτερη φάση και θα αποφασισθεί αν η λειτουργία θα είναι αερόβια ή αναερόβια. Τα κόστη για τον αναερόβιο βιοαντιδραστήρα υπολογίστηκαν με τα δεδομένα των δύο τμημάτων (δυτικό και βορειοανατολικό) και ανάχθηκαν σε έκταση 49.000 m<sup>2</sup>. Τα κόστη για τον αερόβιο βιοαντιδραστήρα υπολογίστηκαν με τα δεδομένα του νοτιοανατολικού τμήματος και ανάχθηκαν σε έκταση S<sub>total</sub> 49.000 m<sup>2</sup> χωρητικότητας M<sub>w total</sub> 326.042 tn. Τα οικονομικά στοιχεία και για τις δύο μεθόδους είναι άμεσα εξαρτώμενα από την διαμόρφωση του εδάφους, όσο για το πλήθος των στρώσεων των απορριμμάτων, οι περισσότερες στρώσεις ισοδυναμούν σε ελκυστικότερα οικονομικά αποτελέσματα.

### 6.4.1. Αναερόβιος βιοαντιδραστήρας

#### 6.4.1.1. Κόστη σχεδιασμού, εγκαταστάσεων, παρακολούθησης και συντήρησης

Η μονάδα κόστους εφαρμογής για την αναερόβια διαδικασία σε ολοκληρωμένης κλίμακας εφαρμογή έχει εκτιμηθεί σε 2,50 \$/tn όπως φαίνεται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3.** Υπολογισμοί κόστους<sup>1</sup> για τη λειτουργία του αναερόβιου βιοαντιδραστήρα (Yazdani *et al.*, 2002).

Περιγραφή	Κόστος ανά τόνο για έκταση 39.000 m <sup>2</sup> και 186.068 tn απορριμμάτων <sup>2</sup>	Κόστος ανά τόνο για έκταση 49.000 m <sup>2</sup> και 326.042 tn απορριμμάτων <sup>3</sup>
Κατασκευή μικτού στρώματος επικάλυψης <sup>4</sup> και εργασίες για την κάλυψη με τεμαχισμένα ελαστικά αυτοκινήτων	Δεν είναι επιπλέον κόστος για την λειτουργία βιοαντιδραστήρα	Δεν είναι επιπλέον κόστος για την λειτουργία βιοαντιδραστήρα
Κατασκευή συστήματος παρακολούθησης απορριμμάτων	0,980 \$/tn	0,699 \$/tn
Κατασκευή του συστήματος <sup>5</sup> συλλογής και απομάκρυνσης αερίου	0,372 \$/tn	0,262 \$/tn
Κατασκευή του συστήματος ανακύκλωσης και άντλησης των στραγγισμάτων	0,752 \$/tn	0,537 \$/tn
Κατασκευή του συνθετικού καλύμματος <sup>6</sup>	Χρησιμοποιήθηκε μόνο για το συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα, υποθέτουμε ότι δεν θα είναι απαραίτητο σε εμπορική εφαρμογή	Χρησιμοποιήθηκε μόνο για το συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα, υποθέτουμε ότι δεν θα είναι απαραίτητο σε εμπορική εφαρμογή
Σύστημα συλλογής δεδομένων και ελέγχου SCADA	0,409 \$/tn	0,291\$/tn
Συνολικά κόστη αρχικού κεφαλαίου	2,512 \$/tn	1,789 \$/tn

Σχεδιασμός όλων των συστημάτων	0,354 \$/tn	0,354 \$/tn
Αρχικό κόστος παρακολούθησης και καταγραφής	0,220 \$/tn	0,158 \$/tn
Κόστη λειτουργίας και παρακολούθησης για 5 χρόνια	0,460 \$/tn	0,460 \$/tn
Συνολικά επιπλέον κόστη	1,034 \$/tn	0,971 \$/tn
Συνολικό κόστος εφαρμογής	3,549 \$/tn	2,50 \$/tn

- <sup>1</sup> Υποθέσεις για τον υπολογισμό του κόστους βασίστηκαν στη συγκεκριμένη διαμόρφωση που είχαν τα απορρίμματα στο χώρο διάθεσής τους στην πολιτεία Υολο όπου το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος απορριμμάτων είναι 15,24 m. Εάν οι συνθήκες του χώρου επιτρέψουν μεγαλύτερα βάθη ταφής, τότε η μονάδα κόστους για τη λειτουργία βιοαντιδραστήρα θα μειωθεί σημαντικά.
- <sup>2</sup> Οι συνολικές ποσότητες απορριμμάτων που τοποθετήθηκαν στο βορειοανατολικό τμήμα ήταν 59.062 tn και το υπολογιζόμενο σύνολο των τόνων που θα τοποθετηθούν στο δυτικό τμήμα είναι 117.934 tn.
- <sup>3</sup> Η χωρητικότητα υπολογίστηκε στους 326.042 tn υποθέτοντας ότι όλος ο χώρος είναι πλήρως γεμισμένος και το βάθος απορριμμάτων είναι 15,24 m.
- <sup>4</sup> Το συνολικό κόστος των στρωμάτων κάλυψης των διαφόρων επιπέδων με χαλίκι και τεμαχισμένα πλαστικά αυτοκινήτων ήταν 321.000 \$. Το συνολικό κόστος της εσωτερικής επικάλυψης με μικτά υλικά ήταν 2.011.612 \$. Επειδή όλα αυτά απαιτούνται και σε συμβατικούς ΧΥΤΑ δεν είναι επιπλέον κόστος για την λειτουργία βιοαντιδραστήρα.
- <sup>5</sup> Το κόστος κατασκευής του συστήματος συλλογής και απομάκρυνσης αερίου σε ένα βιοαντιδραστήρα είναι το ίδιο με το κόστος σε συμβατικό ΧΥΤΑ και υπολογίστηκε σε 1,48 \$/m<sup>2</sup>.
- <sup>6</sup> Επειδή το συνδετικό κάλυμμα απαιτείται για την τελική κάλυψη του χώρου ανεξάρτητα αν λειτουργεί βιοαντιδραστήρας, δεν υπολογίζονται κόστη εδώ.

#### 6.4.1.2 Δυνατότητα εφαρμογής και σε άλλους χώρους

Τα κόστη σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας του χώρου διάθεσης των απορριμμάτων της κομητείας του Υολο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθούν τα κόστη για άλλες εφαρμογές εμπορικής κλίμακας. Το βορειοανατολικό αναερόβιο κελί έχει χωρητικότητα  $M_{w1} = 59.062$  tn, ενώ το δυτικό αναερόβιο κελί έχει χωρητικότητα  $M_{w2} = 127.005$  tn. Για το σύνολο των τριών κελιών η υπολογισμένη χωρητικότητα απορριμμάτων είναι  $M_{w \text{ total}} = 326.042$  tn.

Επισημαίνεται ότι για την ανάλυση του κόστους, οποιαδήποτε μέθοδος και εάν εφαρμοστεί, το μεγαλύτερο κόστος ενός ΧΥΤΑ δαπανάται στην περιβαλλοντολογική προστασία. Το κόστος δεν εξαρτάται από την τυχόν εφαρμογή εμπλουτισμού με βιοαέριο ή όχι. Για παράδειγμα, τα κοινά κόστη μεταξύ παραδοσιακής και σύγχρονης μεθόδου εμπλουτισμού είναι:

- Ένα σύστημα επικάλυψης πυθμένα και ένα σύστημα συλλογής στραγγισμάτων και απομάκρυνσης,
- Τελική κάλυψη των απορριμμάτων με ένα κάλυμμα χαμηλής διαπερατότητας,
- Η εγκατάσταση ενός συστήματος ανάκτησης βιοαερίου και
- Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της εγκατάστασης

Αν αφαιρέσουμε τα κόστη που σχετίζονται με το σύνθετο κάλυμμα πυθμένα, τα στρώματα μεταξύ των επιπέδων, το τελικό κάλυμμα και ένα μέρος του κόστους του συστήματος συλλογής και απομάκρυνσης βιοαερίου, που θα είχε κατασκευαστεί επίσης σε συμβατικό ΧΥΤΑ, καταλήγουμε στο πραγματικό κόστος λειτουργίας ενός αναερόβιου βιοαντιδραστήρα.

#### 6.4.1.3. Εκτιμώμενο κέρδος βασιζόμενο στην ανάκτηση κενού όγκου

Η καθίζηση που παρατηρείται στο ΧΥΤΑ έχει ως αποτέλεσμα την ανάκτηση ωφέλιμου χώρου. Ο ανακτημένος αυτός χώρος είναι διαθέσιμος για επιπλέον τοποθέτηση απορριμμάτων. Με βάση τα αποτελέσματα μιας προηγούμενης πιλοτικής εφαρμογής, υπολογίζεται ότι ο βαθμός ανάκτησης χώρου είναι 15% μέσα σε διάστημα 5 ετών λειτουργίας.

Για την έκταση  $S_{total}$  των 49.000 m<sup>2</sup> και υποθέτοντας ότι το βάθος απορριμμάτων  $d_w$  είναι 15,24 m, τότε ο εκτιμώμενος όγκος  $V_{total}$  είναι περίπου 588.000 m<sup>3</sup>. Υποθέτοντας 15% ανάκτηση όγκου σε 5 έτη λειτουργίας, ο ανακτώμενος χώρος θα είναι 88.200 m<sup>3</sup>. Το βάρος των απορριμμάτων για τον παραπάνω όγκο είναι:

$$B = A_1 \cdot \rho_w \cdot r \quad (11)$$

$$B = (88.200 \text{ m}^3) \times (655 \text{ Kg/m}^3) \times (10^{-3} \text{ tn/Kg}) \times 4/5 = 46.220 \text{ tn}$$

$A_1$ : επιπλέον ωφέλιμος χώρος απόθεσης

$\rho_w$ : Πυκνότητα απορριμμάτων

$r$ : Λόγος καθαρών απορριμμάτων

Υποθέσεις:

Πυκνότητα απορριμμάτων: 655 Kg/m<sup>3</sup>

Αναλογία απορριμμάτων εδάφους: 4:1

Με την απόθεση επιπλέον απορριμμάτων στον ίδιο όγκο ελεύθερου χώρου, τα κόστη του Χ.Υ.Τ.Α όπως η κατασκευή επικάλυψης, οι ενέργειες σφράγισης του και ανάπλασης και τα κόστη μεταφοράς μπορούν να αποφευχθούν ή τουλάχιστον να καθυστερήσουν. Ένα μέρος του κόστους από το υπάρχον απόθεσης απορριμμάτων  $c_{land}$  που είναι 39.68 \$/tn, μπορεί να μετατραπεί με την λειτουργία βιοαντιδραστήρα σε 26,69 \$/tn. Έτσι από το χώρο ανάκτησης λόγω του βιοαντιδραστήρα το κέρδος είναι:

$$P_{air} = B \cdot (c_{land} - c_{anaerob}) \quad (12)$$

όπου:

$P_{air}$ : κέρδος από την επιπλέον καθίζηση για αναερόβιο βιοαντιδραστήρα

$c_{land}$ : κόστος απόθεσης απορριμμάτων για συμβατικό ΧΥΤΑ.

$c_{anaerob}$ : κόστος απόθεσης απορριμμάτων για αναερόβιο βιοαντιδραστήρα.

Για να υπολογίσουμε το κέρδος ανά τόνο συνολικών απορριμμάτων έχουμε:

$$P_{air/tn} = P_{air} / M_{total} \quad (13)$$

όπου:

$P_{air/tn}$ : κέρδος από την επιπλέον καθίζηση για αναερόβιο βιοαντιδραστήρα ανά tn.

$$P_{air/tn}: (600.398 \$)/(326.042 \text{ tn})=1,841 \$/tn$$

#### 6.4.1.4. Εκτιμώμενο κέρδος βασιζόμενο στην ανάκτηση βιοαερίου

Το βιοαέριο που παράγεται στα ΧΥΤΑ ανακτάται και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας, αποτελεί μια επιπλέον πηγή εσόδων. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι οι αυξημένοι ρυθμοί ανάκτησης βιοαερίου που σχετίζονται με την λειτουργία βιοαντιδραστήρα

και μπορεί να μειωθεί σημαντικά η ποσότητα μεθανίου που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Το μεθάνιο όπως έχει αναφερθεί είναι πολύ βλαβερό για το περιβάλλον. Με βάση τα αποτελέσματα της εφαρμογής σε πιλοτική κλίμακα, ο ρυθμός ανάκτησης μεθανίου  $R_{CH_4}$  που αναμένεται είναι  $0,0936 \text{ m}^3/\text{Kg}$  στεγνού απορρίμματος μέσα σε 5 έτη λειτουργίας. Αν όλη η έκταση των  $49.000 \text{ m}^2$  πληρωθεί με απορρίματα η συνολική χωρητικότητα θα είναι:

$M_{\text{total mix}} = 326.042 \text{ tn}$  απορριμμάτων +  $48.900 \text{ tn}$  φυσικών πρώτων υλών για καθημερινή κάλυψη των στρωμάτων =  $374.940 \text{ tn}$ . Υποθέτοντας ότι τα απορρίματα έχουν αρχικό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας 20%, το σύνολο των στεγνών απορριμμάτων θα είναι  $300.000 \text{ tn}$ . Ανάγοντάς το σε παραγωγή μεθανίου για 5 έτη ανά ώρα έχουμε:

$$R_{CH_4 \text{ per hr}} = M_{\text{dry}} \cdot R_{CH_4} \quad (14)$$

όπου:

$R_{CH_4 \text{ per hr}}$ : ο ρυθμός ανάκτησης μεθανίου ανά ώρα

$R_{CH_4}$ : ο ρυθμός ανάκτησης μεθανίου ανά βάρος ξηρών απορριμμάτων

$$(300.000 \text{ tn}) \times (1.000 \text{ Kg/tn}) \times (0,0936 \text{ m}^3/\text{Kg}) \times (1/5 \text{ έτη}^{-1}) \times (1/365 \text{ έτη} / \text{μέρες}) \times (1/24 \text{ μέρες} / \text{ώρες}) = 641,1 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Το ποσό θερμικής ενέργειας από το αέριο μεθάνιο υπολογίζεται περίπου στα  $31.784 \text{ BTU/m}^3$  μεθανίου.

$$E_{\text{th per hr}} = R_{CH_4 \text{ per hr}} \cdot E_{\text{th}} \quad (15)$$

όπου:

$E_{\text{th per hr}}$ : ανακτώμενη θερμική ενέργεια μεθανίου ανά ώρα

$E_{\text{th}}$ : ανακτώμενη θερμική ενέργεια μεθανίου

$$(641,1 \text{ m}^3/\text{hr}) \times (31.784 \text{ BTU/m}^3) = 20.377.000 \text{ BTU/hr}$$

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θερμική  $R_{el}$  υπολογίζεται στα  $12.500 \text{ BTU/KWhr}$ .

$$E_{\text{el per hr}} = E_{\text{th per hr}} / R_{el} \quad (16)$$

όπου:

$E_{\text{el per hr}}$ : ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια μεθανίου ανά ώρα

$R_{el}$ : ρυθμός μετατροπής θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική

$$(20.377.000 \text{ BTU/hr}) / (12.500 \text{ BTU/KWhr}) = 1.631 \text{ KWhr}$$

Συγκρίνοντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με αυτή ενός συμβατικού ΧΥΤΑ (ξηρής ταφής) με άριστο σύστημα ανάκτησης βιοαερίου έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

Υπόθεση: ο ρυθμός ανάκτησης μεθανίου  $R_{CH}$  που αναμένεται είναι  $0,038 \text{ m}^3/\text{Kg}$  στεγνού απορρίμματος μέσα σε 5 έτη λειτουργίας.

$$E_{\text{land per hr}} = E_{\text{el per hr}} \cdot R_{CH4 \text{ land}} / R_{CH4} \quad (17)$$

όπου:

$E_{\text{land per hr}}$ : ανακτώμενη ηλεκτρική ενέργεια μεθανίου ανά ώρα συμβατικού ΧΥΤΑ

$R_{CH4land}$ : ο ρυθμός ανάκτησης μεθανίου ανά βάρος ξηρών απορριμμάτων συμβατικού ΧΥΤΑ

$$(1.631 \text{ KWhr}) \times [(0,038 \text{ m}^3/\text{Kg}) / (0,0936 \text{ m}^3/\text{Kg})] = 662 \text{ KWhr}$$

Συγκρίνοντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με αυτή ενός συμβατικού Χ.Υ.Τ.Α (ξηρής ταφής) με φτωχό σύστημα ανάκτησης βιοαερίου έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

Υπόθεση: ο ρυθμός ανάκτησης μεθανίου  $R_{el}$  που αναμένεται είναι  $0.01874 \text{ m}^3/\text{Kg}$  στεγνού απορρίμματος μέσα σε 5 χρόνια λειτουργίας.

$$(1631 \text{ KWhr}) \times [(0.01874 \text{ m}^3/\text{Kg}) / (0.0936 \text{ m}^3/\text{Kg})] = 326 \text{ KWhr}$$

Ένα παράδειγμα υπολογισμού για τα πιθανά έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας για το κελί του βιοαντηδραστήρα με ενδεικτική τιμή  $0,03 \text{ \$/KWhr}$  για διάστημα 5 ετών είναι:

$$(1.631 \text{ KWhr}) \times (24 \text{ hr}) \times (365 \text{ μέρες} / \text{έτος}) \times (5 \text{ έτη}) \times (0,03 \text{ \$/KWhr}) = 2.143.134 \text{ \$}$$

Συγκεντρωτικά, τα πλεονεκτήματα από τη αυξημένη παραγωγή και ανάκτηση βιοαερίου δίνονται στον παρακάτω Πίνακα<sup>1</sup>.

**Πίνακας 4.** Παραγωγή βιοαερίου και πλεονεκτήματα ανάκτησης (Yazdani *et al.*, 2002).

	Αναερόβιος βιοαντιδραστήρας	Συμβατικός ΧΥΤΑ (ξηρής ταφής) με άριστο σύστημα* ανάκτησης βιοαερίου	Συμβατικός ΧΥΤΑ (ξηρής ταφής) με φτωχό σύστημα ανάκτησης βιοαερίου
Μέσος ρυθμός ανάκτησης αερίου (για 5 έτη)	641,1 m <sup>3</sup> /hr	260,3 m <sup>3</sup> /hr	128,4 m <sup>3</sup> /hr
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	1.631 KWhr	662 KWhr	326 KWhr
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (0,01 \\$/KWhr)	714.378 \\$	289.956 \\$	142.788 \\$
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (0,03 \\$/KWhr)	2.143.134 \\$	869.868 \\$	428.364 \\$
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (0,05\\$/KWhr)	3.571.890 \\$	1.449.780 \\$	713.940 \\$

Για να υπολογίσουμε το κέρδος ανά βάρος συνολικών απορριμμάτων στην περίπτωση πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας  $P_{el}$  με τιμή (0,01 \\$/KWhr) έχουμε:

$$P_{el} = (714.378 \text{ \$}) / (326.042 \text{ tn}) = 2,19 \text{ \$/tn}$$

<sup>1</sup> Τα δεδομένα βασίζονται σε πιλοτική εφαρμογή και στην υπόθεση ότι η άριστη ανάκτηση βιοαερίου μπορεί να επιτευχθεί χωρίς τη χρήση συνθετικού καλύμματος αλλά με την εγκατάσταση επιπλέον πηγαδιών συλλογής αερίου.

#### 6.4.1.5. Εκτιμώμενο κέρδος βασισμένο στη μείωση εξόδων συντήρησης μετά το κλείσιμο

Ένα από τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας ενός βιοαντιδραστήρα είναι η μείωση των απαιτήσεων για την συντήρηση μετά το κλείσιμο σε σύγκριση με ένα παραδοσιακό ΧΥΤΑ. Με τη γρήγορη αποσύνθεση των απορριμμάτων (5 -10 έτη) και την δημιουργία μιας σταθερής μάζας απορριμμάτων (πιθανότητα ενώ ακόμα ο ΧΥΤΑ λειτουργεί) μειώνονται οι απαιτήσεις για τη συντήρηση μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ. Παρόλο που πιστεύεται ότι μια σημαντική μείωση του κόστους είναι εφικτή, είναι μη ρεαλιστικό να υποθεθεί ότι δεν θα υπάρξουν έξοδα για μια περίοδο 30 ετών μετά το κλείσιμο. Τα απορρίμματα θεωρείται ότι θα σταθεροποιηθούν και όλες οι ενέργειες θα πραγματοποιηθούν μέσα σε 10 έτη, ενώ θεωρείται ότι θα υπάρξει μείωση των εξόδων κατά 2/3 (από 30 έτη σε 10 έτη).

Στην εφαρμογή για τον κεντρικό ΧΥΤΑ της πολιτείας του Υολο το κόστος μετά το κλείσιμο  $C_{cl}$  ήταν 9.379.225 \$. Ο υπολογιζόμενος όγκος απορριμμάτων  $V_{total}$  αυτής της εφαρμογής ήταν 15.275.180 m<sup>3</sup>.

$$c_{cl \text{ per } V} = C_{cl} / V_{total} \quad (18)$$

όπου:

$c_{cl \text{ per } V}$ : κόστος συντήρησης ανά m<sup>3</sup>  
 $C_{cl}$ : το συνολικό κόστος μετά το κλείσιμο  
 $V_{total}$ : συνολικός όγκος απορριμμάτων

$$c_{cl \text{ per } V} = (9.379.225 \$) / (15.275.180 \text{ m}^3) = 0,614 \$/\text{m}^3$$

Ο εκτιμώμενος όγκος απορριμμάτων για τη συνολική έκταση των 49.000 m<sup>2</sup> είναι περίπου 588.000 m<sup>3</sup>

Υπολογίζοντας τα έξοδα για αυτόν τον όγκο απορριμμάτων έχουμε :

$$C_{maint} = V_{total} \cdot c_{cl \text{ per } V} \quad (19)$$

όπου:

$C_{maint}$ : κόστος συντήρησης αναερόβιου βιοαντιδραστήρα  
 $V_{total}$ : όγκος απορριμμάτων για έκταση 39000 m<sup>3</sup>

$$\text{Υπόθεση: } V_{total} = 588.000 \text{ m}^3$$

$$C_{maint} = (588.000 \text{ m}^3) \times (0,614 \$/\text{m}^3) = 361.032 \$$$

Υποθέτοντας ότι τα κόστη συντήρησης μετά το κλείσιμο μειώνονται κατά 2/3 (από 30 σε 10 έτη), το κόστος κλεισίματος του βιοαντιδραστήρα υπολογίζεται:

$$C_{cl} = (361.032 \$) / 3 = 120.344 \$$$

όπου:

$C_{cl}$ : κόστος κλεισίματος του βιοαντιδραστήρα

Για να υπολογίσουμε το κέρδος ανά βάρος συνολικών απορριμμάτων έχουμε:

$$P_{\text{per tn}} = (C_{maint} - C_{cl}) / M_{total} \quad (20)$$

όπου:

$P_{\text{per tn}}$ : κέρδος ανά βάρος συνολικών απορριμμάτων

$$P_{\text{per tn}} = [(361.032 \$) - (120.344 \$)] / (326.042 \text{ tn}) = 0,74 \$/\text{tn}$$

#### 6.4.1.6. Εξοικονόμηση από την επεξεργασία των στραγγισμάτων

Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων ενός ΧΥΤΑ έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία στραγγισμάτων με μειωμένο μολυσματικό φορτίο. Το πλεονέκτημα της μεθόδου ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένα έξοδα για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ή να αποκλείσει την αναγκαιότητα για σύστημα προεπεξεργασίας στραγγισμάτων τα οποία θα διοχετεύονταν σε μονάδα βιολογικού καθαρισμού. Επιπλέον, η χρήση του ΧΥΤΑ για αποθήκευση των στραγγισμάτων μπορεί να εξισορροπήσει τη ροή των στραγγισμάτων ώστε η διάθεσή τους να έχει ένα σχετικά σταθερό ρυθμό ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους επεξεργασίας τους και τη μείωση της ανάγκης κατασκευής αποθηκευτικών χώρων. Βασισμένη στο προηγούμενο πιλοτικό πρόγραμμα που εφαρμόστηκε στον κεντρικό ΧΥΤΑ της πολιτείας του Yolo, η απαραίτητη ποσότητα προστιθέμενου υγρού για τη βέλτιστη λειτουργία του ΧΥΤΑ είναι περίπου:

$$V_{\text{liq per tn}} = 114 \text{ έως } 190 \text{ L/tn απορριμμάτων.}$$

Με υπολογισμένη ποσότητα απορριμμάτων και φυσικών πρώτων υλών για καθημερινή κάλυψη των στρωματώσεων  $M_{\text{total mix}} = 374.940 \text{ tn}$  ο όγκος του υγρού  $V_{\text{liq}}$  που απαιτείται για την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας (για απορρόφηση  $V_{\text{liq per tn}} = 114 \text{ L/tn}$ ) είναι  $46.930.215 \text{ L}$ . Το υγρό θα αξιοποιηθεί στην διαδικασία της αναερόβιας αποικοδόμησης. Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα νερού για παραγωγή μεθανίου είναι  $M_{\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4} = 0,19 \text{ Kg/m}^3$  και ο μέσος ρυθμός παραγωγής μεθανίου  $R_{\text{CH}_4\text{per hr}} = 641,1 \text{ m}^3/\text{hr}$ . Σε διάστημα 5 ετών η ποσότητα νερού  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  που απαιτείται είναι:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4} \cdot R_{\text{CH}_4\text{per hr}} \quad (21)$$

όπου:

$M_{\text{H}_2\text{O}}$ : απαιτούμενη ποσότητα νερού σε διάστημα 5 ετών

$M_{\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4}$ : χρησιμοποιούμενη ποσότητα νερού για παραγωγή μεθανίου ( $\text{Kg/m}^3$ )

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = (0,19 \text{ Kg/m}^3) \times (641,1 \text{ m}^3/\text{hr}) \times (24 \text{ hr}) \times (365 \text{ μέρες / έτος}) \times (5 \text{ έτη}) = 5.335.234 \text{ Kg.}$$

Ο όγκος αυτής της ποσότητας νερού (όπου πυκνότητα νερού  $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$ ) είναι  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 5.335,2 \text{ m}^3$ . Το κόστος διάθεσης των στραγγισμάτων  $c_{\text{leact}}$  είναι  $9,24 \text{ \$/m}^3$ <sup>(2)</sup> άρα το εκτιμώμενο κέρδος από την αποφυγή διάθεσης των στραγγισμάτων είναι:

$$P_{\text{leacht}} = c_{\text{leact}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (22)$$

όπου:

$P_{\text{leacht}}$ : εκτιμώμενο κέρδος από την αποφυγή διάθεσης των στραγγισμάτων

$c_{\text{leact}}$ : κόστος διάθεσης των στραγγισμάτων

$V_{\text{H}_2\text{O}}$ : όγκος της απαιτούμενης ποσότητας νερού σε διάστημα 5 ετών

<sup>2</sup> Το κόστος που καταγράφηκε για την πολιτεία του Σακραμέντο στον ΧΥΤΑ ήταν  $18,5 \text{ \$/m}^3$ . Για συντηρητικό υπολογισμό υποθέτουμε τη μισή αξία, δηλαδή  $9,24 \text{ \$/m}^3$ .

$$P_{\text{leacht}} = (9,24 \text{ \$/m}^3) \times (5.335,2 \text{ m}^3) = 49.297 \text{ \$}$$

Για να υπολογίσουμε το κέρδος ανά βάρος συνολικών απορριμμάτων έχουμε:

$$P_{\text{leacht per w}} = P_{\text{leacht}} / M_{\text{w total}} \quad (23)$$

όπου:

$P_{\text{leacht per w}}$ : το κέρδος ανά βάρος συνολικών απορριμμάτων από την αποφυγή διάθεσης των στραγγισμάτων

$$P_{\text{leacht per w}} = (49.297 \text{ \$}) / (326.042 \text{ tn}) = 0,15 \text{ \$/tn}$$

## 6.4.2. Αερόβιος βιοαντιδραστήρας

### 6.4.2.1 Κόστη σχεδιασμού ελέγχου και λειτουργίας

Εξαιτίας του αρχικού σταδίου λειτουργίας του νοτιοανατολικού αερόβιου κελιού, η πλειοψηφία των εξόδων που δαπανήθηκαν είναι για το σχεδιασμό, την κατασκευή και το ξεκίνημα λειτουργίας του συστήματος. Για να λειτουργήσει το σύστημα πλήρως απαιτείται ολοκλήρωση του σταθμού φυσητήρων και του βιοφίλτρου. Το κόστος έχει υπολογισθεί και έχει αναχθεί για έκταση  $S_{\text{total}} = 49.000 \text{ m}^2$ . Το λειτουργικό κόστος ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα είναι 5,85 \\$/ton.

### 6.4.2.2. Δυνατότητα εφαρμογής και σε άλλους χώρους

Τα κόστη σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας του χώρου διάθεσης των απορριμμάτων της κομητείας του Υolo μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθούν τα κόστη για άλλες εφαρμογές εμπορικής κλίμακας. Τα συνολικά απορρίμματα που τοποθετήθηκαν στο νοτιοανατολικό αερόβιο κελί είναι  $M_{\text{w}3} = 10.832 \text{ tn}$ . Η δυναμικότητα για την συγκεκριμένη έκταση των 49.000 m<sup>2</sup> υπολογίζεται σε  $M_{\text{w total}} = 326.042 \text{ tn}$ .

Για σύγκριση με τις τεχνικές του παραδοσιακού ΧΥΤΑ πολλά από τα μεγέθη που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα δεν περιλαμβάνονται στον υπολογισμό του κόστους του βιοαντιδραστήρα.

Για την ανάλυση του κόστους, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, ανεξάρτητα της μεθόδου που πρόκειται να εφαρμοστεί, το μεγαλύτερο κόστος ενός ΧΥΤΑ δαπανάται στην περιβαλλοντική προστασία. Το κόστος δεν εξαρτάται από την τυχόν εφαρμογή εμπλουτισμού με βιοαέριο ή όχι. Για παράδειγμα, τα κοινά κόστη μεταξύ παραδοσιακής και σύγχρονης μεθόδου εμπλουτισμού είναι:

- Ένα σύστημα επικάλυψης πυθμένα και ένα σύστημα συλλογής στραγγισμάτων και απομάκρυνσης τους
- Τελική κάλυψη των απορριμμάτων με ένα κάλυμμα χαμηλής διαπερατότητας
- Η εγκατάσταση ενός συστήματος ανάκτησης βιοαερίου
- Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της εγκατάστασης

Αν αφαιρέσουμε τα κόστη που σχετίζονται με το σύνθετο κάλυμμα πυθμένα, τα στρώματα αερισμού μεταξύ των επιπέδων, το τελικό κάλυμμα και ένα μέρος του κόστους του συστήματος συλλογής και απομάκρυνσης βιοαερίου, που θα είχε κατασκευαστεί επίσης σε παραδοσιακό ΧΥΤΑ, καταλήγουμε στο πραγματικό κόστος λειτουργίας ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα.

**Πίνακας 5.** Εκτιμώμενο κέρδος από την λειτουργία αερόβιου αντιδραστήρα (Yazdani *et al.*, 2002).

Περιγραφή	Κόστος/tn αερόβιου αντιδραστήρα έκτασης 10.118 m <sup>2</sup> και 10,83 tn απορριμμάτων	Κόστος/tn αερόβιου αντιδραστήρα έκτασης 48.564 m <sup>2</sup> και 326.042 tn απορριμμάτων <sup>1</sup>
Κατασκευή σύνθετης μεμβράνης κάλυψης και στρώματος τεμαχισμένων ελαστικών αυτοκινήτων <sup>2</sup>	Δεν υπάρχει επιπλέον κόστος για την λειτουργία του βιοαντιδραστήρα	Δεν υπάρχει επιπλέον κόστος για την λειτουργία του βιοαντιδραστήρα
Κατασκευή δευτερεύοντος σύνθετης μεμβράνης κάλυψης και στρώματος τεμαχισμένων ελαστικών αυτοκινήτων <sup>3</sup>		
Κατασκευή συστήματος ελέγχου απορριμμάτων	5,67 \$/tn	0,904 \$/tn
Κατασκευή συστήματος συλλογής βιοαερίου συμπεριλαμβανοντας σωληνώσεις φυσητήρα και βιοφίλτρο <sup>4</sup>	13,54 \$/tn	1,764 \$/tn
Κατασκευή συστήματος ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων / άντλησης	7,43 \$/tn	1,185 \$/tn
Σύστημα συλλογής δεδομένων και ελέγχου	5,16 \$/tn	0,824 \$/tn
<i>Συνολικό κόστος αρχικού κεφαλαίου</i>	31,815 \$/tn	4,678 \$/tn
Σχεδιασμός όλων των συστημάτων	0,143 \$/tn	0,143 \$/tn
Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος για φυσητήρα	1,69 \$/tn	0,280 \$/tn
Αρχικό κόστος παρακολούθησης και καταγραφής	2,19 \$/tn	0,349 \$/tn
Κόστη λειτουργίας και παρακολούθησης για ένα χρόνο	2,77 \$/tn	0,184 \$/tn
<i>Συνολικά επιπλέον κόστη</i>	6,800 \$/tn	0,957 \$/tn
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ</b>	<b>38,61 \$/tn</b>	<b>5,63 \$/tn</b>

<sup>1</sup> Η χωρητικότητα υπολογίστηκε στους 326.042 tn υποθέτοντας ότι όλος ο χώρος είναι πλήρως γεμισμένος και το βάθος απορριμμάτων είναι 15,24 m.

<sup>2</sup> Το συνολικό κόστος των στρωμάτων κάλυψης των διαφόρων επιπέδων με χαλίκι και τεμαχισμένα πλαστικά αυτοκινήτων ήταν 321.000 \$. Το συνολικό κόστος της εσωτερικής επικάλυψης με μικτά υλικά ήταν 2.011.612 \$. Επειδή όλα αυτά απαιτούνται και σε συμβατικούς ΧΥΤΑ δεν είναι επιπλέον κόστος για την λειτουργία βιοαντιδραστήρα.

<sup>3</sup> Το συνολικό κόστος των στρωμάτων κάλυψης των διαφόρων επιπέδων με χαλίκι και τεμαχισμένα πλαστικά αυτοκινήτων ήταν 321.000 \$. Το συνολικό κόστος της εσωτερικής επικάλυψης με μικτά υλικά ήταν 2.011.612 \$. Επειδή όλα αυτά απαιτούνται και σε συμβατικούς ΧΥΤΑ δεν είναι επιπλέον κόστος για την λειτουργία βιοαντιδραστήρα.

<sup>4</sup> Το κόστος κατασκευή του συστήματος συλλογής και απομάκρυνσης αερίου σε ένα βιοαντιδραστήρα είναι το ίδιο με το κόστος σε συμβατικό ΧΥΤΑ και υπολογίστηκε σε 1,48 \$/m<sup>2</sup>.

#### 6.4.2.3. Εκτιμώμενο κέρδος βασισμένο στην ανάκτηση κενού όγκου

Ο εκτιμώμενος όγκος για την έκταση των 49.000 m<sup>2</sup> είναι περίπου  $V_{total} = 588.000 \text{ m}^3$ . Υποθέτοντας 30% ανάκτηση όγκου σε 1 χρόνο λειτουργίας, ο ανακτώμενος χώρος θα είναι

176.400 m<sup>3</sup>. Το βάρος των απορριμμάτων για τον παραπάνω όγκο είναι σύμφωνα τη σχέση (11):

$$B = (176.400 \text{ m}^3) \times (655 \text{ Kg/m}^3) \times (10^{-3} \text{ tn/Kg}) \times 4/5 = 92.434 \text{ tn}$$

Υποθέσεις:

Πυκνότητα απορριμμάτων = 655 Kg/m<sup>3</sup>

Αναλογία απορριμμάτων εδάφους = 4:1

Με την απόθεση επιπλέον απορριμμάτων στον ίδιο όγκο ελεύθερου χώρου, τα κόστη του ΧΥΤΑ όπως η κατασκευή επικάλυψης και οι ενέργειες σφράγισης του και ανάπλασης και τα κόστη μεταφοράς μπορούν να αποφευχθούν ή τουλάχιστον να καθυστερήσουν. Ένα μέρος του κόστους από το υπάρχον απόθεσης απορριμμάτων  $c_{land}$  που είναι 39,68 \$/ton, μπορεί να μετατραπεί με την λειτουργία βιοαντιδραστήρα σε 26,69 \$/tn. Έτσι, από το χώρο ανάκτησης λόγω του βιοαντιδραστήρα το κέρδος υπολογίζεται από τη σχέση (12) και είναι  $P_{air} = 1.200.718$  \$. Για τον υπολογισμό του κέρδους ανά βάρος συνολικών απορριμμάτων έχουμε:  $P_{air/tn} = (1.200.718 \text{ \$}) / (326.042 \text{ tn}) = 3,68 \text{ \$/tn}$  (13)

#### 6.4.2.4. Εκτιμώμενο κέρδος βασισμένο στη μείωση εξόδων συντήρησης μετά το κλείσιμο

Ένα από τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας ενός βιοαντιδραστήρα, σε σύγκριση με ένα παραδοσιακό ΧΥΤΑ, είναι η μείωση των απαιτήσεων για τη συντήρηση μετά το κλείσιμο. Με τη γρήγορη αποσύνθεση των απορριμμάτων (5-10 έτη) και τη δημιουργία μιας σταθερής μάζας απορριμμάτων (πιθανότατα ενώ ακόμα ο ΧΥΤΑ λειτουργεί) μειώνονται οι απαιτήσεις για τη συντήρηση μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ. Παρόλο που πιστεύουμε ότι μια σημαντική μείωση του κόστους είναι εφικτή, είναι μη ρεαλιστικό να υποθέσουμε ότι δεν θα υπάρξουν καθόλου έξοδα για μια περίοδο 30 ετών μετά το κλείσιμο. Υποθέτουμε ότι τα απορρίμματα θα σταθεροποιηθούν και όλες οι ενέργειες θα πραγματοποιηθούν μέσα σε 5 έτη καθώς και τη μείωση των εξόδων κατά 5/6 (από 30 έτη σε 5 έτη).

Στην εφαρμογή για τον κεντρικό ΧΥΤΑ της πολιτείας του Υολο το κόστος μετά το κλείσιμο  $C_{cl}$  ήταν 9.379.225 \$. Ο υπολογιζόμενος όγκος  $V_{2total}$  αυτής της εφαρμογής ήταν 15.275.180 m<sup>3</sup>. Αυτό ισοδυναμεί με κόστος συντήρησης ανά όγκο απορριμμάτων  $c_{cl \text{ per } V} = 0,614 \text{ \$/m}^3$  (18)

Ο εκτιμώμενος όγκος για τη συνολική έκταση των 49.000 m<sup>2</sup> είναι περίπου 588.000 m<sup>3</sup>

Υπολογίζοντας τα έξοδα για αυτόν τον όγκο απορριμμάτων από τη σχέση (19) έχουμε:

$$C_{maint} = (588.000 \text{ m}^3) \times (0,614 \text{ \$/m}^3) = 361.032 \text{ \$}$$

Υποθέτοντας ότι τα κόστη συντήρησης μετά το κλείσιμο μειώνονται κατά 5/6 (από 30 σε 5 έτη), το κόστος κλεισίματος του βιοαντιδραστήρα υπολογίζεται σε:

$$C_{cl} = (361.032 \text{ \$}) / 6 = 60.172 \text{ \$}$$

Για να υπολογίσουμε το κέρδος ανά βάρος συνολικών απορριμμάτων από τη σχέση (20) έχουμε:

$$P_{per \text{ tn}} = [(361.032 \text{ \$}) - (60.172 \text{ \$})] / (326.042 \text{ tn}) = 0,92 \text{ \$/tn}$$

#### 6.4.2.5. Εξοικονόμηση από την επεξεργασία των στραγγισμάτων

Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων ενός ΧΥΤΑ έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία στραγγισμάτων με μειωμένο μολυσματικό φορτίο. Το πλεονέκτημα αυτό της μεθόδου ανακυκλοφορίας μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένα έξοδα για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων ή να αποκλείσει την αναγκαιότητα για σύστημα προεπεξεργασίας στραγγισμάτων, τα οποία θα διοχετεύονταν σε μονάδα βιολογικού καθαρισμού. Επιπλέον, η χρήση του ΧΥΤΑ για αποθήκευση των στραγγισμάτων μπορεί να εξισορροπήσει τη ροή των

στραγγισμάτων ώστε η διάθεση τους να έχει ένα σχετικά σταθερό ρυθμό ροής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους επεξεργασίας τους και την μείωση της ανάγκης κατασκευής αποθηκευτικών χώρων.

Βάση του προηγούμενου πιλοτικού προγράμματος που εφαρμόστηκε στο κεντρικό ΧΥΤΑ της πολιτείας του Υολο, η ποσότητα της απαραίτητης προσθήκης υγρού για την βέλτιστη λειτουργία του ΧΥΤΑ είναι περίπου  $V_{\text{liq per tn}} = 114$  έως  $190$  L/tn απορριμμάτων. Με υπολογισμένη ποσότητα απορριμμάτων και φυσικών πρώτων υλών για καθημερινή κάλυψη των στρωματώσεων  $M_{\text{total mix}} = 374.940$  tn ο όγκος του υγρού  $V_{\text{liq}}$  που απαιτείται για την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας (για απορρόφηση  $V_{\text{liq per tn}} = 114$  L/tn) είναι  $46.930.215$  L. Ο όγκος αυτής της ποσότητας νερού είναι,  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 46.930$  m<sup>3</sup>. Το κόστος διάθεσης των στραγγισμάτων είναι  $9,24$  \$/m<sup>3</sup> <sup>(3)</sup> και άρα το εκτιμώμενο κέρδος από την αποφυγή διάθεσης των στραγγισμάτων είναι από τη σχέση (22),  $P_{\text{leacht}} = 433.635$  \$. Για να υπολογίσουμε το κέρδος ανά βάρος συνολικών απορριμμάτων έχουμε:

$$P_{\text{leacht per w}} = (433.635 \text{ \$}) / (326.042 \text{ tn}) = 1,33 \text{ \$/tn}$$

### 6.4.3 Εκτιμήσεις

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τα κόστη και τα κέρδη λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Όπως σε κάθε οικονομική ανάλυση, έπρεπε να γίνουν πολλές υποθέσεις, επομένως υπάρχει ένας βαθμός απόκλισης σχετικά με τα οικονομικά αποτελέσματα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο εκτιμώμενο κόστος του αερόβιου βιοαντιδραστήρα. Επειδή ο σταθμός του φυσητήρα και του βιοφίλτρου δεν είχαν κατασκευασθεί, ήταν απαραίτητο να γίνουν πολλές υποθέσεις για τα κόστη τους. Επιπλέον, καθώς η τεχνολογία του αερόβιου αντιδραστήρα είναι σχετικά καινούρια, υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στη συμπεριφορά των απορριμμάτων κατά την αερόβια διαδικασία αποικοδόμησης (το ποσοστό καθίζησης 30% είναι ρεαλιστικό για λειτουργία μεγάλης κλίμακας). Επίσης, ο ίδιος προβληματισμός ισχύει για τον όγκο του αέρα που απαιτείται για την αποικοδόμηση των απορριμμάτων (στοιχείο που θα έχει πολύ σημαντική επίδραση στον αριθμό των φυσητήρων και στις απαιτήσεις ανάλωσης ενέργειας).

**Πίνακας 6.** Αερόβιος και αναερόβιος βιοαντιδραστήρας αποτελέσματα για χώρο έκτασης  $49000\text{m}^2$  (Yazdani *et al.*, 2002).

	Αναερόβιος βιοαντιδραστήρας	Αερόβιος αντιδραστήρας
Συνολικό κόστος	2,50 \$/tn	5,36 \$/tn
Κέρδος από την ανάκτηση κενού χώρου	1,84 \$/tn	3,68 \$/tn
Κέρδος βασισμένο στη μείωση εξόδων συντήρησης μετά το κλείσιμο	0,74 \$/tn	0,92 \$/tn
Κέρδος από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	2,19 \$/tn	0 \$/tn
Εξοικονόμηση από την επεξεργασία των στραγγισμάτων	0,15 \$/tn	1,33 \$/tn

<sup>3</sup> Το κόστος που καταγράφηκε για την πολιτεία του Σακραμέντο στον ΧΥΤΑ ήταν  $18,48$  \$/m<sup>3</sup>. Για συντηρητικό υπολογισμό υποθέτουμε τη μισή αξία, δηλαδή  $9,24$  \$/m<sup>3</sup>.

Συνολικό κέρδος	4,92 \$/tn	5,93 \$/tn
Καθαρό κέρδος	2,42 \$/tn	0,3 \$/tn
Αναλογία κέρδος / κόστος	1,97	1,05

Η μελέτη αυτή έδειξε ότι η λειτουργία αναερόβιου αντιδραστήρα είναι οικονομικά εφικτή και επικερδής, ενώ για τη λειτουργία του αερόβιου αντιδραστήρα απαιτείται περισσότερη έρευνα ώστε να εκτιμηθεί αν είναι οικονομικά εφικτή λύση (Yazdani *et al.*, 2002).

## 6.5. Συμπεράσματα

Ο αναερόβιος βιοαντιδραστήρας αποτελεί αρχικά μία συμφέρουσα οικονομική λύση. Για να γίνει η τελική επιλογή της αποτελεσματικότερης μεθόδου εφαρμογής, είναι απαραίτητο να συνεκτιμηθούν και άλλοι παράγοντες όπως η προστασία του περιβάλλοντος.

## 6.6. Βιβλιογραφία

- Downey D.C., Pluhar C.J., Dudus L.A., Blystone P.G., Miller R.N., Lane G.L., and Taffinder S. (1994). Remediation of gasoline-contaminated soils using regenerative resin vapor treatment and in situ bioventing. In: *Proceedings of the Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals Ground Water: Prevention, Detection, and Restoration Conference* (November 10-12).
- Read A.D., Hudgins M., Harper S., Phillips P., and Morris J. (2000). The successful demonstration of aerobic landfilling. The potential for a more sustainable solid waste management approach, *Resour. Conserv. Recycl.*, 32: 133-143.
- US EPA (Environmental Protection Agency) (1995). *Principles and Practices of Bioventing*. Manual, Volume II: Bioventing Design, EPA/540/R-95/534a, 47-48.
- Yazdani R., Kieffer J., and 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 92695, 37-46.

## 7. Περιπτώσεις εφαρμογής (case studies)

**Μυρίλλα Αγγελική**

Πολιτικός Μηχανικός

**Κεανάκης Γεώργιος**

Χημικός Μηχανικός

### 7.1. Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται περιπτώσεις εφαρμογής (case studies) της μεθόδου βιοεξυγίανσης σε Χώρους Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΔΑ), με τις εξής πρακτικές: (α) Συστήματα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων και (β) Συνδυασμός συστημάτων ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων με μεθόδους αερόβιας βιοεξυγίανσης. Οι μέθοδοι αυτές έχουν περιγραφεί διεξοδικά στα Κεφάλαια 2 και 4 του παρόντος εγχειριδίου. Πρόκειται για μεθόδους που εφαρμόζονται αποτελεσματικά εδώ και αρκετά χρόνια σε ευρεία κλίμακα σε χώρους διάθεσης αστικών στερεών απορριμμάτων.

Οι περιπτώσεις που περιγράφονται στις επόμενες ενότητες επιλέχθηκαν λόγω της επιτυχούς εφαρμογής των μεθόδων, της μεγάλης κλίμακας εφαρμογής και της τυπικής σύστασης των αστικών απορριμμάτων που δέχονται. Επομένως, η εμπειρία που αποκτήθηκε από τις συγκεκριμένες εφαρμογές, που πραγματοποιήθηκαν σε ΧΔΑ και Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) στις Η.Π.Α. και τον Καναδά, μπορεί να αξιοποιηθεί σε ελληνικούς ΧΔΑ/ΧΥΤΑ που δέχονται ανάλογης σύστασης απορρίμματα. Συγκεκριμένα, περιγράφονται τέσσερις ΧΔΑ με συστήματα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων σε κελιά που λειτουργούν σαν αναερόβιοι βιοαντιδραστήρες και δύο ΧΔΑ με συστήματα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στα οποία έχουν ενσωματωθεί συστήματα αερόβιας βιοεξυγίανσης (κελιά που λειτουργούν σαν αερόβιοι βιοαντιδραστήρες).

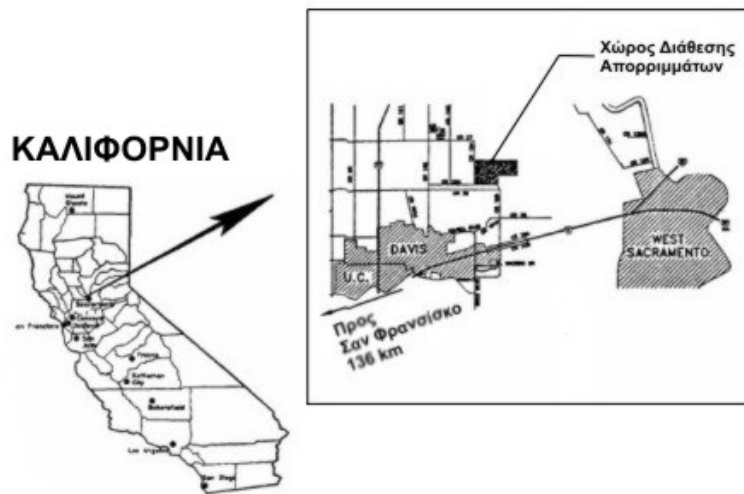
### 7.2. ΧΔΑ στην κομητεία του Yolo στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ: δυο αναερόβια και ένα αερόβιο τμήμα με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων

#### 7.2.1. Περιγραφή και σκοπός του έργου

Η κομητεία του Yolo και το Τμήμα Προγραμματισμού και Δημόσιων Έργων λειτουργεί τον ΧΔΑ της σε μια έκταση 80 στρεμμάτων κοντά στο Davis στην Καλιφόρνια ως ελεγχόμενο βιοαντιδραστήρα. Στην πρώτη φάση του έργου, κατασκευάστηκε ένα τμήμα 49 στρεμμάτων. Το τμήμα αυτό διαχωρίστηκε σε δύο επιμέρους εκτάσεις, 25 και 14 στρεμμάτων αντίστοιχα, που λειτουργούν αναερόβια, και σε ένα μέρος 10 στρεμμάτων, το οποίο λειτουργεί αερόβια (Εικ. 1). Η αρμόδια αρχή θα ολοκληρώσει τη δεύτερη φάση σε δύο έτη και ανάλογα με τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης, θα αποφασίσει εάν θα λειτουργήσει τη δεύτερη φάση αναερόβια είτε αερόβια.

### 7.2.2. Γεωγραφική περιοχή και περιγραφή της εγκατάστασης και των διαδικασιών

Ο ΧΔΑ της κομητείας του Yolo βρίσκεται στη διασταύρωση του δρόμου 104 και του δρόμου 28H, περίπου 3 χιλιόμετρα βορειοανατολικά της πόλης του Davis (Εικ. 2). Ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1975 για τη διάθεση μη-επικίνδυνων στερεών αποβλήτων, μπαζών και μη επικίνδυνων υγρών αποβλήτων. Οι υπάρχουσες διαδικασίες περιλαμβάνουν μια εγκατάσταση ηλικίας 30 ετών για την ανάκτηση και περισυλλογή μεθανίου, μια περιοχή συγκέντρωσης για τα ανακυκλώσιμα απορρίμματα, μια εγκατάσταση συλλογής και αποκατάστασης μετάλλων, μια μονάδα ανάκτησης βιομηχανικών αποβλήτων ξυλείας και ναυπηγείων και μια μονάδα ανακύκλωσης από σκυρόδεμα.



**Εικόνα 1.** Θέση της υπό μελέτης περιοχής (Recycling information for Davis California, 2005).

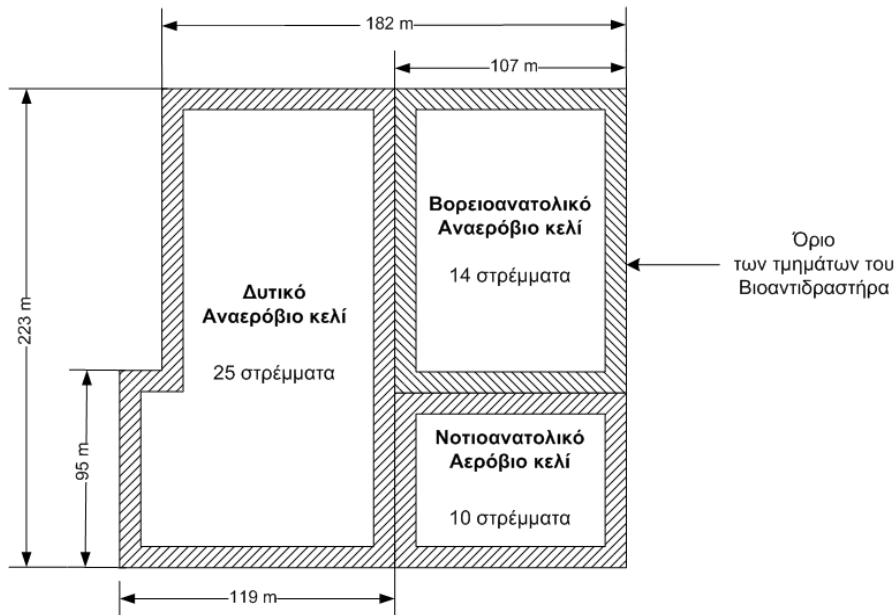


**Εικόνα 2.** ΧΔΑ του Yolo (Yazdani *et al.*, 2005).

Το επίπεδο της στάθμης του νερού κυμαίνεται από 1 έως 3 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια του χειμώνα και της άνοιξης, και από 1,5 έως 4,5 m κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Τον Ιανουάριο του 1989, η κομητεία του Yolo κατασκεύασε ένα

τοιχίο από χώμα και βεντονίτη με υδαρές κονίαμα για να αναχαιτίσει τη ροή υπόγειων νερών στην περιοχή του ΧΥΤΑ από το Βορρά. Ο τοίχος έχει συνολικό μήκος 1122 m, 878 m κατά μήκος της βόρειας πλευράς και 244 m κατά μήκος της δυτικής και μέγιστο βάθος 13,5 m. Το φθινόπωρο του 1990, άλλαξαν οι πρακτικές άρδευσης στα βόρεια της περιοχής του ΧΥΤΑ για να ελαχιστοποιηθεί η διήθηση του ύδατος. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν 16 φρεάτια άντλησης υπόγειων νερών νότια του τοιχίου, προκειμένου να χαμηλώσει η στάθμη του νερού νότια και ανατολικά, ώστε να έχουμε κάθετο χωρισμό μεταξύ της βάσης του ΧΥΤΑ και του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Πριν από την τοποθέτηση του τοιχίου και του συστήματος απομάκρυνσης του νερού, η κατεύθυνση της ροής των υπόγειων νερών ήταν προς τα νοτιοανατολικά. Υπό τους τρέχοντες όρους απομάκρυνσης νερού, οι πορείες της ροής των υπόγειων νερών είναι προς τα φρεάτια άντλησης που βρίσκονται κατά μήκος της δυτικής πτέρυγας του βόρειου τμήματος της εγκατάστασης. Στην πραγματικότητα, δημιουργείται μια ζώνη συλλογής από το σύστημα εξαγωγής του υπόγειου νερού, που ελαχιστοποιεί τη δυνατότητα αλλαγής της κατεύθυνσης της μόλυνσης. Η κομητεία του Υolo σκοπεύει να χρησιμοποιήσει τα στραγγίσματα τα υπόγεια νερά και, εάν δεν είναι διαθέσιμο αρκετό υγρό, άλλα συμπληρωματικά υγρά, όπως το νερό εκροής από εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, σηπτικά απόβλητα και απόβλητα από βιομηχανίες τροφίμων. Έτσι, υγρά απόβλητα όπως τα παραπάνω, που συνήθως δεν έχουν καμία ευεργετική χρήση, μπορούν να ενισχύσουν τη βιοδιάσπαση των στερεών αποβλήτων.

Η διαμόρφωση των τμημάτων του βιοαντιδραστήρα του έργου χωρίζει το βορειοανατολικό τεταρτημόριο από τα βορειοδυτικά και τα νοτιοδυτικά τεταρτημόρια, με αποτέλεσμα να έχουμε 3 χωριστά κελιά ΧΔΑ, δύο από τα οποία λειτουργούν αναερόβια και ένα αερόβια. Στην Εικόνα 3 υποδεικνύονται τα τρία μέρη βιοαντιδραστήρων ως δυτικό αναερόβιο κελί, βορειοανατολικό αναερόβιο, και αερόβιο τμήμα. Η διαμόρφωση αυτή επιτρέπει την κατασκευή του βορειοανατολικού αναερόβιου τμήματος και την έναρξη της λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα πριν από την ολοκλήρωση του δυτικού αναερόβιου τμήματος. Με το διαχωρισμό του αναερόβιου βιολογικού αντιδραστήρα σε δύο επιμέρους τμήματα, θα αποκτηθεί εμπειρία από την κατασκευή του βορειοανατολικού κυττάρου ώστε να αξιοποιηθεί στο δυτικό αναερόβιο τμήμα. Σ' αυτό το πρόγραμμα η κομητεία του Υolo συνεργάστηκε με την Ένωση Αποκατάστασης Στερεών Αποβλήτων της Βόρειας Αμερικής (Solid Association of North America - SWANA) και το Ίδρυμα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης (Environmental Management - IEM Inc.).



Εικόνα 3. Διαμόρφωση του βιοαντιδραστήρα.

### 7.2.3. Βορειοανατολικό αναερόβιο κελί

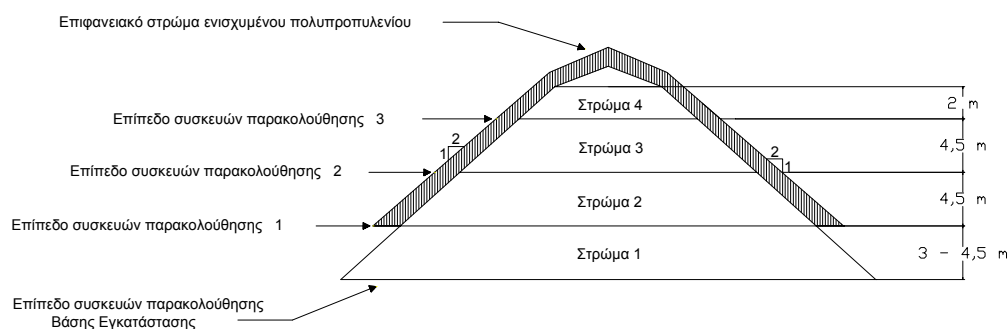
Το βορειοανατολικό αναερόβιο κελί καταλαμβάνει περίπου 14 στρέμματα στο βορειοανατολικό τεταρτημόριο της εγκατάστασης.

#### Κατασκευή

Η κατασκευή του βορειοανατολικού αναερόβιου κελιού μπορεί να χωριστεί γενικά σε τέσσερις σημαντικούς τομείς: διάθεση - τοποθέτηση απορριμμάτων, προσθήκη υγρού, συλλογή βιοαερίου, και εγκατάσταση της επιφανειακής κάλυψης. Κάθε ένας τομέας αναλύεται παρακάτω.

#### Απόθεση απορριμμάτων

Η απόθεση των απορριμμάτων άρχισε στις 13 Ιανουαρίου 2001 και ολοκληρώθηκε στις 3 Αυγούστου 2001. Τα απορρίμματα τοποθετήθηκαν σε τέσσερα στρώματα με ένα μέσο πάχος 4,5 m το καθένα (Εικ. 4). Η χρήση χώματος κάλυψης κατά τη διάρκεια της πλήρωσης απορριμμάτων ελαχιστοποιήθηκε αποσκοπώντας στη γενική διαπερατότητα των απορριμμάτων. Όποτε ήταν δυνατόν, χρησιμοποιήθηκαν φυτικές πρώτες ύλες ή λινάτσες ως εναλλακτική καθημερινή κάλυψη και στην περίπτωση της χρήσης χώματος, το χώμα αφαιρέθηκε πριν από την τοποθέτηση αποβλήτων στο επόμενο επίπεδο. Όλες οι κλίσεις κατασκευάστηκαν περίπου ίσες με 2 προς 1 (οριζόντιος προς κατακόρυφο) και έλαβαν τουλάχιστον 30 cm της εδαφικής κάλυψης. Τέλος, οι συσκευές παρακολούθησης της εγκατάστασης τοποθετήθηκαν στα επίπεδα 1, 2 και 3, μεταξύ των στρωμάτων των απορριμμάτων.



**Εικόνα 4.** Τομή βορειοανατολικού αναερόβιου κελιού.

### Προσθήκη υγρού

Σε κάθε στρώμα απορριμμάτων εγκαταστάθηκε οριζόντιο δίκτυο συλλογής υγρών στραγγισμάτων υγρού (Εικ. 5). Το δίκτυο συλλογής τοποθετήθηκε μεταξύ των στρωμάτων, σε απόσταση περίπου 12 m. Το δίκτυο συλλογής των στραγγισμάτων που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο 4 εγκαταστάθηκε σε διάστημα περίπου 7,5 m με μια πρόσθετη γραμμή που κάλυπτε την περίμετρο του πάνω στρώματος. Κάθε δίκτυο αποτελείται από έναν σωλήνα πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (High Density Poly Ethylene-HDPE) διαμέτρου 3,2 cm, που τοποθετείται οριζόντια (με κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο), και επεκτείνεται σε όλη την έκταση των απορριμμάτων. Κάθε γραμμή στραγγισμάτων είναι διάτρητη με οπές διαμέτρου περίπου 2,4 mm ανά 6 m περίπου. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 2480 m δικτύου σωλήνων με συνολικά 342 οπές.



**Εικόνα 5.** Εγκατεστημένο οριζόντιο δίκτυο συλλογής βιοαερίου και υγρών διασταλαγμάτων με ελαστική επίστρωση (Yazdani *et al.*, 2005).

### Συλλογή βιοαερίου

Ανάμεσα στα στρώματα απορριμμάτων αλλά και κάτω από την γεομεμβράνη ενισχυμένου πολυπροπυλενίου εγκαταστάθηκαν οριζόντιες γραμμές συλλογής βιοαερίου (Εικ. 6). Το δίκτυο συλλογής βιοαερίου αποτελείται από διάφορους συνδυασμούς σωλήνων πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) διαμέτρου 10 και 15 cm (Εικ. 5), καθώς επίσης και διάφορες

παραλλαγές με κυματοειδείς σωλήνες HDPE. Ανάμεσα στα στρώματα των απορριμμάτων, οι σωλήνες συλλογής βιοαερίου έχουν απόσταση περίπου 12 m μεταξύ τους, ενώ ακριβώς κάτω από τη γεωμεμβράνη ενισχυμένου πολυπροπυλενίου έχουν απόσταση περίπου 7,5 m. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 16 γραμμές συλλογής βιοαερίου. Η συλλογή βιοαερίου άρχισε στις 13 Δεκεμβρίου 2001. Η συλλογή του βιοαερίου πριν από την επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων είναι απαραίτητη για να αποτραπεί η υπερβολική πίεση αερίου κάτω από το επιφανειακό στρώμα.



**Εικόνα 6.** Συσκευή μέτρησης βιοαερίου GEM-500 (Landfill Gas Monitor, 2005).

#### *Σύσταση βιοαερίου*

Η σύσταση του βιοαερίου μετριέται χρησιμοποιώντας τη συσκευή μέτρησης καύσιμων αερίων GEM-500 που κατασκευάζεται από την εταιρία LANDTEC. Η συσκευή είναι σε θέση να μετρήσει μεθάνιο (είτε σαν % σύσταση κατ' όγκο είτε σαν % του χαμηλότερου εκρηκτικού ορίου), διοξείδιο του άνθρακα, και οξυγόνο. Για την βαθμονόμηση της χρησιμοποιείται αέριο άζωτο.

#### *Κάλυψη τμημάτων βιοαντιδραστήρα*

Η ομάδα μελετητών της κομητείας του Υolo αξιοποίησε τις αρχές τις διανυσματικής μηχανικής για να σχεδιάσει τις μεμβράνες κάλυψης για κάθε ένα από τα τμήματα των βιοαντιδραστήρων (Εικ. 7). Το πεδίο εργασίας τους περιέλαβε τους ακόλουθους στόχους (Yazdani *et al.*, 2005):

- Την έρευνα των διαθέσιμων υλικών μεμβρανών στο εμπόριο, συμπεριλαμβανομένου του πολυαιθυλενίου υψηλής και χαμηλής πυκνότητας, πολυβινυλοχλωριδίου, και ενισχυμένο πολυπροπυλένιο,
- Το σχεδιασμό ενός βιοφίλτρου για τη διαχείριση των αερίων εκπομπής από το αερόβιο τμήμα,
- Την προετοιμασία των σχεδίων και τις προδιαγραφές για την επιφανειακή κάλυψη, και
- Την εξασφάλιση της ποιότητας κατασκευής της εγκατάστασης της μεμβράνης επιφάνειας.



Εικόνα 7. Κάλυψη του βορειοανατολικού αναερόβιου τμήματος του βιοαντιδραστήρα (Yazdani *et al.*, 2005).

Επίσης, μελετήθηκαν τα σχέδια και οι προδιαγραφές του συστήματος σωληνώσεων για τη συλλογή των στραγγισμάτων. Βάσει ερευνών προτάθηκε μια γεωμεμβράνη ενισχυμένου πολυπροπυλενίου σε σχέση με μια απλή κάλυψη γεωμεμβράνης (Vector Engineering, 2001). Το ενισχυμένο πολυπροπυλένιο έχει προφανή πλεονεκτήματα σχετικά με τα άλλα πιθανά υλικά, συμπεριλαμβανομένου του μεγάλου χρόνου ζωής του (εγγύηση 20 ετών), της υψηλής αντοχής του λόγω της νάιλον ενίσχυσης και της χαμηλής θερμικής του συστολής και διαστολής. Για να επισπεύσει την κατασκευή και να μειώσει το γενικό κόστος του προγράμματος, η κομητεία προχώρησε άμεσα στην αγορά του απαραίτητου υλικού μεμβρανών, το οποίο και παράδωσε στον ανάδοχο για την εγκατάσταση. Στις 29 Ιουνίου 2001, η κομητεία του Yolo εξέδωσε ένα αίτημα για 32.520 m<sup>2</sup> ενισχυμένου πολυπροπυλενίου που παραλήφθηκαν στις 9 Ιουλίου 2001 με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Η εγκατάσταση της επιφανειακής κάλυψης και των απαιτούμενων σωληνώσεων ολοκληρώθηκε το Νοέμβριο του 2001. Οι αισθητήρες στα επίπεδα των συσκευών παρακολούθησης 1, 2 και 3 τοποθετήθηκαν σε στρώματα είτε φυτικών απορριμμάτων (τεμαχισμένα φύλλα, μικρά κομμάτια ξύλου), είτε αμμοχάλικου.

### Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία ελέγχεται με θερμικές αντιστάσεις που κατασκευάζονται από την εταιρία "Quality Thermistor Inc." με εύρος θερμοκρασιών από 0°C έως 100°C, τόσο στα αναερόβια όσο και στα αερόβια τμήματα. Για να αποτραπεί η διάβρωση, κάθε θερμική αντίσταση τοποθετείται σε θήκη ανοξείδωτου χάλυβα που περιέχει εποξική ρητίνη.

### Πίεση

Η πίεση στο βορειοανατολικό αναερόβιο κελί ελέγχεται με σωλήνες δειγματοληψίας εσωτερικής διαμέτρου 1/4 ίντσας και εξωτερικής διαμέτρου 3/8 - ίντσας. Κάθε σωλήνας μπορεί να συνδεθεί με ένα μετρητή πίεσης και μια συμπληρωματική πηγή αέρα. Αρχικά αφαιρείται η υγρασία από τον σωλήνα με την παροχή ξηρού αέρα, και έπειτα μετράται η ακριβής πίεση, για αέριο ή/και υγρό με τη βοήθεια αισθητήρων.

### Υγρασία

Τα επίπεδα υγρασίας μετρούνται με αισθητήρες υγρασίας (Εικ. 8) πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) και τούβλα γύψου. Τόσο οι αισθητήρες υγρασίας PVC όσο και τα τούβλα γύψου διαβάζονται χρησιμοποιώντας τον ίδιο μετρητή. Οι αισθητήρες υγρασίας είναι διάτρητοι σωλήνες PVC διαμέτρου 5 cm γεμισμένοι με αμμοχάλικο (Εικ. 9) και έχουν δύο βίδες ανοξείδωτου χάλυβα σε απόσταση 20 cm που συνδέονται με καλώδια για να διαμορφώσουν κλειστό κύκλωμα. Τα τούβλα γύψου είναι αξιόπιστα στην καταγραφή των αυξήσεων της περιεκτικότητας σε υγρασία. Όμως απαιτείται αρκετός χρόνος για να ξηραθούν και επομένως μπορεί να μην απεικονίσουν την πραγματική ξήρανση του περιβάλλοντος.



Εικόνα 8. Αισθητήρας υγρασίας.



Εικόνα 9. Υγρασία, θερμοκρασία, και εγκατάσταση σωλήνων (Yazdani *et al.*, 2005).

### *Επανακυκλοφορία στραγγισμάτων*

Η προσθήκη υγρών διασταλαγμάτων στο βορειοανατολικό τμήμα άρχισε στις 27 Μαρτίου 2002 (Εικ. 10). Αρχικά δοκιμάστηκε το οριζόντιο δίκτυο στραγγισμάτων με την άντληση περίπου 4 m<sup>3</sup> για να επιβεβαιωθεί η ροή λειτουργίας και η μέτρηση της πίεσης σε κάθε πλευρικό δίκτυο στραγγισμάτων. Μέχρι το τέλος του Μαρτίου του 2002, προστέθηκαν στο βορειοανατολικό αναερόβιο τμήμα συνολικά 6 m<sup>3</sup> υγρού (στραγγίσματα). Όταν ολοκληρώθηκε η δοκιμαστική φάση, προστέθηκαν μεγάλοι όγκοι υγρού για να επιτευχθεί η απαιτούμενη παροχή. Όταν επιτευχθεί η παροχή αυτή, προστίθεται μόνο τόσο υγρό ώστε να διατηρείται η παροχή στο επιθυμητό επίπεδο.



**Εικόνα 10.** Κύριο και πλευρικό δίκτυο σωληνώσεων στραγγισμάτων (Yazdani *et al.*, 2005).

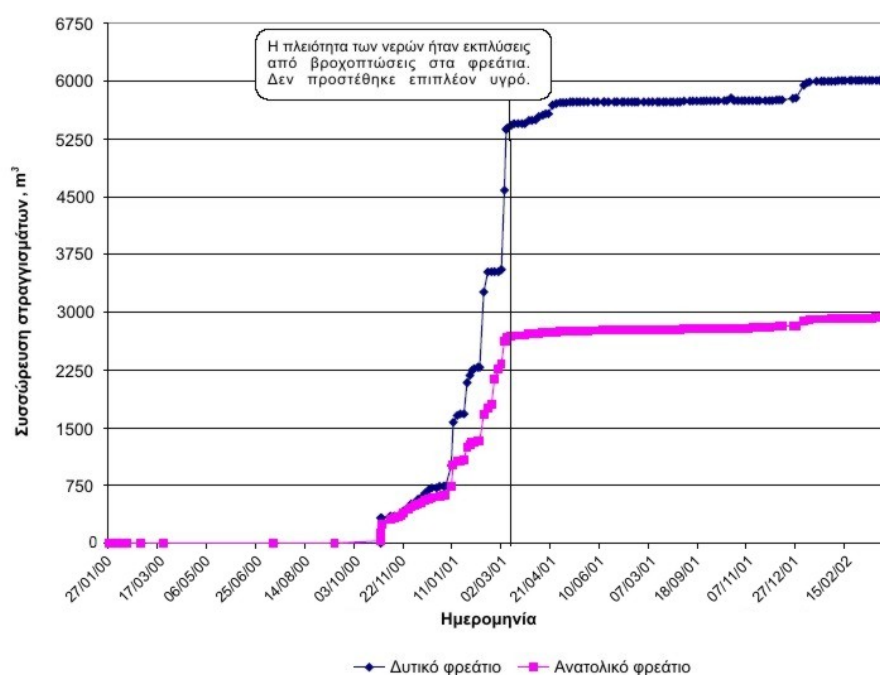
### *Ποσότητα και ποιότητα στραγγισμάτων*

Τα υγρά στραγγίσματα που παράγονται από τους αγωγούς του βορειοανατολικού αναερόβιου κελιού συγκεντρώνονται σε φρεάτιο συλλογής (Εικ. 11). Μια αντλία χρησιμοποιείται μόνο για την αφαίρεση των στραγγισμάτων και για την άντληση σε μια από τις λίμνες αποθήκευσης στραγγισμάτων. Ένας μετρητής ροής μετρά το ποσοστό και το συνολικό όγκο που αντλείται από το φρεάτιο.



**Εικόνα 11.** Κάλυψη με αμμοχάλικο και φρεάτιο συγκέντρωσης υγρών (Yazdani *et al.*, 2005).

Τα στραγγίσματα ελέγχονται ως προς τις ακόλουθες παραμέτρους: pH, EC, DO, δυναμικό οξειδοαναγωγής και θερμοκρασία. Όταν συγκεντρώνονται ικανές ποσότητες στραγγισμάτων, αναλύονται σε εργαστήριο οι ακόλουθες παράμετροι: TDS, BOD, COD, TOC, θρεπτικές ουσίες (NH<sub>3</sub>, TKN, TP), κοινά ιόντα, βαριά μέταλλα και βασικοί οργανικοί ρύποι. Πριν από τα μέσα Φεβρουαρίου 2001, οι μετρήσεις των στραγγισμάτων απεικονίζουν τις βροχοπτώσεις και όχι την πραγματική παραγωγή στραγγισμάτων. Μεταξύ Φεβρουαρίου 2001 και Μαρτίου 2002, παρήχθησαν περίπου 1200 m<sup>3</sup> στραγγισμάτων από το βορειοανατολικό και το νοτιοανατολικό αναερόβιο τμήμα και συλλέχθηκαν στο ανατολικό φρεάτιο (Διάγραμμα 1). Το Φεβρουάριο του 2002 τα στραγγίσματα υποβλήθηκαν σε χημική ανάλυση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

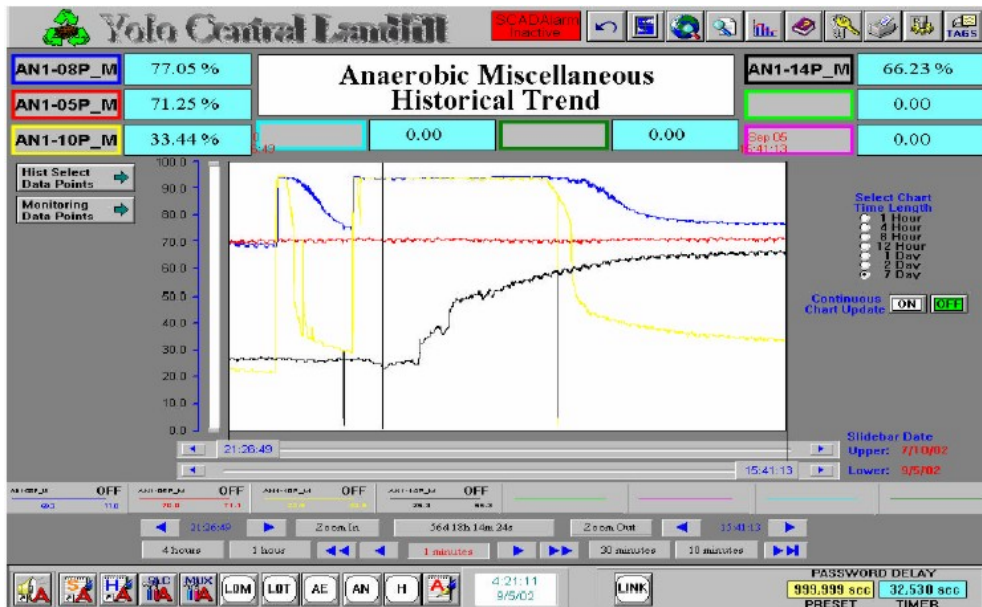


**Διάγραμμα 1.** Συγκέντρωση στραγγισμάτων στο Βορειοανατολικό τμήμα.

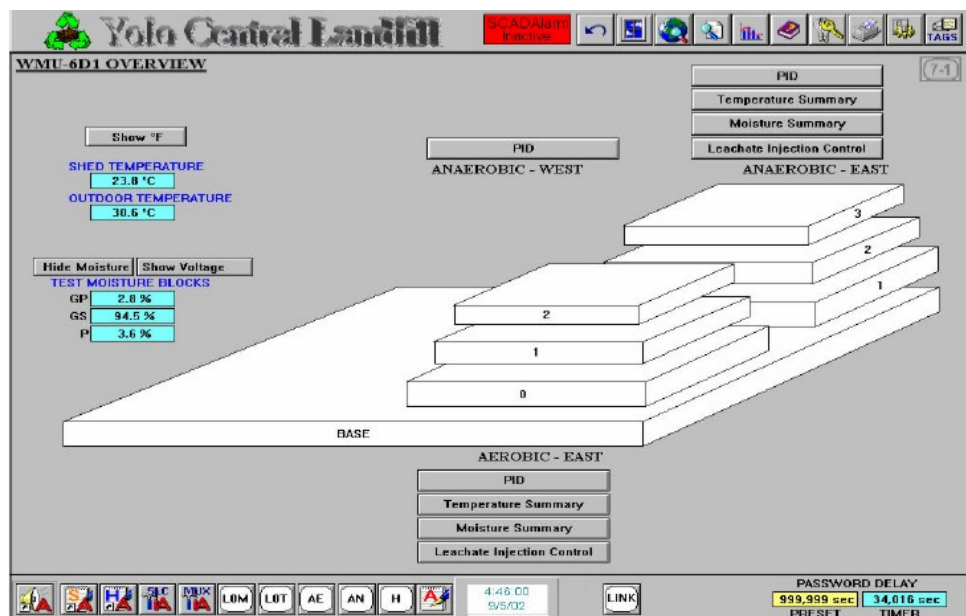
**Πίνακας 1.** Χημική ανάλυση των στραγγισμάτων του Βορειοανατολικού αναερόβιου τμήματος (US EPA, 2005).

Παράμετρος	Μονάδες	14/02/02	14/05/02	20/06/02	23/07/02	26/09/02	17/10/02	26/02/03	27/05/03
pH	-	7,13	7,40	7,60	7,44	7,47	7,35	8,16	7,02
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	μS	6.583	6.095	4.054	11.510	12.440	10.230	9.351	11.990
Δυναμικό οξειδοαναγωγής	mV	-119	80	94	-7	-35	-25	160	17
Θερμοκρασία	°C	19,9	25,9	26,5	30,5	28,4	26,0	23,5	33,3
Διαλυμένο οξυγόνο, DO	mg/L	1	1,4	2,04	0,33	3,66	2,96	6	2,80
Σύνολο διαλυμένων στερεών, TDS	ppm	5.244	4.059	3.062	9.740	10.770	8.640	7.850	9.978
Αμμωνία ως N	mg/L	30	26,3	13,5	131	255	289	132	207
Διπτανθρακικά ιόντα	mg/L	1.740	1.760	1.110	3.740	3.960	4.010	2.680	3.280
BOD	mg/L	20	19	10	200	1400	3000	44	85
COD	mg/L	633	791	196	1.620	2.830	1.810	120	1.590
Cl <sup>-</sup>	mg/L	1.070	1.030	617	1.950	1.870	1.380	1.470	1.670
NO <sup>3-</sup> και NO <sup>2-</sup> ως N	mg/L	< 0,03	< 1,5	< 0,015	0,061	1,4	< 0,009	17,3	13
Ολικός (μη διαλυτός) οργανικός άνθρακας, TOC	mg/L	202	123	68,8	544	943	588	325	490
Ολική αλκαλικότητα ως CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	mg/L	1.740	1.760	1.110	3.740	3.960	4.010	2.680	3.280
Σύνολο διαλυμένων στερεών στους 180 °C, TDS	mg/L	4.440	3.700	2.500	7.800	8.000	6.680	5.720	7.700
Ολικό Αζωτο, TN	mg/L	53,1	40	21,8	201	326	358	222	320
Ολικό Θείο, TS	mg/L	1,9	1,3	0,74	1,2	1,1	1,4	0,034	0,020

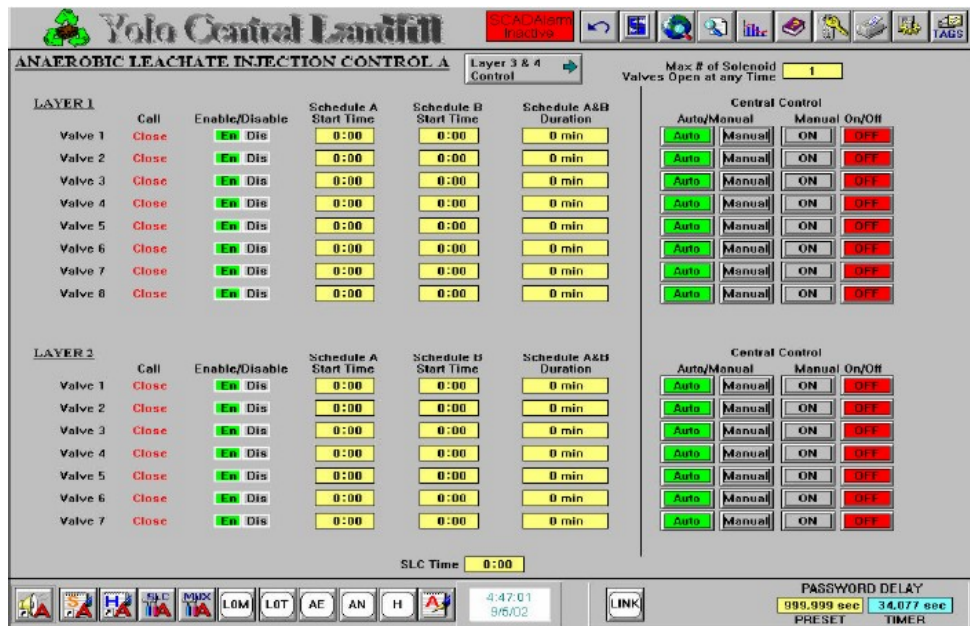
Διαλυμένο Μαγνήσιο	mg/L	323	262	-	535	480	437	359	265
Διαλυμένο Κάλιο	mg/L	152	133	-	215	319	348	371	372
Διαλυμένος Σίδηρος	mg/L	1,1	0,39	0,19	2,9	3,19	4	2,5	2,8



Εικόνα 12. Παρακολούθηση λειτουργίας βιοαντιδραστήρα με ηλεκτρονικά μέσα - λογισμικό SCADA (Yazdani *et al.*, 2005).



Εικόνα 13. Παρακολούθηση φυσικοχημικών ιδιοτήτων βιοαντιδραστήρα - λογισμικό SCADA (Yazdani *et al.*, 2005).



Εικόνα 14. Παρακολούθηση συλλογής διασταλλαγμάτων και προσθήκης υγρού - λογισμικό SCADA (Yazdani *et al.*, 2005).

#### 7.2.4. Δυτικό αναερόβιο κελί

Το δυτικό αναερόβιο κελί (Εικ. 15 και 16) του ΧΔΑ ακολουθεί την ίδια φιλοσοφία με το αντίστοιχο Βορειοανατολικό με μόνη διαφορά ότι έχει έκταση 25 στρέμματα ενώ το Βορειοανατολικό έχει έκταση 14 στρέμματα.



Εικόνα 15. Τοποθέτηση απορριμμάτων στο δυτικό τμήμα (Yazdani *et al.*, 2005).

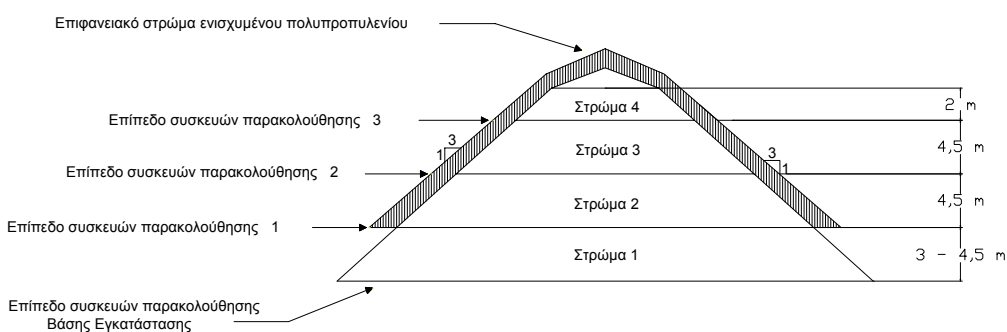
### Ποσότητα και ποιότητα στραγγισμάτων

Μεταξύ του Οκτωβρίου του 2001 και του Μαρτίου του 2002, παρήχθησαν περίπου 270 m<sup>3</sup> στραγγισμάτων από το δυτικό τμήμα. Το Φεβρουάριο του 2002 τα στραγγίσματα υποβλήθηκαν σε χημική ανάλυση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

### 7.2.5. Αερόβιο κελί

#### Κατασκευή

Η κατασκευή του νοτιοανατολικού αερόβιου κελιού μπορεί να χωριστεί γενικά σε πέντε σημαντικούς τομείς: τοποθέτηση απορριμμάτων, προσθήκη υγρού, συλλογή αερίου, προσθήκη αερίου και εγκατάσταση της επιφανειακής κάλυψης. Κάθε ένας από αυτούς τους πέντε τομείς αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 16. Τομή δυτικού αναερόβιου κελιού.

Πίνακας 2. Χημική ανάλυση των στραγγισμάτων του δυτικού αναερόβιου τμήματος (US EPA, 2005).

Παράμετρος	Μονάδες	14/02/02	14/05/02	20/06/02	23/07/02	13/08/02
pH	-	6,74	6,8	6,72	6,85	6,71
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	μS	3.530	3.851	3.944	3.899	3.810
Δυναμικό οξειδοαναγωγής	mV	-62	-46	-19	-38	-36
Θερμοκρασία	°C	24,9	26,2	25,2	25,7	26,9
Διαλυμένο οξυγόνο, DO	mV	3,15	1,54	1,31	3,62	2,6
Σύνολο διαλυμένων στερεών, TDS	mg/L	2.617	2.871	2.960	2.965	2.908
Αμμωνία ως N	mg/L	20,3	23,5	21,2	23,8	25
Διπτανθρακικά ιόντα	mg/L	1.700	1.780	1.730	1.710	1.680
BOD	mg/L	28	12	12	7,9	12
COD	mg/L	350	300	274	270	262
Cl <sup>-</sup>	mg/L	187	333	358	341	366
NO <sup>3-</sup> και NO <sup>2-</sup> ως N	mg/L	0,016 (ίχνη)	< 1,5	< 0,03	< 0,015	< 0,015
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	mg/L	1,7 (ίχνη)	< 10	0,8 (ίχνη)	2,2	0,75 (ίχνη)
TOC	mg/L	112	85,2	86,5	82,7	78,1

Συνολική αλκαλικότητα ως CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	mg/L	1.700	1.780	1.730	1.710	1.680
Συνολικό Άζωτο, TN	mg/L	32,6	31,1	31,5	31,4	31
Ολικό Θείο, TS	mg/L	0,033	< 0,014	< 0,014	0,023	< 0,014
Διαλυμένο Μαγνήσιο	mg/L	198	343	-	217	185
Διαλυμένο Κάλιο	mg/L	55,2	58,6	-	37,8	32,5
Διαλυμένος Σίδηρος	mg/L	0,4	0,035	1,9	0,59	0,11

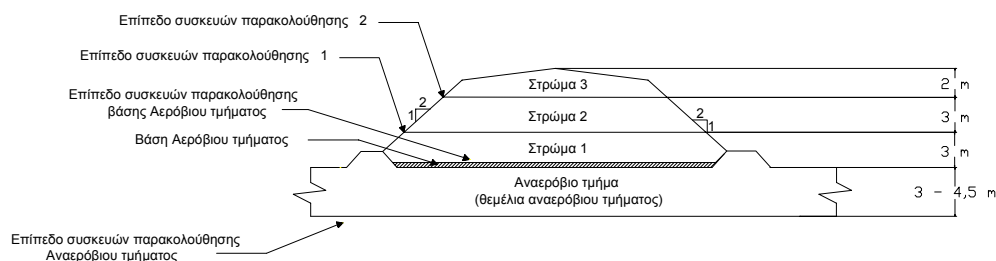
### Τοποθέτηση απορριμμάτων

Η τοποθέτηση απορριμμάτων άρχισε στις 14 Νοεμβρίου 2000 σε ένα επίπεδο ύψους 3 m που αποτέλεσε το συνδετικό κρίκο του αναερόβιου και του αερόβιου τομέα. Τα απορρίμματα τοποθετήθηκαν βάσει του μεγέθους τους (ξεκινώντας από τα πιο μεγάλα) και καλύφθηκαν με μια γεωμεμβράνη (Εικ. 17) προκειμένου να συγκεντρωθούν τα στραγγίσματα που παράγονται από το αερόβιο τμήμα. Έπειτα, τοποθετήθηκε μία ύφανση από φυσικά υλικά πάνω από τη μεμβράνη για να ενεργήσει ως προστατευτικό κάλυμμα για το στρώμα τεμαχισμένων ελαστικών αυτοκινήτων (διαπερατότητας [K]>1 cm/s) που ακολουθεί. Κατά τη διάρκεια αυτού του προγράμματος χρησιμοποιήθηκαν περίπου 1,5 εκατομμύριο ρόδες. Τα απορρίμματα τοποθετήθηκαν στο αερόβιο τμήμα κατά το χρονικό διάστημα 08/08-26/09 του 2001, σε 3 στρώματα με μέσο πάχος 3 m και κλίσεις 2:1 στο Βορρά, την ανατολή και τη δύση (εσωτερικές δευτερεύουσες κλίσεις), και κλίση 3:1 στο νότο (Εικ. 18). Η χρήση χώματος κάλυψης κατά τη διάρκεια της πλήρωσης απορριμμάτων ελαχιστοποιήθηκε αποσκοπώντας στη γενική διαπερατότητα των απορριμμάτων.



**Εικόνα 17.** Αερόβιο τμήμα έτοιμο για την τοποθέτηση στρώματος τεμαχισμένων ελαστικών αυτοκινήτων και την τοποθέτηση απορριμμάτων (Yazdani *et al.*, 2005).

Όποτε ήταν δυνατόν, χρησιμοποιήθηκαν φυτικές πρώτες ύλες ή λινάτσες ως εναλλακτική καθημερινή κάλυψη και στην περίπτωση της χρήσης χώματος, το χώμα αφαιρέθηκε πριν από την τοποθέτηση αποβλήτων στο επόμενο επίπεδο. Με βάση τα αρχεία εισόδου απορριμμάτων, η πυκνότητα απορριμμάτων είναι περίπου 475 kg/m<sup>3</sup>. Τα επίπεδα των συσκευών μέτρησης και παρακολούθησης 1 και 2 τοποθετήθηκαν μεταξύ των στρωμάτων.



**Εικόνα 18.** Τομή αερόβιου κελιού.

### Προσθήκη υγρού

Σε κάθε στρώμα των απορριμμάτων εγκαταστάθηκε ένα οριζόντιο δίκτυο υγρών διασταλλαγμάτων (Εικ. 5). Το δίκτυο υγρών διασταλλαγμάτων τοποθετήθηκε μεταξύ των στρωμάτων σε διάστημα περίπου 6 m. Το δίκτυο συλλογής στραγγισμάτων πάνω από το στρώμα 3 εγκαταστάθηκε σε διάστημα περίπου 6 m. Κάθε δίκτυο αποτελείται από σωλήνες HDPE και πολυβινυλοχλωριδίου διαμέτρου 3,2 cm (Εικ. 19). Κάθε γραμμή συλλογής στραγγισμάτων είναι διάτρητη με οπές διαμέτρου περίπου 2,4 mm ανά 3 m περίπου. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 1460 m σωλήνων με 326 οπές στραγγισμάτων.

### Συλλογή βιοαερίου

Το οριζόντιο δίκτυο συλλογής βιοαερίου (Εικ. 20) εγκαταστάθηκε μεταξύ κάθε στρώματος των απορριμμάτων. Το δίκτυο συλλογής βιοαερίου αποτελείται από διάφορους συνδυασμούς σωλήνων πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) διαμέτρου 15 και 20 cm, καθώς επίσης και διάφορες παραλλαγές χρησιμοποιώντας κυματοειδείς σωλήνες HDPE. Κάθε γραμμή συλλογής αέρα χρησιμοποιεί τεμαχισμένα ελαστικά αυτοκινήτων ως διαπερατά μέσα. Οι γραμμές συλλογής βιοαερίου μεταξύ των επιπέδων του βιοαντιδραστήρα έχουν απόσταση περίπου 7,5 m. Συνολικά εγκαταστάθηκαν 506 m οριζόντιων γραμμών συλλογής αερίου. Κάθε γραμμή συλλογής αέρα συνδέεται σε έναν αγωγό συλλογής διαμέτρου περίπου 30,5 cm, που προωθεί το αέριο στο συμπιεστή και στο βιοφίλτρο. Σε κάθε γραμμή συλλογής βιοαερίου ενσωματώνεται σύστημα ρύθμισης και παρακολούθησης της ροής, της θερμοκρασίας και της πίεσης.



**Εικόνα 19.** Πλευρικό δίκτυο συλλογής στραγγισμάτων στην τάφρο (Yazdani *et al.*, 2005).



**Εικόνα 20.** Οριζόντιο δίκτυο συλλογής αέρα (Yazdani *et al.*, 2005).

#### *Κάλυψη τμημάτων βιοαντιδραστήρα*

Δεδομένου ότι στο ΧΔΑ της κομητείας Υολο αρχικά εξετάστηκε η λειτουργία ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα, υπήρχαν δύο εναλλακτικές μέθοδοι διαχείρισης αέρα για την παραλαβή οξυγόνου. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην ώθηση αέρα στο ΧΥΤΑ ενώ η δεύτερη στην εφαρμογή κενού και την άντληση αέρα διαμέσου του ΧΥΤΑ. Και οι δύο μέθοδοι έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Εντούτοις, η ομάδα μελετητών της κομητείας του Υολο αποφάσισε ότι η καλύτερη λύση είναι να καλυφθεί το αερόβιο

τιμήμα με χώμα και φυσικά απορρίματα (τεμαχισμένα φύλλα, κλαδιά κλπ), αλλά χωρίς μία στεγανή γεωμεμβράνη, έτσι ώστε ο αέρας να μπορεί να αντληθεί μέσω των απορριμμάτων με την εφαρμογή κενού. Με αυτό τον τρόπο, ο αέρας εισάγεται μέσω της επιφάνειας του ΧΥΤΑ και μεταφέρεται στις οριζόντιες σωληνώσεις στις οποίες εφαρμόζεται κενό.

#### **Επανακυκλοφορία στραγγισμάτων**

Αρχικά, προστέθηκαν μεγάλοι όγκοι υγρού για να φέρουν τα απόβλητα στην επιθυμητή δυναμικότητα (Εικ. 21). Μόλις επιτευχθεί η επιθυμητή δυναμικότητα, προστίθεται τόσο υγρό ώστε να διατηρείται σταθερή η παροχή. Είναι απαραίτητοι μεγαλύτεροι όγκοι υγρού (έναντι των αναερόβιων τμημάτων) για να διατηρήσουν την δυναμικότητα των τμημάτων λόγω της αφαίρεσης του υγρού από το σύστημα συλλογής αέρα.



**Εικόνα 21.** Επανακυκλοφορία στραγγισμάτων (Yazdani *et al.*, 2005).

#### **Ποσότητα και ποιότητα στραγγισμάτων**

Τα στραγγίσματα που παράγονται από το αερόβιο τμήμα συλλέγονται σε ένα χωριστό φρεάτιο, πάνω από το φρεάτιο συλλογής στραγγισμάτων που περιγράφεται στο Ανατολικό τμήμα (Εικ. 22). Στο σημείο αυτό χρησιμοποιείται αντλία για την αφαίρεση και μεταφορά των στραγγισμάτων σε λίμνες συγκέντρωσης διασταλλαγμάτων. Το ποσοστό και ο συνολικός όγκος των στραγγισμάτων που αντλούνται από το φρεάτιο μετράται με τη βοήθεια ροόμετρου ενώ παράλληλα μετρώνται το pH, η EC, το DO, το δυναμικό οξειδοαναγωγής και η θερμοκρασία. Όταν συγκεντρώνονται ικανές ποσότητες στραγγισμάτων, αναλύονται σε εργαστήριο οι ακόλουθες παράμετροι: TDS, BOD, COD, TOC, θρεπτικές ουσίες (NH<sub>3</sub>, TKN, TP), ιόντα, βαριά μέταλλα και βασικοί οργανικοί ρύποι. Το Φεβρουάριο του 2002 τα στραγγίσματα υποβλήθηκαν σε χημική ανάλυση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.



**Εικόνα 22.** Αερόβιο φρεάτιο εγκατεστημένο και έτοιμο για πλήρωση (Yazdani *et al.*, 2005).

### 7.2.6. Επένδυση στρωμάτων βιοαντιδραστήρα και επιφανειακή κάλυψη

Αξίζει να αναφερθούμε στα υλικά επένδυσης των διαφόρων στρωμάτων του βιοαντιδραστήρα και στην επιφανειακή του κάλυψη. Ο βιολογικός αντιδραστήρας φέρει διπλή επένδυση (Εικ. 23), πράγμα που σημαίνει ότι κατασκευάστηκαν δύο σύνθετα συστήματα επένδυσης, το ένα πάνω από άλλο. Ο λόγος για αυτό είναι ότι προκειμένου να επιταχυνθεί η αποσύνθεση ανακυκλώνονται τα στραγγίσματα του βιοαντιδραστήρα, γεγονός που ανησύχησε τους μελετητές σχετικά με την αύξηση της πιθανότητας μόλυνσης των υπόγειων νερών. Ένα μειονέκτημα της διπλής επένδυσης είναι ότι διπλασιάζει τις αρχικές δαπάνες κατασκευής. Αφότου ολοκληρωθεί η επένδυση του βιοαντιδραστήρα, τοποθετούνται εναλλάξ σε στρώσεις τα μη-ογκώδη και τα φυσικά απορρίμματα (Εικ. 24). Έπειτα, τοποθετούνται και τίθενται σε λειτουργία οι αισθητήρες, προκειμένου να ελέγχεται η θερμοκρασία, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η πίεση αερίου κατά τη διάρκεια της πλήρωσης.

**Πίνακας 3.** Χημική ανάλυση των στραγγισμάτων του αερόβιου τμήματος (US EPA, 2005).

Παράμετρος	Μονάδες	Βορειοανατολικό αναερόβιο τμήμα*
pH	-	7,75
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	μS	7.026
Δυναμικό οξειδοαναγωγής	mV	195
Θερμοκρασία	°C	15,1
Διαλυμένο οξυγόνο, DO	mV	5,45
Σύνολο διαλυμένων στερεών, TDS	mg/L	5.673
Αμμωνία ως N	mg/L	2,8
Διπτανθρακικά ιόντα	mg/L	1.120
BOD	mg/L	3,3
COD	mg/L	595
Cl <sup>-</sup>	mg/L	1.670
NO <sup>3-</sup> και NO <sup>2-</sup> ως N	mg/L	0,16

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	mg/L	290
Συνολικός (μη διαλυτός) οργανικός άνθρακας, TOC	mg/L	766
Συνολική αλκαλικότητα ως CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	mg/L	1.120
Σύνολο διαλυμένων στερεών της 180 °C	mg/L	4.810
Συνολικό Άζωτο, TN	mg/L	19,9
Total Θείο, TS	mg/L	0,51
Διαλυμένο Μαγνήσιο	mg/L	273
Διαλυμένος Σίδηρος	mg/L	0,32

\* Ημερομηνία δειγματοληψίας: 26 Φεβρουαρίου 2002



**Εικόνα 23.** Διπλή επένδυση βιοαντιδραστήρα (MSW, 2005).



**Εικόνα 24.** Τοποθέτηση απορριμμάτων (MSW, 2005).

Το τελικό επίπεδο των απορριμμάτων τοποθετήθηκε σε μορφή πυραμίδας για να διευκολύνει την αποστράγγιση των όμβριων υδάτων, και καλύφθηκε με ένα τελικό στρώμα φυσικών-"πράσινων" αποβλήτων (συμπεριλαμβανομένου ενός φορτίου πεπονιών, όπως φαίνεται στο κέντρο της Εικόνας 25). Πάνω από το τελικό στρώμα των "πράσινων" αποβλήτων τοποθετήθηκαν περίπου 500 τόνοι τεμαχισμένα ελαστικά αυτοκινήτου για να

δημιουργήσουν μια οριζόντια "κουβέρτα" αποκομιδής βιοαερίου πάχους 60 cm. Συνήθως δεν κατασκευάζεται το παραπάνω στρώμα τεμαχισμένων ελαστικών σε ΧΔΑ, αλλά ένας από τους στόχους του προγράμματος είναι να αξιολογηθεί η απόδοσή τους σε αυτήν την εφαρμογή, δεδομένου ότι είναι άφθονα και προσιτά.

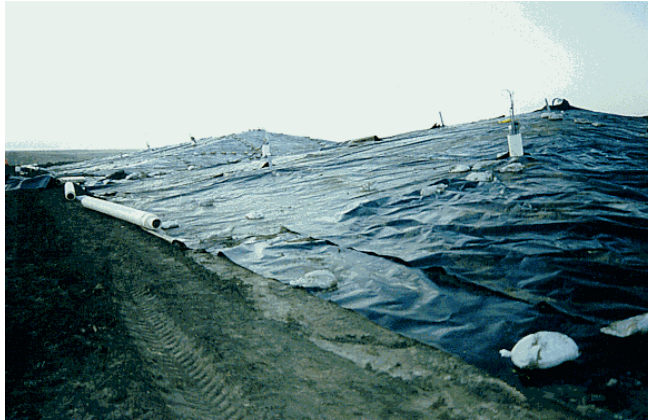


**Εικόνα 25.** Τοποθέτηση τελικού στρώματος αποβλήτων (MSW, 2005).

Πάνω από το στρώμα τεμαχισμένων ελαστικών αυτοκινήτων τοποθετήθηκε ένα γεωφίλτρο για να αποτρέψει τη μετακίνηση μορίων εδάφους που θα μπορούσε να φράξει τα κενά στις τεμαχισμένες ρόδες (Εικ. 26). Κατόπιν, τοποθετήθηκε ένα στρώμα πάχους 30 cm χώματος πάνω από το γεωφίλτρο. Οι άσπρες σωληνώσεις που απεικονίζονται στην Εικόνα 26 είναι μέρος του δικτύου συλλογής βιοαερίου. Τέλος, τοποθετήθηκε ένα στρώμα πλαστικών μεμβρανών για να αποτρέψει τη διαφυγή του βιοαερίου (Εικ. 27). Οι σάκοι άμμου χρησιμοποιήθηκαν για να κρατήσουν το πλαστικό στη θέση του (Εικ. 28).



**Εικόνα 26.** Τοποθέτηση γεωφίλτρου και κάλυψη με χώμα (MSW, 2005).



Εικόνα 27. Τελική κάλυψη με πλαστικές μεμβράνες (MSW, 2005).



Εικόνα 28. Επιφανειακή κάλυψη βιοαντιδραστήρα (MSW, 2005).

### **7.3.Εγκαταστάσεις Northern Oaks στις ΗΠΑ: αναερόβιος βιοαντιδραστήρας στερεών απορριμμάτων με ανακυκλοφορία στραγγισμάτων**

Σε αυτή τη μονάδα, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα κελί ΧΥΤΑ που περιέχει αστικά στερεά απορρίμματα (Municipal Solid Waste - MSW) και λειτουργεί ως αναερόβιος βιοαντιδραστήρας, με έκταση 8 στρεμμάτων, για να αξιολογήσει τις βασικές χημικές, βιολογικές και φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτό. Παρουσιάζεται η εμπειρία που αποκτήθηκε σχετικά με το σχεδιασμό και τις αρχικές φάσεις της λειτουργίας του κελιού αυτού (Zhao *et al.*, 2003).

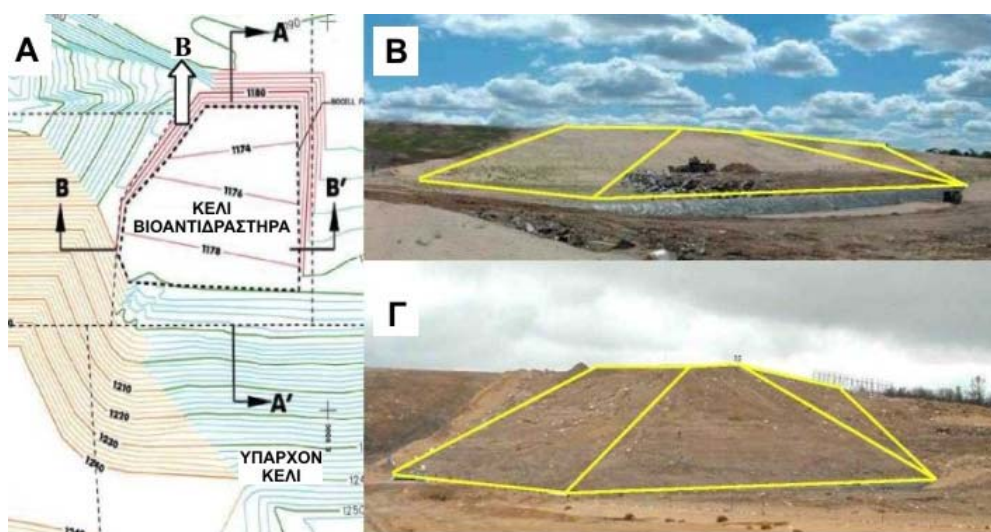
#### **7.3.1. Περιγραφή περιοχής**

Οι εγκαταστάσεις ανακύκλωσης και διάθεσης Northern Oaks (NORDF- Northern Oaks Recycling & Disposal Facility) στο Harrison, MI, USA άρχισαν τη λειτουργία τους το

Δεκέμβριο του 1992. Καταλαμβάνουν περίπου 1295 στρέμματα, από τα οποία 308 στρέμματα έχουν μελετηθεί για ενεργό χρήση. Η εγκατάσταση δέχεται συνολικά περίπου 500 ton MSW/d, πέντε ημέρες την εβδομάδα, και έχει τη ρυθμιστική άδεια για ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Αυτή τη στιγμή ανακυκλοφορεί περίπου το 75% των στραγγισμάτων που συλλέγονται επιτόπου, είτε στο κελί βιοαντιδραστήρα είτε στο μέτωπο λειτουργίας των συμβατικών κελιών (Zhao *et al.*, 2003).

### 7.3.2. Κατασκευή κελιού βιοαντιδραστήρα

Το κελί κατασκευάζεται σε αδιατάραχτο υπόστρωμα εδάφους, σε βάθος 3 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Εικ. 29), με ένα ίχνος περίπου 6 στρεμμάτων. Έχει επενδυθεί με σύνθετη επένδυση τύπου D, δηλαδή γεωσυνθετική επίστρωση αργίλου και επένδυση γεωμεμβράνης HDPE με 15 έως 30 cm άμμου πάνω από την κορυφαία επένδυση.



**Εικόνα 29.** Κελί βιοαντιδραστήρα στερεών αποβλήτων στην εγκατάσταση Ανακύκλωσης και Διάθεσης Northern Oaks (Zhao *et al.*, 2003): (Α) Τοπογραφικό διάγραμμα του κελιού του βιοαντιδραστήρα; (Β) Άποψη του κελιού από το Βορρά κατά τη διάρκεια της πλήρωσης; (Γ) Άποψη του κελιού από το Βορρά μετά την πλήρωση.

Οι βιοαντιδραστήρες (*bioreactor landfills*) σχεδιάζονται ώστε να προωθούν την ταχεία αποδόμηση του οργανικού μέρους των MSW. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διατήρηση των βέλτιστων επιπέδων υγρασίας για βιοαποδόμηση, συνήθως μέσω ενός συνδυασμού ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων και προσθήκης νερού. Τα στραγγίσματα συλλέγονται από διάτρητο σωλήνα HDPE διαμέτρου 15 cm και οδηγούνται σε φρεάτιο συγκέντρωσης. Επίσης, εγκαθίσταται ένα προσωρινό τοίχωμα φραγής ύψους 1,83 m στη βόρεια πλευρά για συγκράτηση των στραγγισμάτων μέσα στο κελί. Από τη νότια πλευρά, το κελί επικαλύπτει ένα υπάρχον κύτταρο μετά από κάλυψη του παλιού κυττάρου με ενδιάμεση στρώση 30 cm αργίλου. Για να εξασφαλιστεί η μόνωση, εγκαθίσταται επίσης ένα στρώμα γεωμεμβράνης στην κορυφή της ενδιάμεσης κάλυψης. Ένα στρώμα άμμου (30 cm) τοποθετείται πάνω από την γεωμεμβράνη για την προστασία της και για λόγους αποστράγγισης. Το ύψος του κελιού σχεδιάζεται να είναι 18,3 m. Τοποθετούνται έξι στρώματα απορριμμάτων, ύψους 3 m περίπου το καθένα. Μετά από το τελικό στρώμα, το κελί επικαλύπτεται με στρώση γεωμεμβράνης. Στο κελί εγκαθίστανται τρεις διαφορετικοί τύποι συστημάτων διανομής

διασταλλαγμάτων: (α) οριζόντιες ‘γραμμές’ επανακυκλοφορίας διασταλλαγμάτων από διάτρητους σωλήνες διαμέτρου 10 cm μέσα σε στρώμα αμμοχάλικου (πλάτους 122 cm και ύψους 92 cm): εγκαθίστανται ανά 15 m οριζόντια και 3 m κάθετα σε ένα τμήμα του κελιού, (β) γεωσυνθετικό αποστραγγιστικό στρώμα πλάτους 18,3 m με διάτρητο σωλήνα διαμέτρου 10 cm στο κέντρο και χωρίς στρώμα αμμοχάλικου και (γ) γεωσυνθετικό αποστραγγιστικό στρώμα πλάτους 4,6 m με ένα διάτρητο σωλήνα διαμέτρου 10 cm στο κέντρο και ένα στρώμα αμμοχάλικου πλάτους 60 cm και ύψους 30 cm.

Μετά την κάλυψη των γραμμών ανακυκλοφορίας με MSW, τα στραγγίσματα αντλούνται σε κοινή δεξαμενή αποθήκευσης. Η άντληση γίνεται σε κάθε γραμμή με ρυθμό 100 gr/m (0,38 m<sup>3</sup>/min) για 20 λεπτά καθημερινά (πέντε μέρες τη βδομάδα). Οι γραμμές εξαγωγής αερίου (διάτρητοι σωλήνες διαμέτρου 10 cm) εγκαθίστανται οριζόντια, μεταξύ των γραμμών ανακυκλοφορίας στο Επίπεδο 1, και κάθετα, με τρόπο ώστε να μην ενοχλούν τις γραμμές ανακυκλοφορίας στα επόμενα επίπεδα. Η ρύθμιση αυτή γίνεται ώστε να μειωθεί η πιθανότητα εισαγωγής υγρού στις γραμμές αερίου. Όλοι οι σωλήνες εξαγωγής αερίου συνδέονται με έναν ενιαίο πολλαπλής εισαγωγής, ο οποίος θα συνδεθεί με ένα σύστημα εξαγωγής αερίου.

### 7.3.3. Αποτελέσματα μετρήσεων και συμπεράσματα

Στο βιοαντιδραστήρα εγκαταστάθηκε τρισδιάστατο πλέγμα ελέγχου αποτελούμενο από 48 θύρες δειγματοληψίας για μετρήσεις περιεκτικότητας σε υγρασία, θερμοκρασίας, σύνθεσης αερίου και χημικών χαρακτηριστικών των στραγγισμάτων. Εγκαταστάθηκαν επίσης προφίλ καθίζησης εδάφους στο άνω επίπεδο κάθε ενός από τα έξι στρώματα πάχους 3 m, από τα οποία αποτελείται το κελί (Πίνακας 4), για να ελέγξουν την καθίζηση των απορριμμάτων. Έλεγχοι τύπου TDR (Time Domain Reflectometry) χρησιμοποιήθηκαν για επιτόπου μετρήσεις περιεκτικότητας σε υγρασία και θερμοκρασίας σε κάθε μία θύρα δειγματοληψίας. Ακολουθούν τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός τους.

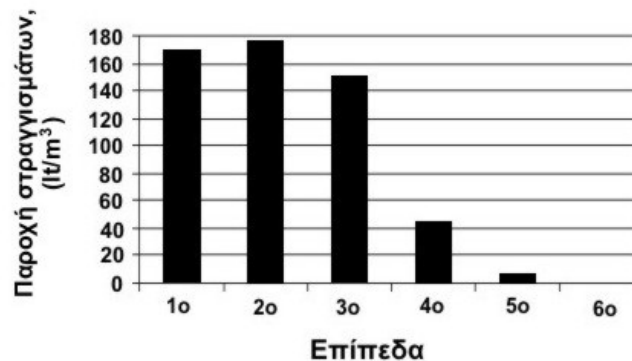
**Πίνακας 4.** Ημερομηνίες πλήρωσης των 6 στρωμάτων του ΧΔΑ και ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων (Zhao *et al.*, 2003).

Κατακόρυφη απόσταση από τον πυθμένα	Επίπεδο	Αριθμός γραμμών ανακυκλοφορίας	Ημερομηνία έναρξης πλήρωσης	Ημερομηνία παύσης πλήρωσης	Ημερομηνία έναρξης ανακυκλοφορίας	Ημερομηνία παύσης ανακυκλοφορίας
3 m	1	4	12/07/02	01/08/02	18/10/02	03/12/02
6 m	2	4	10/09/02	29/10/02	14/11/02	13/01/03
9 m	3	3	12/11/02	30/11/02	09/12/02	27/02/03
12 m	4	2	17/12/02	07/01/03	03/02/03	28/02/03
15 m	5	1	28/01/03	13/02/03	20/02/03	28/02/03
18 m	6	1	17/02/03	26/02/03		

#### Υγρασία και θερμοκρασία κελιού

Τους καλοκαιρινούς και φθινοπωρινούς μήνες εφαρμόστηκε ανακυκλοφορία στραγγισμάτων κατά τη διάρκεια της φάσης πλήρωσης σε MSW. Μετά την κάλυψη των σωλήνων ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων με MSW, γινόταν άμεση συλλογή των στραγγισμάτων (Πίνακας 4). Η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων σταματούσε κατά τη διάρκεια των ψυχρότερων χειμωνιάτικων μηνών. Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζεται ο ρυθμός εισαγωγής στραγγισμάτων ανά μονάδα όγκου MSW, αν και το πραγματικό ποσό νερού που παραλαμβάνεται σε κάθε επίπεδο είναι υψηλότερο από τις τιμές που παρουσιάζονται λόγω

των βροχοπτώσεων (έως το 2003 το κελί ήταν ανοιχτό). Επίσης, ένα μέρος των στραγγισμάτων που εισάγονταν στο υψηλότερο επίπεδο έφταναν ως το χαμηλότερο.



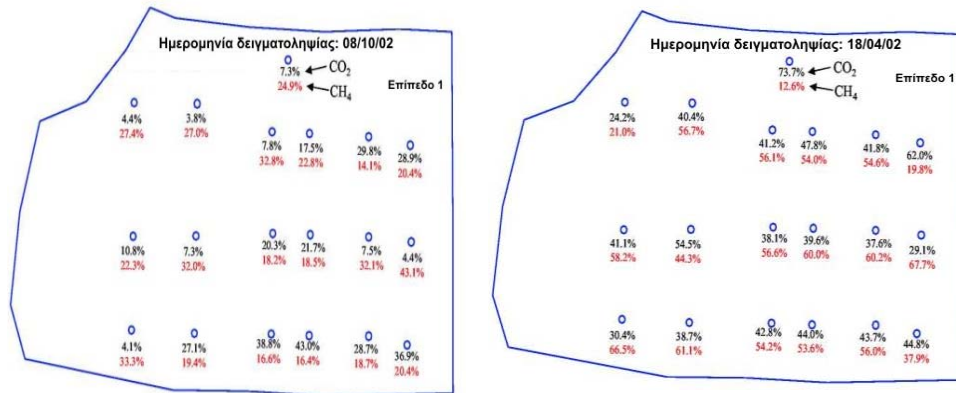
**Διάγραμμα 2.** Επανακυκλοφορία στραγγισμάτων ανά επίπεδο.

Την άνοιξη του 2003, μετά τη στεγάνωση του κελιού με γεωμεμβράνη, πραγματοποιείται και πάλι ανακυκλοφορία στραγγισμάτων. Τα εισαγόμενα στραγγίσματα συλλέγονται από όλα τα υπάρχοντα κελιά του NORDF καθώς και το κελί του βιοαντιδραστήρα. Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων γίνεται στα επίπεδα 4, 5 και 6 ώστε η παροχή υγρού ανά μονάδα όγκου να είναι  $75 \text{ L/m}^3$ . Στη συνέχεια, το υγρό θα επανακυκλοφορήσει με τρόπο ώστε τα εισαγόμενα στραγγίσματα να προέρχονται μόνο από το φρεάτιο συλλογής του βιοαντιδραστήρα. Όπως προκύπτει από τις μετρήσεις, η υγρασία των απορριμμάτων αυξήθηκε σημαντικά στα χαμηλότερα στρώματα (επίπεδα 1, 2, 3). Η αύξηση αυτή προέκυψε από την εισαγωγή στραγγισμάτων και από τα νερά των βροχοπτώσεων. Από τις αποκρίσεις του TDR και τις τιμές της θερμοκρασίας, προκύπτει ότι μετά από την έναρξη της εισαγωγής του υγρού στο στρώμα 1, η θερμοκρασία μειώθηκε. Αυτή η μείωση προκλήθηκε από τη χαμηλή θερμοκρασία των εκ νέου διανεμημένων διασταλλαγμάτων και από τη μειωμένη θερμοκρασία αέρα στα τέλη του φθινοπώρου. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στα στρώματα 2 και 3. Αντίθετα, οι αποκρίσεις TDR ήταν σχετικά χαμηλές στο στρώμα 5, δηλαδή υπήρχε χαμηλή υγρασία λόγω της χαμηλής εισαγωγής υγρού. Οι θερμοκρασίες στα υψηλότερα στρώματα (επίπεδα 4, 5, 6) ήταν επίσης χαμηλότερες επειδή η πλήρωσή τους πραγματοποιήθηκε το χειμώνα.

#### **Σύνθεση παραγόμενου αερίου του βιοαντιδραστήρα**

Εγκαταστάθηκαν θύρες δειγματοληψίας αερίου σε κάθε θέση όπου γινόταν ο έλεγχος υγρασίας/θερμοκρασίας και στη θέση της λεκάνης συλλογής στραγγισμάτων. Τα δείγματα αερίου συλλέχθηκαν από κάθε μία θύρα σε μηνιαία βάση μετά από την εγκατάσταση. Η συγκέντρωση του οξυγόνου, του αζώτου, του μονοξειδίου του άνθρακα, του διοξειδίου του άνθρακα, του μεθανίου και του υδρογόνου προσδιορίζονται με αέρια χρωματογραφία και συσκευή ανάλυσης αερίου. Η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου σε ποσοστά επί τοις εκατό σε όλες τις θύρες στο στρώμα 1 κατά τη διάρκεια δύο γεγονότων δειγματοληψίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 30. Κατά τη διάρκεια της πρώτης δειγματοληψίας βρέθηκε σε όλα τα δείγματα από το στρώμα 1 σημαντική συγκέντρωση μεθανίου (12 ως 43%). Η δειγματοληψία έγινε περίπου δύο μήνες μετά από την ολοκλήρωση της πλήρωσης του πρώτου επιπέδου και πριν από την έναρξη της πλήρωσης του δεύτερου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η παραγωγή μεθανίου μπορεί να είναι πολύ γρήγορη για μικρό διάστημα πλήρωσης. Σε έξι δείγματα παρατηρήθηκε λιγότερο από 1% οξυγόνου ενώ

σε άλλα έξι βρέθηκε πλήρης απουσία οξυγόνου. Έξι μήνες αργότερα, η συγκέντρωση μεθανίου αυξήθηκε σε 40% στο επίπεδο 1 (Εικ. 30).

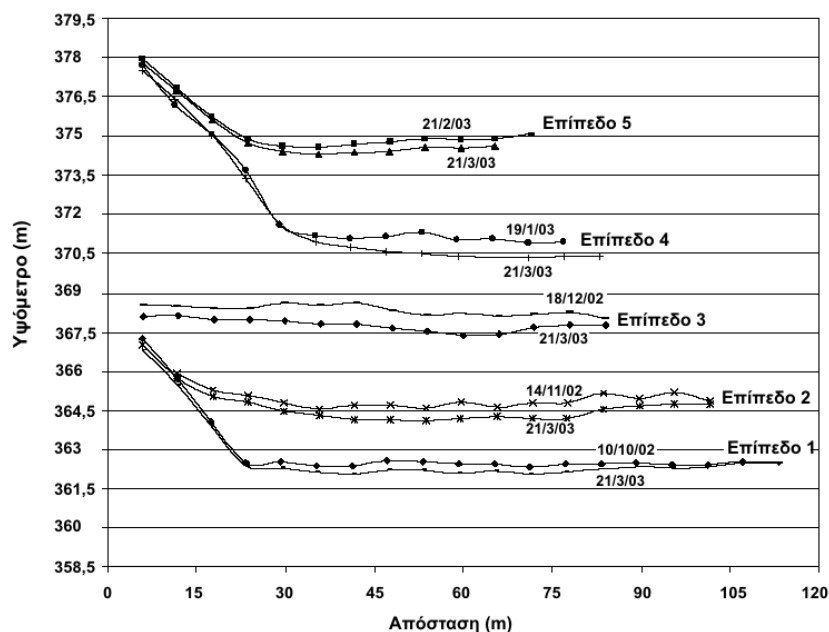


Εικόνα 30. Σύνθεση αερίου στο επίπεδο 1 (Zhao *et al.*, 2003).

### Καθίζηση των απορριμμάτων

Ένας από τους δείκτες της αποσύνθεσης των MSW είναι η ολική καθίζηση των απορριμμάτων στο βιοαντιδραστήρα. Η αθροιστική καθίζηση ενός κελιού μπορεί να μετρηθεί εύκολα με χωροστάθμηση της ανώτερης επιφάνειας. Όμως, η μέτρηση της καθίζησης σε κάθε ένα από τα 6 επίπεδα παρέχει επιπρόσθετες πληροφορίες για την αποδόμηση στην κάθετη διεύθυνση. Αυτή η διαφορική καθίζηση μπορεί να μετρηθεί με χρήση σωληνώσεων με ηλεκτρικά καλώδια που τοποθετούνται σε επιλεγμένες στάθμες του κελιού και ένα προφίλ διαφορικής καθίζησης.

Πραγματοποιήθηκε μια μέτρηση αμέσως μετά την εγκατάσταση των καλωδίων ώστε να είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες. Στη συνέχεια πραγματοποιούνταν μετρήσεις σε μηνιαία βάση. Τα αποτελέσματα από ένα από τα προφίλ σωληνώσεων σε κάθε επίπεδο φαίνονται στο Διάγραμμα 3. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται τα υψομετρικά δεδομένα των αρχικών και τελικών μετρήσεων. Έτσι, μπορεί να μελετηθεί ένα τρισδιάστατο ιστορικό καθίζησης βασισμένο στα αποτελέσματα και την αρχική χωροστάθμηση του προφίλ. Αυτά τα αποτελέσματα σε συνδυασμό με τις πληροφορίες βιοαποδόμησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη κατανόηση της σχέσης της βιολογικής σταθερότητας και της καθίζησης των MSW (Zhao *et al.*, 2003).



**Διάγραμμα 3.** Μετρήσεις διαφορικής καθίζησης σε κάθε επίπεδο. (Στον άξονα x η απόσταση από το σημείο εισόδου του καλωδίου μέτρησης, στον άξονα y το υψόμετρο (Zhao *et al.*, 2003).

## 7.4. Εγκατάσταση ΧΔΑ Trail Road στον Καναδά: ανακυκλοφορία στραγγισμάτων μεγάλης κλίμακας

Η εγκατάσταση ΧΔΑ Trail Road βρίσκεται στον περιφερειακό δήμο της Ottawa-Carleton (RMOC) στο Nerean, στο Οντάριο του Καναδά. Εκτείνεται σε περιοχή με εμβαδό 2000 στρέμματα από τα οποία τα 1350 στρέμματα αποτελούν μία ζώνη απομόνωσης που περικλείει την ενεργό περιοχή. Περίπου το ένα τρίτο των MSW που συλλέγονται στον δήμο καταλήγει σε αυτόν το ΧΔΑ.

### 7.4.1. Περιγραφή εγκατάστασης

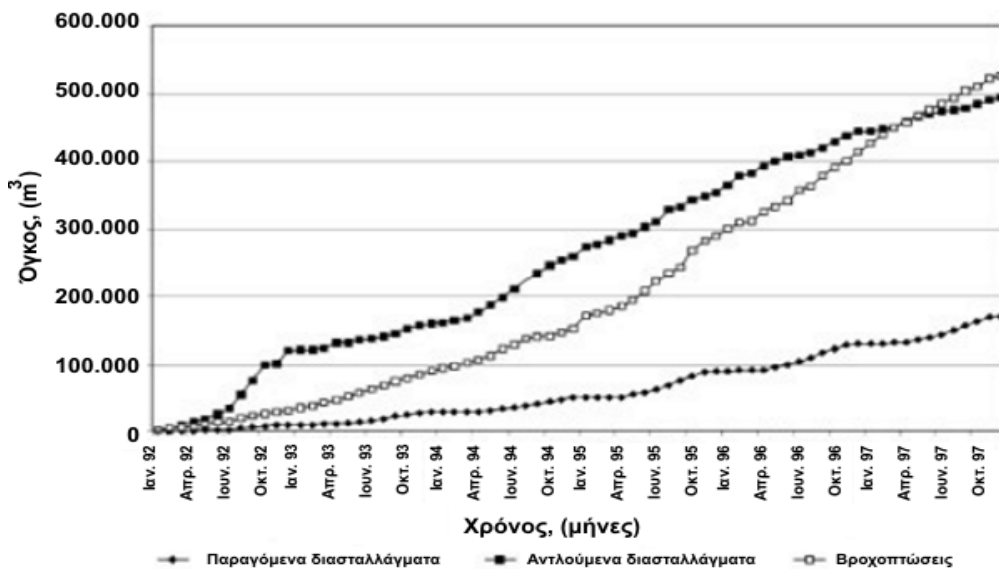
Υπάρχουν τέσσερις βαθμίδες ανάπτυξης στην εγκατάσταση ΧΔΑ. Η Βαθμίδα III αποτελεί αυτή τη στιγμή μία ενεργό περιοχή διάθεσης αποβλήτων, η οποία έχει επενδυθεί με σύνθετη επίστρωση αποτελούμενη από ένα μέτρο συμπυκνωμένης αργίλου και ένα στρώμα 80 mm γεωμεμβράνης από HDPE. Αυτή η βαθμίδα καλύπτει μια έκταση 135 στρεμμάτων. Στη Βαθμίδα III πραγματοποιήθηκε ανακυκλοφορία στραγγισμάτων για να ενισχυθεί η βιοδιάσπαση των οργανικών αποβλήτων και για να μειωθεί η διάρκεια ζωής μολυσματικών παραγόντων της περιοχής του ΧΔΑ. Επίσης, η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων έγινε ώστε να καθυστερήσει η επεξεργασία τους για μια χρονική περίοδο, μέχρι να υπάρξει καλύτερος χαρακτηρισμός τους.

Τα στραγγίσματα απομακρύνθηκαν από το κελί ΧΔΑ μέσω ενός στρώματος κοκκώδους υλικού, μιας σειράς σωλήνων συλλογής και ενός κύριου σωλήνα συλλογής. Ο σωλήνας αυτός συνδέεται με ένα αντλιοστάσιο για να αποσύρει τα στραγγίσματα από το κελί και για

να διατηρήσει το υδραυλικό ύψος στον πυθμένα της μεμβράνης χαμηλότερο από 0,3 m. Τα υγρά μετά την άντληση οδηγούνται σε λίμνες διήθησης στην κεφαλή των ενταφιασμένων απορριμμάτων. Οι λίμνες διήθησης κατασκευάστηκαν με χρήση αργίλου σαν υλικό για τα αναχώματα συγκράτησης. Οι θέσεις των λιμνών αυτών άλλαζαν συχνά ώστε να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη διανομή της υγρασίας στα ενταφιασμένα απορρίμματα, καθώς και για την διευθέτηση της λειτουργίας της χωματερής και της πλήρωσής της με τα MSW. Το οργανικό δυναμικό του υγρού μετρημένο σε BOD και COD, καθώς και το pH και η συγκέντρωση χλωριδίου, ελέγχθηκαν για μια περίοδο οκτώ ετών για να καθοριστεί η επίδραση της ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων στην αλλαγή των ιδιοτήτων των MSW, και ειδικότερα στη μείωση του οργανικού φορτίου των απορριμμάτων. Η καθίζηση των απορριμμάτων προσδιορίστηκε σε ετήσια βάση (Warith, 2002).

#### 7.4.2. Εμπειρία πεδίου - Αποτελέσματα μετρήσεων και συμπεράσματα

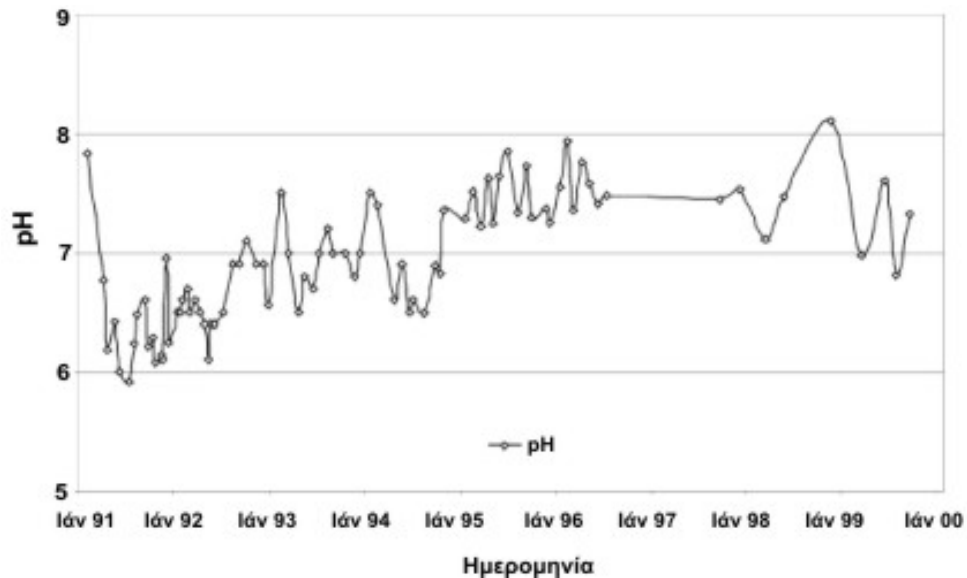
Το Διάγραμμα 4 επεξηγεί τη σχέση μεταξύ της μέσης μηνιαίας κατακρήμνισης, της ποσότητας του παραγόμενου διασταλλάγματος και της ποσότητας του αντλούμενου διασταλλάγματος από την βαθμίδα III της εγκατάστασης. Όπως σημειώνεται, το ποσοστό παραγωγής των στραγγισμάτων ήταν περίπου το 25-30% της συνολικής κατακρήμνισης.



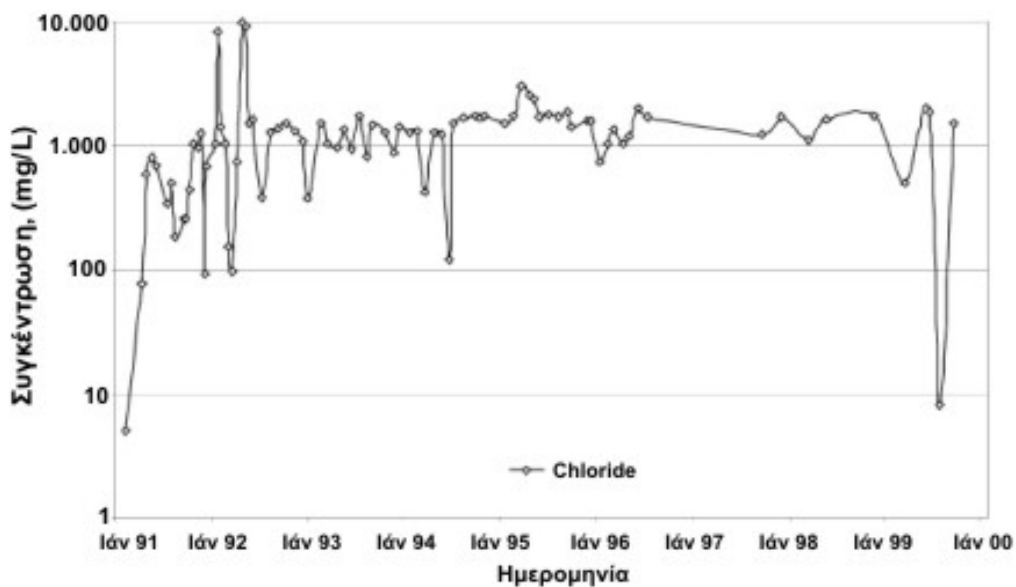
**Διάγραμμα 4.** Σύγκριση μεταξύ της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης και των ρυθμών παραγωγής διασταλλάγματος (Warith, 2002).

Η μεταβολή του pH στα στραγγίσματα με το χρόνο φαίνεται στο Διάγραμμα 5. Κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων ετών της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων στον ΧΔΑ (τα οποία αντιπροσωπεύουν τις αρχικές ρυθμίσεις και τη μετάβαση της βιοαποδόμησης των MSW από αερόβιες σε αναερόβιες φάσεις), τα επίπεδα του pH ήταν από 6,0 έως 6,5, δηλαδή στην όξινη πλευρά της κλίμακας pH. Κατά τη διάρκεια του ενδιάμεσου αναερόβιου σταδίου βιοαποδόμησης, αρχίζουν να εμφανίζονται με αργούς ρυθμούς μεθανογενή βακτηρίδια. Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής του αερίου μεθανίου, μειώνονται οι συγκεντρώσεις υδρογόνου, διοξειδίου του άνθρακα και πτητικών λιπαρών οξέων (Murphy *et al.*, 1995). Η μετατροπή των λιπαρών οξέων αυξάνει το pH μέσα στα κελιά αποβλήτων. Η φάση ζύμωσης

του μεθανίου εμφανίζεται όταν τα επίπεδα pH ανέρχονται στις ουδέτερες τιμές 6,8 – 8,0. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η δραστηριότητα μεθανογενών βακτηριδίων είναι σχετικά χαμηλή και αρχίζει η φάση ωρίμανσης. Στο Διάγραμμα 6 φαίνονται οι αλλαγές στη συγκέντρωση χλωριδίου στα στραγγίσματα κατά τη διάρκεια της περιόδου ανακυκλοφορίας τους. Η συγκέντρωση του χλωριδίου παραμένει σχετικά σταθερή σε μια μέση συγκέντρωση περίπου 1000 mg/L.



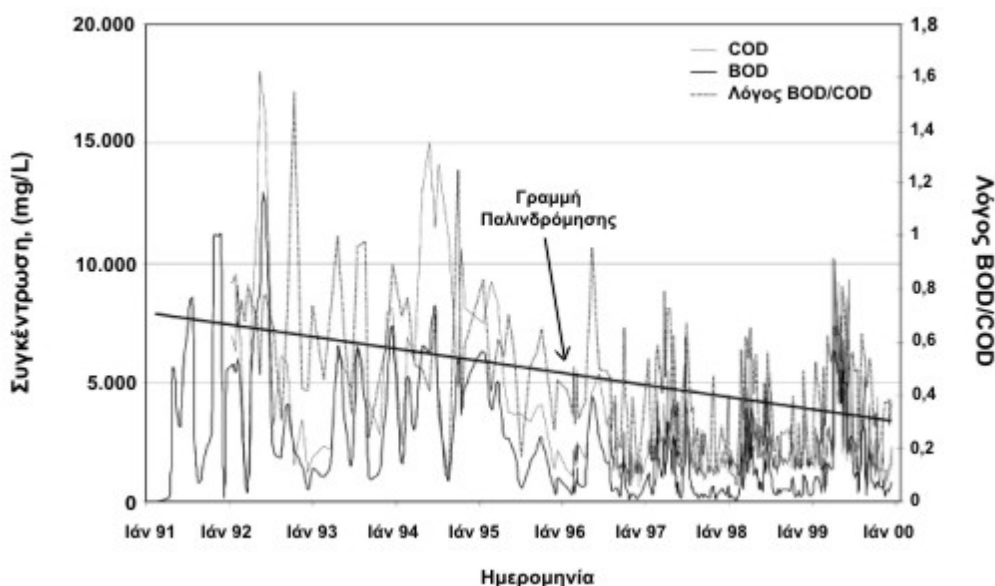
**Διάγραμμα 5.** Μεταβολή του pH κατά τη διάρκεια της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων (Warith, 2002).



**Διάγραμμα 6.** Μεταβολή της συγκέντρωσης χλωριδίου κατά τη διάρκεια της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων (Warith, 2002).

Παρατηρήθηκε μια τάση μείωσης του BOD και COD για μία περίοδο οκτώ ετών ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων. Το Διάγραμμα 7 δείχνει τη σχέση μεταξύ BOD, COD και του λόγου BOD/COD κατά τη διάρκεια του χρόνου. Ο λόγος BOD/COD μειώθηκε από περίπου 0,9 σε 0,4 μέσα στα οκτώ χρόνια, γεγονός που εξηγεί τη μείωση των βιοδιασπάσιμων οργανικών ενώσεων και την αύξηση των μικροβιακών δραστηριοτήτων λόγω της αύξησης της υγρασίας των στερεών αποβλήτων. Η διαχείριση των στραγγισμάτων της εγκατάστασης ΧΔΑ Trail Road με ανακυκλοφορία μέσω λιμνών έχει επιτύχει:

- αποτελεσματική διαχείριση, σε προσωρινή βάση, των στραγγισμάτων και
- αναβολή της επεξεργασίας των στραγγισμάτων έως ότου η ποσότητα και ποιότητά τους φτάσει σε καθορισμένα επίπεδα.



**Διάγραμμα 7.** Μεταβολή των συγκεντρώσεων του βιολογικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) και του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) στην εγκατάσταση ΧΔΑ Trail Road (Warith, 2002).

Η επανακυκλοφορία μείωσε τη διάρκεια ζωής μολυσματικών παραγόντων του ΧΔΑ. Επίσης, ενίσχυσε την καθίζηση των στερεών αποβλήτων της Βαθμίδας ΙΙΙ και οδήγησε στην ανάκτηση του 25% του κενού όγκου (διάκενα αέρα μέσα στο στρώμα των αποβλήτων), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για ταφή επιπλέον ποσότητας στερεών απορριμμάτων. Στον Πίνακα 5 φαίνεται η σχέση μεταξύ της ολικής χωρητικότητας σε απορρίμματα και των αξιοποιήσιμων διάκενων ανά έτος. Η αρχική αναλογία της χρησιμοποίησης χώρου είχε τιμές από 0,5 έως 0,7, δηλ. 500 - 700 kg MSW θα καταλάβουν περίπου 1 m<sup>3</sup>, η όποια είναι μια λογική αναλογία λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμένο εξοπλισμό συμπίεσης που χρησιμοποιείται στην περιοχή. Εντούτοις, η αναλογία τα έτη 1997 και 1998 αυξάνεται με τιμές πάνω από 1,0 (Πίνακας 5), που σημαίνει ότι στον ίδιο όγκο χωράνε περισσότερα απόβλητα. Αυτή η παρατήρηση αποκαλύπτει τα πλεονεκτήματα της επανακυκλοφορίας και της επίδρασής της στην επιτάχυνση της βιοδιάσπασης αποβλήτων, καθώς επίσης και την αύξηση του ποσοστού παραγωγής βιοαερίου.

**Πίνακας 5.** Αναλογία χρήσης χώρου (Warith, 2002).

Έτος	Πυκνότητα, kg/m <sup>3</sup>
1991	0,63
1992	0,54
1993	0,72
1994	0,58
1995	0,63
1996	0,59
1997	1,03
1998	1,09

## 7.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων από δυο διαφορετικούς ΧΔΑ με αερόβια κελιά που βρίσκονται στην Georgia (USA)

### 7.5.1. Περιγραφή εγκαταστάσεων, γεωγραφικής περιοχής και σκοπός του προγράμματος

Οι ΧΔΑ αντιμετωπίζουν παγκοσμίως τις συνέπειες των συμβατικών τεχνικών υγειονομικής ταφής, με τις οποίες δημιουργούνται αναερόβιες συνθήκες και έτσι ενισχύεται η αργή σταθεροποίηση των αποβλήτων, η παραγωγή αερίου μεθανίου (ένα αέριο θερμοκηπίου), και η παραγωγή επιβλαβών στραγγισμάτων με το πέρασμα του χρόνου. Η λύση, που έχει αποδειχθεί αποτελεσματική σε δύο ΧΔΑ στις ΗΠΑ, είναι η αερόβια αποικοδόμηση, η οποία μπορεί γρήγορα να αυξήσει το ποσοστό αποσύνθεσης απορριμμάτων, να μειώσει την παραγωγή του μεθανίου, να βελτιώσει την ποιότητα των στραγγισμάτων και να μειώσει την ποσότητα του υγρού που χρειάζεται για την επεξεργασία (Dessaulx *et al.*, 1987, Hudgins and Green, 1999). Τα δύο ξεχωριστά συστήματα αερόβιας βιοεξυγίανσης, που λειτουργούν σε διαφορετικούς ΧΔΑ, βρίσκονται στην Πολιτεία της Georgia (USA). Αποδείχθηκε ότι τα συστήματα αυτά ενσωματώνονται εύκολα στους υπάρχοντες ΧΔΑ και επιπλέον οι ΧΔΑ μπορούν με επικερδή τρόπο να μετατρέψουν τις αναερόβιες διαδικασίες, με τις οποίες λειτουργούν, σε αερόβιες, επιτυγχάνοντας άμεσα αλλά και μακροπρόθεσμα οφέλη με την αερόβια αποδόμηση των αστικών απορριμμάτων (Dessaulx *et al.*, 1987).

Η πρώτη ανεξάρτητη μονάδα βιοαερισμού (*bioventing*) βρίσκεται στον ΧΔΑ της κομητείας της Columbia (Columbia County Landfill), η οποία στο εξής θα αναφέρεται σαν Αερόβιο Σύστημα 1, και η δεύτερη στον ΧΔΑ Live Oak (Live Oak Landfill), η οποία θα αναφέρεται σαν Αερόβιο Σύστημα 2. Η λειτουργία τους ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 1997. Ήταν εντυπωσιακό το γεγονός ότι όχι μόνο η κάθε μονάδα απέδειξε ότι η *in situ* αερόβια αποσύνθεση των MSW μπορεί να ολοκληρωθεί ακίνδυνα και επιτυχώς, αλλά και ότι τα στοιχεία και στις δύο ήταν σχεδόν παρόμοια, όσον αφορά τη μείωση του παραγόμενου βιοαερίου και την αύξηση της καθίζησης των αποβλήτων, παρά το γεγονός ότι ο κάθε ΧΔΑ κατασκευάστηκε με διαφορετικό τρόπο και είχε διαφορετικές εισροές απορριμμάτων.

Το πρώτο σύστημα εγκαταστάθηκε σε ένα τμήμα 65 στρεμμάτων ενός ΧΔΑ κοντά στην Augusta της Georgia και λειτούργησε για περίπου 21 μήνες. Μέσω μιας δευτερεύουσας τροποποίησης της άδειας λειτουργίας του ΧΔΑ, το Τμήμα Προστασίας του Περιβάλλοντος της Georgia (Environmental Protection Division, EPD) μέσα σε 30 ημέρες ενέκρινε την άδεια για τη λειτουργία του συστήματος βιοαερισμού. Η εγκατάσταση του συστήματος έγινε σε διάστημα περίπου δύο εβδομάδων και είναι σε λειτουργία από τότε. Το δεύτερο σύστημα

(Live Oak Landfill), κατασκευάστηκε σε ένα μεγαλύτερο ΧΔΑ στη νότια-κεντρική Georgia, και λειτούργησε μόνο για εννέα μήνες. Αυτό το κελί καταλάμβανε έκταση 10 στρεμμάτων, περιείχε περίπου 57.000 m<sup>3</sup> στερεών αποβλήτων και μέσο βάθος 9 m. Η παρακολούθηση των κρίσιμων δεδομένων λειτουργίας γινόταν με χρήση ενός συστήματος οργάνων πραγματικού χρόνου που συνδέθηκαν με εξοπλισμό τηλεπισκόπησης. Με την ολοκλήρωση του προγράμματος, έγινε εκταφή των αποδομημένων απορριμμάτων για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Επιπλέον, έγινε χαρακτηρισμός των ανακτημένων απορριμμάτων για καθορισμό πιθανών μελλοντικών χρήσεών τους (Dessaulx *et al.*, 1987, Hudgins and Green, 1999).

### 7.5.2. Τρόπος λειτουργίας της μεθόδου βιοαερισμού στα δύο κελιά

Το σύστημα λειτουργεί με φυσικές διεργασίες με την εισαγωγή αέρα υπό πίεση στη μάζα των απορριμμάτων και με ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, ώστε να παρέχονται το απαιτούμενο οξυγόνο, η υγρασία και τα θρεπτικά συστατικά στους αυτόχθονες αερόβιους μικροοργανισμούς που αποδομούν τα στερεά απόβλητα. Και στις δύο εγκαταστάσεις το σύστημα εισαγωγής αέρα αποτελείται από ηλεκτρικούς φυσητήρες ή αεροσυμπιεστές και σωλήνες τροφοδοσίας, συνδεδεμένους με την υπάρχουσα υποδομή του ΧΔΑ. Μέσα στο στρώμα των αποβλήτων εγκαθίστανται κάθετα φρεάτια εισαγωγής αέρα για να παρέχουν το απαιτούμενο οξυγόνο. Στον ΧΔΑ Νούμερο 1, που υπήρχε εγκατεστημένο σύστημα συλλογής στραγγισμάτων στον πυθμένα, έγινε ενσωμάτωση συστήματος βιοαερισμού σ' αυτό το σύστημα, και αποδείχθηκε στην πράξη ότι είναι δυνατή η συλλογή των υγρών κατά τη διάρκεια της εισαγωγής αέρα (Read *et al.*, 2001).

**Πίνακας 6.** Συνθήκες λειτουργίας στα δύο κελιά (Read *et al.*, 2001).

Παράμετρος σχεδιασμού	Μονάδες	ΧΔΑ Columbia County (Σύστημα 1)	ΧΔΑ Live Oak (Σύστημα 2)
Μέγεθος κελιού	στρέμματα	16	10
Μέσο βάθος στρώσης απορριμμάτων	m	3	10
Ύψολικός όγκος απορριμμάτων	m <sup>3</sup>	45,2	49
Ηλικία των αποβλήτων κατά την έναρξη του προγράμματος	μήνες	18	18
Ρυθμός εισαγωγής στραγγισμάτων	L/d	13,6	25,2
Ύψολική έγχυση στραγγισμάτων	L	> 7.000.000	6.676.200
Ρυθμός εισαγωγής αέρα	m <sup>3</sup> /min	56	100
Διάρκεια της μελέτης	μήνες	18	9
Ξήσεις βροχοπτώσεις	cm/yr	137	114

Ο αρχικός στόχος του αερόβιου βιοαντιδραστήρα είναι να επιτευχθεί η βέλτιστη σταθεροποίηση των απορριμμάτων μέσω της αερόβιας αποικοδόμησης. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος στην ποιότητα των στραγγισμάτων μελετήθηκε με τη βοήθεια εργαστηριακών αναλύσεων. Ο όγκος του παραγόμενου μεθανίου καθορίστηκε με

επί τόπου μετρήσεις των αερίων του βιαντιδραστήρα. Η καθίζηση της μάζας των απορριμμάτων του βιαντιδραστήρα ελέγχθηκε με φυσικές μεθόδους. Αν και το ποσοστό βιοδιάσπασης μπορεί να καθοριστεί με διάφορους τρόπους, σε αυτή την εφαρμογή καθορίστηκε με βάση τα ποσοστά λήψης οξυγόνου και τις μετρήσεις θερμοκρασίας των αποβλήτων. Τα αποτελέσματα από κάθε κελί δοκιμής συζητούνται παρακάτω. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατό να εξασφαλιστούν πλήρως αερόβιες συνθήκες σε όλο το κελί βιαντιδραστήρα, και είναι ακόμα δυσκολότερο εάν το σύστημα αναπτύσσεται σε μια ολόκληρη μονάδα βιαντιδραστήρα. Σημαντικό όμως είναι ότι οι συνθήκες μέσα στην περιοχή είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στο "ιδανικό" για την πλειοψηφία της περιοχής. Σίγουρα κάποιες από τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στον βιαντιδραστήρα θα παραμείνουν αναερόβιες, αλλά αυτό μπορεί να περιοριστεί με συνεχή έλεγχο των αερόβιων συνθηκών. Μόλις σταθεροποιηθούν τα απορρίμματα, η προσωρινή επιφανειακή κάλυψη από χώμα μπορεί να απομακρυνθεί, να συσσωρευτεί και να τοποθετηθεί σε ένα νέο επίπεδο απορριμμάτων, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τις δαπάνες σε υλικά (Read *et al.*, 2001).

### 7.5.3. Αποτελέσματα της μελέτης

Οι αναλύσεις των δειγμάτων αμμού, οι χημικές αναλύσεις των στραγγισμάτων, η βιολογική δραστηριότητα και η επιθεώρηση των δειγμάτων αποβλήτων επιβεβαιώνουν ότι και τα δύο αερόβια συστήματα ΧΥΤΑ ήταν εξαιρετικά αποτελεσματικά, σχετικά με τη σταθεροποίηση των απορριμμάτων. Επιπλέον, κάθε σύστημα λειτουργεί ως σύστημα επεξεργασίας στραγγισμάτων *in situ*, με το οποίο ο όγκος των στραγγισμάτων, καθώς επίσης και οι συγκεντρώσεις ρυπαντών, μειώνονται (Hudgins and Green, 1999). Συγκεκριμένα, τα αερόβια συστήματα παρουσίασαν: (α) Σημαντική αύξηση του ποσοστού βιοδιάσπασης των MSW σε σχέση με τις αναερόβιες διαδικασίες, (β) Μείωση όγκου στραγγισμάτων και μείωση συγκεντρώσεων οργανικών ενώσεων στα στραγγίσματα και (γ) Σημαντική μείωση παραγωγής μεθανίου. Επιπλέον, παρατηρήθηκε καθίζηση των αποβλήτων, καθώς κάθε σύστημα σταθεροποίησε τα οργανικά τμήματα της μάζας των αποβλήτων. Η επίτευξη αυτών των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με διατήρηση της βέλτιστης περιεκτικότητας σε υγρασία και με σταθεροποιημένες θερμοκρασίες στη μάζα των αποβλήτων. Ο Πίνακας 7 παρέχει μια περίληψη των αποτελεσμάτων.

#### Μετρήσεις παραγόμενου βιοαερίου

Και στα δύο αερόβια συστήματα, το O<sub>2</sub> αρχικά αυξήθηκε σε πολλά από τα σημεία εισαγωγής αμμού μέσα στη μάζα των αποβλήτων. Το CO<sub>2</sub> μειώθηκε αρχικά και αυξήθηκε έπειτα σε συσχέτισμό με την κατανάλωση O<sub>2</sub>. Αν συγκριθούν οι μετρήσεις αυτές των αερίων με τα επίπεδα μεθανίου, δείχνουν ένα μετασχηματισμό από αναερόβιο σε τουλάχιστον μερικό αερόβιο μεταβολισμό. Το CO<sub>2</sub> αυξάνεται καθώς καταναλώνεται το O<sub>2</sub> και η παραγωγή CH<sub>4</sub> ελαττώνεται. Η θερμοκρασία της μάζας των αποβλήτων παρέμεινε σταθερή μεταξύ 40 και 60°C μετά την επίτευξη αερόβιων συνθηκών. Η υγρασία της μάζας ήταν κάτω από 50% κατά βάρος (κ.β. - w/w) στις πιο ενεργές περιοχές. Συνολικά, αυτά τα στοιχεία δείχνουν ότι επιτεύχθηκαν αερόβιες συνθήκες μέσα στα απόβλητα. (Hudgins, 1999). Στο αερόβιο Σύστημα 2, τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αερίου ήταν παρόμοια. Οι συγκεντρώσεις μεθανίου μειώθηκαν κατά τουλάχιστον 80% σε τρεις εβδομάδες μετά από την έναρξη των συστημάτων και παρέμειναν κάτω από 15% κατ' όγκο για το μεγαλύτερο μέρος του προγράμματος. Η κατανάλωση οξυγόνου αυξήθηκε κατ' αντιστοιχία με τη μείωση μεθανίου (Διάγραμμα 8). Επισημαίνεται ότι το CO<sub>2</sub> είναι επίσης αέριο θερμοκηπίου, αλλά λιγότερο ισχυρό από το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>).

**Πίνακας 7.** Σύνοψη των τελικών αποτελεσμάτων (Read *et al.*, 2001).

Παράμετρος	ΧΔΑ Columbia County (Σύστημα 1)	ΧΔΑ Live Oak (Σύστημα 2)
Ρυθμός βιοαποδόμησης <sup>α</sup>	Αύξηση κατά 50%	Αυξανόμενος κατά 110% από 0,167 έως 0,351 mg O <sub>2</sub> την ώρα (h)
Καθίζηση στερεών αποβλήτων (m/m) <sup>β</sup>	Μέγιστη = 9% (23 cm) Μέσος όρος = 4,5%	Μέγιστη = 10%
Παραγωγή μεθανίου <sup>γ</sup>	Μείωση κατά 50-90%	Μείωση κατά 50-90%
BOD στραγγισμάτων	Μείωση κατά 70% 1100-300 ppm (3 μήνες)	Μείωση κατά 70%
VOCs στραγγισμάτων	Μείωση κατά 75-99% <sup>δ,ε</sup>	Μείωση κατά 50%
Οσμές	Αξιοπρόσεκτη μείωση στην περιοχή	Σχετική επιτυχία που αναφέρθηκε από το προσωπικό
Εκταφή απορριμμάτων	Πραγματοποιήθηκε	Χρήση λιπάσματος και χώματος ως κάλυψη του ΧΔΑ
Όγκος στραγγισμάτων	Μείωση κατά 86%	Μείωση κατά 50%

<sup>α</sup> Βασισμένος στην παραγωγή CO<sub>2</sub>, στην κατανάλωση O<sub>2</sub> και στις θερμοκρασίες της μάζας των αποβλήτων.

<sup>β</sup> Με βάση τη φυσική έρευνα, μελλοντική υπερφόρτιση δεν λαμβάνεται υπόψη

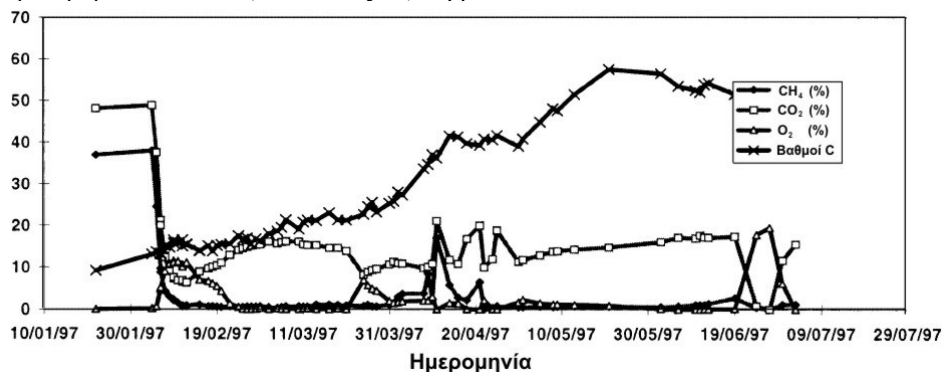
<sup>γ</sup> Μείωση μεθανίου από 50-90% για το 80% των σημείων μέτρησης, 70-90% για τη σειρά των σημείων που βρίσκονται πιο κοντά στα σημεία εισαγωγής αέρα.

<sup>δ</sup> Σίδηρος που μειώνεται από 75-90% ο μολύβδος μειώθηκε στα επίπεδα υποβάθρου.

<sup>ε</sup> Π.χ. τολουόλιο (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>), ακετόνη (CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>) κ.λπ..

### Ποιότητα στραγγισμάτων

Οι εργαστηριακές μετρήσεις του BOD και των συγκεντρώσεων πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) στα στραγγίσματα έδειξαν σημαντική μείωση και για τα 2 συστήματα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7. Στο Σύστημα 1, το BOD μειώθηκε κατά τουλάχιστον 70%. Τα οργανικά όπως η μέθυλ-αίθυλ-κετόνη (MEK) και η ακετόνη (CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>) μειώθηκαν σημαντικά. Επίσης το περιτωματικό κολοβακτηρίδιο αποβλήθηκε από τα στραγγίσματα. Οι ολικές συγκεντρώσεις VOC σε πολλά από τα δείγματα ατμού βρέθηκαν λιγότερο από 1 ppm. Στο Σύστημα 2, οι συγκεντρώσεις σιδήρου στα στραγγίσματα δηλώνουν σημαντική μείωση με την αερόβια διαδικασία, από 61 ως 23,03 ppm.



**Διάγραμμα 8.** Αέριες εκπομπές βιοαντιδραστήρα (%)-Ενδεικτικές των αερόβιων συνθηκών (Read *et al.*, 2001).

### *Μείωση όγκου στραγγισμάτων*

Πριν από το ξεκίνημα του αερόβιου συστήματος τον Ιανουάριο του 1997, ο ΧΔΑ Νούμερο 1 έστελνε κάθε μήνα περίπου 454 m<sup>3</sup> υγρών διασταλλαγμάτων στην τοπική μονάδα επεξεργασίας. Τα στραγγίσματα αντλούνταν χωρίς προ-επεξεργασία, μέσω ενός νέου αντλητικού σταθμού (μια επένδυση κόστους περίπου \$100.000). Κατά τη διάρκεια των πρώτων 6 μηνών μετά από την έναρξη των αερόβιων συστημάτων, από το Σύστημα 1 δεν αντλούνταν στραγγίσματα στη μονάδα επεξεργασίας. Από το Μάρτιο του 1998, δηλαδή 14 μήνες μετά από την έναρξη, το αερόβιο σύστημα 1 έχει αντλήσει συνολικά μόνο 950 m<sup>3</sup> προς τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Αν είχε διατηρηθεί ο προηγούμενος ρυθμός παραγωγής στραγγισμάτων (δηλαδή 454 m<sup>3</sup> το μήνα) θα απαιτούσαν επεξεργασία περίπου 6.400 m<sup>3</sup> στραγγισμάτων (454 m<sup>3</sup> × 14 μήνες). Επομένως οι ανάγκες επεξεργασίας των στραγγισμάτων από το Σύστημα 1 μειώθηκαν κατά ένα ποσοστό πάνω από 85%. Αυτή η μείωση οφείλεται κατά ένα μέρος στις εξατμιστικές συνέπειες λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών της μάζας των απορριμμάτων και στην επίδραση του αέρα που εισάγεται και ξηραίνει τα απορρίμματα.

### *Αποτελέσματα εκταφής απορριμμάτων*

Τον Νοέμβριο του 1997, έγινε εκσκαφή των απορριμμάτων από τα «αερόβια» και «αναερόβια» τμήματα του ΧΔΑ 1 για να εξεταστούν τα αποτελέσματα των αερόβιων διαδικασιών. Στις περισσότερες από τις περιοχές που έγινε εκταφή, τα απορρίμματα ήταν τυπικά MSW των βορειοανατολικών Η.Π.Α.: τρόφιμα τοποθετημένα σε σακούλες ή χωρίς, χαρτί, πλαστικό και διάφορα απορρίμματα. Όμως παρατηρήθηκε και ένα αξιόλογο ποσοστό αδρανών και ανθεκτικών υλικών μεγάλου μεγέθους, όπως απορρίμματα κατασκευής και κατεδάφισης (μιάζα), επεξεργασμένη ξυλεία, απορρίμματα ξύλου και μεγάλου πάχους πλαστικά. Αυτό δεν είχε προβλεφθεί πριν από αυτό το πρόγραμμα (Johnson and Baker, 1999), που είχε θεωρήσει ότι ο ΧΔΑ 1 δέχονταν MSW υψηλού οργανικού περιεχομένου (πάνω από 60%).

Παρά την παρουσία αυτών των ανθεκτικών στην βιοαποδόμηση υλικών, η επιθεώρηση των διάφορων τύπων οργανικών απορριμμάτων που συλλέχθηκαν στις «αερόβιες» περιοχές επιβεβαίωσε ότι στους αερόβιους ΧΔΑ πραγματοποιείται γρήγορη υποβίβαση μεγάλου μέρους του οργανικού κλάσματος των MSW. Επίσης, τα εύκολα διασπάζσιμα υλικά, όπως τα υπολείμματα τροφίμων, η βλάστηση και τα προϊόντα χαρτιού «λιπασματοποιήθηκαν», και μετατράπηκαν σε ένα πλούσιο χουμικό υλικό καφέ χρώματος. Συγκριτικά με τις «αερόβιες», η επιθεώρηση των δειγμάτων απορριμμάτων από την εκταφή στις «αναερόβιες» περιοχές επιβεβαίωσε μικρή έως μηδενική υποβάθμιση των οργανικών απορριμμάτων. Επίσης, οι οσμές από τις αναερόβιες περιοχές είχαν σημαντικά συστατικά αμμωνίας και θείου. Τα MSW που εξετάστηκαν στις δύο αυτές περιοχές είχαν τοποθετηθεί στο ΧΔΑ περίπου την ίδια χρονική στιγμή. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των ανασκαφών παρατηρήθηκε ότι τα μεγάλα, ανθεκτικά υλικά σχημάτιζαν μια δομή με μεγάλα κενά διαστήματα που γέμισαν με τα οργανικά υλικά. Είναι πιθανό ότι, αν και η αερόβια διαδικασία δεν ήταν δυνατό να μεταβάλλει τη δομή αυτή (πράγμα που φαίνεται από την αμελητέα καθίζηση του ενδιάμεσου αργλικού καλύμματος), η δομή επέτρεπε στον αέρα και τα στραγγίσματα να φτάνουν στις ευκολότερα διασπάζσιμες οργανικές ουσίες. Έτσι γινόταν λιπασματοποίηση των άμεσα βιοδιασπάζσιμων υλικών. Πάντως, για μεγαλύτερες περιόδους λειτουργίας εκτιμάται ότι το σύστημα μπορεί να διασπάσει πολλά από τα ανθεκτικά ξυλώδη υλικά (Boni *et al.*, 1997).

Στον αερόβιο ΧΔΑ Νούμερο 2, τα αποδομημένα απορρίμματα μετά την εκταφή τους χωρίστηκαν με περιστρεφόμενα κυλινδρικά κόσκινα. Το πιο λεπτόκοκκο κλάσμα που προέκυψε από το κοσκίνισμα ήταν κατάλληλο για λίπανση εδαφών και είχε ικανοποιητική

περιεκτικότητα σε υγρασία. Το λίπασμα ήταν σταθερό, και δεν απαιτούσε κάποια άλλη επεξεργασία πριν από τη χρήση. Τα διαλυτά άλατα, τα μέταλλα και το pH ήταν μέσα σε ασφαλή όρια, ενώ δεν ανιχνεύτηκαν παθογόνοι μικροοργανισμοί.

#### Καθίζηση απορριμμάτων

Η καθίζηση των απορριμμάτων είναι συνάρτηση των εξής παραμέτρων: είδος και σύσταση απορριμμάτων, πυκνότητα συμπίεσης, υγρασία, ύψος ΧΔΑ και χρόνος (Reinhart and Townsend, 1997, Yuen *et al.*, 1999). Σύμφωνα με μετρήσεις που έγιναν στο αερόβιο τμήμα σε συγκεκριμένες θέσεις (πριν και κατά τη διάρκεια του προγράμματος), η καθίζηση έφτανε τα 23 cm από βάθος στρώσης απορριμμάτων ίσο με 3 m. Παρά το γεγονός ότι με την αερόβια επεξεργασία γινόταν λιπασματοποίηση παρουσία ανθεκτικών αδρανών υλικών, συστήνεται γενικά τα ογκώδη, ανθεκτικά, αδρανή απορρίμματα, όπως επεξεργασμένο ξύλο, σκυρόδεμα και μεγάλου πάχους πλαστικά, να απορρίπτονται σε ξεχωριστούς χώρους διάθεσης μαζών ή να ανακυκλώνονται. Έτσι, θα επιτευχθούν μεγαλύτερα ποσοστά λιπασματοποίησης των απορριμμάτων (Yuen *et al.*, 1999).

Η καθίζηση στο Σύστημα 2, μετρημένη με φυσική χωροστάθμηση, ξεπέρασε τα 30 cm στις περισσότερες περιοχές (Εικ. 31). Υπάρχουν ενδείξεις ότι ο ΧΔΑ θα είναι σε θέση να ανακτήσει σχεδόν το 50% του διαθέσιμου χώρου του, λόγω της καθίζησης και της εκταφής και απομάκρυνσης μεγάλου μέρους των απορριμμάτων για χρήση τους ως λίπασμα ή υλικό επικάλυψης. Εάν υλικά όπως πλαστικά, μέταλλο και γυαλί δεν καταλήξουν στον ΧΔΑ αλλά στην ανακύκλωση, τότε, όπως υποστηρίζουν οι Hudgins and Green (1999) το ποσοστό ανάκτησης χώρου θα φτάσει το 70% ή και περισσότερο. Αυτή είναι μια πολύ σημαντική εκτίμηση, καθώς σε πολλά μέρη του κόσμου ο διαθέσιμος χώρος ταφής μειώνεται γρήγορα, όπως στις βορειοανατολικές ΗΠΑ και σε περιοχές της Αγγλίας (Hudgins and Green, 1999).



**Εικόνα 31.** Καθίζηση μετά από την αερόβια επεξεργασία : (A) Ύψος της επιφάνειας του ΧΥΤΑ όταν έγινε η τοποθέτηση του σωλήνα και (B) Νέο ύψος μετά την καθίζηση (Hudgins *et al.*, 2000).

Στα Συστήματα 1 και 2 τα ύψη των στρώσεων των απορριμμάτων ήταν 3 και 9 m αντίστοιχα. Υπολογίζεται ότι το αερόβιο σύστημα θα αυξήσει την προβλεπόμενη καθίζηση μετά την επιβάρυνση με μελλοντικές στρώσεις απορριμμάτων που θα αυξήσουν το ύψος

αυτό, αφού εξακολουθεί να αποδομεί αερόβια και να μειώνει το δυναμικό των απορριμμάτων. Παρά το γεγονός ότι το αερόβιο σύστημα εξαρτάται από σύνθετους βιολογικούς μηχανισμούς, η τεχνολογία του μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε νέους και υπάρχοντες ΧΔΑ με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η επίπτωσή του στις λειτουργίες του ΧΔΑ. Οι δύο ΧΔΑ που περιγράφηκαν, δέχονται MSW παρόμοιας σύνθεσης με πολλούς άλλους ΧΔΑ σε διάφορες χώρες, με αποτέλεσμα, τα πλεονεκτήματα που παρουσίασαν με την χρήση των αερόβιων συστημάτων να μπορούν να αξιοποιηθούν διεθνώς. Με την ανάπτυξη των αντίστοιχων τεχνολογιών, μπορούν να αξιολογηθούν επιπλέον δεδομένα για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση των μελλοντικών αερόβιων συστημάτων (Hudgins, 1998, Hudgins and Green, 1999, Johnson and Baker, 1999).

#### *Οικονομικά οφέλη από τη χρήση των αερόβιων συστημάτων*

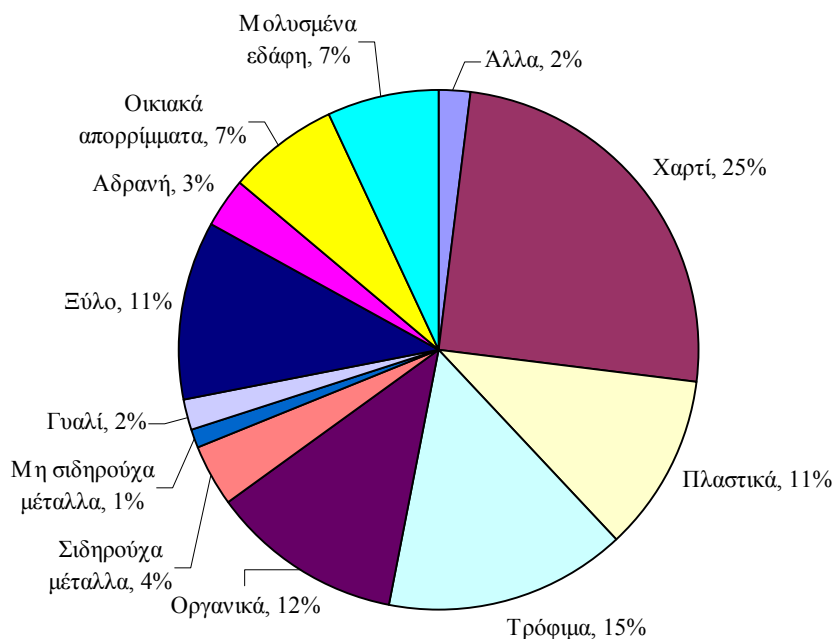
Αναλυτικά τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από τη μετατροπή των αναερόβιων διαδικασιών, με τις οποίες λειτουργούν οι ΧΔΑ, σε αερόβιες διαδικασίες, παρουσιάζονται στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Εδώ αναφέρουμε επιγραμματικά τα οφέλη που προέκυψαν από τις δύο εφαρμογές που περιγράφηκαν παραπάνω: (α) Αυξανόμενα έσοδα μέσω της ανάκτησης κενού χώρου (επιμήκυνση χρόνου ζωής του ΧΔΑ), (β) ελάττωση των μολυσματικών παραγόντων στα στραγγίσματα καθώς και μείωση του όγκου των στραγγισμάτων, (γ) μείωση της παραγωγής αερίου μεθανίου, (δ) μειωμένες δαπάνες περάτωσης του έργου και λειτουργίας και (ε) μειωμένες περιβαλλοντικές ευθύνες. Επιπλέον, ο σχεδιασμός αυτός ενσωματώνει μια πρακτική και οικονομικά αποδοτική προσέγγιση στην παροχή αέρα και υγρασίας στη μάζα των απορριμμάτων (Hudgins, 1998b). Παρακάτω ακολουθούν συνοπτικές περιγραφές κάποιων άλλων ΧΔΑ. Οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες κρίνεται σκόπιμο να παραληφθούν μιας και είναι ίδιες με αυτές που έχουν ήδη περιγραφεί.

### **7.6. Sainte Sophie, Quebec**

Ο βιοαντιδραστήρας του Sainte Sophie, δουλεύει από το 1997, βρίσκεται σε μία έκταση 120 στρεμμάτων και δέχεται περίπου 940.000 ton MSW/yr (Sainte Sophie Shines, 2005).

#### *Σύσταση απορριμμάτων*

Στην Εικόνα 32 φαίνεται η σύσταση των απορριμμάτων που εισέρχονται στον ΧΥΤΑ του Sainte Sophie.



**Εικόνα 32.** ΧΔΑ Sainte Sophie και σύσταση των απορριμμάτων (Pollution Probe, 2005).

#### *Επανακυκλοφορία στραγγισμάτων*

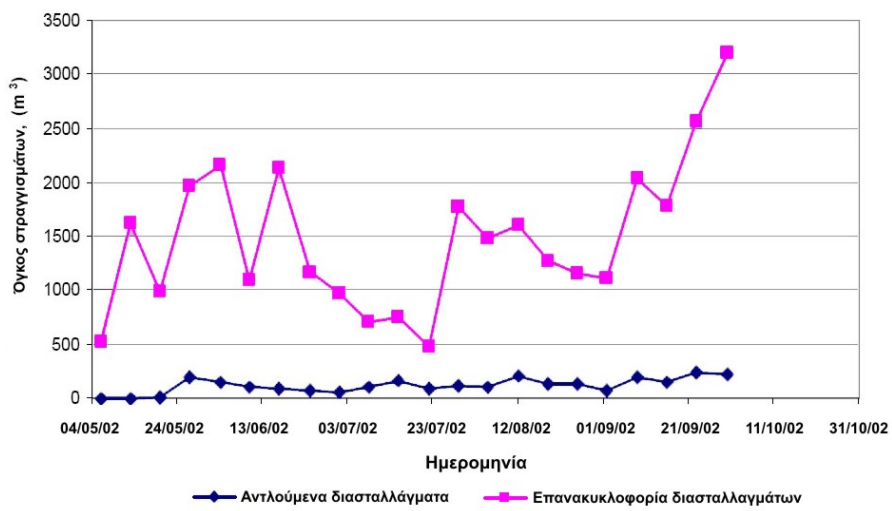
Το δίκτυο συλλογής των στραγγισμάτων αποτελείται από έναν σωλήνα HDPE που εκτείνεται σε όλη την έκταση των απορριμμάτων (Εικ. 33). Η γραμμή στραγγισμάτων είναι διάτρητη με οπές διαμέτρου 3/32 ίντσες. Τα υγρά στραγγίσματα συγκεντρώνονται σε φρεάτιο συλλογής. Από τις 10 Μαΐου μέχρι 10 Σεπτεμβρίου 2002 ανακυκλώθηκαν περίπου 30.700 m<sup>3</sup> υγρών στραγγισμάτων ενώ προστέθηκαν 75 - 125 Lt νερού /τον απορριμμάτων (Διάγραμμα 9, Pollution Probe, 2005).

### **7.7. Βιοαντιδραστήρας στο New River της Φλόριντα**

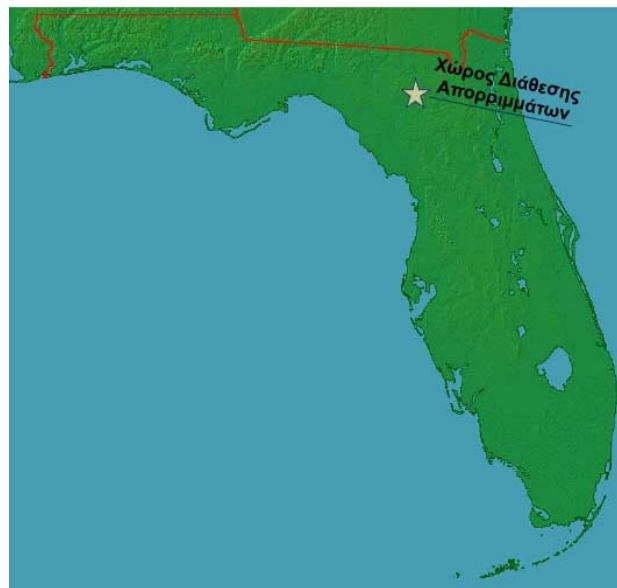
Ο ΧΔΑ του New River εξυπηρετεί πέντε πολιτείες και δέχεται περίπου 800 ton MSW/d. Ο βιοαντιδραστήρας καταλαμβάνει έκταση 40 στρεμμάτων, και έχει χωρητικότητα 300.000 τόνων απορριμμάτων. Το κατασκευαστικό κόστος της εγκατάστασης ανήλθε στα 2.174.798 \$, ενώ το κόστος μελέτης στα 639.887 \$. Ο βιοαντιδραστήρας του New River χωρίζεται σε αερόβιο τμήμα που καταλαμβάνει περίπου το 25% της συνολικής έκτασης και σε αναερόβιο (75%). Στο αερόβιο τμήμα προστίθενται περίπου 9 m<sup>3</sup>/d νερού, ενώ στο αναερόβιο τμήμα του βιοαντιδραστήρα απαιτείται περισσότερη υγρασία και προστίθεται περίπου 20 m<sup>3</sup>/d νερό.



**Εικόνα 33.** Επανακυκλοφορία στραγγισμάτων (Pollution Probe, 2005).



**Διάγραμμα 9.** Όγκος στραγγισμάτων σε εβδομαδιαία βάση (Pollution Probe, 2005).



**Εικόνα 34.** Χάρτης της υπό μελέτη περιοχής (New Rules Project, 2004).



**Εικόνα 35.** Συμπιεστής - Εξαγωγή βιοαερίου (State Water Resources Control Board, 2005).



**Εικόνα 36.** Τοποθέτηση γεωμεμβράνης ενισχυμένου πολυπροπυλενίου (NSWMA, 2005).

## 7.8. Βιβλιογραφία

- Boni M., Delle-Site A, Lombardi G., and Rolle E. (1997). Aerobic-anaerobic operation of a lab-scale municipal solid waste sanitary landfill. *Journal of Solid Waste Technology Management*, **24**(3),137-142.
- California Regional Water Quality Control Board (2000). *Central Valley Region, Waste Discharge Requirements for the Yolo County Central Landfill*, No. 5-00-134, June 16.
- Dessaulx J. et al. (1987). Aerobic degradation of household refuse in landfill. *ISWA International Sanitary Landfill Symposium*, Cagliari, Italy.
- US EPA (2005). *EPA - Yolo County Central Landfill* [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.epa.gov/projectxl/yolo](http://www.epa.gov/projectxl/yolo)].
- Golder Associates (1999). *Final Report, Construction Quality Assurance, Yolo County Central Landfill, WMU 6, Module D, Phase 1 Expansion*.
- Hudgins M. and Green L. (1999). Using an aerobic landfill system. *SWANA's 22<sup>nd</sup> Landfill Gas Symposium*, Orlando, Florida.
- Hudgins M. (1999). Aerobic landfill studies from the USA. *1<sup>st</sup> International Conference on Solid Waste*, Rome, Italy.
- Hudgins M. (1998), Pilot project data on aerobic waste processing. *14<sup>th</sup> International Solid Waste Technology and Management Conference*, Philadelphia, USA.
- IEM, SWANA, EPA (2000). *Final Project Agreement for the Yolo County Accelerated Anaerobic and Aerobic Composting (Bioreactor) Project*, 14 September.
- Johnson W. and Baker J. (1999). Transformation of an anaerobic MSW landfill to an aerobic bioreactor at Live Oak Landfill. *Waste Tech 99*, New Orleans, USA.
- Landfill Gas Monitor - Landtec Gem 500 [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.envisupply.com/rentals/instruments/LandtecGem500.htm](http://www.envisupply.com/rentals/instruments/LandtecGem500.htm)].
- MSW (2005). MSW Management/Getting Dow to Cases: Just What Is a Bioreactor Landfill? [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.mswmanagement.com/msw\\_0007\\_getting.html](http://www.mswmanagement.com/msw_0007_getting.html)].
- Murphy R.J., Jones D.E., and Stessel R.I. (1995). Relationship of microbial mass and activity in biodegradation of solid waste. *Waste Management and Research*, **13**, 485-497.
- NSWMA (2005). *National Solid Wastes Management Association*, [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.nswma.org](http://www.nswma.org)].
- New Rules Project - Democratic Energy (2004). [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.newrules.org/de/archives/2004\\_12.html](http://www.newrules.org/de/archives/2004_12.html)].
- Pollution Probe (2005). [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.pollutionprobe.org/whatwedo/GPW/montreal/presentations/bourque.pdf>].

- Read A.D., Hudgins M., Harper S., Phillips P., and Morris J. (2001). The successful demonstration of aerobic landfilling. The potential for a more sustainable solid waste management approach? *Resources, Conservation and Recycling*, **32**, 115-146.
- Recycling Information for Davis California (2005). [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.ci.davis.ca.us/pw/recycle/recycle.cfm?t=garbage](http://www.ci.davis.ca.us/pw/recycle/recycle.cfm?t=garbage)].
- Sainte Sophie Shines (2005). [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.wasteage.com/mag/waste\\_sainte\\_sophie\\_shines/index.html](http://www.wasteage.com/mag/waste_sainte_sophie_shines/index.html)].
- State Water Resources Control Board (2005). [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.waterboards.ca.gov/>].
- Vector Engineering (2001). *Design Report for the Surface Liners of the Module D Phase 1 Bioreactors at the Yolo County Central Landfill*.
- Warith M. (2002). Bioreactor landfills: experimental and field results. *Waste Management*, **22**, 7-17.
- Yazdani Ramin, Bioreactor Project (2005). *Publications/Presentations*, [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.yolocounty.org/recycle/bioreactor.htm](http://www.yolocounty.org/recycle/bioreactor.htm)].
- Yazdani, R., Moore R., Dahl. K., Augenstein D. (1998). *Yolo County Controlled Landfill Bioreactor Project. Yolo County Public Works and I E M, Inc. Report to the Urban Consortium Energy Foundation (UUCETF) and the Western Regional Biomass Energy Program, USDOE* [Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.yolocounty.org/recycle/bioreactor.htm](http://www.yolocounty.org/recycle/bioreactor.htm)].
- Yuen S., Styles J., Wang Q., and McMahon T. (1999). Findings from a full-scale bioreactor landfill study in Australia. *Proceedings of Sardinia 99 - 7<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari. Italy.
- Zhao X., Voice T.C., Khire M., Maher S., Musleh R., Heerwani P., and Hashsham S. (2003). Full-scale evaluation of bioreactor landfill technology. *8th Annual Landfill Symposium*, Atlantic City, NJ, June 16-20.

## **ΔΕΝ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Reinhart and Townsend, 1997

Hudgins *et al.*, 2000

## 8. Βασική νομοθεσία για τα στερεά απόβλητα

### Μαυράκης Εμμανουήλ

Χημικός Μηχανικός

#### 8.1. Εισαγωγή

Οι θεμελιώδεις στόχοι της Ευρωπαϊκής Πολιτικής για την Διαχείριση των Στερεών Αποβλήτων διατυπώνονται στην Οδηγία Πλαίσιο 75/442/ΕΚ όπου επισημαίνεται: (α) Η πρόληψη δημιουργίας αποβλήτων, (β) η αξιοποίηση των παραγομένων αποβλήτων για παραγωγή δευτερογενών πρώτων υλών ή και ενέργειας και (γ) η ασφαλής τελική διάθεση των αποβλήτων που δεν μπορούν να αξιοποιηθούν. Αναγνωρίζονται δύο δόκιμες διεργασίες διάθεσης: Η υγειονομική ταφή που κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό (το 67% των παραγομένων αποβλήτων διατέθηκε σε ΧΥΤΑ) και η αποτέφρωση. Οι βασικές Οδηγίες που διέπουν τις παραπάνω διεργασίες διάθεσης είναι: (α) η Οδηγία 99/31/ΕΚ για την υγειονομική ταφή των στερεών αποβλήτων και (β) η Οδηγία 2000/76/ΕΚ για την αποτέφρωση των απορριμμάτων. Ο όγκος των απορριμμάτων που τελικά διατίθεται επιβάλλεται να μειωθεί ενώ τα ανακυκλώσιμα υλικά και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των απορριμμάτων μπορούν να τύχουν επεξεργασίας με κατάλληλες μεθόδους (π.χ. θερμικές) ώστε να ανακτηθούν υλικά ή ενέργεια.

Οι Εθνικοί Στόχοι εξειδικεύουν τους θεμελιώδεις στόχους της Ευρωπαϊκής Πολιτικής και αναφέρονται στη: (α) Δημιουργία συστημάτων ολοκληρωμένης διαχείρισης στερεών αποβλήτων σε όλες τις Περιφέρειες της χώρας, (β) σταδιακή μείωση της ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που οδηγούνται προς υγειονομική ταφή, (γ) σταδιακή αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης/αξιοποίησης των παραγομένων αποβλήτων συσκευασίας και άλλων προϊόντων, στα πλαίσια του Ν. 2939/01, (δ) κάλυψη του συνόλου της χώρας με σύγχρονους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων μέχρι το τέλος του 2008 και (ε) στον έλεγχο της λειτουργίας των ανεξέλεγκτων χωματερών και σταδιακή εξάλειψή τους μέχρι το τέλος της περιόδου υλοποίησης των σύγχρονων έργων διαχείρισης στερεών αποβλήτων.

Για τους ΧΑΔΑ (Χώροι Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων) το ΥΠΕΧΩΔΕ έχει θεσμοθετήσει τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων και έχει θέσει σαφές χρονοδιάγραμμα για την εξάλειψη των ΧΑΔΑ μέχρι το 2008 και καθορίζει «Πρότυπες Προδιαγραφές Τεχνικής Μελέτης Αποκατάστασης ΧΑΔΑ» και έχουν αποσταλεί σε κάθε Δήμο και προσπαθεί με βάση την επικινδυνότητα κάθε ΧΑΔΑ να ιεραρχήσει το κλείσιμο και αποκατάστασή τους. Η ευθύνη για την αποκατάσταση των ΧΑΔΑ ανήκει στους ΟΤΑ, στη διοικητική περιφέρεια των οποίων λειτουργούν ή στους Φορείς Διαχείρισης, εφόσον έχουν συ-σταθεί στην περιοχή. Το αργότερο μέχρι τον Ιούλιο του 2005 κάθε φορέας διαχείρισης είχε την υποχρέωση να έχει εφοδιαστεί με άδεια περιβαλλοντικής αποκατάστασης των ΧΑΔΑ, για τους οποίους φέρει την ευθύνη λειτουργίας τους. Η ευθύνη για την σύνταξη των μελετών περιβαλλοντικής αποκατάστασης ανήκει στους ΟΤΑ ή στους Φορείς Διαχείρισης. Οι μελέτες αυτές εγκρίνονται από τις Διευθύνσεις ΠΕΧΩ των Περιφερειών. Οι εγκεκριμένες μελέτες περιβαλλοντικής αποκατάστασης των ΧΑΔΑ, μαζί με τις οριστικές μελέτες των έργων, αποτελούν τα στοιχεία ωρίμανσης των έργων αποκατάστασης για την ένταξή τους σε χρηματοδοτικά προγράμματα. Η άμεση

ενεργοποίηση της Τ. Α., στην οποία ανήκει η ευθύνη για την υλοποίηση των έργων, αποτελεί το κλειδί για την εξάλειψη των ΧΑΔΑ.

Η έλλειψη οργανωμένων ΦοΔΣΑ, κατάλληλης μορφής και στελέχωσης, έχει σαν αποτέλεσμα τις παρατηρούμενες καθυστερήσεις στην υλοποίηση των εγκεκριμένων έργων ΔΣΑ και στον προγραμματισμό των συμπληρωματικών έργων, όπως είναι η προεπεξεργασία των στερεών αποβλήτων, η μείωση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των αστικών αποβλήτων, η εναλλακτική διαχείριση κλπ.

Οι παραπάνω στόχοι και οι απαιτήσεις για την προστασία του περιβάλλοντος οδήγησαν στην ανάγκη θέσπισης νομοθεσίας η οποία θέτει σαφείς προδιαγραφές για τον τρόπο τελικής διάθεσης των στερεών αποβλήτων ώστε επαρκώς να προστατευτεί και το έδαφος, τα νερά και ο αέρας και όχι μόνο η ανθρώπινη υγεία όπως ήταν ο στόχος των πρώτων υγειονομικών διατάξεων για την διαχείριση των απορριμμάτων. Οι παραπάνω στόχοι τίθενται με σαφήνεια στο νόμο πλαίσιο για την προστασία του περιβάλλοντος (Ν. 1650/86). Η πρόσφατη νομοθεσία προωθεί την ανακύκλωση των απορριμμάτων θεσπίζοντας φορέα και διαδικασίες. Με τις ΚΥΑ των τελευταίων ετών (π.χ. ΚΥΑ 50910/2727/22-12-03) καταργούνται προγενέστερες (π.χ. ΚΥΑ 69728/824/96, 113944/1997 κλπ.) προκειμένου να προσαρμοσθούν στις νέες Οδηγίες της Ε.Ε.

## **8.2. Βασική νομοθεσία στερεών αποβλήτων και καταργούμενες διατάξεις**

### **8.2.1. Ισχύουσα σήμερα βασική νομοθεσία για την διαχείριση των στερεών αποβλήτων**

Παρακάτω παρατίθεται η κύρια σχετική νομοθεσία που διέπει τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων.

- *ΚΥΑ Ειβ/301/1964. ΚΥΑ Ειβ/301/1964 Περί συλλογής αποκομιδής και διαθέσεως απορριμμάτων (ΦΕΚ 69/1964/Β).* Η ΚΥΑ αυτή είναι υγειονομική διάταξη και αποτελεί την πρώτη «ολοκληρωμένη» διάταξη για την διαχείριση των απορριμμάτων, τότε που η περιβαλλοντική νομοθεσία στηριζόταν στις υγειονομικές διατάξεις. Περιγράφει τις τεχνικές προδιαγραφές διαχείρισης των απορριμμάτων (στις οποίες βασίζεται η Διυπουργική Απόφαση 49541/86) και περιέχει τις βασικές τεχνικές οδηγίες για την υγειονομική ταφή στην Ελλάδα. Παρέχει μια λεπτομερή περιγραφή όλων των μεθόδων διάθεσης που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν, δίνει αρκετά λεπτομερείς προδιαγραφές για κάθε μέθοδο και περιγράφει όλα τα στάδια της διαχείρισης των απορριμμάτων. Θέτει τις προϋποθέσεις που ένας χώρος πρέπει να εκπληρώνει ώστε να χρησιμοποιηθεί σαν χωματερή. Ένα ασθενές σημείο της Διάταξης αυτής είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα για την μη εφαρμογή των ανωτέρω, με απόφαση του Νομάρχη, κάτω από ορισμένες συνθήκες, νομιμοποιώντας έτσι στην πράξη την ανεξέλεγκτη απόρριψη.
- *Ν. 743/1977 Ν. 743/1977 Περί προστασίας του θαλασσιού περιβάλλοντος.* Ο νόμος αυτός αφορά τα απορρίματα που παράγονται από τα πλοία. Επίσης, Η Οδηγία επίσης 2000/59/ΕΚ καθορίζει τα σχετικά με τις εγκαταστάσεις στους λιμένες για τα απόβλητα που προκύπτουν από την λειτουργία των πλοίων και τα υπολείμματα φορτίου
- *Ν. 1650/1986.* Ο Ν. 1650/1986 αφορά την προστασία του περιβάλλοντος. Αποτελεί τη βασική ελληνική νομοθεσία (νόμος – πλαίσιο) για την προστασία του Περιβάλλοντος στόχος της οποίας είναι η διαμόρφωση κριτηρίων και η δημιουργία μηχανισμών για την προστασία του περιβάλλοντος. Με βάση αυτόν τον νόμο, η

διαχείριση των στερεών αποβλήτων πρέπει με τρόπο που να μην θίγει το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία και να μην προκαλεί υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος. Επίσης, να εξοικονομούνται πρώτες ύλες και να γίνεται η μεγαλύτερη δυνατή επαναχρησιμοποίηση τους. Η διαχείριση των στερεών αποβλήτων σε εθνικό ή περιφερειακό επίπεδο γίνεται βάσει σχεδιασμού, που αποσκοπεί στον καθορισμό των μεθόδων διαχείρισης, καθώς και στην χωροθέτηση των εγκαταστάσεων διάθεσης. Οι υπόχρεοι για την διαχείριση των στερεών αποβλήτων συντάσσουν σχέδιο για τον τρόπο λήψης κατάλληλων μέτρων για τον περιορισμό των στερεών αποβλήτων, την εφαρμογή μεθόδων ανακύκλωσης, τη λήψη από αυτά πρώτων υλών και ενέργειας και για κάθε άλλη μέθοδο επαναχρησιμοποίησης τους. Σε οποιονδήποτε παράγει ή κατέχει ή διαχειρίζεται στερεά απόβλητα που λόγω του είδους της σύνθεσης ή της ποιότητας τους είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για την υγεία και το περιβάλλον, επιβάλλεται η τήρηση σχετικού βιβλίου.

- *ΚΥΑ 49541/1424/1986.* Η ΚΥΑ 49541/1424/1986 για τα στερεά απόβλητα συμμορφώνει την Ελληνική Νομοθεσία με την οδηγία 75/442/ΕΟΚ (ΦΕΚ 444/1986/Β). Στην ανωτέρω ΚΥΑ δίδεται ο ορισμός των βασικών εννοιών και ορίζονται οι φορείς διαχείρισης των απορριμμάτων. Προσδιορίζεται ο τρόπος που θα γίνεται η διαχείριση των απορριμμάτων ώστε να μην τίθενται σε κίνδυνο το περιβάλλον και η δημόσια υγεία ενώ ρυθμίζονται θέματα σχεδιασμού διαχείρισης και ορίζονται οι στόχοι του, η χωρική κλίμακα και οι αρμόδιες αρχές για τον σχεδιασμό διαχείρισης. Καθορίζονται οι φάσεις του σχεδιασμού διαχείρισης: Α΄ Φάση, που εκπονείται μελέτη εντοπισμού χώρων διάθεσης και δίδεται η κατ' αρχήν άδεια για την καταλληλότητά τους και Β΄ Φάση, που εκπονείται η κυρίως μελέτη σχεδιασμού και δίδεται η άδεια λειτουργίας της εγκατάστασης. Ρυθμίζεται το θέμα των αδειών για την διαχείριση των στερεών αποβλήτων, που χορηγούνται σε φυσικά ή νομικά πρόσωπα, πέρα των ΟΤΑ. Προβλέπεται επίσης, η άσκηση ελέγχου στις εγκαταστάσεις, βιομηχανίες και επιχειρήσεις που διαχειρίζονται στερεά απόβλητα. Καλύπτονται θέματα καθορισμού των υπόχρεων καταβολής δαπάνης διαχείρισης και προβλέπονται οι σχετικές κυρώσεις για τη μη συμμόρφωση των υπόχρεων προς τις οδηγίες των αρμόδιων υπηρεσιών.
- *ΚΥΑ 69269/5387/1990.* Η ΚΥΑ 69269/5387/1990 αφορά την «Κατάταξη έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες, περιεχόμενο ΜΠΕ» σύμφωνα με τον Ν. 1650/86 είναι ο βασικός νόμος που περιγράφει τις επιπτώσεις που ιδιωτικά και δημόσια έργα προκαλούν στο περιβάλλον, σε συμμόρφωση με την Οδηγία 85/337/ΕΟΚ. Καθορίζει τα περιεχόμενα της Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΕΠΕ) και δημιουργεί δύο ομάδες έργων και δραστηριοτήτων που απαιτούν την εκπόνηση ΕΠΕ. Περιγράφει τη διαδικασία που μια ΕΠΕ πρέπει να ακολουθήσει, ώστε να εγκριθεί από το ΥΠΕΧΩΔΕ και διακρίνει τα περιεχόμενα της ΕΠΕ μεταξύ έργων και δραστηριοτήτων κατηγορίας Α και Β. Στην περίπτωση της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων, ο Νόμος έχει ισχύ κατά τη διαδικασία επιλογής των χώρων διάθεσης και συγκεκριμένα μεταξύ των δύο φάσεων αδειοδότησης μιας εγκατάστασης. Σε περιπτώσεις αδειοδότησης χωματερών (αριθ. 4, κατηγορία Α, ομάδα ΙΙ, ΙΙγ), απαραίτητη είναι η συμπλήρωση του πίνακα 3 του άρθρου 16 του Νόμου, για την προέγκριση χωροθέτησης της εγκατάστασης. Εφ' όσον κατά την εξέταση του ερωτηματολογίου κριθεί ότι το έργο δεν προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, τότε το ερωτηματολόγιο αποτελεί την ΜΠΕ για την έγκριση των Περιβαλλοντικών Όρων.
- *Ν. 3010/02.* Η ΚΥΑ 69269/5387/1990 τροποποιήθηκε με τον Ν. 3010 (ΦΕΚ 91 Α΄/25-4-2002) και εναρμόνισε τον Ν. 1650/86 με τις οδηγίες 97/11 Ε.Ε. και 96/61 Ε.Ε., όπου αντί για την προέγκριση χωροθέτησης υιοθετήθηκε η διαδικασία της Προεκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων με την υποβολή Προμελέτης Π.Ε. ενώ

η κατηγοριοποίηση των έργων και δραστηριοτήτων εξειδικεύθηκε περισσότερο με την ΚΥΑ Η.Π.: 15393/2332/5-8-2002 (ΦΕΚ 1022 Β') η οποία αναφέρεται στην κατάταξη δημόσιων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες, σύμφωνα με το άρθρο 3 του Ν. 1650/1986 όπως αντικαταστάθηκε με το άρθρο 1 του Ν. 3010/2002 «Εναρμόνιση του Ν.1650/86 με τις οδηγίες 97/11/ΕΕ και 96/61/ΕΕ (ΦΕΚ 91Α')». Επίσης η παραπάνω ΚΥΑ συμπληρώθηκε με την ΚΥΑ οικ. 145799/ΦΕΚ (1002 Β'/18-7-2005) και τις *διευκρινήσεις του ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΠΕ* (Α.Π. 122810/30-1-04). Στον Πίνακα 4 – Ομάδα 4 το είδος 6 αφορά τις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποίησης μόνο βιοαερίου και το είδος 3 αφορά τις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θερμική επεξεργασία μη επικινδύνων Σ.Α. ή άλλων κλασμάτων τους (π.χ. RDF).

- *ΚΥΑ Η.Π.: 11014/703/Φ 104/03*. Η ΚΥΑ Η.Π.: 11014/703/Φ 104 (ΦΕΚ 332 Β'/20-3-03) αναφέρεται στη διαδικασία έγκρισης και δημοσιοποίησης της ΠΠΕΑ (Προμελέτη Περιβαλλοντικής Εκτίμησης) και ΕΠΟ (Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων) σύμφωνα με το άρθρο 4 του Ν. 1650/86 (Α' 160) όπως αντικαταστάθηκε με το άρθρο 2 του Ν. 3010/2002 «Εναρμόνιση του Ν. 1650/86 με τις οδηγίες 97/11/ΕΕ και 96/61/ΕΕ (ΦΕΚ 91Α') – (ΚΥΑ διαδικασιών).
- *Εγκύκλιος 122343/19-1-04*. Η Εγκύκλιος 122343/19-1-04 (ΥΠΕΧΩΔΕ – Γεν. Δνση Περιβάλλοντος) Διευκρινίζει σχετικά με θέματα ορισμού, κατάταξης και διαδικασιών κατά την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, σύμφωνα με τις διατάξεις του Ν. 1650/86 όπως τροποποιήθηκε με τον Ν. 3010/2002
- *Εγκύκλιος 122859/2-2-2004*. Η Εγκύκλιος ΥΠΕΧΩΔΕ/Γεν. Δνση Περιβάλλοντος (Α.Π. οικ. 122859/2-2-2004) – Αφορά το περιεχόμενο φακέλου για την εφαρμογή του άρθρου 13 της ΚΥΑ Η.Π.: 11014/703/Φ 104 (ΦΕΚ 332 Β'/20-3-03) ήτοι: (α) τον εκσυγχρονισμό, επέκταση, βελτίωση, ή τροποποίηση υφιστάμενου έργου ή δραστηριότητας και (β) την ανανέωση (παράταση της χρονικής διάρκειας ισχύος) απόφασης έγκρισης Π.Ο. υφιστάμενου έργου ή δραστηριότητας
- *ΚΥΑ 82805/2224/1993*. Η ΚΥΑ 82805/2224/1993 αφορά τον «Καθορισμό μέτρων και όρων για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προέρχεται από εγκαταστάσεις καύσης αστικών αποβλήτων».
- *ΚΥΑ 114218/1997*. Η ΚΥΑ 114218/1997 «Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων» (ΦΕΚ 1016 Β'/1997). Ισχύει μέχρι την έκδοση της ΚΥΑ που προβλέπεται στο άρθρο 5 (παρ. 1γ).
- *Ν. 2939/2001*. Ο Ν. 2939/2001 αφορά «Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών άλλων προϊόντων» (ΦΕΚ 179 Α'/2001).
- *ΥΑ 29407/3508/16-12-2002*. Η ΥΑ 29407/3508/16-12-2002 «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων (ΦΕΚ 1572 Β'/2002) η οποία συμπληρώνεται με την απόφαση του Συμβουλίου της 19/12/2002 και εφαρμόζεται από 16/7/2005 εναρμόνισε την ελληνική νομοθεσία με την Οδηγία 1999/31 (26-4-99) Τεύχος L 182. Η συγκεκριμένη ΥΑ ενσωματώνει την οδηγία 1999/31/ΕΚ του Συμβουλίου της 26<sup>ης</sup> Απριλίου 1999 των Ε.Κ. και τις αποφάσεις 2000/738/ΕΚ της 17-11-2000 των Ε.Κ και του Συμβουλίου της 19ης Δεκ. 2002 για τον καθορισμό κριτηρίων και διαδικασιών αποδοχής των αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής σύμφωνα με το άρθρο 16 και το παράρτημα ΙΙ της οδηγίας 1999/31/ΕΚ τις διατάξεις του κανονισμού (ΕΟΚ) 259/1993 του Συμβουλίου της 1-2-1993 «Σχετικά με την παρακολούθηση και τον έλεγχο των μεταφορών αποβλήτων στο εσωτερικό της Κοινότητας καθώς και κατά την είσοδο και έξοδό τους» (ΕΕL 30/1/6.2.1993) όπως ισχύει και του Ν. 2203/1994 «Κύρωση της Σύμβασης της Βασιλείας ... κλπ» (Α' 58)
- *Κανονισμός 259/1993*. Ο Κανονισμός 259/1993 αφορά τη «Μεταφορά τοξικών και επικινδύνων αποβλήτων».

- *ΚΥΑ 37591/2031/30-9-03.* Η ΚΥΑ 37591/2031/30-9-03 (ΦΕΚ 1419 Β'/1-10-03) «Μέτρα και όροι για την διαχείριση ιατρικών αποβλήτων από υγειονομικές μονάδες» (Ισχύει από 1/03/04)
- *ΚΥΑ Η.Π. 50910/2727/03.* Η ΚΥΑ Η.Π. 50910/2727 (ΦΕΚ 1909 Β'/22-12-2003) Μέτρα και όροι για τη διαχείριση Σ.Α. – Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης. Η ΚΥΑ αυτή ενσωματώνει τις οδηγίες: (α) 75/442/ΕΟΚ «περί στερεών αποβλήτων» (Ειδ. Εκδ. Ν. 194/39/75) και (β) 91/156/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 18-03-91 «για την τροποποίηση της οδηγίας 75/442/ΕΟΚ κλπ.» (ΕΕΛ 78/32/1991). Επίσης ενσωματώνει τις αποφάσεις: (α) 2001/118/ΕΚ της Επιτροπής Ε.Κ. της 16-01-2001 (ΕΕΛ 47/1/2001) και (β) 2001/573/Ε.Κ της Επιτροπής Ευρ. Κοινοτήτων «για την τροποποίηση της απόφασης 2000/532/ΕΚ όσον αφορά τον κατάλογο των αποβλήτων»
- *Π.Δ. 115 (ΦΕΚ 80 Α'/5-4-04).* Το Π.Δ. 115 (ΦΕΚ 80 Α'/5-4-04) «Μέτρα όροι και πρόγραμμα για την Εναλ/κή Διαχ/ση των χρησιμοποιημένων Ηλεκτρικών Στηλών και Συσσωρευτών» κατέργησε την ΚΥΑ 73537/1438/1995 (ΦΕΚ 781 Β') και την τροποποίηση της ΚΥΑ 19817/2000 (ΦΕΚ 963 Β')
- *Π.Δ. 109.* Το Π.Δ. 109 (ΦΕΚ 75Α'/5-4-04) «Μέτρα όροι και πρόγραμμα για την Εναλλακτική Διαχείριση μεταχειρισμένων ελαστικών και οχημάτων». Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση τους.
- *Π.Δ. 117.* Το Π.Δ. 117 (ΦΕΚ 82 Α'/5-4-04) «Μέτρα όροι και πρόγραμμα για την Εναλλακτική Διαχείριση των αποβλήτων ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού» (καθώς και περιορισμό χρήσης ορισμένων επικινδύνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού).
- *Π.Δ. 82.* Το Π.Δ. 82 (ΦΕΚ 64 Α'/2-4-04) «Μέτρα όροι και πρόγραμμα για την Εναλλακτική Διαχείριση των αποβλήτων Λιπαντικών Ελαίων» κατέργησε την ΚΥΑ 98012/2001/1996 (ΦΕΚ 40 Β').
- *Π.Δ. 116.* Το Π.Δ. 116 (ΦΕΚ 81 Α'/5-4-04) «Μέτρα όροι και πρόγραμμα για την Εναλλακτική Διαχείριση οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους και των απενεργοποιημένων καταλυτικών μετατροπέων»
- *Εγκύκλιος Α.Π. οικ. 123067/10-2-04.* Η εγκύκλιος Α.Π. οικ. 123067/10-2-04 «Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων: Συλλογή – Μεταφορά – Αποθήκευση Αποβλήτων και Αποκατάσταση Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων».
- *Εγκύκλιος Α.Π. οικ. 123067/10-2-04.* Η εγκύκλιος Α.Π. οικ. 103731/1278/5-5-04 ΥΠΕΧΩΔΕ (Εφαρμογή νομοθεσίας για τη διαχείριση μη επικινδύνων στερεών αποβλήτων) όπως διορθώθηκε (ορθή επανάληψη) με την από 13-5-04 εγκύκλιο ως προς την πργφ. 3.1 και συμπληρώθηκε με την Α.Π. οικ. 110441/3231/5-11-04 διόρθωση της πργφ. Β.3.ΙΙΙ της εγκυκλίου.
- *Εγκύκλιος Α.Π. οικ. 109974/3106/22-10-04.* Η εγκύκλιος Α.Π. οικ. 109974/3106/22-10-04 με ορθή επανάληψη ως προς τη σελίδα 15/4-11-04 «Πρότυπες Προδιαγραφές Τεχνικής Μελέτης Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ)». Οι αποκαταστάσεις των χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων είναι έργα τα οποία η χώρα είναι υποχρεωμένη να πραγματοποιήσει σύμφωνα με τις δεσμεύσεις της αλλά και τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Είναι έργα συγκεκριμένα ως προς τη θέση τους. Για τα έργα αυτά δεν μπορεί προφανώς να τηρηθεί η διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία και η οποία αποσκοπεί στο να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις ενός έργου στο περιβάλλον και να αποφασιστεί μετά από διαβούλευση με το κοινό η υλοποίηση του ή όχι. Για τους παραπάνω λόγους τα έργα αυτά δεν περιλαμβάνονται στους πίνακες του παραρτήματος 1 του άρθρου 5 της ΚΥΑ 15393/2332/5-8-02 και δεν απαιτείται περιβαλλοντική αδειοδότηση γι' αυτά.

Είναι όμως απαραίτητο για τις εργασίες αποκατάστασης χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης, να εκπονείται Τεχνική Μελέτη Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης, σύμφωνα με το άρθρο 10 της πρ.φ. 2 της ΚΥΑ Η.Π. 50910/2727/22-12-03 «Μέτρα και όροι για την διαχείριση των στερεών αποβλήτων Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης» (ΦΕΚ 1909/Β/03). Οι φορείς διαχείρισης στερεών αποβλήτων, στα γεωγραφικά όρια των οποίων έχουν λειτουργήσει κατά τα τελευταία 20 έτη, χωρίς άδεια και κατά ανεξέλεγκτο τρόπο, χώροι διάθεσης ή αξιοποίησης αποβλήτων και οι οποίοι έχουν εγκαταλειφθεί, υποχρεούνται μέσα σε 18 μήνες από την έναρξη ισχύος της ως άνω ΚΥΑ να λάβουν άδεια αποκατάστασής τους, ήτοι μέχρι 22 Ιουνίου 2005. Για το σκοπό αυτό υποβάλλουν σχετική αίτηση, που συνοδεύεται από Τεχνική Μελέτη Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης των σχετικών χώρων, στη Δνση Περιβάλλοντος και Χωροταξίας της Περιφέρειας. Η σχετική άδεια χορηγείται με απόφαση του Γενικού Γραμματέα της Περιφέρειας.

Οι εργασίες αποκατάστασης ανεξέλεγκτων χώρων διάθεσης ή αξιοποίησης Στερεών Αποβλήτων πραγματοποιείται μετά από άδεια που χορηγείται με απόφαση του Γενικού Γραμματέα της Περιφέρειας σύμφωνα με το ανωτέρω άρθρο και λαμβανομένων υπόψη των αναφερομένων στις σχετικές εγκυκλίους (Α.Π. οικ. 123067/10-02-04 και Α.Π. 103731/1278/5-5-04 Ορθή επανάληψη 13-5-04). Για την ένταξη έργων αποκατάστασης ΧΑΔΑ σε χρηματοδοτικά προγράμματα θα πρέπει να υποβάλλονται στις Διαχειριστικές Αρχές: (α) άδεια αποκατάστασης που εκδίδεται από τις Δνσεις ΠΕΧΩ και η εγκεκριμένη Τεχνική Μελέτη Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης του ή των ΧΑΔΑ, (β) οριστική μελέτη του έργου και τεύχη δημοπράτησης και (γ) στην άδεια αποκατάστασης θα πρέπει να αναγράφεται σαφώς η κατηγορία του ΧΑΔΑ βάσει της επικινδυνότητας του και η βαθμολογία του ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί το κόστος αποκατάστασης. Όσοι ΧΑΔΑ βαθμολογούνται λόγω επικινδυνότητας από μηδέν (0) βαθμούς μέχρι 30 +/- 5 βαθμοί δεν θα πρέπει να εντάσσονται σε χρηματοδοτικά προγράμματα. Τα έργα αποκατάστασης σ' αυτή την περίπτωση πρέπει να υλοποιηθούν από τους ΟΤΑ με ίδια μέσα επειδή: (α) είναι έργα μικρής κλίμακας, (β) δεν απαιτούν ειδικές προδιαγραφές κατασκευής, (γ) οι ΟΤΑ διαθέτουν τα απαραίτητα μηχανήματα για την εκτέλεση του έργου και (δ) δεν απαιτείται οριστική Μελέτη και τεύχη δημοπράτησης.

Σ' αυτή την περίπτωση η υλοποίηση της αποκατάστασης του ΧΑΔΑ ακολουθεί τις προδιαγραφές της εγκεκριμένης Τεχνικής Μελέτης Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης και τους Όρους της Άδειας Αποκατάστασης που εκδίδονται από τις ΠΕΧΩ. Για την αποκατάσταση των ΧΑΔΑ είναι απαραίτητο να εκπονηθεί Τεχνική Μελέτη Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης. Το είδος και η έκταση των έργων αποκατάστασης εξαρτώνται κατ' αρχήν από την εκτιμώμενη επικινδυνότητα του εξεταζόμενου ΧΑΔΑ. Οι τεχνικές μελέτες πρέπει να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις όπως αυτές περιγράφονται στο Παράρτημα Ι κεφ. 5 πρ.φ. 12 (σελ. 12960) της ΚΥΑ 114218/1997 «Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων» (ΦΕΚ 1016 Β'/1997) (Ισχύει μέχρι την έκδοση της ΚΥΑ που προβλέπεται στο άρθρο 5 παρ. 1γ της ΚΥΑ 50910/2727 – ΦΕΚ 1909 Β'/22-12-2003). Στις τεχνικές αυτές παρεμβάσεις θα πρέπει να αναλύονται και να αναπτύσσονται οι κάτωθι παρεμβάσεις:

- (α) Εξομάλυνση του υπάρχοντος απορριμματικού αναγλύφου-Εκτέλεση χωματοργικών εργασιών εξομάλυνσης του αναγλύφου σύμφωνα με την εκπονούμενη γι' αυτό το σκοπό μελέτη. Μέσο πάχος στρώσης 1,5 μ. περίπου,
- (β) Διαχείριση στραγγισμάτων,
- (γ) Κατασκευή στεγανωτικής στρώσης - Πάνω στο ανάγλυφο, που έχει ήδη εξομαλυνθεί, κατασκευάζεται συμπιεσμένη στρώση εδαφικού υλικού πολύ χαμηλής διαπερατότητας.

- (δ) Απορροή ομβρίων -Ανάλογα με την τοπογραφία του κάθε χώρου, κατασκευάζεται σε συνδυασμό ανάχωμα και τάφρος για να αποτρέπεται η είσοδος των ομβρίων της ευρύτερης λεκάνης απορροής στο απορριμματικό ανάγλυφο και να επιτρέπεται εκατέρωθεν του χώρου, όπου θα κατασκευασθούν ανοικτά χαντάκια ή τάφροι απαγωγής των ομβρίων.
- (ε) Στρώση ανάπτυξης πρασίνου – Πάνω στη στεγανωτική επιφάνεια διαστρώνεται σε μία στρώση χώμα κατάλληλο για τη φυσική ανάπτυξη πρασίνου σε στρώση 50-60 εκ.
- (στ) Διαχείριση βιοαερίου – σε ανεξέλεγκτες χωματερές που έχουν υποστεί ευρείας έκτασης αυτανάφλεξη πρέπει να αποφεύγεται η κατασκευή έργων σύλληψης και απαγωγής του βιοαερίου επειδή υπάρχει κίνδυνος κάποια στιγμή να λειτουργήσουν ως συστήματα οξυγόνωσης και αναζωπύρωσης των λανθανουσών εστιών καύσης.
- (ζ) Μεταφροντίδα – Η μεταφροντίδα του χώρου, απαραίτητη προϋπόθεση για την ολοκλήρωση του στόχου της ήπιας αποκατάστασης με φυσική επανένταξη μιας ανεξέλεγκτης χωματερές συνίσταται στην
  - Παρακολούθηση κατά τακτά χρονικά διαστήματα της μηχανικής συμπεριφοράς του αναπλασθέντος αναγλύφου
  - Τακτική επιθεώρηση ή και συντήρηση των επιμέρους έργων και εγκαταστάσεων
  - Παρακολούθηση και όταν χρειάζεται προστασία αλλά και υποστήριξη της φυσικής διαδικασίας φυτοκάλυψης του χώρου
  - Προστασία του χώρου έναντι ανεπιθύμητων ανθρωπογενών παρεμβάσεων
- (η) Περιβαλλοντικός έλεγχος (Monitoring) – Συνίσταται στην διαχρονική παρακολούθηση και αξιολόγηση βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων
  - Των στραγγισμάτων και της ποσότητας τους
  - Των νερών του πλησιέστερου κατάντι επηρεαζόμενου σημείου υδροληψίας
  - Του απαγόμενου βιοαερίου και της εκτιμώμενης ποσότητας του, εφόσον υφίσταται το σχετικό δίκτυο.

Σε περίπτωση ειδικών περιπτώσεων κατά την οποία ο αρμόδιος φορέας κρίνει ότι απαιτείται και εξυγίανση του χώρου λαμβάνονται όλα τα πλέον απαραίτητα μέτρα για την δυνατή επαναφορά τόσο του ρυπασμένου εδάφους όσο και των υπόγειων νερών στην αρχική του κατάσταση. Το ΥΠΕΧΩΔΕ/Τμήμα Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων εξέδωσε με την εγκύκλιο Α.Π. οικ. 109974/3106/22-10-04 με ορθή επανάληψη ως προς τη σελίδα 15/4-11-04, «Πρότυπες Προδιαγραφές Τεχνικής Μελέτης Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ)» τις οποίες επισυνάπτομε. Αποτελούνται από πέντε (5) κεφάλαια που αναφέρονται στα: (α) Χαρακτηριστικά ΧΑΔΑ, (β) αξιολόγηση επικινδυνότητας, (γ) μέτρα αποκατάστασης, (δ) προτάσεις και (ε) παραρτήματα (1. Μεθοδολογία αξιολόγησης ΧΑΔΑ 2. Χάρτες - σχέδια 3. Φω-τογραφική αποτύπωση γηπέδου και ευρύτερης περιοχής 4. Εκπόνηση – έγκριση Τεχνικής Μελέτης Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης).

### 8.2.2. Καταργούμενες διατάξεις

Παρακάτω αναφέρονται διατάξεις (ΚΥΑ και Π.Δ.) που καταργήθηκαν, όπως και αυτές που τις αντικατέστησαν:

- Η ΚΥΑ 69728/824/1996 «Μέτρα και όροι για την διαχείριση των στερεών αποβλήτων (ΦΕΚ 358 Β'/1996), καταργήθηκε με την ΚΥΑ 50910/2727 – ΦΕΚ 1909 Β'/22-12-2003.
- Η ΚΥΑ 113944/1997 «Εθνικός Σχεδιασμός διαχείρισης στερεών αποβλήτων» (ΦΕΚ 1016 Β'/1997), καταργήθηκε με την ΚΥΑ 50910/2727 – ΦΕΚ 1909 Β'/22-12-2003)
- Η ΚΥΑ 114218/1997 «Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων» (ΦΕΚ 1016 Β'/1997) Ισχύει μέχρι την έκδοση της ΚΥΑ που προβλέπεται στο άρθρο 5 (παρ. 1γ)

- Η ΚΥΑ 14312/1302/2000 Συμπλήρωση της ΚΥΑ του 1997 για τον Εθνικό Σχεδιασμό της διαχείρισης αποβλήτων (ΦΕΚ 723 Β'/2000), καταργήθηκε με την ΚΥΑ 50910/2727 – ΦΕΚ 1909 Β'/22-12-2003.
- Το Π.Δ. 115 (ΦΕΚ 80 Α'/5-4-04) «Μέτρα όροι και πρόγραμμα για την Εναλ/κή Διαχ/ση των χρησιμοποιημένων Ηλεκτρικών Στηλών και Συσσωρευτών», κατέργησε την ΚΥΑ 73537/1438/1995 (ΦΕΚ 781 Β') και την τροποποίηση της ΚΥΑ 19817/2000 (ΦΕΚ 963 Β')
- Το Π.Δ. 82 (ΦΕΚ 64 Α'/2-4-04) «Μέτρα όροι και πρόγραμμα για την Εναλ/κή Διαχ/ση των αποβλήτων Λιπαντικών Ελαίων», κατέργησε την ΚΥΑ 98012/2001/1996 (ΦΕΚ 40 Β')

### 8.3. ΣΧΕΔΙΑ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Στην ενότητα αυτή θεωρήσαμε χρήσιμο να παρουσιάσουμε σχέδια αποφάσεων του Δημοτικού Συμβουλίου για την παύση λειτουργίας ενός ΧΑΔΑ, το Σχέδιο Άδειας Αποκατάστασης χώρου διάθεσης απορριμμάτων ενός Δήμου όπως σήμερα ισχύει και εφαρμόζεται και το Σχέδιο Απόφασης παύσης λειτουργίας ενός ενεργού/ανενεργού ΧΑΔΑ. Στα υποδείγματα αυτά φαίνεται η νομοθεσία που σήμερα χρησιμοποιείται, οι όροι και προϋποθέσεις που τίθενται και οι υπεύθυνοι φορείς εφαρμογής των ανωτέρω αποφάσεων. Τα σχέδια αυτά των αποφάσεων αποτελούν βοηθήματα για τους συναδέλφους μηχανικούς προκειμένου να αντιληφθούν που πρέπει να εστιάσουν την προσοχή τους κατά την εκπόνηση των ΜΠΕ ακολουθώντας τις προδιαγραφές της παραπάνω νομοθεσίας και τις κατευθύνσεις και προβληματισμούς του παρόντος εγχειριδίου.

#### 8.3.1. Υπόδειγμα απόφασης δημοτικού συμβουλίου δήμου

##### ΑΠΟΦΑΣΗ

.....  
 Το Δημοτικό Συμβούλιο κατά τη συνεδρίασή του στις  
 .....και ύστερα από σχετική συζήτηση

##### Αποφασίζει

1. Την οριστική παύση λειτουργίας και την υποβολή αίτησης και Τεχνικής Μελέτης Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης (ΤΜΠΑ) για την έκδοση άδειας αποκατάστασης, σύμφωνα, με την ΚΥΑ 50910/2727/22-12-2003, των παρακάτω ΧΑΔΑ:

- (α) Θέση .....Δημ. Διαμερίσματα .....  
 (β) Θέση .....Δημ. Διαμερίσματα .....  
 (γ) Θέση .....Δημ. Διαμερίσματα .....  
 (δ).....

Σε όλους τους παραπάνω χώρους απαγορεύεται εφεξής η απόρριψη κάθε είδους αποβλήτων ενώ θα ληφθούν μέτρα για την επιβολή κυρώσεων στους παραβάτες. Μετά την υλοποίηση των έργων αποκατάστασης ο Δήμος θα παρακολουθεί την κατάσταση των παραπάνω χώρων και θα μεριμνά για την τήρηση των όρων που θα περιέχονται στην άδεια αποκατάστασης.

Στο εξής, και μέχρι τη λειτουργία έργων διαχείρισης αποβλήτων, που προβλέπονται από εγκεκριμένο σχεδιασμό συμβατό με την εθνική και κοινοτική νομοθεσία, από τα οποία θα εξυπηρετηθεί ο Δήμος μας, τα απορρίμματα του Δήμου θα διατίθενται στον χώρο ... ..

.....  
 .....  
 .....  
 ..... (θέση - Δημ. Διαμέρισμα),ο οποίος θα παραμείνει ενεργός.

### 8.3.2. Σχέδιο άδειας αποκατάστασης χώρου διάθεσης απορριμμάτων Δήμου (... όπως σήμερα ισχύει και εφαρμόζεται)

Θέμα: *Χορήγηση Άδειας Αποκατάστασης ανενεργού χώρου ανεξέλεγκτης διάθεσης στερεών αποβλήτων Δ.Δ. .... Δήμου .....  
Ν. ....*

Έχοντας υπόψη:

- (α) Το Ν.1650/86 (ΦΕΚ 160 Α/18.10.86) " Για την προστασία του περιβάλλοντος " όπως τροποποιήθηκε με τον Ν. 3010/2002 (ΦΕΚ 91 Α).
- (β) Το Ν. 3010/91Α/25.04.02 « Εναρμόνιση του Ν. 1650/1986 με τις Οδηγίες 97/11 Ε.Ε. και 96/61 Ε.Ε. ....»
- (γ) Την ΚΥΑ Η.Π. 11014/703/Φ104/ΦΕΚ 332Β/20.03.03 « Διαδικασία Προκαταρκτικής περιβαλλοντικής Εκτίμησης και Αξιολόγησης και Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων κλπ»
- (δ) Την ΚΥΑ Η.Π. 15393/2332/ΦΕΚ 1022 Β/05.08.02 «Κατάταξη δημόσιων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες κλπ»
- (ε) Την ΚΥΑ 114218/31.10.97 (ΦΕΚ 1016/Β/17.11.97) που αναφέρεται στην "Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων".
- (στ) Την ΚΥΑ Η.Π. 29407/3508/1572 Β/16.12.02 « Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων»
- (ζ) Την ΚΥΑ Η.Π. 50910/2727/1909<sup>Α</sup>/22.12.03 «Μέτρα και όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης»
- (η) Την με αρ.πρ. οικ. 123067/2004 Εγκύκλιο του ΥΠΕΧΩΔΕ « Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων: Συλλογή -Μεταφορά - Αποθήκευση Αποβλήτων και Αποκατάσταση χώρων ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων»
- (θ) Την με αρ.πρ. οικ. 109974/3106/2004 Εγκύκλιο του ΥΠΕΧΩΔΕ «Πρότυπες Προ-διαγραφές Τεχνικής Μελέτης Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ)»
- (ι) Το με αρ.πρ. 112588/3879 (2.2.05) έγγραφο του ΥΠΕΧΩΔΕ – Τμήμα Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων «Διευκρινίσεις επί διατάξεων νομοθεσίας σχετικά με τη διαχείριση στερεών αποβλήτων»
- (ια) Το με αρ.πρ. οικ. 126720/1780/05 έγγραφο του ΥΠΕΧΩΔΕ – Τμήμα Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων «Συντονισμός ενεργειών για την υλοποίηση σε εθνικό επίπεδο του προγράμματος αποκατάστασης των ΧΑΔΑ»
- (ιβ) Το με αρ.πρ. ....έγγραφο του Δήμου ..... με συνημμένη τεχνική μελέτη περιβαλλοντικής αποκατάστασης και την 107/2005 Απόφαση του Δημοτικού Συμβουλίου με θέμα «Οριστική παύση λειτουργίας ΧΑΔΑ Δήμου .....»
- (ιγ) Το με αρ. πρ.127188/1945/05 έγγραφο του ΥΠΕΧΩΔΕ - Τμήμα Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων «Συμπληρωματικές

Διευκρινίσεις για τον συντονισμό των ενεργειών για την υλοποίηση σε εθνικό επίπεδο του προγράμματος αποκατάστασης των Ανεξέλεγκτων Χώρων Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ)»

Αποφασίζουμε

Τη χορήγηση άδειας αποκατάστασης χώρου ανεξέλεγκτης διάθεσης στερεών απορριμμάτων (ΧΑΔΑ) ..... του Δ.Δ. .... Δήμου ..... του Ν. .... Ο ΧΑΔΑ ανήκει στην κατηγορία των ανενεργών και ευρίσκεται σε απόσταση περίπου .....m Β –Δ του οικισμού ..... έχει έκταση περίπου .....στρεμμάτων, είναι ανενεργός από το..... και έχουν αποθεθεί σε αυτόν κυρίως οικιακά αστικά απορρίμματα. Οι συντεταγμένες του φαίνονται στο συνημμένο με την υποβληθείσα μελέτη τοπογραφικό διάγραμμα.

Επισημαίνεται ότι:

- (α) Η άμεση αποκατάσταση του ΧΑΔΑ επιβάλλεται από:
- Τις προβλέψεις της νομοθεσίας (ζ σχετ.)
  - Τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης θέσης
  - Την ανάγκη προστασίας της δημόσιας υγείας και του φυσικού περιβάλλοντος
  - Την διασφάλιση της ανεμπόδιστης ροής υδάτων στο ρέμα ..... (κατά περίπτωση αναφέρονται λόγοι)
  - Την αναγκαιότητα υλοποίησης των στόχων που αναφέρονται στο (ια) σχετ. για τη μεταβατική λειτουργία ενός χώρου διάθεσης στερεών αποβλήτων ανά ΟΤΑ μέχρι την λειτουργία του ΧΥΤΑ .....
- (β) Η παρούσα απόφαση αφορά χώρο ο οποίος έχει παύσει να λειτουργεί και θα αποκατασταθεί ώστε να ενταχθεί στο φυσικό περιβάλλον της περιοχής. Οι εργασίες αποκατάστασης του ΧΑΔΑ θα πρέπει να είναι τεχνικά απλές, οικονομικά εφικτές, περιβαλλοντικά αποτελεσματικές.
- (γ) Για τη δημιουργία και λειτουργία χώρων στους οποίους θα διατίθενται στερεά απορρίμματα με όρους υγειονομικής ταφής απαιτείται η τήρηση διαδικασιών Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης και έκδοσης άδειας λειτουργίας (β, γ, δ, ε, στ, ζ, ι σχετ). Οι διαδικασίες αυτές δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας απόφασης.

Γενικοί όροι:

- (α) Η άδεια ισχύει μέχρι 31.12.2008
- (β) Δεν επιτρέπεται η συνέχιση οποιαδήποτε διάθεσης ή και καύσης κάθε είδους στερεών αποβλήτων στον ΧΑΔΑ του πιο πάνω αναφερόμενου Δημοτικού Διαμερίσματος. Η διάθεση των απορριμμάτων του Δήμου ..... θα γίνεται στο χώρο διάθεσης απορριμμάτων του ..... Ο χώρος αυτός θα συνεχίσει να λειτουργεί μεταβατικά ως ο μοναδικός χώρος διάθεσης στερεών απορριμμάτων του Δήμου ..... μέχρι την έναρξη λειτουργίας του ΧΥΤΑ ..... οπότε και θα συνταχθεί Τεχνική Μελέτη Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης (ΤΜΠΑ) για την οριστική παύση λειτουργίας

- και αποκατάσταση του.
- (γ) Σε κάθε περίπτωση η αποκατάσταση του χώρου δεν μπορεί να συνοδεύεται από την επανενεργοποίηση ή τη δημιουργία νέων χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων.
- (δ) Οι εργασίες αποκατάστασης του χώρου θα γίνουν με βάση τα συμπεράσματα και τις προτάσεις της συνημμένης μελέτης και τις προδιαγραφές της κείμενης νομοθεσίας και δεν επιτρέπεται να αντίκεινται στο Γενικό Οικοδομικό Κανονισμό.
- (ε) *Από την περιγραφή και αξιολόγηση των φυσικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών ο ΧΑΔΑ συγκεντρώνει 40 βαθμούς στην κλίμακα επικινδυνότητας και κατατάσσεται στην κατηγορία Γ (γ' προτεραιότητα) από άποψη επικινδυνότητας (σελ. 14, θ. σχετ.). Για τα έργα της αποκατάστασης του ΧΑΔΑ επιλέγεται για λόγους περιβαλλοντικούς και οικονομικούς η καταρχήν συλλογή όλων των διασκορπισμένων απορριμμάτων τα οποία βρίσκονται γύρω από το χώρο και ακολούθως η διευθέτηση του απορριμματικού αναγλύφου του ΧΑΔΑ στο πλαίσιο της I<sup>ης</sup> κατηγορίας μέτρων της (θ) σχετ. Ιδιαίτερη φροντίδα θα πρέπει να ληφθεί για την διασφάλιση ομαλής ροής υδάτων στο ρέμα ..... λόγω της σημαντικής κλίσης του εδάφους στο χώρο θα εξετασθεί στο στάδιο της οριστικής μελέτης η αναγκαιότητα κατασκευής τοιχίου αντιστήριξης για τον εγκλωβισμό την αποφυγή διασκορπισμού των απορριμμάτων.*
- (στ) Με ευθύνη του Δήμου .....: (i) θα οριοθετηθεί ο χώρος, θα τοποθετηθούν ενημερωτικές πινακίδες και θα γίνουν οι πλέον πρόσφορες παρεμβάσεις για την παρεμπόδιση πρόσβασης σε αυτόν και (ii) θα εκδοθεί διοικητική πράξη με την οποία θα καθορίζονται:
- Η απαγόρευση εισόδου και ρίψης αποβλήτων στο χώρο μετά την παύση λειτουργίας τους
  - Η παρακολούθηση και επιθεώρηση από τις υπηρεσίες του Δήμου της μηχανικής συμπεριφοράς του αναπλάσθεντος αναγλύφου, των επιμέρους έργων κι εγκαταστάσεων, της διαδικασίας φυτοκάλυψης, της ασφάλειας του χώρου από ανεπιθύμητες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις.
  - Η παρακολούθηση από τις υπηρεσίες του Δήμου για την εμφάνιση περιβαλλοντικών προβλημάτων σε σχέση με την παραγωγή στραγγισμάτων και βιοαερίου και την ασφάλεια των επιφανειακών και υπογείων υδάτων
  - Η περιοδική αστυνόμευση του χώρου από υπαλλήλους του Δήμου
  - Η διαδικασία επιβολής προστίμων και το σχετικό ύψος τους για τις περιπτώσεις παράνομης απόθεσης αποβλήτων
  - Η διαδικασία ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης των πολιτών
  - Το σχέδιο αντιμετώπισης εκτάκτων περιστατικών
- (ζ) Κατά την έναρξη υλοποίησης των έργων ο Δήμος ..... οφείλει να καταθέσει στις υπηρεσίες της Ν.Α. ....(Προγραμματισμού και Περιβάλλοντος) καθώς και στη ΔΠΠΕΧΩ .....στοιχεία σχετικά με την ημερομηνία έναρξης εργασιών, το χρονοδιάγραμμα υλοποίησης, τη χρηματοδότηση και το

συνολικό κόστος.

Η παρούσα άδεια:

- Χορηγείται ανεξάρτητα από τυχόν άλλες απαιτούμενες εγκρίσεις ή άδειες άλλων αρμόδιων υπηρεσιών, η έκδοση των οποίων αποτελεί υποχρέωση του φορέα διαχείρισης του χώρου.
- Δεν αποτελεί νομιμοποίηση τυχόν πολεοδομικών παραβάσεων
- Μπορεί ανά πάσα στιγμή να τροποποιηθεί με την προσθήκη επιπλέον όρων ή την τροποποίηση των υπαρχόντων εφόσον διαπιστωθεί ότι από τη διαδικασία αποκατάστασης των χώρων δημιουργούνται επιπλέον περιβαλλοντικά προβλήματα και επιπτώσεις που δεν είχαν προβλεφθεί στην Τεχνική έκθεση ή κριθεί αναγκαία η συμμόρφωση του έργου με την κείμενη νομοθεσία εφόσον αυτό δεν επιτυγχάνεται με την παρούσα απόφαση.
- Είναι δυνατόν να ανακληθεί (προσωρινά ή οριστικά) εφόσον διαπιστωθούν παραβάσεις όρου/όρων της ή εκτιμηθούν – διαπιστωθούν περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις εργασίες αποκατάστασης οι οποίες θέτουν σε κίνδυνο τη Δημόσια Υγεία ή το φυσικό/ανθρωπογενές περιβάλλον.

Αντίγραφο της παρούσας θα πρέπει να βρίσκεται στα γραφεία του Δήμου ..... και να επιδεικνύεται σε κάθε έλεγχο από αρμόδια υπηρεσία σύμφωνα με την εκάστοτε ισχύουσα νομοθεσία. Ο Δήμος ..... είναι υπεύθυνος για την τήρηση και εφαρμογή των όρων της παρούσας απόφασης και οφείλει να συμμορφώνεται πλήρως με το περιεχόμενο της. Παράβαση των όρων της παρούσας Απόφασης θα έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή κυρώσεων που προβλέπονται από την εκάστοτε ισχύουσα νομοθεσία. Κατά της Απόφασης αυτής είναι δυνατόν να ασκηθεί προσφυγή στον αρμόδιο Υπουργό ΠΕΧΩΔΕ, σύμφωνα με το άρθρο 18 παρ.12 του Ν. 2218/94 μέσα σε αποκλειστική προθεσμία τριάντα (30) ημερών από την κοινοποίηση της.

Ο Γενικός Γραμματέας

.....

### 8.3.3. Σχέδιο απόφασης παύσης λειτουργίας του ενεργού/ανεργού ΧΑΔΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ	Ημερομηνία .....
ΝΟΜΑΡΧΙΑΚΗ ΑΥΤΟΔΙΟΙΚΗΣΗ	Αρ. Πρωτ.
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	
ΤΜΗΜΑ	
ΠΡΟΣ: 1. Δήμο	
Ταχ. Δ/ση	
Ταχ. Κώδικας:	<u>ΚΟΙΝ.</u>
TELEFAX	1.Δασαρχείο
	2.ΔΙ.ΠΕ.ΧΩ
Πληροφορίες	3.Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε,
Τηλέφωνο	Τμήμα Διαχείρισης
	Στερεών Αποβλήτων,
E-mail	Πατησίων 147, 112 51 Αθήνα

#### ΑΠΟΦΑΣΗ

Θέμα: Παύση λειτουργίας του ενεργού (ανεργού) ΧΑΔΑ στη θέση...του Δημ. Διαμερίσματος ....., του ενεργού (ανεργού) ΧΑΔΑ στη θέση του Δημ. Διαμερίσματος ..... του Δήμου.....

Ο Νομάρχης .....

Έχοντας υπ' όψη:

- (α) Το Ν.1650/86, όπως τροποποιήθηκε από το Ν. 3010/2002
- (β) Την ΚΥΑ 50910/2727/2003 (ΦΕΚ Β' 1909/22-12-2003)
- (γ) Την εγκύκλιο 103731/1278/5-5-2004 (ορθή επανάληψη 13-5-2004) του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.
- (δ) Την εγκύκλιο 109974/3106/22-10-2004 (ορθή επανάληψη 4-11-2004) του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε..

Το γεγονός ότι ανεξέλεγκτη διάθεση αστικών αποβλήτων στο φυσικό περιβάλλον και όχι σε οργανωμένο Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές πηγές ρύπανσης που προκαλεί σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα και κινδύνους για τη δημόσια υγεία. Παράλληλα, η παύση λειτουργίας και η αποκατάσταση των Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ), αποτελεί αναγκαιότητα τόσο για την αντιμετώπιση καταγγελιών και αποφυγή ς προστίμων σε εθνικό και τοπικό επίπεδο όσο και για την εφαρμογή της υφιστάμενης ς εθνικής και ευρωπαϊκής νομοθεσίας. Με βάση τα παραπάνω

#### Αποφασίζει

- (1) Την παύση λειτουργίας των παρακάτω ΧΑΔΑ του Δήμου .....
- (α) ..... Ενεργός (ανεργός) ΧΑΔΑ στη Θέση ..... του Δημ. Διαμερίσματος
- (β) ..... Ενεργός (ανεργός) ΧΑΔΑ στη θέση ..... του Δημ. Διαμερίσματος
- (γ) Ο Δήμος ..... υποχρεούται να διαθέτει τα απόβλητά του

σύμφωνα με τον εγκεκριμένο σχεδιασμό και να μεριμνήσει για όλες τις απαιτούμενες ενέργειες για την παύση λειτουργίας και την αποκατάσταση των παραπάνω ΧΑΔΑ. Επίσης υποχρεούται να συντάξει Μελέτη Περιβαλλοντικής Αποκατάστασης του ΧΑΔΑ η οποία πρέπει να εγκριθεί από τη Δ/ση ΠΕ.ΧΩ.

(2) Τη συγκρότηση τριμελούς επιτροπής αποτελούμενης από έναν εκπρόσωπο από:

(α) το Τμήμα Περιβάλλοντος

(β) τη Διεύθυνση Τεχνικών Έργων

(γ) το Δασαρχείο .....

Η παραπάνω επιτροπή, εντός προθεσμίας 20 ημερών από την υπογραφή της παρούσας απόφασης, θα επισκεφτεί σε συνεννόηση με το Δήμο τους παραπάνω ΧΑΔΑ, προκειμένου να διασφαλίσει την παύση λειτουργίας τους και να φροντίσει για την αποκοπή πρόσβασης σε αυτούς με τα απαιτούμενα τεχνικά μέσα (φυσικό ανάχωμα, εκσκαφή κάθετα στην οδό πρόσβασης κλπ.)

(3) Η μη συμμόρφωση προς τα παραπάνω θα έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή κυρώσεων, σύμφωνα με τα άρθρα 28, 29 και 30 του Ν. 1650/1986.

Ο Νομάρχης

.....

## 8.4. Διαδικασία υλοποίησης αποκατάστασης ΧΥΤΑ/ΧΑΔΑ

Στην ενότητα αυτή κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιασθεί η διαδικασία της υλοποίησης αποκατάστασης ενός ΧΥΤΑ με έμφαση στις Τεχνικές Προδιαγραφές της μελέτης αποκατάστασης ΧΔΑ και στην Ειδική Συγγραφή Υποχρεώσεων. Παρουσιάζονται επίσης η Πρόσκληση Εκδήλωσης Ενδιαφέροντος για μελέτες αποκατάστασης και η Σύμβαση Ανάθεσης της μελέτης με βάση τον Ν. 716/77 περί μελετών. Προκειμένου να τονισθούν οι διαφορές σε σχέση με τον νέο Νόμο περί μελετών παρουσιάζονται και αναλύονται τα άρθρα του Ν. 716/77 που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω διακηρύξεις, προδιαγραφές και συμβάσεις σε σχέση με τον Ν. 3316/05.

### 8.4.1. Υπόδειγμα πρόσκλησης εκδήλωσης ενδιαφέροντος για μελέτες αποκατάστασης (Με βάση τον Ν. 716/77 περί μελετών)

Δήμος .....

Ο Δήμος ..... προσκαλεί μελετητές, γραφεία μελετών ή συμπράξεις των ανωτέρω, που εδρεύουν στην Ελλάδα ή σε άλλη χώρα, να εκδηλώσουν το ενδιαφέρον τους, σε διάστημα 20 ημερών από τη δημοσίευση της πρόσκλησης στο Ενημερωτικό Δελτίο του ΤΕΕ, για την ανάληψη εκπόνησης της μελέτης:

*"Μελέτη αποκατάστασης Χώρου Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΔΑ)"*

Οι σχετικές αιτήσεις πρέπει να κατατεθούν στην διεύθυνση ... .. Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η εκπόνηση της μελέτης αποκατάστασης του Χώρου Διάθεσης Απορριμμάτων του ... .. που βρίσκεται στη θέση ... ..

Η μελέτη θα περιλαμβάνει τα ακόλουθα επιμέρους παραδοτέα:

- (α) Μελέτη εκτίμησης ρίσκου (risk assessment) για τα διαφεύγοντα αέρια και υγρά, καθώς και για την ευστάθεια του υφιστάμενου ΧΔΑ. Οι ακόλουθες μελέτες θα βασιστούν στα αποτελέσματα της εκτίμησης ρίσκου.
- (β) Σχέδιο διαμόρφωσης και απόδοσης νέων χρήσεων, οριστική μελέτη στεγανοποίησης, οριστική μελέτη διαχείρισης βιοαερίου και στραγγισμάτων, οριστική μελέτη παρακολούθησης του χώρου.
- (γ) Τεύχη δημοπράτησης για τα παραπάνω έργα

Η μελέτη θα συνταχθεί σύμφωνα με τις το τεύχος Τεχνικών Προδιαγραφών που μπορούν οι υποψήφιοι ανάδοχοι να προμηθευτούν από την παραπάνω διεύθυνση. Η κατ' αποκοπή αμοιβή της μελέτης ορίζεται σε ..... € πλέον ΦΠΑ και αναλύεται ως εξής:

- Αμοιβή Περιβαλλοντικών μελετών .....€ πλέον Φ.Π.Α.
- Αμοιβή Γεωτεχνικών μελετών .....€ πλέον Φ.Π.Α.
- Αμοιβή Χημικοτεχνικών μελετών .....€ πλέον Φ.Π.Α.

Δικαίωμα εκδήλωσης ενδιαφέροντος έχουν μελετητές ή γραφεία μελετών ή συμπράξεις των ανωτέρω που να διαθέτουν πτυχίο Β' ή Γ' τάξης στην κατηγορία 27 (Περιβαλλοντικές μελέτες), Α' ή Β' τάξης

στην κατηγορία 20, Α' τάξης στην κατηγορία 21 (Γεωτεχνικές Μελέτες) και Β' τάξης στην κατηγορία 18 (Χημικοτεχνικές μελέτες).

Ο συνολικός χρόνος σύνταξης της μελέτης ορίζεται σε 90 ημερολογιακές ημέρες και οι επιμέρους παραδόσεις θα είναι ως εξής:

- 20 ημερολογιακές ημέρες από την υπογραφή της σύμβασης για το παραδοτέο 1.
- 85 ημερολογιακές ημέρες από την υπογραφή της σύμβασης για το παραδοτέο 2.
- 90 ημερολογιακές ημέρες από την υπογραφή της σύμβασης για το παραδοτέο 3.

Τα στοιχεία που πρέπει να υποβληθούν είναι τα εξής:

- (α) Αίτηση εκδήλωσης ενδιαφέροντος υπογεγραμμένη από τους συμπράττοντες μελετητές στην οποία θα αναγράφονται το όνομα των μελετητών ή των γραφείων και η έδρα του διαγωνιζόμενου σχήματος.
- (β) Επικυρωμένο φωτοαντίγραφο του πτυχίου των μελετητών καθώς και υπεύθυνη δήλωση για την έδρα και την ισχύ του πτυχίου.
- (γ) Υπεύθυνη δήλωση του Ν. 1599/86 καθ' ενός των συμπραττόντων μελετητών, στην οποία θα αναφέρεται η αποδοχή της σύμβασης καθώς επίσης και ο νόμιμος εκπρόσωπος των συμπραττόντων μελετητών απέναντι στον εργοδότη.
- (δ) Υπεύθυνη δήλωση του Ν. 1599/86 για κάθε ένα των συμπραττόντων μελετητών, στην οποία θα αναφέρονται απαραίτητα σε μορφή πίνακα:
  - Οι παρόμοιες με την παρούσα μελέτες που εκπονήθηκαν για λογαριασμό του Δημοσίου, Ν.Π.Δ.Δ., ΟΤΑ, Δημοσίων Επιχειρήσεων και λοιπών Οργανισμών Δημοσίου Ενδιαφέροντος, με αναγραφή του τίτλου μελέτης, του ονόματος του εργοδότη, του χρόνου ανάθεσης και υπογραφής της σχετικής σύμβασης, της συνολικής αμοιβής της μελέτης, του ποσοστού συμμετοχής και του αντίστοιχου ποσού αμοιβής, καθώς και του χρόνου περάτωσης.
  - Οι μελέτες του Δημοσίου, Ν.Π.Δ.Δ., ΟΤΑ, Δημοσίων Επιχειρήσεων και λοιπών Οργανισμών Δημοσίου Ενδιαφέροντος που εκπονήθηκαν ή εκτελέστηκαν, τα 5 τελευταία έτη, με αναγραφή του τίτλου μελέτης ή του έργου, του ονόματος του εργοδότη, του χρόνου ανάθεσης και υπογραφής της σχετικής σύμβασης, της συνολικής αμοιβής της μελέτης, του ποσοστού συμμετοχής και του αντίστοιχου ποσού αμοιβής, καθώς και του χρόνου περάτωσης.
- (ε) Υπεύθυνη δήλωση του Ν. 1599/86 για κάθε ένα των συμπραττόντων μελετητών, στην οποία θα αναφέρονται οι εν ενεργεία μελέτες και οι μελέτες των οποίων εκκρεμεί η αποπληρωμή, κάθε κατηγορίας έργων του Δημοσίου, Ν.Π.Δ.Δ., ΟΤΑ, Δημοσίων Επιχειρήσεων και λοιπών Οργανισμών Δημοσίου Ενδιαφέροντος που εκπονούνται κατά

την παρούσα περίοδο, το στάδιο πού βρίσκεται η κάθε μια από αυτές με αναγραφή του τίτλου μελέτης, του ονόματος του εργοδότη, του χρόνου ανάθεσης και υπογραφής της σχετικής σύμβασης, της συνολικής αμοιβής της μελέτης, του ποσοστού συμμετοχής, του αντίστοιχου υπολειπόμενου ποσού αμοιβής και του προβλεπόμενου χρόνου περάτωσης.

- (στ) Βιογραφικά σημειώματα των συμπραττόντων μελετητών και των συμβούλων, όπου θα δηλώνεται η επιστημονική δραστηριότητα, η γενική επαγγελματική δραστηριότητα, ο εξοπλισμός και η οργάνωση του γραφείου περιλαμβανομένης και της απαιτούμενης για την εν λόγω μελέτη υποδομής και γενικά κάθε άλλο στοιχείο που οι ενδιαφερόμενοι θεωρούν ότι συμβάλλει στην διαμόρφωση πλήρους εικόνας της εμπειρίας, του μελετητικού έργου και των δυνατοτήτων τους για την άρτια εκπόνηση της μελέτης. Σημειώνεται ότι θα πρέπει να υποβληθεί το οργανόγραμμα της ομάδας έργου, στο οποίο με σαφήνεια θα δηλώνεται ο project manager καθώς και ο αναπληρωτής του, καθώς και η κατανομή των εργασιών ανά μέλος της ομάδας έργου. Επί ποινή αποκλεισμού, στην ομάδα έργου πρέπει να συμμετέχουν μελετητές με πτυχίο κατηγορίας 13 (Υδραυλικά έργα), μελετητές με πτυχίο κατηγορίας 25 (Φυτοτεχνικές μελέτες). Ειδικότερα για τον project manager του έργου πρέπει να καλύπτονται οι ακόλουθες ελάχιστες προϋποθέσεις:
- Να είναι μελετητής με εμπειρία σε θέματα προετοιμασίας έργων διαχείρισης στερεών αποβλήτων.
  - Να έχει αποδεδειγμένη εμπειρία σε παρεμφερή έργα, όπως αυτά δηλώνονται στο στοιχείο 8 της παρούσας.
  - Να έχει εμπειρία σε θέματα εκτίμησης κινδύνων από χώρους διάθεσης αποβλήτων.
- (ζ) Υπεύθυνη δήλωση του Ν. 1599/86 υπογεγραμμένη από τον κοινό εκπρόσωπο των μελετητών στην οποία θα αναγράφεται ότι αποδέχεται να προσέλθει για υπογραφή της σχετικής σύμβασης ανάθεσης της μελέτης εντός δέκα (10) ημερών από την έγγραφη ειδοποίησή του.
- (η) Τεχνική περιγραφή (το πολύ 15 σειρές ανά έργο) για τουλάχιστον πέντε και κατά μέγιστο δέκα επιλεγμένα έργα που έχουν υλοποιήσει οι υποψήφιοι ανάδοχοι με παρεμφερές αντικείμενο. Ως παρεμφερές αντικείμενο εννοούνται, αποκλειστικά:
- Η εκπόνηση μελετών αποκατάστασης σε επίπεδο οριστικής μελέτης και μελέτης εφαρμογής, καθώς και τα καθήκοντα τεχνικού συμβούλου κατά την υλοποίηση τέτοιων έργων, όπως θα αποδεικνύονται με βεβαιώσεις της επιβλέπουσας υπηρεσίας και μόνο.
  - Η εκπόνηση μελετών και ερευνητικών προγραμμάτων αποκατάστασης και αξιοποίησης ανενεργών χώρων (ΧΔΑ, λατομεία κλπ) όπως θα αποδεικνύονται με σχετικές βεβαιώσεις και μόνο.
  - Η εκπόνηση προγραμμάτων παρακολούθησης χώρων, που περιλαμβάνουν μετρήσεις βιοαερίου με φορητό αναλυτή,

δειγματοληψία και αναλύσεις στραγγισμάτων, μετρήσεις καθιζήσεων κλπ, όπως θα αποδεικνύονται με βεβαιώσεις της επιβλέπουσας υπηρεσίας ή του φορέα διαχείρισης του έργου και μόνο.

- Η εκπόνηση εργασιών εκτίμησης ρίσκου και μελετών επικινδυνότητας σε χώρο ταφής ή ΧΔΑ, όπως θα αποδεικνύονται από βεβαιώσεις της επιβλέπουσας υπηρεσίας, ερευνητικών προγραμμάτων αλλά και από σχετικές δημοσιεύσεις.
  - Η εκπόνηση προμελετών και τευχών δημοπράτησης για αποκαταστάσεις και χώρους ταφής, όπως θα αποδεικνύονται από σχετικές βεβαιώσεις και μόνο.
  - Σημειώνεται ότι στην ειδική εμπειρία θα αξιολογηθούν ευνοϊκότερα τα σχήματα που παρουσιάζουν εμπειρία (τουλάχιστον ένα project) σε καθένα από τα προηγούμενα αντικείμενα.
- (θ) Πλήρη στοιχεία (διεύθυνση, fax, e-mail και ονοματεπώνυμο) του αντίκλητου του σχήματος που θα αντιπροσωπεύει το σχήμα στο Δήμο ..... Ο αντίκλητος πρέπει να είναι μόνιμος κάτοικος του Δήμου ..... και ο ορισμός του πρέπει να γίνει με συμβολαιογραφικό, το οποίο συνοδεύει την αίτηση εκδήλωσης ενδιαφέροντος. Η ανάθεση θα γίνει με απ' ευθείας επιλογή, με βάση το άρθρο 11 παρ.7 του Ν. 716/77, επειδή δεν υφίσταται δυνατότητα εφαρμογής της διαδικασίας ανάθεσης που προβλέπεται από τις παραγράφους 5 και 6 του ίδιου άρθρου. Τα κριτήρια επιλογής των διαγωνιζομένων είναι:
- (i) Η συνολική εμπειρία των μελετητών σε θέματα διαχείρισης απορριμμάτων τόσο σε επίπεδο μελετών, όσο και σε επίπεδο εξειδίκευσης, δημοσιεύσεων και γενικότερης παρουσίας. Βαρύτητα κριτηρίου: 25%/
  - (ii) Η εμπειρία στα έργα που αναφέρονται στο στοιχείο 8 προηγούμενα. Βαρύτητα κριτηρίου: 45%/
  - (iii) Η στελέχωση και ο εξοπλισμός των γραφείων των μελετητών, καθώς και ο συνολικός φόρτος εργασίας που έχουν, ώστε να μπορούν να εκπονήσουν με επιτυχία και στον απαιτούμενο χρόνο την παρούσα μελέτη. Βαρύτητα κριτηρίου: 15%.
  - (iv) Ο ρόλος και τα προσόντα του project manager, ο οποίος θα πρέπει να συνδυάζει μελετητική και ερευνητική εμπειρία σε θέματα διαχείρισης στερεών αποβλήτων και ειδικότερα σε θέματα αποκατάστασης και εκτίμησης κινδύνων. Βαρύτητα κριτηρίου: 15%.

Τα έξοδα δημοσίευσης της παρούσας και των πιθανών επαναληπτικών προσκλήσεων θα βαρύνουν τον ανάδοχο της μελέτης, μόνο δε στην περίπτωση που για οποιονδήποτε λόγο η μελέτη δεν ανατεθεί τελικώς, τα σχετικά έξοδα θα βαρύνουν τον κύριο της μελέτης. Για κάθε πληροφορία οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να απευθύνονται κατά τις εργάσιμες ημέρες και ώρες στην ... ..

.....

#### 8.4.2. Τεχνικές προδιαγραφές μελέτης

*"Μελέτη αποκατάστασης χώρου διάθεσης αποβλήτων (ΧΔΑ) ... .."*

Αντικείμενο της μελέτης αποκατάστασης του Χ.Δ.Α. είναι να αντιμετωπίσει όλα τα προβλήματα που ο χώρος προκαλεί μακροπρόθεσμα στο περιβάλλον να τον επανεντάξει τελικά στη γύρω περιοχή. Η μελέτη περιλαμβάνει τα ακόλουθα παραδοτέα: (α) Μελέτη εκτίμησης ρίσκου (risk assessment) για τα διαφεύγοντα αέρια και υγρά, καθώς και για την ευστάθεια του υφιστάμενου ΧΔΑ. Οι ακόλουθες μελέτες θα βασιστούν στα αποτελέσματα της εκτίμησης ρίσκου, (β) σχέδιο διαμόρφωσης και απόδοσης νέων χρήσεων, οριστική μελέτη στεγανοποίησης, οριστική μελέτη διαχείρισης βιοαερίου και στραγγισμάτων, οριστική μελέτη παρακολούθησης του χώρου και (γ) τεύχη δημοπράτησης για τα παραπάνω έργα. Τα επιμέρους παραδοτέα αναλύονται ως εξής.

##### *Μελέτη Εκτίμησης Ρίσκου*

Η μελέτη περιλαμβάνει: (α) την διαμόρφωση εννοιολογικού μοντέλου για τις εκπομπές αερίων και στραγγισμάτων από τον χώρο, (β) τον ποσοτικό ή ημιποσοτικό προσδιορισμό του ρίσκου για τις εκπομπές βιοαερίου και στραγγισμάτων από τον χώρο, (γ) την εκτίμηση ρίσκου για την ευσταθεια και τη μηχανική συμπεριφορά του αναφερόμενου ΧΔΑ και (δ) την συσχέτιση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης ρίσκου με τα μέτρα διαχείρισης των κινδύνων (στεγανοποίηση, διαχείριση βιοαερίου και στραγγισμάτων κλπ).

##### *Σχέδιο Διαμόρφωσης και Απόδοσης Νέων Χρήσεων.*

Στην δράση αυτή θα γίνουν τα εξής: (α) αποκλεισμός των σημείων πρόσβασης οχημάτων στον χώρο, (β) πύλη εισόδου, (γ) χωματουργικές εργασίες εξομάλυνσης του αναγλύφου, (δ) μελέτη διαχείρισης ομβρίων και (ε) προτάσεις για την απόδοση νέων χρήσεων γης και σχέδιο φυτεύσεων. Οι απαιτούμενες χωματουργικές εργασίες, καθώς και το σχέδιο διαχείρισης ομβρίων, θα αποτυπωθούν σε επίπεδο οριστικής μελέτης.

##### *Οριστική μελέτη στεγανοποίησης.*

Με βάση τα αποτελέσματα της εκτίμησης ρίσκου, Θα προσδιοριστεί η απαιτούμενη τελική κάλυψη του χώρου. Η μελέτη στεγανοποίησης θα παραδοθεί σε επίπεδο οριστικής μελέτης, συνοδευόμενη από όλα τα σχετικά σχέδια (οριζοντιογραφίες, λεπτομέρειες) καθώς και από τις απαιτούμενες προμετρήσεις και κοστολόγια.

##### *Οριστική μελέτη διαχείρισης βιοαερίου και στραγγισμάτων.*

Η θέση της εγκατάστασης διαχείρισης στραγγισμάτων Θα είναι στο χαμηλότερο σημείο του Χ.Δ.Α. καταλαμβάνοντας έκταση ..... m<sup>3</sup> περίπου. Με την επιφύλαξη των αποτελεσμάτων του παραδοτέου 1, επιλέγεται ο ακόλουθος συνδυασμός συστήματος επεξεργασίας: (α) Αεριζόμενες δεξαμενές, (β) Φυσική επεξεργασία διαχωρισμού αιωρούμενων στερεών σε δεξαμενή καθίζησης και (γ)

ανακυκλοφορία των επεξεργασμένων στραγγισμάτων και βροχοστραγγισμάτων. Με την επιφύλαξη των αποτελεσμάτων του παραδοτέου 1, η συλλογή στραγγισμάτων θα γίνεται με:

- Κάθετα στους κεντρικούς αγωγούς Φ315 στον πόδα του αναχώματος Θα τοποθετηθεί αγωγός Φ315 ο οποίος συνεχίζει κατά μήκος του κατάντη ορίου και επίσης εξέρχεται των απορριμμάτων ώστε να επιτυγχάνεται καθαρισμός του.
- Το δίκτυο Θα εγκατασταθεί στον υφιστάμενο Χ.Δ.Α. και προτείνεται στα κατάντη του να κατασκευαστεί τοίχος βαρύτητας στα ανάντη του οποίου θα εγκατασταθεί το δίκτυο συλλογής

Όσον αφορά τη διαχείριση του Βιοαερίου, με την επιφύλαξη των αποτελεσμάτων του παραδοτέου 1, προτείνεται εγκατάσταση άντλησης, συλλογής και καύσης του βιοαερίου που περιλαμβάνει γενικά φρεάτια συλλογής, δίκτυο μεταφοράς του αερίου και μονάδα άντλησης και καύσης. Η μέθοδος που επιλέγεται να εφαρμοστεί στον υπό μελέτη Χ.Δ.Α. είναι αυτή της συλλογής του αερίου με συνδυασμένη χρήση οριζόντιου και κατακόρυφου δικτύου συλλογής. Συγκεκριμένα, θα κατασκευαστούν κατακόρυφα φρεάτια απαγωγής του βιοαερίου. Τα φρεάτια αυτά θα ανέλθουν μέχρι την τελική επιφάνεια της. Για να επιτευχθεί αυτό θα γίνει σύνδεση των φρεατίων, με οριζόντιο δίκτυο αγωγών μεταφοράς. Οι εργασίες διαχείρισης βιοαερίου και στραγγισμάτων θα παραδοθούν σε επίπεδο οριστικής μελέτης, συνοδευόμενες από όλα τα σχετικά σχέδια (οριζοντιογραφίες, λεπτομέρειες) καθώς και από τις απαιτούμενες προμετρήσεις και κοστολόγια.

*Οριστική μελέτη παρακολούθησης και μεταφροντίδας του χώρου.*

Ο περιβαλλοντικός έλεγχος του έργου δεν είναι αντικείμενο του παρόντος Τ.Δ.Ε. και την υλοποίηση του σύμφωνα με την ΚΥΑ114218/97 αναλαμβάνει να εκτελέσει ο Δήμος ..... με ίδιους πόρους. Ωστόσο, η οριστική μελέτη παρακολούθησης του χώρου θα περιλαμβάνει λεπτομερές και αναλυτικό πρόγραμμα παρακολούθησης με βάση τα αποτελέσματα του παραδοτέου 1, καθώς και κοστολόγια για τον απαιτούμενο εξοπλισμό παρακολούθησης. Η μελέτη θα παραδοθεί σε επίπεδο οριστικής μελέτης, συνοδευόμενη από όλα τα σχετικά σχέδια (οριζοντιογραφίες, λεπτομέρειες) καθώς και από τις απαιτούμενες προμετρήσεις.

*Τεύχη Δημοπράτησης για τα Παραπάνω Έργα.*

Για τις παραπάνω εργασίες θα παραδοθούν Τεύχη Δημοπράτησης. Ο ακριβής καθορισμός των εργασιών που θα περιληφθούν στα Τεύχη Δημοπράτησης θα γίνει μετά από συνεννόηση με την επιβλέπουσα υπηρεσία.

### 8.4.3. Ειδική συγγραφή υποχρεώσεων

“Μελέτη αποκατάστασης ΧΔΑ..... ”

Προϋπολογισμός:.....€ + Φ.Π.Α.

- Άρθρο 1.* Αντικείμενο της Ε.Σ.Υ. Το τεύχος αυτό Ε.Σ.Υ αφορά στην εκπόνηση της μελέτης " ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΧΔΑ ..... ". Η μελέτη πρέπει να συνταχθεί σύμφωνα με τις σύγχρονες επιστημονικές, τεχνικές αντιλήψεις και να καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις που αναφέρονται στις τεχνικές προδιαγραφές.
- Άρθρο 2.* *Φορέας Εκπόνησης της Μελέτης.* Φορέας της μελέτης είναι ο Δήμος....., εκπροσωπούμενος από το Δημοτικό Συμβούλιο με πρόεδρο τον Δήμαρχο ..... Κο. ....
- Άρθρο 3.* *Στοιχεία Σύμβασης.* Τα συμβατικά στοιχεία κατά σειρά ισχύος (για περίπτωση ασυμφωνίας) είναι η σύμβαση, η απόφαση ανάθεσης εκπόνησης της μελέτης και το παρόν τεύχος της Ε.Σ.Υ και οι Τεχνικές Προδιαγραφές.
- Άρθρο 4.* *Προθεσμία - Ποινικές Ρήτρες.* Η συνολική προθεσμία περάτωσης της μελέτης από τον ανάδοχο είναι 90 ημερολογιακές ημέρες, στην οποία συμπεριλαμβάνονται τα χρονικά μεσοδιαστήματα μεταξύ της υποβολής των ενδιάμεσων σταδίων και των εντολών του εργοδότη για έναρξη εκπόνησης του επόμενου σταδίου, ούτε ο χρόνος εκπόνησης των συμπληρωματικών εργασιών που τυχόν θα απαιτηθούν. Οι τμηματικές προθεσμίες αναφέρονται αναλυτικά στην πρόσκληση εκδήλωσης ενδιαφέροντος. Περισσότερες λεπτομέρειες που έχουν σχέση με τις προθεσμίες και την υπέρβασή τους λόγω υπαιτιότητας του αναδόχου, καθώς και με την επιβολή των ποινικών ρητρών για τις ημέρες καθυστέρησης αναφέρονται στα άρθρα 20 του Ν.716/77 και 11 του Π.Δ.194/79.
- Άρθρο 5.* *Αμοιβή Αναδόχου - Τρόπος Πληρωμής του.* Η κατ' αποκοπή αμοιβή του αναδόχου για την εκπόνηση της μελέτης καθορίζεται συνολικά σε ..... € πλέον Φ.Π.Α. και κατανέμεται ως εξής:
- Αμοιβή Περιβαλλοντικών μελετών ..... € πλέον Φ.Π.Α.
  - Αμοιβή Γεωτεχνικών μελετών ..... € πλέον Φ.Π.Α.
  - Αμοιβή Χημικοτεχνικών μελετών ..... € πλέον Φ.Π.Α.
- Η αμοιβή θα καταβάλλεται ως εξής: Προκαταβολή ύψους ..... € πλέον Φ.Π.Α. 19%, με την υπογραφή της σύμβασης.  
 .....€ πλέον Φ.Π.Α. 19% με την παράδοση του παραδοτέου Ι.  
 .....€ πλέον Φ.Π.Α. 19%, με την παράδοση του

παραδοτέου 2.

.....€ πλέον Φ.Π.Α. 19%, με την παράδοση του παραδοτέου 3.

Η κατ' αποκοπή αμοιβή του αναδόχου (για τις εργασίες που προβλέπεται αυτή) δεν θα μειωθεί σύμφωνα με την ΚΥΑ Δ17Α/01/120/6-10-88 «περί κανονισμού αμοιβών για μελέτες κ.λ.π. έργων Προγράμματος Δημοσίων Επενδύσεων», γιατί η κράτηση έχει υπολογιστεί στην κατ' αποκοπή αμοιβή.

*Άρθρο 6. Σ.Π. Συμπληρωματική Σύμβαση.* Όταν προκύψει η ανάγκη εκτέλεσης συμπληρωματικών εργασιών υπογράφεται συμπληρωματική σύμβαση κατά τις διατάξεις των άρθρων 16 και 18 του Ν. 716/77 και 9 του Π. Δ. 194/79. Όταν παραστεί ανάγκη επέκτασης, συμπλήρωσης ή τροποποίησης της σύμβασης, μέσα στο αρχικό αντικείμενο αυτό γίνεται αφού προηγουμένως συνταχθεί από την Διευθύνουσα Υπηρεσία και εγκριθεί Σ.Π. κατά τις διατάξεις των άρθρων 17 και 18 Ν. 716/77 και 9, 10 του Π. Δ. 194/79.

*Άρθρο 7. Παραλήψεις ή Ελαττώματα στην Εκπόνηση Μελέτης. Υποχρεώσεις Αναδόχου – Έκπτωση.* Ο ανάδοχος ευθύνεται για την αρτιότητα της μελέτης, σύμφωνα με τους κανόνες της επιστήμης και της τεχνικής, τους συμβατικούς όρους και υποχρεώσεις του. Οι αξιώσεις του εργοδότη λόγω ελαττωμάτων ή παραλήψεων της μελέτης, παραγράφονται μετά παρέλευση έξι (6) ετών από την παραλαβή της μελέτης. Ο ανάδοχος υποχρεούται στην επανόρθωση παντός ελαττώματος ή παράληψης της μελέτης τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησής της, όσο και μετά την αποπεράτωση και έγκριση αυτής. Τα θέματα αυτά ρυθμίζονται με τις διατάξεις των άρθρων 19 του Ν. 716/77 και 13, 21, 22 του Π. Δ. 194/79.

*Άρθρο 8. Διακοπή - Λύση της Σύμβασης.* Για την διακοπή και λύση της σύμβασης ισχύουν τα άρθρα 17 και 21 του Ν. 716/77 καθώς και τα άρθρα 14, 15, 16 του Π. Δ. 194/79.

*Άρθρο 9. Παραλαβή της Μελέτης.* Η παραλαβή της μελέτης πραγματοποιείται: (α) Με την έκδοση από τη Διευθύνουσα Υπηρεσία βεβαίωσης ότι ο ανάδοχος συμμορφώθηκε με τις συμβατικές του υποχρεώσεις και (β) με την εγκριτική απόφαση του εργοδότη για την έγκριση της μελέτης. Οι προθεσμίες και άλλες λεπτομέρειες για την παραλαβή αναφέρονται στα άρθρα 22 του Ν. 716/77 και 19 του Π. Δ. 194/79.

*Άρθρο 10. Εκχώρηση της Μελέτης.* Για την εκχώρηση της μελέτης, ισχύει το άρθρο 14 του Ν. 716/77.

*Άρθρο 11. Ενστάσεις - Αιτήσεις Θεραπείας - Επίλυση Διαφορών.* Οι τυχόν διαφωνίες που θα προκύψουν για (ή κατά) την εκπόνηση της μελέτης μεταξύ εργοδότη και αναδόχου από πράξεις τους ή πράξεις της Δ.Υ. ή των οργάνων του εργοδότη, θα επιλυθούν, είτε πρόκειται για ενστάσεις και για αιτήσεις θεραπείας είτε για δικαστική επίλυση

διαφόρων, κατά τις διατάξεις του άρθρου 23 του Ν. 716/77.

*Άρθρο 12. Ισχύουσες Διατάξεις.* Όσα ζητήματα δεν ρυθμίζονται από την παρούσα Σ.Υ. και για οποιοδήποτε θέμα που θα προκύπτει, ισχύουν οι παρακάτω διατάξεις:

- Ν. 716/77 "περί μητρώου μελετητών και ανάθεσης και εκπόνησης μελετών", όπως τροποποιήθηκε ή συμπληρώθηκε μέχρι σήμερα.
- Π.Δ. 696/74 "περί αμοιβών μηχανικών και σχετικών τεχνικών προδιαγραφών", όπως τροποποιήθηκε μέχρι σήμερα.
- Η κατ' έτος εκδιδόμενη απόφαση του Υ.ΠΕΧΩ.Δ.Ε. για τα όρια της αμοιβής μελετών.
- Οι κοινές Υπουργικές αποφάσεις όπως ισχύουν τροποποιημένες, για μείωση αμοιβής μελετών έργων Δημοσίου ή Ν. Π. Δ. Δ. Ν. 1418/84, Π. Δ. 609/85 για τα Δημόσια Έργα όπως τροποποιήθηκαν και ισχύουν μέχρι σήμερα κατά τις διατάξεις τους εκείνες που αναφέρονται στην εκπόνηση μελετών.

#### 8.4.4. Σύμβαση ανάθεσης μελέτης

*“Μελέτη αποκατάστασης χώρου διάθεσης απορριμμάτων (ΧΔΑ) .....”*

Σήμερα την..... του μηνός..... του έτους ....., ημέρα..... στο....., μεταξύ αφ' ενός του κ..... Δημάρχου ..... (εργοδότης) και αφετέρου των συμπραττόντων μελετητών ....., συμφώνησαν τα παρακάτω βάσει της υπ' αριθ... .. απόφαση του Δ.Σ. του Δήμου ..... για την ανάθεση της μελέτης «*Μελέτη Αποκατάστασης Χώρου Διάθεσης Απορριμμάτων (Χ.Δ.Α) .....*» συνολικής κατ' αποκοπή αμοιβής ..... περιλαμβανομένου του Φ.Π.Α.

*Άρθρο 1.* Αντικείμενο της Μελέτης. Με την παρούσα σύμβαση ο εργοδότης αναθέτει στους μελετητές την «*Μελέτη Αποκατάστασης Χώρου Διάθεσης Απορριμμάτων (Χ.Δ.Α).....*»

*Άρθρο 2.* Φορέας Ανάθεσης και Ισχύουσα Νομοθεσία. Φορέας ανάθεσης της μελέτης είναι ο Δήμος ..... Διευθύνουσα Υπηρεσία για τη μελέτη της παρούσας σύμβασης είναι η Τ.Υ. του Δήμου ..... Οι ισχύουσες διατάξεις που αφορούν το αντικείμενο της παρούσης σύμβασης είναι:

- Ο Ν. 716/77 (Περί μητρώου Μελετητών και αναθέσεως και εκπονήσεως μελετών (Έχει καταργηθεί με τον Ν. 3316/05)
- Ο Ν. 3316/05 (ΦΕΚ 42 Α/22-2-05) «*Ανάθεση και εκτέλεση δημοσίων συμβάσεων εκπόνησης μελετών και παροχής συναφών υπηρεσιών και άλλες διατάξεις*»

- Το Π.Δ.696/74 (περί αμοιβών μηχανικών και τεχνικών προδιαγραφών μελετών), όπως τροποποιήθηκε με το Π.Δ. 515/89
- Το Π.Δ. 194/79
- Το Ν. 1650/86 (για την προστασία του περιβάλλοντος), όπως τροποποιήθηκε από το Ν. 3010/2002
- Η ΚΥΑ 69269/5387/90 όπως τροποποιήθηκε και συμπληρώθηκε .....
- Η ΚΥΑ 69728/824/96
- Η κατ' έτος εκδιδόμενη απόφαση του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. για τα όρια της αμοιβής μελετών.
- Οι κοινές Υπουργικές αποφάσεις όπως ισχύουν τροποποιημένες, για μείωση αμοιβής μελετών έργων Δημοσίου ή Ν.Π.Δ.Δ.
- Ν. 1418/84, Π.Δ. 609/85 για τα Δημόσια Έργα όπως τροποποιήθηκαν και ισχύουν μέχρι σήμερα κατά τις διατάξεις τους εκείνες που αναφέρονται στην εκπόνηση μελετών.
- Η ΚΥΑ 114218/97 (κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων
- διαχείρισης στερεών αποβλήτων)
- Η ΚΥΑ 113944/97 (εθνικός σχεδιασμός διαχείρισης στερεών αποβλήτων)
- Οι λοιπές ισχύουσες διατάξεις, εγκύκλιοι και αποφάσεις της χώρας μας και Οδηγίες της Ε.Ε. για την προστασία του περιβάλλοντος.

Αναπόσπαστο μέρος της Σύμβασης αυτής αποτελούν τα τεύχη Διακήρυξης, τα τεύχη πρόσκλησης ενδιαφέροντος και η προσφορά αναδόχου.

*Άρθρο 3. Διάρθρωση Μελέτης- Περιεχόμενα Μελέτης.* Η μελέτη θα περιλαμβάνει τα ακόλουθα επιμέρους παραδοτέα:

- (i) Μελέτη Εκτίμησης Ρίσκου (risk assessment) για τα διαφεύγοντα αέρια και υγρά, καθώς και για την ευστάθεια του υφιστάμενου ΧΔΑ. Οι ακόλουθες μελέτες Θα βασιστούν στα αποτελέσματα της εκτίμησης ρίσκου.
- (ii) Οριστική Μελέτη Διαμόρφωσης Χώρου
- (iii) Οριστική Μελέτη Τελικής Αποκατάστασης.
- (iv) Οριστική Μελέτη Συστήματος Διαχείρισης Βιοαερίου
- (v) Οριστική Μελέτη Συστήματος Διαχείρισης Στραγγισμάτων
- (vi) Οριστική Μελέτη Παρακολούθησης του χώρου.
- (vii) Τεύχη Δημοπράτησης για τα παραπάνω έργα.

*Άρθρο 4. Χρονοδιάγραμμα.* Ο συνολικός χρόνος σύνταξης της μελέτης ορίζεται σε 60 ημερολογιακές ημέρες και οι επιμέρους παραδόσεις θα είναι ως εξής:

- 15 ημερολογιακές ημέρες από την υπογραφή της σύμβασης για το παραδοτέο 1.
- 30 ημερολογιακές ημέρες από την υπογραφή της σύμβασης για το παραδοτέο 2-6
- 15 ημερολογιακές ημέρες από την υπογραφή της σύμβασης για το παραδοτέο 7.

*Άρθρο 5. Υποβολή -Παραλαβή και Αντίτυπα της Μελέτης.* Η Μελέτη

υποβάλλεται σε τρία (3) αντίγραφα Η παραλαβή της μελέτης πραγματοποιείται: (α) Με την έκδοση από τη Διευθύνουσα Υπηρεσία βεβαίωσης, ότι ο ανάδοχος συμμορφώθηκε με τις συμβατικές του υποχρεώσεις και (β) με την εγκριτική απόφαση του εργοδότη για την έγκριση της μελέτης. Οι προθεσμίες και άλλες λεπτομέρειες για την παραλαβή αναφέρονται στα άρθρα 22 του Ν. 716/77 και 19 του Π.Δ. 194/79.

*Άρθρο 6. Αμοιβή Μελετητή.* Η συνολική αμοιβή του μελετητή για την εκπόνηση της μελέτης είναι η κατ' αποκοπή αμοιβή ..... χιλιάδες € με Φ.Π.Α.. Η κατανομή της αμοιβής με Φ.Π.Α. είναι:

- (α) Περιβαλλοντικές μελέτες
- (β) Γεωτεχνικές μελέτες
- (γ) Χημικοτεχνικές μελέτες
- (δ) Γεωλογικές μελέτες

Σύνολο ..... με Φ.Π.Α.

Η αμοιβή θα καταβάλλεται ως εξής:

- Προκαταβολή ύψους .....περιλαμβανομένου του Φ.Π.Α., με την υπογραφή της σύμβασης.
- .....περιλαμβανομένου του Φ.Π.Α. με την παράδοση του παραδοτέου 1 (σύμφωνα με το άρθρο 4).
- .....περιλαμβανομένου του Φ.Π.Α. με την παράδοση του παραδοτέου 2-6 (σύμφωνα με το άρθρο 4).
- .....με το Φ.Π.Α. με την παράδοση του παραδοτέου 7 (σύμφωνα με το άρθρο 4).

Η κατ' αποκοπή αμοιβή του αναδόχου (για τις εργασίες που προβλέπεται αυτή) δεν θα μειωθεί σύμφωνα με την ΚΥΑ Δ17Α/01/120/6-10-88 "Περί κανονισμού αμοιβών για μελέτες κ.λ.π. έργων Προγράμματος Δημοσίων Επενδύσεων", γιατί η κράτηση έχει υπολογιστεί στην κατ' αποκοπή αμοιβή.

*Άρθρο 7. Εγγυήσεις Καλής Εκτέλεσης.* Για την άρτια εκπόνηση της μελέτης και την υπογραφή της σύμβασης ο μελετητής κατέθεσε την υπ' αριθμόν..... εγγυητική επιστολή καλής εκτέλεσης ποσού ..... ΕΥΡΩ του ΤΣΜΕΔΕ ή άλλης αναγνωρισμένης Τράπεζας, που αντιστοιχεί στο 10% του ύψους της αμοιβής της μελέτης.

*Άρθρο 8. Συμπληρωματική Σύμβαση.* Δεν προβλέπεται.

*Άρθρο 9. Παραλήψεις ή Ελαττώματα στην Εκπόνηση Μελέτης. Υποχρεώσεις Αναδόχου – Έκπτωση.* Ο ανάδοχος ευθύνεται για την αρτιότητα της μελέτης, σύμφωνα με τους κανόνες της επιστήμης και της τεχνικής, τους συμβατικούς όρους και υποχρεώσεις του. Οι αξιώσεις του εργοδότη λόγω ελαττωμάτων ή παραλήψεων της μελέτης, παραγράφονται μετά παρέλευση έξι (6) ετών από την παραλαβή της μελέτης. Ο ανάδοχος υποχρεούται στην επανόρθωση παντός ελαττώματος ή παράληψης της μελέτης τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησής της, όσο και μετά την αποπεράτωση και έγκριση αυτής. Τα θέματα αυτά ρυθμίζονται με τις διατάξεις των άρθρων 19 του Ν.716/77

και 13, 21, 22 του Π.Δ. 194/79.

*Άρθρο 10. Διακοπή - Λύση της Σύμβασης.* Για την διακοπή και λύση της σύμβασης ισχύουν τα άρθρα 17 και 21 του Ν. 716/77 καθώς και τα άρθρα 14, 15, 16 του Π.Δ. 194/79.

*Άρθρο 11. Εκχώρηση της Μελέτης.* Για την εκχώρηση της μελέτης, ισχύει το άρθρο 14 του Ν. 716/77

*Άρθρο 12 Ενστάσεις, Αιτήσεις Θεραπείας, Επίλυση Διαφορών.* Οι τυχόν διαφωνίες που θα προκύψουν για (ή κατά) την εκπόνηση της μελέτης μεταξύ εργοδότη και αναδόχου από πράξεις τους ή πράξεις της Δ.Υ. ή των οργάνων του εργοδότη, θα επιλυθούν, είτε πρόκειται για ενστάσεις και για αιτήσεις Θεραπείας είτε για δικαστική επίλυση διαφορών, κατά τις διατάξεις του άρθρου 23 του Ν.716/77. Ο Μελετητής υποχρεούται να συμμετάσχει σε συσκέψεις, δημόσιες παρουσιάσεις, λαϊκές συνελεύσεις κ.λπ., που μπορεί να διοργανώσει ο Εργοδότης για την παροχή στοιχείων και την παρουσίαση φάσεων ή του συνόλου της μελέτης

Οι Συμβαλλόμενοι

#### 8.4.5. Διαφορές Ν. 716/77 για τις παραπάνω διακηρύξεις, προδιαγραφές και συμβάσεις ανάθεσης σε σχέση με το Ν. 3316/05

Θεωρούμε χρήσιμο να αναφερθούμε στις αλλαγές των άρθρων που έχουν προκύψει με βάση τον Ν. 3316/05 σε σχέση με τον Ν. 716/77, ο οποίος σήμερα δεν ισχύει, στα άρθρα εκείνα που χρησιμοποιούμε για την διακήρυξη ή την ανάθεση ή την ειδική συγγραφή υποχρεώσεων.

(α) Η ανάθεση θα γίνει με απ' ευθείας επιλογή, με βάση το άρθρο 11 παρ.7 του Ν. 716/77, επειδή δεν υφίσταται δυνατότητα εφαρμογής της διαδικασίας ανάθεσης που προβλέπεται από τις παραγράφους 5 και 6 του ίδιου άρθρου.

*Αντικαταστάθηκε* με το άρθρο 10 του Ν. 3316/05 όπου «η ανάθεση θα γίνει με διαπραγμάτευση ..... γνώμη τεχνικού συμβούλου έως 15.000 € ... κλπ.»

(β) Η κατ' αποκοπή αμοιβή του αναδόχου (για τις εργασίες που προβλέπεται αυτή) δεν θα μειωθεί σύμφωνα με την ΚΥΑ Δ17Α/01/120/6-10-88 «περί κανονισμού αμοιβών για μελέτες κ.λ.π. έργων Προγράμματος Δημοσίων Επενδύσεων», γιατί η κράτηση έχει υπολογιστεί στην κατ' αποκοπή αμοιβή.....

(γ) Όταν προκύψει η ανάγκη εκτέλεσης συμπληρωματικών εργασιών υπογράφεται συμπληρωματική σύμβαση κατά τις διατάξεις των άρθρων 16 και 18 του Ν. 716/77 και 9 του Π. Δ. 194/79.

(δ) Όταν παραστεί ανάγκη επέκτασης, συμπλήρωσης ή τροποποίησης της σύμβασης, μέσα στο αρχικό αντικείμενο αυτό γίνεται αφού προηγουμένως συνταχθεί από την Διευθύνουσα Υπηρεσία και εγκριθεί Σ.Π. κατά τις διατάξεις των άρθρων 17 και 18 Ν. 716/77 και 9, 10 του Π. Δ. 194/79.

Τα παραπάνω άρθρα *αντικαταστάθηκαν* με το άρθρο 29 του Ν. 3316/05.

(ε) Ο ανάδοχος υποχρεούται στην επανόρθωση παντός ελαττώματος ή παράληψης της μελέτης τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησής της, όσο και μετά την αποπεράτωση και έγκριση αυτής. Τα θέματα αυτά ρυθμίζονται με τις διατάξεις των άρθρων 19 του Ν. 716/77 και 13, 21, 22 του Π. Δ. 194/79.

Τα παραπάνω άρθρα *αντικαταστάθηκαν* με το άρθρο 31 του Ν. 3316/05.

(στ) Για την διακοπή και λύση της σύμβασης ισχύουν τα άρθρα 17 και 21 του Ν. 716/77 καθώς και τα άρθρα 14, 15, 16 του Π. Δ. 194/79.

Τα παραπάνω άρθρα *αντικαταστάθηκαν* με το άρθρο 34,35,36 του Ν. 3316/05.

(ζ) Οι προθεσμίες και άλλες λεπτομέρειες για την παραλαβή αναφέρονται στα άρθρα 22 του Ν. 716/77 και 19 του Π. Δ. 194/79

Τα παραπάνω άρθρα *αντικαταστάθηκαν* με το άρθρο 37 του Ν. 3316/05

(η) Για την εκχώρηση της μελέτης, ισχύει το άρθρο 14 του Ν. 716/77 .....

(θ) Οι τυχόν διαφωνίες που θα προκύψουν για (ή κατά) την εκπόνηση της μελέτης μεταξύ εργοδότη και αναδόχου από πράξεις τους ή πράξεις της Δ.Υ. ή των οργάνων του εργοδότη, θα επιλυθούν, είτε πρόκειται για ενστάσεις και για αιτήσεις θεραπείας είτε για δικαστική επίλυση διαφορών, κατά τις διατάξεις του άρθρου 23 του Ν. 716/77

Το παραπάνω άρθρο *αντικαταστάθηκε* με το άρθρο 41 του Ν. 3316/05

(ι) Όσα ζητήματα δεν ρυθμίζονται από την παρούσα Σ.Υ. και για οποιοδήποτε θέμα που θα προκύπτει, ισχύουν οι παρακάτω διατάξεις:

- Ν. 716/77 "περί μητρώου μελετητών και ανάθεσης και εκπόνησης μελετών", όπως τροποποιήθηκε ή συμπληρώθηκε μέχρι σήμερα.

Αντί του Ν. 716/77 *αναφέρουμε* του Ν. 3316/05 ....

- Π.Δ. 696/74 "περί αμοιβών μηχανικών και σχετικών τεχνικών προδιαγραφών", όπως τροποποιήθηκε μέχρι σήμερα.

- Η κατ' έτος εκδιδόμενη απόφαση του Υ.ΠΕΧΩ.Δ.Ε. για τα όρια της αμοιβής μελετών.
  - Οι κοινές Υπουργικές αποφάσεις όπως ισχύουν τροποποιημένες, για μείωση αμοιβής μελετών έργων Δημοσίου ή Ν. Π. Δ. Δ.
- (ια) Ν. 1418/84, Π. Δ. 609/85 για τα Δημόσια Έργα όπως τροποποιήθηκαν και ισχύουν μέχρι σήμερα κατά τις διατάξεις τους εκείνες που αναφέρονται στην εκπόνηση μελετών.
- (ιβ) Άρθρο 2. Φορέας Ανάθεσης και Ισχύουσα Νομοθεσία. Φορέας ανάθεσης της μελέτης είναι ο Δήμος ..... Διευθύνουσα Υπηρεσία για τη μελέτη της παρούσας σύμβασης είναι η Τ.Υ. του Δήμου ..... Οι ισχύουσες διατάξεις που αφορούν το αντικείμενο της παρούσης σύμβασης είναι:
- Ο Ν. 716/77 (Περί μητρώου Μελετητών και αναθέσεως και εκπονήσεως μελετών (Έχει καταργηθεί με τον Ν. 3316/05)
  - Ο Ν. 3316/05 (ΦΕΚ 42 Α/22-2-05) «Ανάθεση και εκτέλεση δημοσίων συμβάσεων εκπόνησης μελετών και παροχής συναφών υπηρεσιών και άλλες διατάξεις»
  - Το Π.Δ.696/74 (περί αμοιβών μηχανικών και τεχνικών προδιαγραφών μελετών), όπως τροποποιήθηκε με το Π.Δ. 515/89
  - Το Π.Δ. 194/79
  - Το Ν. 1650/86 (για την προστασία του περιβάλλοντος), όπως τροποποιήθηκε από το Ν. 3010/2002
  - Η ΚΥΑ 69269/5387/90 όπως τροποποιήθηκε και συμπληρώθηκε .....
  - Η ΚΥΑ 69728/824/96
  - Η κατ' έτος εκδιδόμενη απόφαση του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. για τα όρια της αμοιβής μελετών.
  - Οι κοινές Υπουργικές αποφάσεις όπως ισχύουν τροποποιημένες, για μείωση αμοιβής μελετών έργων Δημοσίου ή Ν.Π.Δ.Δ.
  - Ν. 1418/84, Π.Δ. 609/85 για τα Δημόσια Έργα όπως τροποποιήθηκαν και ισχύουν μέχρι σήμερα κατά τις διατάξεις τους εκείνες που αναφέρονται στην εκπόνηση μελετών.
  - Η ΚΥΑ 114218/97 (κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων
  - διαχείρισης στερεών αποβλήτων)
  - Η ΚΥΑ 113944/97 (εθνικός σχεδιασμός διαχείρισης στερεών αποβλήτων)
  - Οι λοιπές ισχύουσες διατάξεις, εγκύκλιοι και αποφάσεις της χώρας μας και Οδηγίες της Ε.Ε. για την προστασία του περιβάλλοντος.

Αναπόσπαστο μέρος της Σύμβασης αυτής αποτελούν τα τεύχη Διακήρυξης, τα τεύχη πρόσκλησης ενδιαφέροντος και η προσφορά αναδόχου.

(ιγ) Οι προθεσμίες και άλλες λεπτομέρειες για την παραλαβή αναφέρονται στα άρθρα 22 του Ν. 716/77 και 19 του Π.Δ. 194/79.

Το παραπάνω άρθρο αντικαταστάθηκε με το άρθρο 37 του Ν. 3316/05

(ιδ) Για την εκχώρηση της μελέτης, ισχύει το άρθρο 14 του Ν. 716/77.....

(ιε) Οι τυχόν διαφωνίες που θα προκύψουν για (ή κατά) την εκπόνηση της μελέτης μεταξύ εργοδότη και αναδόχου από πράξεις τους ή πράξεις της Δ.Υ. ή των οργάνων του εργοδότη, θα επιλυθούν, είτε πρόκειται για ενστάσεις και για αιτήσεις Θεραπείας είτε για δικαστική επίλυση διαφώρων, κατά τις διατάξεις του άρθρου 23 του Ν.716/77.

Το παραπάνω άρθρο αντικαταστάθηκε με το άρθρο 41 του Ν. 3316/05

Η νομοθεσία που σήμερα εφαρμόζεται (Νόμος 3316/05) είναι διαθέσιμος στο διαδίκτυο και αναφέρεται στην προκήρυξη της ανοικτής διαδικασίας με ανάλυση – παρουσίαση των άρθρων του Νόμου και τα προσαρτήματα Ι, ΙΙ και ΙΙΙ. Παρακάτω παρουσιάζονται τα περιεχόμενα της ανάλυσης του Νόμου και των Προσαρτημάτων.

## ΠΡΟΚΗΡΥΞΗ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

### Περιεχόμενα

#### Κεφάλαιο Α΄

- Άρθρο 1: Κύριος του Έργου- Αναθέτουσα αρχή
- Άρθρο 2: Παραλαβή τευχών- Παροχή διευκρινίσεων
- Άρθρο 3: Προϋποθέσεις έγκυρης συμμετοχής- Υποβολή Φακέλου
- Άρθρο 4: Διαδικασία παραλαβής και αξιολόγησης προσφορών - Ενστάσεις
- Άρθρο 5: Ολοκλήρωση - Ακύρωση - Μερική επανάληψη – Ανάθεση
- Άρθρο 6: Σύναψη και υπογραφή Σύμβασης
- Άρθρο 7: Τεύχη της Διαγωνισμού - Συμβατικά τεύχη
- Άρθρο 8: Γλώσσα Διαδικασίας
- Άρθρο 9: Εφαρμοστέα νομοθεσία
- Άρθρο 10: Τεκμήριο από την συμμετοχή στη διαδικασία

#### Κεφάλαιο Β΄

- Άρθρο 11: Αντικείμενο- Προεκτιμώμενη Αμοιβή -Χρηματοδότηση – Συμβατική προθεσμία
- Άρθρο 12: Διαδικασία επιλογής Αναδόχου παροχής των υπηρεσιών – Κριτήριο ανάθεσης της σύμβασης
- Άρθρο 13: Προσφορές – Χρόνος ισχύος προσφορών
- Άρθρο 14: Ημερομηνία λήξης της προθεσμίας παραλαβής των φακέλων συμμετοχής
- Άρθρο 15: Εγγυήσεις συμμετοχής και καλής εκτέλεσης
- Άρθρο 16: Αμοιβή Αναδόχου – Τρόπος πληρωμής
- Άρθρο 17: Δημοσιότητα - Δαπάνες δημοσίευσης

#### Κεφάλαιο Γ΄

- Άρθρο 18: Δικαιούμενοι συμμετοχής στο διαγωνισμό
- Άρθρο 19: Προσωπική κατάσταση των διαγωνιζομένων
- Άρθρο 20: Ειδική Τεχνική και Επαγγελματική Ικανό
- Άρθρο 21: Δικαιολογητικά - Αποδεικτικά έγγραφα
- Άρθρο 22: Κριτήρια αξιολόγησης προσφοράς – προσδιορισμός Αναδόχου
- Άρθρο 23: Περιεχόμενο φακέλου συμμετοχής
- Άρθρο 24: Έλεγχος νομιμοποίησης και προσωπικής κατάστασης του επιλεγέντος αναδόχου.

### Προσαρτήματα

*Προσάρτημα I:* Υπόδειγμα Υπεύθυνης Δήλωσης.

*Προσάρτημα II:* Υποδείγματα για την τεχνική ικανότητα

Υπόδειγμα 1: Κατάλογος παρόμοιας φύσης μελετών

Υπόδειγμα 2: Πίνακας των υπευθύνων για την εκτέλεση της σύμβασης (με τίτλους σπουδών και επαγγελματικά προσόντα)

*Προσάρτημα III:* Υποδείγματα για την τεχνική προσφορά

Υπόδειγμα 1: Πίνακας προτεινόμενου προσωπικού

Υπόδειγμα 2: Αναλυτικό βιογραφικό σημείωμα

Υπόδειγμα 3: Πίνακας μελετών-υπηρεσιών σε εξέλιξη

*Προσάρτημα V:* Υπόδειγμα Εγγυητικής Επιστολής Συμμετοχής

*Προσάρτημα VI:* Υπόδειγμα Εγγυητικής Επιστολής Καλής Εκτέλεσης

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

## ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ

**Αερισμός (Aeration):** διεργασία κατά την οποία πραγματοποιείται εισαγωγή ή εξαγωγή αέρα σε ένα μέσο όπως το νερό ή το έδαφος

**Αερόβιο (Aerobic):** το σύστημα όπου ζει δρα ή εμφανίζεται μόνο με την παρουσία οξυγόνου

**Ακόρεστη ζώνη (Unsaturated zone):** στρώμα εδάφους κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα

**Ακτίνα επίδρασης οξυγόνου:** η απόσταση μέχρι την οποία το παρεχόμενο οξυγόνο αρκεί για τη διατήρηση της βέλτιστης βιοαποικοδόμησης. Είναι συνάρτηση της παροχής του αέρα και του ρυθμού κατανάλωσης οξυγόνου, εξαρτάται από τη γεωλογία της περιοχής, το σχεδιασμό του φρεατίου και τη μικροβιακή δραστηριότητα

**Ακτίνα επιρροής (Radius of influence):** η μέγιστη απόσταση από το φρεάτιο εισαγωγής ή εξαγωγής όπου πραγματοποιείται μεταφορά αερίου

**Αλκαλικότητα (Alkalinity):** η συγκέντρωση των ιόντων υδροξυλίου σε ένα διάλυμα

**Αναερόβιο (Anaerobic):** το σύστημα όπου ζει δρα ή εμφανίζεται μόνο κατά την απουσία του οξυγόνου

**Αυτόχθονες Μικροοργανισμοί (Indigenous microorganisms):** οι μικροοργανισμοί που ζουν και αναπτύσσονται στην περιοχή μελέτης.

**Βιοαέριο (Biogas):** το αέριο που παράγεται κατά τη βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων.

**Βιοαερισμός (Bioventing):** διεργασία αερισμού υποεπιφανειακών εδαφών μέσω φρεατίων με σκοπό τη διέγερση της βιολογικής δραστηριότητας

**Βιοαντιδραστήρας (Bioreactor):** διάταξη ή περιοχή στην οποία πραγματοποιούνται βιολογικές αντιδράσεις ή δραστηριότητες

**Βιοαποικοδόμηση (Biodegradation):** η διάσπαση των συστατικών με φυσικό τρόπο, όπως ο μεταβολισμός των μικροοργανισμών.

**Βιοαύξηση (bioaugmentation):** η προσθήκη μη-αυτοχθόνων μικροοργανισμών στις διεργασίες της βιοεξυγίανσης, έτσι ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός της αποδόμησης των ρυπαντών

**Βιοδιαθεσιμότητα (Bioavailability):** η προσβασιμότητα των ρύπων σε μικροοργανισμούς βιοδιάσπασης. Σχετίζεται (1) με την κατανομή φάσεων και τη μεταφορά μάζας και (2) με την καταλληλότητα του ρύπου σαν υπόστρωμα

**Βιοδιασπάσιμο υλικό ή συστατικό (Biodegradable material):** που δύναται να διασπαστεί με φυσικό τρόπο όπως ο μεταβολισμός των μικροοργανισμών

**Βιοδιέγερση (biostimulation):** είδος βιοεξυγίανσης το οποίο εφαρμόζεται όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι κατάλληλες

**Βιοεξυγίανση (Bioremediation):** μέθοδος αποκατάστασης περιοχών, στην οποία χρησιμοποιούνται μικροβιακές διεργασίες, όπως ο μεταβολισμός για την διάσπαση εδαφικών και υδάτινων ρύπων

**Βιομάζα (Biomass):** ποσότητα μάζας ζώντων οργανισμών (σε δεδομένη περιοχή)

**Βιοχημική Ενεργότητα (Biochemical activity):** η ικανότητα των μικροοργανισμών να αποικοδομούν το οργανικό κλάσμα.

**Βιοψεκασμός οξυγόνου (bioparging):** η αερόβια επεξεργασία κορεσμένων εδαφών

**Δέκτης ηλεκτρονίων (Electron acceptor):** ένωση που υφίσταται οξείδωση καθώς δέχεται ηλεκτρόνια από έναν δότη

**Διαπερατότητα (Permeability):** μέτρηση της ικανότητας ενός υγρού ή αερίου να κινείται μέσα σε πορώδες υλικό

**Διάχυση (Diffusion):** διεργασία παθητικής μεταφοράς ενός συστατικού που πραγματοποιείται εξαιτίας της ύπαρξης διαφοράς συγκέντρωσης

**Δότης ηλεκτρονίων (Electron donor):** οργανικός άνθρακας ή ανόργανο συστατικό που υφίσταται αναγωγή δίνοντας ηλεκτρόνια

**Εγγενής βιοεξυγίανση (intrinsic bioremediation):** η φυσική εξυγίανση των ρυπασμένων περιοχών

**Ένζυμα (Enzymes):** πρωτεϊνικής φύσεως βιολογικοί καταλύτες

**Εξαγωγή εδαφικού αερίου (Soil Vapor Extraction):** μέθοδος αποκατάστασης που ο σχεδιασμός και η λειτουργία της βασίζεται στη βελτιστοποίηση της εξαίτησης των συστατικών χαμηλού μοριακού βάρους

**Κονιορτοποιώ (Comminute):** μετατροπή ενός υλικού σε μορφή σκόνης.

**Μπεντονίτης (Bentonite):** γεωλογικό στρώμα που από ηφαιστειακή στάχτη που χρησιμοποιείται για το σφράγισμα των φρεατίων

**Οξείδωση (Oxidation):** χημική διεργασία κατά την οποία μια χημική ένωση ή συστατικό απομακρύνει ηλεκτρόνια

**Πορώδες (Porosity):** ο διαθέσιμος χώρος ενός υλικού μέσα από τον οποίο μπορεί να μεταφερθεί ένα υγρό ή αέριο

**Προσρόφηση (Adsorption):** διεργασία κατά την οποία τα μόρια μιας ουσίας συσσωρεύονται και προσκολλούνται στην επιφάνεια ενός στερεού εξαιτίας της ύπαρξης φυσικών και/ή χημικών δυνάμεων

**Πρωτεύον υπόστρωμα (Primary layer):** το υπόστρωμα που καλύπτει τις ενεργειακές και αναπτυξιακές ανάγκες των κυττάρων

**Πτητική (Volatile):** η ένωση που εξατμίζεται εύκολα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες

**Ρόφηση (Sorption):** η πρόσληψη ή συγκράτηση μιας ουσίας μέσω της προσρόφησης ή απορρόφησης της σε ένα μέσο

**Ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου (Oxygen consumption rate):** ο ρυθμός με τον οποίο το εδαφικό περιεχόμενο σε οξυγόνο μειώνεται λόγω των βιολογικών και χημικών αντιδράσεων

**Ρύπος (Pollutant):** χημική ένωση που όταν έρθει σε επαφή με συστατικό το καθιστά ακάθαρτο μολυσματικό ή μη ασφαλές

**Σημείο Δρόσου (Dew point):** θερμοκρασία, στην οποία οι ατμοί αρχίζουν να υγροποιούνται.

**Σταθεροποίηση (Stabilization):** η μετατροπή των απορριμμάτων σε χημικά αδρανή.

**Στραγγίσματα (Leachate):** τα παραγόμενα υγρά, κατά τη βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων.

**Στρωμάτωση (Layer):** η κάθετη διάταξη των πετρωμάτων στο υπέδαφος μιας περιοχής.

**Συμμεταβολισμός (Cometabolism):** ο μεταβολισμός του δευτερεύοντος υποστρώματος, που πραγματοποιείται κατά το μεταβολισμό του πρωτεύοντος υποστρώματος

**Τάση Ατμών (Vapor pressure):** μέτρο της τάσης διαφυγής ενός υγρού, η πίεση που θα παρατηρούνταν στην αέρια φάση, αν το υγρό τοποθετούνταν σε κενό δοχείο και ισορροπούσε.

**Υδροφορέας (Aquifer):** γεωλογικό στρώμα που φέρει νερό, βραχώδες, αμμώδες ή χαλικώδες

**Ex situ:** αναφέρεται σε μια διεργασία ή τεχνολογία στην οποία το ρυπασμένο υλικό απομακρύνεται από την περιοχή ρύπανσης για την επεξεργασία του

**In situ τεστ αναπνοής (In situ respiration test):** το τεστ που πραγματοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού βιοαποικοδόμησης για τον καθορισμό της εφαρμοσιμότητας του βιοαερισμού σε μια ρυπασμένη περιοχή

**In situ:** αναφέρεται σε μια διεργασία ή τεχνολογία που πραγματοποιείται στην περιοχή της ρύπανσης

**pH:** μέτρηση της αλκαλικότητας ή οξύτητας ενός διαλύματος. Ο αρνητικός λογάριθμος της συγκέντρωσης των κατιόντων υδρογόνου

## ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ

<b>BOD<sub>5</sub></b>	η βιοχημική απαίτηση οξυγόνου
<b>COD</b>	η χημική απαίτηση οξυγόνου
<b>C<sub>S</sub></b>	ποσότητα του ρύπου που είναι προσροφημένη στα σωματίδια του εδάφους (g/g <sub>soil</sub> )
<b>C<sub>V</sub></b>	συγκέντρωση του ρύπου στην αέρια φάση (g/L)
<b>C<sub>vsat</sub></b>	συγκέντρωση κορεσμού της αέριας φάσης (g/L)
<b>C<sub>W</sub></b>	συγκέντρωση του ρύπου στην υδατική φάση (g/L <sub>aqueous</sub> )
<b>DNAPL</b>	μη υδατικοί και βαρύτεροι από το νερό ρυπαντές
<b>Eh</b>	δυναμικό οξειδοαναγωγής
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	τρισθενής σίδηρος
<b>h</b>	πάχος αερισμού (m)
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	υπεροξείδιο του υδρογόνου
<b>H<sub>2</sub>S</b>	υδρόθειο
<b>k</b>	μέγιστος ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος (g <sub>s</sub> /g <sub>x</sub> · min)
<b>k<sub>B</sub></b>	ρυθμός βιοαποικοδόμησης (mg υδρογονανθράκων/kg εδάφους · day)
<b>K<sub>d</sub></b>	συντελεστής ρόφησης (L <sub>aqueous</sub> /g <sub>soil</sub> )
<b>k<sub>d</sub></b>	ρυθμός ενδογενούς αναπνοής (day <sup>-1</sup> )
<b>k<sub>o</sub></b>	ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου (%/hr)
<b>k<sub>o</sub></b>	βασικός ρυθμός βιοαποικοδόμησης (%O <sub>2</sub> /d)
<b>K<sub>ow</sub></b>	συντελεστής κατανομής οκτανόλης / νερού
<b>K<sub>S</sub></b>	σταθερά ημίσεως ρυθμού του Monod (g <sub>s</sub> /L)
<b>k<sub>T</sub></b>	θερμοκρασιακά διορθωμένος ρυθμός βιοαποικοδόμησης (%O <sub>2</sub> /d)
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	μαγγάνιο
<b>MW<sub>x</sub></b>	μοριακό βάρος του ρύπου (g/mol)
<b>NH<sub>3</sub></b>	αμμωνία
<b>NO<sup>3-</sup></b>	νιτρικά
<b>PCBs</b>	πολυχλωριωμένα διφαινόλια
<b>PCE</b>	τετραχλωροαιθυλένιο
<b>P<sub>V</sub></b>	πίεση της αέριας φάσης του ρύπου σε θερμοκρασία T (atm)
<b>Q<sub>s</sub></b>	παροχή αέρα για την περιοχή (m <sup>3</sup> /min)
<b>Q<sub>w</sub></b>	παροχή αέρα ανά φρεάτιο (m <sup>3</sup> /min)
<b>R</b>	παγκόσμια σταθερά των αερίων (1,987 cal/°K · mol)
<b>R<sub>I</sub></b>	ακτίνα επιρροής (m)
<b>S</b>	συγκέντρωση του υποστρώματος (g <sub>s</sub> /L)
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	θειικά
<b>s<sub>x</sub></b>	διαλυτότητα του καθαρού ρύπου στο νερό (g/L <sub>water</sub> )
<b>t</b>	χρόνος (min)

<b>T<sub>abs</sub></b>	απόλυτη θερμοκρασία (°K)
<b>TCE</b>	τριχλωροαιθυλένιο
<b>TDS</b>	ολικά διαλυμένα στερεά
<b>TOC</b>	ο συνολικός οργανικός άνθρακας
<b>V</b>	όγκος του ρυπασμένου εδάφους (m <sup>3</sup> ) όπου περιοριστικός παράγοντας είναι το οξυγόνο
<b>X</b>	συγκέντρωση των μικροοργανισμών (g <sub>x</sub> /L)
<b>Y</b>	συντελεστής κυττάρων (mg βιομάζας/mg υδρογονανθράκων)
<b>ΑΣΑ</b>	αστικά στερεά απόβλητα
<b>E<sub>a</sub></b>	ενέργεια ενεργοποίησης (cal/mol)
<b>θ<sub>a</sub></b>	πορώδες με αέρα (cm <sup>3</sup> <sub>air</sub> / cm <sup>3</sup> <sub>soil</sub> )
<b>θ<sub>a</sub></b>	τιμήμα του πορώδους που περιέχει αέρα (τυπικό εύρος 0,2-0,3)
<b>χ</b>	ποσοστό κατανομής του ρύπου (αδιάστατο μέγεθος)
<b>X</b>	βιομάζα (mg βιομάζας/kg εδάφους)

## ΧΑΔΑ στην Κρήτη

Στους Πίνακες 1-3 δίδεται και ο βαθμός επικινδυνότητας ανά ΧΑΔΑ όπως αυτός προσδιορίστηκε με βάση τα στοιχεία της απογραφής της Περιφέρειας. (Ο βαθμός αυτός θα πρέπει να τεκμηριωθεί αναλυτικά σε κάθε μελέτη αποκατάστασης ΧΑΔΑ). Τα στοιχεία αυτά παραχωρήθηκαν από την Διευθνή της ΠΕΧΩ κ. Εμ. Μαυράκη.

**Πίνακας 1.** Ενεργοί ΧΑΔΑ των ΟΤΑ που έχουν κάλυψη από υφιστάμενο ΧΥΤΑ

α/α	Νομός	ΟΤΑ	Δημοτικό Διαμέρισμα	Τοπωνύμιο ΧΑΔΑ	Έργο ΧΥΤΑ	Βαθμός Επικινδυνότη.
1	Ηρακλείου	Γουβών	Γουβών	Σκαφιδαράς (Αγ. Παρασκευή Σκοτεινού)	Χερσονήσου	33
2	Ηρακλείου	Καστελίου	Καστελίου	Πριόνα	Χερσονήσου	55
3	Ηρακλείου	Καστελίου	Αρχάγγελου	Νταμάρι	Χερσονήσου	59
4	Λασιθίου	Αγ. Νικολάου	Αγ. Νικόλαος	Κουρτό	Αγ. Νικολάου	62
5	Ρεθύμνης	Ανωγείων	Ανωγείων	Καλοκαιρινό	Αμαρίου	52
6	Ρεθύμνης	Κουλούκωνα	Γαράζο	Χαλέπα (Μουρτζανά)	Αμαρίου	32
7	Ρεθύμνης	Κουλούκωνα	Απλαδιανά	Σκουρόλαγκος	Αμαρίου	38
8	Ρεθύμνης	Κουλούκωνα	Λιβάδια	Πέρα Γεράκι	Αμαρίου	46
9	Ρεθύμνης	Κουλούκωνα	Ζωνιανά	Βασιλέρι	Αμαρίου	46
10	Ρεθύμνης	Κουλούκωνα	Αξός	Γέφυρα Φονιά	Αμαρίου	38
11	Ρεθύμνης	Κουλούκωνα	Χώνος	Αυγούστα	Αμαρίου	38
12	Ρεθύμνης	Λάμπης	Αγ. Γαλήνη	Μελιχιάς	Αμαρίου	52
13	Ρεθύμνης	Λάμπης	Μιζόρρουμα	Κόκκινο Κεφάλι-Λιθάρι	Αμαρίου	35
14	Ρεθύμνης	Λάμπης	Σπήλι	Ξεριζάμπτελο	Αμαρίου	24
15	Ρεθύμνης	Λάμπης	Μέλαμπτες	Σελί	Αμαρίου	37
16	Ρεθύμνης	Φοίνικα	Σελίων	Διχαλόστρατα	Αμαρίου	49
17	Χανίων	Βουκολιών	Παλαιών Ρουμάτων	Αρχοντικά	Ακρωτηρίου	69
18	Χανίων	Βουκολιών	Βουκολιές / Ταυρωνίτης	Ταυρωνίτης	Ακρωτηρίου	96
19	Χανίων	Γεωργιου-πόλεως	Κουρνάς	Χαδά	Ακρωτηρίου	33
20	Χανίων	Θερίσου	Βαρύπετρου	Γεωργ/λεως Βαρύπετρου	Ακρωτηρίου	27
21	Χανίων	Καντάνου	Καντάνου	Βουκολές	Ακρωτηρίου	37
22	Χανίων	Καντάνου	Καντάνου	Βαμβακάδες	Ακρωτηρίου	52
23	Χανίων	Κεραμειών	Παπαδιανών	Απογλύστρες	Ακρωτηρίου	57
24	Χανίων	Κεραμειών	Παπαδιανών	Παναγιά-Βαντές	Ακρωτηρίου	30
25	Χανίων	Μηθύμνης	Χαιρεθιανών	Χαδά Χαιρεθιανών	Ακρωτηρίου	30
26	Χανίων	Μηθύμνης	Τοπολιών	Καψανιανά	Ακρωτηρίου	39
27	Χανίων	Μουσούρων	Αλικιανού	Λιδιά	Ακρωτηρίου	57
28	Χανίων	Μουσούρων	Βατόλακου	Αγ. Στυλιανός	Ακρωτηρίου	47
29	Χανίων	Μουσούρων	Σκινές	Σκοπευτήριο	Ακρωτηρίου	47
30	Χανίων	Μουσούρων	Φουρνές	Βλάτος	Ακρωτηρίου	54
31	Χανίων	Μουσούρων	Κουφού	Γαβράνου	Ακρωτηρίου	54

**Πίνακας 2.** Ενεργοί ΧΑΔΑ των ΟΤΑ όπου μπορεί να εφαρμοστεί το πρόγραμμα “Ένας (1) ΧΑΔΑ ανά ΟΤΑ”

α/α	Νομός	ΟΤΑ	Δημοτικό Διαμέρισμα	Τοπωνύμιο ΧΑΔΑ	Βαθμός Επικινδυνότητας
1	Ηρακλείου	Αγ. Βαρβάρα	Αγ. Βαρβάρας	Χαλέπα	43
2	Ηρακλείου	Αγ. Βαρβάρα	Αγ. Θωμά	Μέλισσα	43
3	Ηρακλείου	Αγ. Βαρβάρα	Πρινιά	Χαλέπα	40
4	Ηρακλείου	Αγ. Βαρβάρα	Λαρανίου	Μπουλούμπαχη Βρύση	43
5	Ηρακλείου	Αγ. Βαρβάρα	Άνω Μουλίων	Μιτάτα	40
6	Ηρακλείου	Αρκαλοχωρίου	Αρκαλοχωρίου	Σαραφαλή Μάντρα	89
7	Ηρακλείου	Αρκαλοχωρίου	Σκινιά	Κάτω Λενικά	51
8	Ηρακλείου	Αρκαλοχωρίου	Παρτίρων	Σταυρός	51
9	Ηρακλείου	Αστερουσίων	Μεσοχωρίου		40
10	Ηρακλείου	Αστερουσίων	Λιγορτύνου	Παχειά Λιβάδια	40
11	Ηρακλείου	Αστερουσίων	Τεφελίου	Παραθάμνα	40
12	Ηρακλείου	Γοργολαΐνη	Κάτω Ασιτών	Χαλούρα	51
13	Ηρακλείου	Γοργολαΐνη	Άνω Ασιτών	Ανεμόμυλος	54
14	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Χουστουλιανών	Καλάμια	52
15	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Πλατάνου	Γεροπόταμος	44
16	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Γκαγκαλών	Φαράγγι	27
17	Ηρακλείου	Ζαρού	Ζαρού	Χαλεφές	46
18	Ηρακλείου	Ζαρού	Βοριζίων	Χαλέπα	62
19	Ηρακλείου	Ζαρού	Μορονίου	Παλιάμπελα	40
20	Ηρακλείου	Κρουσώνα	Κρουσώνας	Καμάρα	62
21	Ηρακλείου	Κρουσώνα	Κρουσώνας	Γκριδιανά	62
22	Ηρακλείου	Κρουσώνα	Σάρχος	Ποταμός	51
23	Ηρακλείου	Κρουσώνα	Κορφές	Αγ. Μαρίνα	51
24	Ηρακλείου	Κρουσώνα	Λουτράκι	Μπουχανές	48
25	Ηρακλείου	Κρουσώνα	Κιθαρίδα	Κάμπος	58
26	Ηρακλείου	Ν. Αλικαρνασσού	Ν. Αλικαρνασσού	Αγ. Νεκτάριος	69
27	Ηρακλείου	Ν. Αλικαρνασσού	Ν. Αλικαρνασσού	Δυό Αοράκια	34
28	Ηρακλείου	Τυμπακίου	Τυμπακίου	Παχειά Άμμος	56
29	Ηρακλείου	Τυμπακίου	Φανερωμένης	Φανερωμένης	84
30	Ηρακλείου	Τυμπακίου	Πιτσιδίων	Τρυπητό Χαράκι	41
31	Λασιθίου	Ιεράπετρας	Ιεράπετρας	Μακριλιά	80
32	Λασιθίου	Ιεράπετρας	Καβουσίου	Πλατύς Ποταμός	40
33	Λασιθίου	Ιτάνου	Παλαιοκάστρου	Ασπρομάντρες	67
34	Λασιθίου	Ιτάνου	Ζάκρου	Αμπέλες	36
35	Λασιθίου	Νεάπολης	Οικ. Κουρούνες	Κουρούνες	41
36	Λασιθίου	Νεάπολης	Βραχασίου	Μπαλωθιές (Αγκινάρας)	43

**Πίνακας 3. Ανενεργοί ΧΑΔΑ**

a/a	Νομός	ΟΤΑ	Δημοτικό Διαμέρισμα	Τοπωνύμιο ΧΑΔΑ	Βαθμός Επικινδυνότητας
1	Ηρακλείου	Αρχανών	Άνω Αρχανών	Κακιιά Σκάλα	65
2	Ηρακλείου	Αρχανών	Κάτω Αρχανών	Κεφάλια	43
3	Ηρακλείου	Αρχανών	Άνω Αρχανών	Κακιιά Σκάλα	60
4	Ηρακλείου	Γαζίου	Φόδελε	Μελισσινού	13
5	Ηρακλείου	Γαζίου	Αχλάδας	Κολυτσάνες	29
6	Ηρακλείου	Γαζίου	Ρογδιάς	Ρέχτρα	35
7	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Αγίων Δέκα	Άσπια	58
8	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Αμπελούζου	Κόπρινα	29
9	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Βαγιωνιάς	Γεροπόταμος	62
10	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Βασιλικής	Γαραμίκη	44
11	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Μιαμούς	Μαχαιρίδια	29
12	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Αγ. Κύριλου	Δρακώνα	25
13	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Πλώρας	Γέφυρα	54
14	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Βασ. Ανωγείων	Γεροπόταμος	29
15	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Μητρόπολις	Λιθαίο Ποταμό	54
16	Ηρακλείου	Γόρτυνας	Απεσωκαρίου	Γεροπόταμος	40
17	Ηρακλείου	Επισκοπής	Επισκοπής	Πλάι	50
18	Ηρακλείου	Μαλίων	Μαλίων	Γερανοί	39
19	Ηρακλείου	Μαλίων	Μαλίων	Μαχά	49
20	Ηρακλείου	Μοιρών	Γαλιά	Φαράγγι	65
21	Ηρακλείου	Μοιρών	Πετροκεφάλι	Τζαρελίδικα	68
22	Ηρακλείου	Μοιρών	Αντισκάρι	Χάρακας	43
23	Ηρακλείου	Μοιρών	Πόμπια	Δρόμος προς Πηγαϊδάκια	33
24	Ηρακλείου	Τεμένους	Προφ. Ηλία	Μουσούρου	30
25	Ηρακλείου	Τυμπακίου	Τυμπακίου	Παλιό Αεροδρόμιο	57
26	Ηρακλείου	Χερσονήσου	Χερσονήσου	Πυργιά	37
27	Λασιθίου	Αγ. Νικολάου	Ελούντας	Ντρουβάλια	37
28	Λασιθίου	Ιεράπετρας	Κάτω Χωριό	Καλαμάτης	61
29	Λασιθίου	Λεύκης	Απιδίων	Κιμπαρές	20
30	Λασιθίου	Μακρύ Γιαλού	Σταυροχωρίου	Λάπιθος	24
31	Λασιθίου	Μακρύ Γιαλού	Ορεινού	Μουρί	24
32	Λασιθίου	Νεάπολης	Μιλάτου	Αγκινάρας	36
33	Λασιθίου	Σητείας	Σητείας	Νταούσο	33
34	Ρεθύμνης	Ανωγείων	Ανωγείων	Βιόλα	49
35	Ρεθύμνης	Φοίνικα	Μύρθιου	Καμινάκι	58
36	Χανίων	Ακρωτηρίου	Μουζουρά	Κουρουπητός	73
37	Χανίων	Ανατ. Σελίνου	Σούγιας	Κατελανές	57
38	Χανίων	Βουκολιών	Βουκολιές	Πύργος	58
39	Χανίων	Βουκολιών	Ταυρωνίτης	Τραχάλα	63
40	Χανίων	Ελ. Βενιζέλου	Νεροκούρου	Οδός Νεροκούρου / Μαλάξας	78
41	Χανίων	Ελ. Βενιζέλου	Μουρνιών	Σιόπατα	81
42	Χανίων	Ελ. Βενιζέλου	Μουρνιών	Βάντες Κούρμπα	77
43	Χανίων	Κισσάμου	Κισσάμου	Αμμούτσες	34
44	Χανίων	Κρουονερίδας	Εμπρόσνερου	Ροτάκι	45
45	Χανίων	Κρουονερίδας	Βρυσών	Κεφάλια	45
46	Χανίων	Κρουονερίδας	Βρυσών	Μπούτακας	33
47	Χανίων	Πελεκάνου	Παλαιόχωρας	Πανόραμα	29
48	Χανίων	Πελεκάνου	Πελεκάνου	Αγ. Θεόδωροι	26
49	Χανίων	Φρέ	Φρέ	Αγγέλου Γκρεμός	28