



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

Πτυχιακή Εργασία

**ΧΩΡΟΙ ΤΕΛΙΚΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ  
ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:**

**ΝΙΚΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ**

**ΓΚΑΤΖΩΝΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ**

**ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ ΣΑΒΒΑΣ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 4 ΜΑΡΤΙΟΥ 2010**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην εργασία, που ακολουθεί και αποτελεί μια σύνθεση πληροφοριών από την διεθνή βιβλιογραφία, γίνεται μια προσπάθεια να παρουσιαστούν όλα τα στοιχεία, που αφορούν την φύση, την ποσότητα και ποιότητα, καθώς και τους τρόπους διάθεσης των απορριμμάτων στο φυσικό περιβάλλον. Η προσπάθεια επικεντρώνεται στην περιγραφή της δομής, καθώς και των φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α), αφενός γιατί ο τρόπος αυτός διάθεσης αποτελεί, και θα αποτελεί και τις επόμενες δεκαετίες, την δημοφιλέστερη μέθοδο διάθεσης απορριμμάτων στη χώρα μας και αφετέρου γιατί στο θέμα αυτό εμπλέκεται και συνεισφέρει ουσιαστικά η Γεωλογική επιστήμη και συγκεκριμένα ο κλάδος της Υδρογεωλογίας.

## Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Εισαγωγή	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup>	
1.1 Γενικά.	4
1.2 Οι πηγές και τα είδη των απορριμμάτων.	4
1.2.1 Πηγές απορριμμάτων	5
1.2.2 Είδη απορριμμάτων.	6
1.3 Σύσταση Δημοτικών απορριμμάτων.	8
1.3.1 Φυσική σύσταση δημοτικών απορριμμάτων.	9
1.3.2 Χημική σύσταση δημοτικών απορριμμάτων.	11
1.3.3 Μεταβολές στην σύσταση των απορριμμάτων	12
1.4 Τρόποι τελικής διάθεσης απορριμμάτων.	13
1.5 Υγειονομική ταφή των απορριμμάτων.	14
1.5.1 Η γενική φιλοσοφία της υγειονομικής ταφής ως μεθόδου τελικής απόθεσης	14
1.5.2 Δομή και τρόποι απόθεσης στους Χ.Υ.Τ.Α.	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup>	
(Υδρολογικό ισοζύγιο και στεγανότητα του χώρου υγειονομικής ταφής.)	23
2.1 Γενικά	23
2.2 Υδρολογικό ισοζύγιο του Χ.Υ.Τ.Α.	25
2.3 Στεγανά υποστρώματα στους Χ.Υ.Τ.Α.	27
2.3.1 Ακαμπτα υποστρώματα.	27
2.3.2 Εύκαμπτα υποστρώματα (φυσικά υλικά)	28
2.3.3 Εύκαμπτα υποστρώματα (Συνθετικά υλικά).	33
2.4 Στεγανά καλύμματα.	36
2.5 Υπολογισμός της ποσότητας στραγγίσματος που διαφεύγει από τα στεγανά υποστρώματα	37

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

3.1 Η δράση των μικροοργανισμών.	47
3.2 Βιοχημικές διεργασίες και παραγωγή βιοαερίου.	49
3.3 Βιοχημικές διεργασίες και παραγωγή διασταλαζόντων υγρών	52
3.4 Μετανάστευση βιοαερίου.	56
3.5 Μετανάστευση διασταλαζόντων υγρών και μόλυνση του υπόγειου νερού.	60
3.5.1 Τρόποι και συσκευές παρακολούθησης της μετανάστευσης του στραγγίσματος.	60
3.5.2 Κυριότερες διαδικασίες που καθορίζουν την ποιότητα και τις του στραγγίσματος, αλλά και του υπόγειου νερού που γίνεται αποδέκτης του.	66
3.6 Τελική αποκατάσταση ενός χώρου απόθεσης.	82
Βιβλιογραφία	84

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι διάφοροι ρύποι, που προέρχονται από την κοινή χρήση, διακρίνονται ανάλογα με την φύση τους σε οικιακά, βιομηχανικά, ογκώδη, ραδιενεργά, κ.τ.λ. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο, για την καλύτερη κατανόηση του θέματος, να γίνει αναφορά στην φύση, τις πηγές και την ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται στις σύγχρονες κοινωνίες και διατίθενται σε χώρους απόθεσης. Το υδρολογικό ισοζύγιο του Χ.Υ.Τ.Α καθώς και η απόδοση των μέτρων στεγάνωσης, είναι οι δύο κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα των διασταλαζόντων υγρών που θα διαφύγουν προς το υπέδαφος και το υπόγειο νερό. Το υδρολογικό ισοζύγιο του Χ.Υ.Τ.Α, καθορίζεται από το υδρολογικό ισοζύγιο της ευρύτερης περιοχής και από τα φυσικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων, ενώ η απόδοση των μέτρων στεγάνωσης εξαρτάται, από το είδος και την ποιότητα κατασκευής του στεγανού υποστρώματος (liner) και του συστήματος στράγγισης (drain). Όταν ένας χώρος απόθεσης έχει κατασκευαστεί με τις προδιαγραφές ενός Χ.Υ.Τ.Α, μετά το πέρας των εργασιών απόθεσης και την τοποθέτηση της τελικής επικάλυψης, πρέπει να αποκατασταθεί με την διαμόρφωση ενός τελικού συμβατού με την περιοχή ανάγλυφου και προαιρετικά με φυτοκάλυψη και αισθητική διαμόρφωση του τοπίου.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη μιας κοινωνίας, στην οποία πολύς κόσμος δεν σκέπτεται δυο φορές για τα πράγματα που αγοράζει ή πετάει ως άχρηστα, ή που αγοράζει περισσότερο από ότι έχει ανάγκη, καθώς και η ανεξέλεγκτη παραγωγή αγαθών πολλές φορές μη απαραίτητων, οδηγεί στην σημαντική αύξηση της ποσότητας των απορριμμάτων. Τα παραχθέντα ρυπαντικά φορτία από τις διεργασίες αποδόμησης (διασταλάζοντα υγρά, βιοαέριο), διοχετεύονταν και διοχετεύονται ακόμα και σήμερα, ανεξέλεγκτα, στο έδαφος τον αέρα και το υπόγειο νερό. Ο προφανής περιβαλλοντικός κίνδυνος για τις επόμενες γενιές και η υποχρέωση ορθολογικής διαχείρισης, χωρίς την ύπαρξη (ή με την ελαχιστοποίηση) κινδύνων μόλυνσης, απαίτησαν την συμβολή διαφόρων ειδικοτήτων του επιστημονικού χώρου, στις διαδικασίες πρόληψης και ελάττωσης της ρύπανσης.

Η διαχείριση των απορριμμάτων, που περιλαμβάνει την συλλογή, την μεταφορά και την επεξεργασία ή/και διάθεση, περιέχει ένα σύνολο δραστηριοτήτων που πρέπει να υλοποιούνται με σύγχρονες και αυστηρές προδιαγραφές, ώστε να ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Το πιο ευπαθές σημείο της διαχείρισης των απορριμμάτων είναι η διάθεση τους σε χωματερές και χώρους υγειονομικής ταφής (Χ.Υ.Τ.Α). Στο μέσο πολίτη η λέξη χώρος διάθεσης απορριμμάτων θυμίζει μια εικόνα απερίγραπτης όψης σκουπιδιών, με οσμές, τροφτικά, κ.λ.π. Η αντιστροφή αυτής της εικόνας, επιδιώκεται με την υγειονομική ταφή, σε χώρους που μετά την πλήρωση τους αποκαθίστανται περιβαλλοντικά, ώστε να μην αποτελούν πηγές κανενός είδους όχλησης.

Δύο βασικούς τύπους χώρων υγειονομικής ταφής μπορούμε να διακρίνουμε:

1. Τύπου αντιδραστήρα, οι οποίοι παράγουν ποσοτικός και ποιοτικώς προβλέψιμες εκπομπές, έτσι ώστε εντός μιας τριακονταετίας οι τελευταίες να έχουν μειωθεί σε σημείο ώστε τα απορρίμματα να ικανοποιούν τα σταθερότυπα ποιότητας τελικής απόθεσης.

2. Τελικής απόθεσης, στους οποίους τα απορρίμματα, ικανοποιούν εξαρχής και μετά από κάποια επεξεργασία, τα σταθερότυπα ποιότητας τελικής απόθεσης,

Στην χώρα μας ο χώρος υγειονομικής ταφής αντιμετωπίζεται ως "μαύρο κουτί", με συνδυασμό κατάλληλων επενδύσεων γύρω του, ώστε να ελαχιστοποιηθούν και να ελεγχθούν οι εκπομπές από αυτό. Εκπομπές μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι κατά κύριο λόγο τα διασταλάζοντα υγρά (στραγγίσματα) και το βιοαέριο και κατά δευτερεύοντα λόγο οι οσμές και τα αερομεταφερόμενα σωματίδια.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

Είδη, ποσότητες, σύσταση και τρόποι διάθεσης απορριμμάτων.

### 1.1 Γενικά,

Οι διάφοροι ρύποι, που προέρχονται από την κοινή χρήση, διακρίνονται ανάλογα με την φύση τους σε οικιακά, βιομηχανικά, ογκώδη, ραδιενεργά, κ.τ.λ. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο, για την καλύτερη κατανόηση του θέματος, να γίνει αναφορά στην φύση, τις πηγές και την ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται στις σύγχρονες κοινωνίες και διατίθενται σε χώρους απόθεσης.

### 1.2 Οι πηγές και τα είδη των απορριμμάτων.

Η γνώση των πηγών και του είδους των στερεών απορριμμάτων, σε συνδυασμό με στοιχεία για την σύνθεση (φυσική και χημική) και την ποσότητα τους, αποτελούν βασική γνώση για την κατανόηση του σχεδιασμού αλλά και τον περιβαλλοντικών κινδύνων ενός



σκουπιδότοπου.

#### 1.2.1 Πηγές απορριμμάτων.

Οι πηγές των στερεών απορριμμάτων σχετίζονται κυρίως με τις χρήσεις γης και την αντίστοιχη χωροταξική ζωνοποίηση. Αν και υπάρχουν πολλές κατατάξεις των πηγών, η κατάταξη στις ακόλουθες κατηγορίες είναι ικανοποιητικά λεπτομερής και σχετικά απλή:

1. Οικιακά.
2. Εμπορικά.
3. Δημοτικά.
4. Βιομηχανικά.
5. Ανοικτών περιοχών.
6. Κατάλοιπα επεξεργασίας λυμάτων.
7. Αγροτικά και κτηνοτροφικά.

Οι κυριότερες δραστηριότητες ή τοποθεσίες στις οποίες παράγονται τα απορρίμματα κάθε κατηγορίας καθώς και η συνηθέστερη φυσική σύσταση τους, παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί:

**Πίνακας 1.1 Τυπικές δραστηριότητες και τοποθεσίες παραγωγής απορριμμάτων σε συνδυασμό με τα κυριότερα είδη ανά κατηγορία.**

(Tchobanoglous et al, 1977)

Πίνακας 1.1 Τυπικές δραστηριότητες και τοποθεσίες παραγωγής απορριμμάτων σε συνδυασμό με τα κυριότερα είδη ανά κατηγορία. (Tchobanoglous et al, 1977)

Κατηγορία πηγής	Τυπικές δραστηριότητες και τοποθεσίες	Είδη απορριμμάτων
Οικιακά	Μονοκατοικίες και διαμερίσματα πολυκατοικιών.	Υπολείμματα φαγητών, υπολείμματα υλικών, στάχτες.
Εμπορικά	Καταστήματα, εστιατόρια, αγορές, ξενοδοχεία, γραφεία, τυπογραφεία, συνεργεία, νοσοκομεία, κ.τ.λ.	Υπολείμματα φαγητών, υπολείμματα υλικών, στάχτες, δομικά υλικά, ειδικά απορρίμματα.
Δημοτικά	Περιλαμβάνουν τις δύο πρώτες κατηγορίες.	Περιλαμβάνουν τις δυο πρώτες κατηγορίες.
Βιομηχανικά	Οικοδομές, βιομηχανίες παραγωγής τροφίμων και ποτών, χημικές βιομηχανίες, διυλιστήρια, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, κ.τ.λ.	Υπολείμματα φαγητών, υπολείμματα υλικών, στάχτες, δομικά υλικά, ειδικά απορρίμματα, τοξικά απορρίμματα.
Ανοιχτών περιοχών	Δρόμοι, πάρκα, παιδικές χαρές, παραλίες, κ.τ.λ.	Ειδικά απορρίμματα, υπολείμματα υλικών.
Υπολείμματα επεξεργασίας λημμάτων	Υπολείμματα βιολογικών καθαρισμών	Υπολείμματα βιολογικών καθαρισμών
Αγροτικά και κτηνοτροφικά	Καλλιεργούμενες εκτάσεις, αγροικίες, φάρμες, στάνες, χοιροστάσια, βουστάσια κ.τ.λ.	Αγροτικά απορρίμματα, υπολείμματα φαγητών, υπολείμματα υλικών, τοξικά απορρίμματα.

### 1.2.2. Είδη απορριμμάτων

Πρέπει αρχικά να τονίσουμε ότι η κατάταξη των απορριμμάτων σε διάφορα είδη, είναι πολύ σημαντική για την καλύτερη κατανόηση και περιγραφή των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ένα χώρο απόθεσης.

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από κατατάξεις σε είδη στην διεθνή βιβλιογραφία, εμείς όμως θα χρησιμοποιήσουμε την κατάταξη κατά Tchobanoglous et. al (1977), η οποία φαίνεται να είναι, κατά κάποιο

τρόπο, μια σύνθεση των υπολοίπων.

- *Υπολείμματα φαγητών.* Περιλαμβάνονται εδώ υπολείμματα από κρέας, φρούτα, λαχανικά, καθώς και όλα τα υπολείμματα από την προετοιμασία και το μαγείρεμα των φαγητών. Το κυριότερο χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι ότι τα απορρίμματα αποσυντίθενται γρήγορα, ειδικά κάτω από υψηλές θερμοκρασίες. Εκτός από τις κατοικίες, μεγάλη παραγωγή τέτοιων απορριμμάτων έχουμε σε καφετέριες, εστιατόρια και κτίρια μαζικής διαμονής, όπως νοσοκομεία και ξενοδοχεία,
- *Υπολείμματα υλικών.* Η κατηγορία περιλαμβάνει καύσιμα και μη καύσιμα υλικά, τα οποία παράγονται σε κατοικίες, εμπορικές περιοχές, γραφεία και χώρους μαζικής διαμονής, εκτός βέβαια από τα υπολείμματα φαγητών και άλλα αποσυνθεμένα υλικά. Πιο συγκεκριμένα, στα καύσιμα περιλαμβάνονται χαρτί, χαρτόνι, πλαστικά, υφάσματα, λάστιχα, δέρματα, ξύλα και φυτικά υπολείμματα, ενώ στα μη καύσιμα γυαλί, τσίγκινα και αλουμινένια κουτιά, σιδερένια αντικείμενα, κάθε είδους μέταλλα και σκόνη.
- *Στάχτες και υπολείμματα καύσης.* Πρόκειται για υλικά που προέρχονται από την καύση ξύλου, κάρβουνου, καθώς και άλλων καύσιμων υλικών που περιλαμβάνονται στην προηγούμενη κατηγορία.
- *Δομικά υλικά-μπάζα.* Πρόκειται για υλικά που παράγονται σε ανεγειρόμενες οικοδομές ή που προέρχονται από κατεδαφίσεις και εκσκαφές. Αποτελούνται κυρίως από σκόνη, πέτρες, σκυρόδεμα, τούβλα, γύψο, ξύλα, μεταλλικούς σωλήνες και καλώδια.
- *Ειδικά απορρίμματα.* Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται υλικά, που προέρχονται από τον καθαρισμό οδών και δημοσίων χώρων και δεν μπορούν να καταταχθούν στις προηγούμενες κατηγορίες, όπως φυτική ύλη, νεκρά ζώα, εγκαταλελειμμένα αυτοκίνητα και κάθε είδους ογκώδη μεταλλικά αντικείμενα.

- *Υπολείμματα βιολογικών καθαρισμών. Πρόκειται για όλα τα στερεά και ημιστερεά υπολείμματα επεξεργασίας λυμάτων κάθε είδους. Δεν έχουν συγκεκριμένη σύνθεση αλλά είναι ιδιαίτερα βεβαρημένα σε τοξικά στοιχεία και οργανικό υλικό.*
- *Αγροτικά και κτηνοτροφικά απορρίμματα. Πρόκειται για υπολείμματα από καλλιεργητικές δραστηριότητες, όπως φυτοφάρμακα και λιπάσματα, καθώς και υπολείμματα από την παραγωγή γάλακτος και τυριού και την μαζική ανατροφή ζώων για σφαγή, όπως περιττώματα, υπολείμματα ζωοτροφών κ.τ.λ.*
- *Τοξικά απορρίμματα. Περιλαμβάνονται στην κατηγορία αυτή χημικά, βιοχημικά, εύφλεκτα, εκρηκτικά και ραδιενεργά στερεά απορρίμματα. Τα υλικά αυτά βέβαια είναι σε πολύ μικρές ποσότητες διότι η συνηθέστερη μορφή τους είναι η υγρή και έτσι δεν απασχολούν ιδιαίτερα την απόθεση των στερεών απορριμμάτων.*

*Όπως προαναφέραμε, στους χώρους απόθεσης διατίθενται κατά κύριο λόγο τα δημοτικά απορρίμματα, που περιλαμβάνουν τα οικιακά και εμπορικά. Με τις κατηγορίες θα ασχοληθούμε εκτενέστερα στις επόμενες παραγράφους.*

### *1.3 Σύσταση Δημοτικών απορριμμάτων.*

*Στις επόμενες παραγράφους δίνονται συνοπτικά στοιχεία για την φυσική και χημική σύσταση των δημοτικών απορριμμάτων. Γίνεται επίσης αναφορά στις πιθανές μελλοντικές μεταβολές στην σύσταση των απορριμμάτων και τους λόγους που μπορεί να τις προκαλέσουν. Οι αναφορές είναι βασισμένες σε στοιχεία από τον διεθνή αλλά και τον Ελληνικό χώρο.*

### 1.3.1 Φυσική σύσταση δημοτικών απορριμμάτων.

Στους πίνακες 1.2 έως και 1.4 που ακολουθούν παρουσιάζεται η φυσική σύσταση και κατανομή των απορριμμάτων για χώρες του δυτικού κόσμου και την Ελλάδα. Όσον αφορά την Ελλάδα γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στα μεγάλα αστικά κέντρα και την επαρχία.

Πίνακας 1.2. Τυπική φυσική σύσταση δημοτικών απορριμμάτων για την Λυτική Ευρώπη και τις Η.Π.Α.  
(Tchobanoglous et. al, 1977)

Συστατικά	Επί τοις εκατό κατά βάρος	
	Εύρος κύμανσης	Τυπική τιμή
Υπολείμματα φαγητών	6-26	15
Χαρτί	25-45	40
Χαρτόνι	3-15	4
Πλαστικά	2-8	3
Υφάσματα	0-4	2
Λάστιχα	0-2	0,5
Δέρμα	0-2	0,5
Φυτική ύλη	0-20	12
Ξύλο	1-4	2
Γυαλί	4-16	8
Κουτάκια αλουμινίου	2-8	6
Μέταλλα (εκτός σιδήρου)	0-1	1
Σιδερένια αντικείμενα	1-4	2
Σκόνες, στάχτες, δομικά υλικά	0-10	4

**Πίνακας 1.3.** Τυπική φυσική σύσταση δημοτικών απορριμμάτων γκχ την Αττική  
(ΥΠΕΧΩΔΕ, ΠΕΡΠΙΑ)

Συστατικά	Επί τοις εκατό κατά
	βάρος
	Τυπική τιμή
Υπολείμματα φαγητών	58,5
Χαρτί, χαρτόνι	19,2
Πλαστυιά	7
Υφάσματα, ξύλα, λάστιχα, δέρμα.	3,5
Γυαλί	2,5
Μέταλλα	3,75
Υπόλοιπα	1
	4,55

**Πίνακας 1.4.** Τυπική φυσική σύσταση δημοτικών απορριμμάτων για την επαρχία  
ΕΥΠΕΧΩΛΗ, ΠΗΡΠΙΑ 1

Συστατικά	Επί τοις εκατό κατά
	βάρος
	Τυπική τιμή
Υπολείμματα φαγητών	60,39
Χαρτί, χαρτόνι	17,77
Πλαστικά	6,81
Υφάσματα, ξύλα, λάστιχα, δέρμα.	4,14
Γυαλί	2,34
Μέταλλα	4,09
Σκόνες, στάχτες, δομικά υλικά	4,46

*Το ποσοστό συμμετοχής του κάθε υλικού στην σύσταση των δημοτικών απορριμμάτων κυμαίνεται ανάλογα με την τοποθεσία, την εποχή, το βιοτικό επίπεδο και πολλούς άλλους παράγοντες. Οι τιμές λοιπόν που αναφέρονται στους πίνακες είναι καθαρά ενδεικτικές. Η διαδικασία για τον προσδιορισμό της φυσικής σύστασης των απορριμμάτων περιλαμβάνει δειγματοληψία και ανάλυση από συγκεκριμένες περιοχές και σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, και είναι μια επίπονη και*

χρονοβόρα διαδικασία.

Ένα πολύ σημαντικό φυσικό χαρακτηριστικό των απορριμμάτων είναι η περιεχόμενη υγρασία η οποία, συνήθως εκφράζεται σαν ποσοστό επί τοις εκατό του υγρού ή ξηρού βάρους των απορριμμάτων. Εάν επιλέξουμε το υγρό βάρος απορριμμάτων τότε η περιεχόμενη υγρασία δίνεται από τον τύπο:

Τυπικά στοιχεία για την περιεχόμενη υγρασία κάθε ουσιαστικής κατηγορίας δίνονται στον πίνακα 1.5 που ακολουθεί.

Επί τοις εκατό περιεχόμενη υγρασία

Συστατικά                      Εύρος κύμανσης      Τυπική τιμή

Πίνακας 1.5. Τυπική περιεχόμενη υγρασία δημοτικών απορριμμάτων για την Δυτική Ευρώπη και τις Η.Π.Α. (Tchobanoglous et. al, 1977)

Υπολείμματα φαγητών	50-80	70
Χαρτί	4-10	6
Χαρτόνι	4-8	5
Πλαστικά	1-4	2
Υφάσματα	6-15	10
Λάστιχα	1-4	2
Δέρμα	8-12	10
Φυτική ύλη	30-80	60
Ξύλο	15-40	20
Γυαλί	1-4	2
Κουτάκια αλουμινίου	2-4	3
Μέταλλα (εκτός σιδήρου)	2-4	2
Σιδερένια αντικείμενα	2-6	3
Σκόνες, στάχτες, δομικά υλικά	6-12	8
Δημορικά στερεά απορρίμματα	15-40	20

### 1.3.2 Χημική σύσταση δημοτικών απορριμμάτων.

Όταν αναφερόμαστε στον όρο χημική σύσταση δημοτικών απορριμμάτων εννοούμε την χημική σύσταση των καύσιμων και ζυμώσιμων υλικών και πιο συγκεκριμένα την επί τοις εκατό περιεκτικότητα τους σε άνθρακα, οξυγόνο, υδρογόνο, άζωτο, θείο και υπολείμματα καύσης, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αναλύονται και τα θρεπτικά ανόργανα στοιχεία όπως ασβέστιο, φώσφορος, κάλιο, νάτριο κ.τ.λ.

Συστατικά	Άνθρακας	Υδρογόνο	Οξυγόνο	Άζωτο	θείο	Υπολείμματα καύσης
Υπολείμματα φαγητών	48,0	6,4	i/fi	2,6	0,4	5,0
Χαρτί	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Χαρτόνι	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Πλαστικά	60,0	7,2	22,8			10,0
Υφάσματα	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Λάστιχα	78,0	10,0	-	2,0	.	10,0
Δέρμα	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Φυτική ύλη	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Ξύλο	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Σκόνες, στάχτες, δομικά υλικά	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

### 1.3.3 Μεταβολές στην σύσταση των απορριμμάτων.

Η φυσική σύσταση των απορριμμάτων έχει μεταβληθεί σημαντικά κατά τις τελευταίες δεκαετίες και αναμένεται να μεταβάλλεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αλλαγή των συνθηκών ζωής αλλά και στην πρόοδο της βιομηχανίας υλικών. Οι κυριότερες μεταβολές τα τελευταία χρόνια, καθώς και οι λόγοι που τις προκάλεσαν ήταν:

- Η ελάττωση της στάχτης λόγω αντικατάστασης των στερεών με υγρά καύσιμα και την αυξανόμενη χρήση του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Η σχετική ελάττωση των φυτικών υλών λόγω της μείωσης του πράσινου στα αστικά κέντρα.



- Η αύξηση των υλικών συσκευασίας, όπως χαρτιά, χαρτόνια και πλαστικά, όπως επίσης και η σχετική αύξηση του πλαστικού έναντι του γυαλιού.

Η αύξηση των επικίνδυνων χημικών όπως προϊόντα καθαρισμού, ορυκτέλαια, εντομοκτόνα κ.τ.λ.

#### 1.4 Τρόποι τελικής διάθεσης απορριμμάτων.

Όπως είναι προφανές, τα παραγόμενα απορρίμματα πρέπει να διατεθούν κάπου. Ακόμα και όταν έχει προηγηθεί μια επεξεργασία (Π.χ καύση, λιπασματοποίηση διαλογή), υπάρχουν κάποια υπολείμματα που πρέπει να διατεθούν τελικά κάπου.

Δύο εναλλακτικές λύσεις υπάρχουν μέχρι σήμερα για την διαδικασία αυτή. Διάθεση στην ξηρά στον ανώτερο φλοιό της γης ή διάθεση στους ωκεανούς, Η πρώτη επιλογή είναι αυτή που υιοθετείται σχεδόν εξ ολοκλήρου αφού η διάθεση στους ωκεανούς θεωρείται περιβαλλοντικά απαράδεκτη και απερίγραπτα επιζήμια για το περιβάλλον.

Η διάθεση στην ξηρά γίνεται, είτε ανεξέλεγκτα σε υπαίθριες χωματερές με πρόχειρη ή καθόλου επικάλυψη, είτε ελεγχόμενα σε χώρους υγειονομικής ταφής. (Χ.Υ.Τ.Α). Για την λειτουργία και την δομή των υπαίθριων χωματερών δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες ή μέτρα προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος. Σε ενίσχυση μάλιστα της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης πολλές φορές επιλέγονται βολικά τοπογραφικές θέσεις για την κατασκευή τους, όπως φυσικές μισγάγκειες οι οποίες είναι σε άμεση επαφή με τα επιφανειακά και υπόγεια νερά, κομμάτια του φυσικού περιβάλλοντος που είναι τα πλέον ευάλωτα στις

επιδράσεις από την λειτουργία τέτοιων χώρων. Ως αποτέλεσμα έχουμε την λιγότερο ή περισσότερο σημαντική ρύπανση και μόλυνση του περιβάλλοντος με τρόπους και διαδικασίες που θα εξετάσουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

#### 1.5 Υγειονομική ταφή των απορριμμάτων,

1.5.1 Η γενική φιλοσοφία της υγειονομικής ταφής ως μεθόδου τελικής απόθεσης.

Η μέχρι τώρα παγκόσμια εμπειρία στην διάθεση των απορριμμάτων έχει δείξει, ότι η υγειονομική ταφή είναι μια αρκετά οικονομική και ταυτόχρονα περιβαλλοντικά αποδεκτή λύση. Στον πίνακα 1.7 που ακολουθεί αναφέρονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υγειονομικής ταφής ως μεθόδου διάθεσης των απορριμμάτων.

**Πίνακας 1.7.** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Χ.Υ.Τ.Α. (Tchobanoglous et al, 1977)

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
οικονομική λύση διάθεσης απορριμμάτων	διαθέσιμη γης σε οικονομικά αποδεκτή απόσταση, είναι ιδιαίτερα δύσκολη
2. Η αρχική επένδυση χρημάτων είναι χαμηλή σε σχέση με άλλες περιβαλλοντικά αποδεκτές μεθόδους απόθεσης	2. Πρέπει να τηρούνται αυστηρά οι κανόνες λειτουργίας γιατί σε αντίθετη περίπτωση ένας Χ.Υ.Τ.Α μπορεί να μεταβληθεί σε χωματερή.
3. Ο Χ.Υ.Τ.Α είναι μια ολοκληρωμένη και τελική λύση σε σχέση με την αποτέφρωση και την λιπασματοποίηση που αφήνουν κατάλοιπα προς περαιτέρω επεξεργασία.	3. Χ.Υ.Τ.Α οι οποίοι είναι τοποθετημένοι κοντά σε κατοικημένες περιοχές μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές κοινωνικές αντιδράσεις.
4. Οι Χ.Υ.Τ.Α μπορούν να δεχτούν όλα τα είδη των στερεών απορριμμάτων χωρίς να χρειάζεται προεπιλογή τους.	4. Οι Χ.Υ.Τ.Α ακόμα και μετά την περάτωση των εργασιών χρειάζονται παρακολούθηση και μέριμνα.
5. Οι Χ.Υ.Τ.Α είναι λειτουργικά ευέλικτοι και μπορούν να δεχτούν αυξημένες ποσότητες απορριμμάτων με μικρές αλλαγές στην δομή και το προσωπικό.	5. Χρειάζεται ειδικός σχεδιασμός και κατασκευή για κτίρια που πρόκειται να θεμελιωθούν σε περατωμένους Χ.Υ.Τ.Α, λόγω του κινδύνου των καθιζήσεων. 6. Το μεθάνιο, το οποίο είναι εκρηκτικό αέριο που παράγεται σε μεγάλες ποσότητες στους Χ.Υ.Τ.Α μπορεί να δημιουργήσει διάφορα προβλήματα και κινδύνους στις μετά την αποπεράτωση των Χ.Υ.Τ.Α χρήσεις.
6. Οι περατωμένοι Χ.Υ.Τ.Α, μετά την τελική τους αποκατάσταση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες κοινωφελείς χρήσεις, όπως δημιουργία γηπέδων παιδικών χαρών, πάρκων κ.τ.λ.	

Η επιλογή της καταλληλότερης θέσης για την δημιουργία Χ.Υ.Τ.Α εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό συνεπιδρόντων παραγόντων που αφορούν, αφενός στην λειτουργικότητα και οικονομική βιωσιμότητα της επιλογής και αφετέρου στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Συνοπτικά οι παράγοντες που αφορούν την λειτουργικότητα των Χ.Υ.Τ.Α είναι οι εξής:

- Η χωρική διάσταση του χώρου που απαιτείται για την εγκατάσταση του Χ.Υ.Τ.Α.
- Η χωρική διάσταση του χώρου που απαιτείται για την εγκατάσταση του Χ.Υ.Τ.Α.
- Η χωρική διάσταση του χώρου που απαιτείται για την εγκατάσταση του Χ.Υ.Τ.Α.

- ὁ ΣΤΕΙΛΙΟΝ ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἐπιπέδου ἡμετέρας.
  - ὁ ἄξονας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
  - ὁ ἄξονας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
  - ἡ ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
  - ὁ ἄξονας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
  - ὁ ἄξονας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
  - ὁ ἄξονας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
  - ὁ ἄξονας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
- ἡ ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας

- ἡ ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
- ἡ ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
- ἡ ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας
- ἡ ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας ὡς ἰσορροπία τῆς ἐπιπέδου ἡμετέρας

- Εξασφάλιση της προστασίας των υπόγειων νερών και όλων των υδρομαστευτικών έργων της ευρύτερης περιοχής.
- Αποφυγή αποφράξεως υδρορευμάτων και κάθε είδους φυσικών επιφανειακών ροών.
- Προστασία των φυσικών πόρων, όπως μεταλλεύματα, κοιτάσματα, κ.τ.λ.
- Προστασία των δασών και των φυσικών οικοσυστημάτων της περιοχής.

Οι κυριότεροι από τους παράγοντες αυτούς θα εξεταστούν

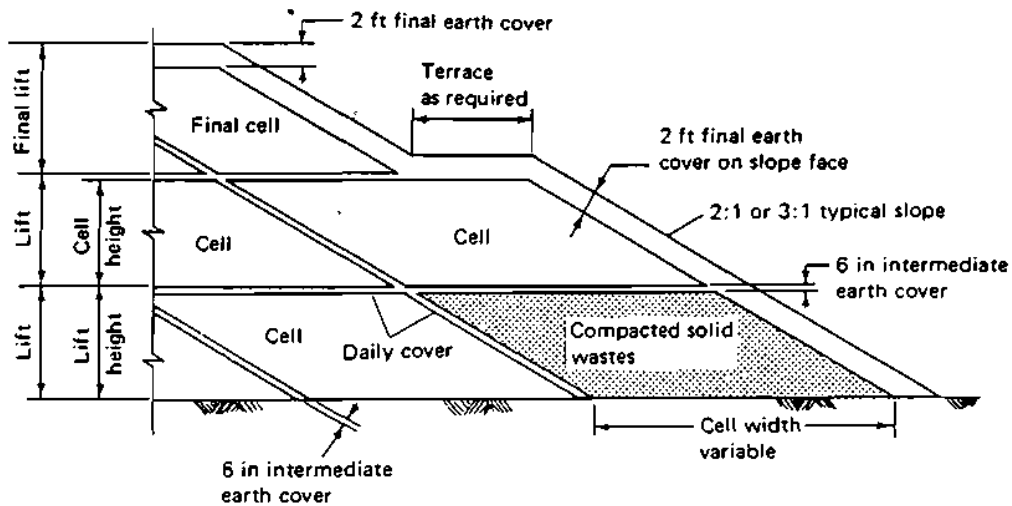
αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια μιας και οι περισσότεροι, αφορούν το γεωλογικό και υδρογεωλογικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής ενός Χ.Υ.Τ.Α.

#### 1.5.2 Δομή και τρόποι απόθεσης στους Χ.Υ.Τ.Α.

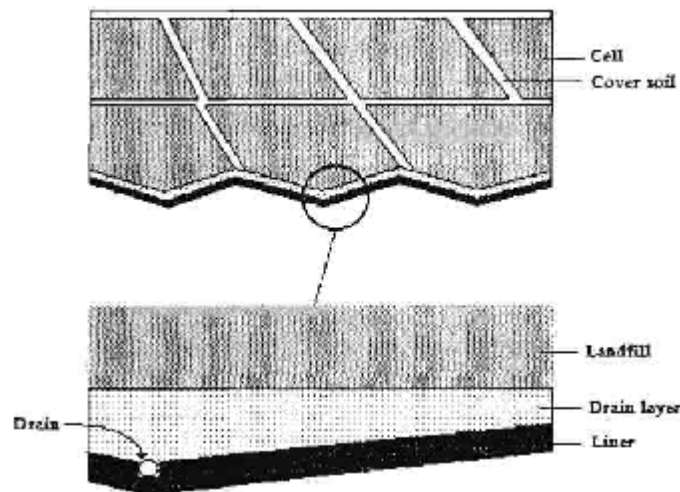
Η απόθεση των απορριμμάτων σε Χ.Υ.Τ.Α γίνεται σε στρώσεις οι οποίες συμπαγοποιούνται με την χρήση κατάλληλων μηχανημάτων. Κάθε στρώση (ταμπάνι), χωρίζεται σε κελιά ημερήσιας επικάλυψης, τμήματα δηλαδή της στρώσης στα οποία εναποτίθεται η ημερήσια ποσότητα απορριμμάτων, που φτάνει στο Χ.Υ.Τ.Α και που στο τέλος των ημερήσιων εργασιών επικαλύπτεται με λεπτό στρώμα υλικού (0,2-0,3 m), προσωρινής επικάλυψης. Τα υλικά της προσωρινής επικάλυψης, είναι συνήθως αμμώδη ή αμμοχαλικώδη υλικά της εγγύς του Χ.Υ.Τ.Α περιοχής. Μετά την ολοκλήρωση της απόθεσης απορριμμάτων για τον χρόνο ζωής του Χ.Υ.Τ.Α έχουμε και την τελική επικάλυψη του χώρου με υλικό πάχους περίπου 0,6 m (συνήθως μοντμοριλλονιτική άργιλος), όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1

Για λόγους στεγανότητας του Χ.Υ.Τ.Α, στην βάση του κατασκευάζεται ένα στεγανό υπόστρωμα του οποίου υπέρκειται ένα στρώμα από υλικό υψηλής περατότητας,

Το σύνολο των αερίων που παράγονται λόγω βιοχημικών διεργασιών στους Χ.Υ.Τ.Α



Σχήμα 1.1 Η δομή ενός Χ.Υ.Τ.Α σε τομή (Tchobanoglous et. al, 1977) στο οποίο τοποθετείται και ένα σύστημα στραγγιστηριών για την απομάκρυνση των διασταλαζόντων υγρών όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.

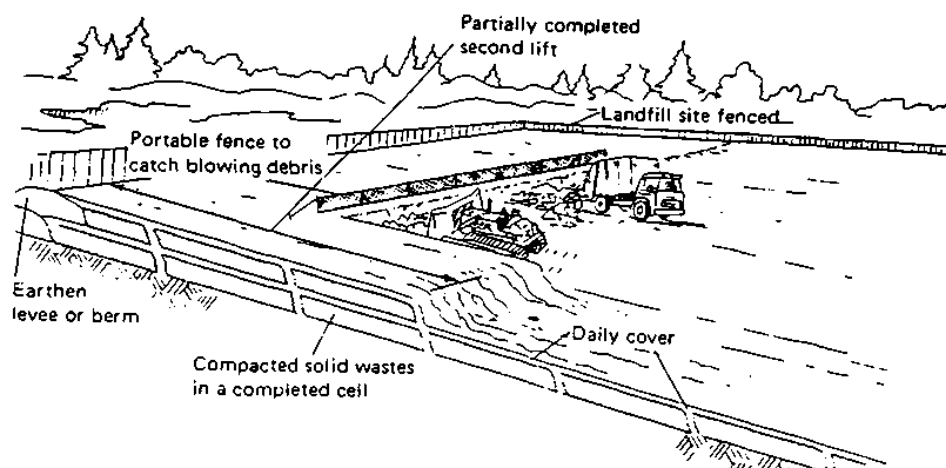


Σχήμα 1.2 Η δομή του στεγανού υποστρώματος και του στραγγιστηριού συστήματος στους Χ.Υ.Τ.Α (Tchobanoglous et. al, 1977)

Ανάλογα με την μορφολογία της περιοχής του Χ.Υ.Τ.Α διακρίνουμε διάφορους τρόπους απόθεσης των απορριμμάτων.

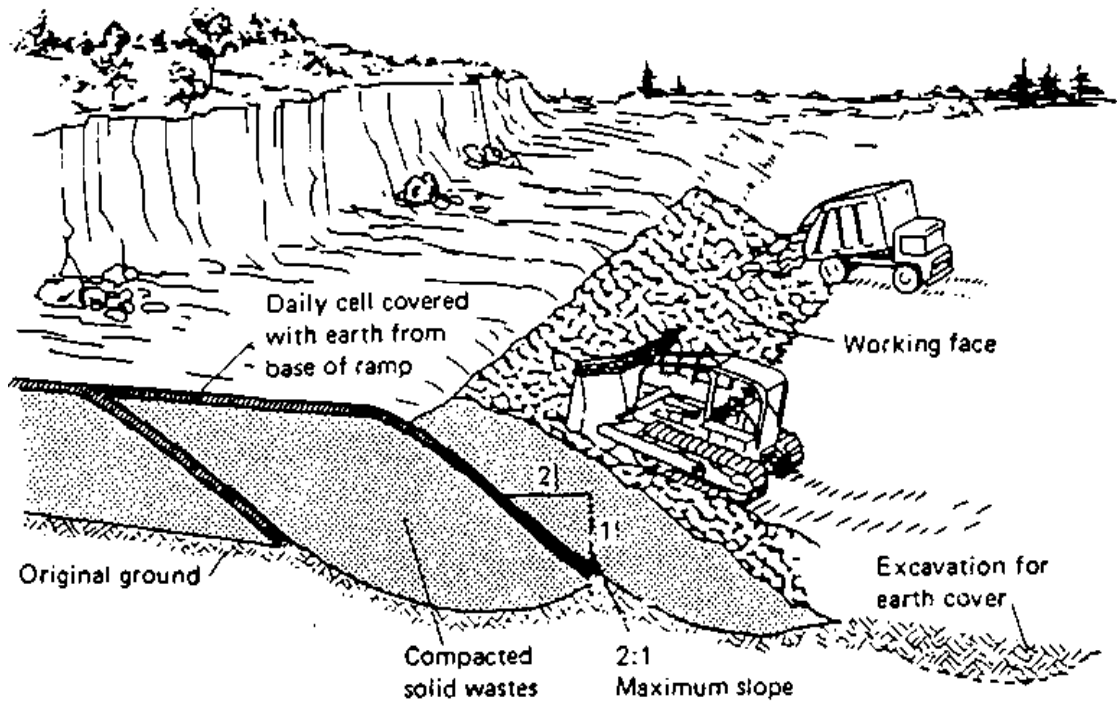
1. Μέθοδος σε επίπεδες περιοχές. Χρησιμοποιείται όπου η μορφολογία είναι επίπεδη και όπου η διάνοιξη τάφρων είναι αδύνατη. Τα απορρίμματα απλώνονται σε λεπτές λωρίδες και επάλληλα στρώματα και

συμπαγοποιούνται. Η απόθεση συνεχίζεται μέχρι το επιθυμητό προκαθορισμένο ύψος του κελιού. Στο τέλος της ημερήσιας απόθεσης το κελί καλύπτεται με υλικό προσωρινής επικάλυψης, το οποίο μεταφέρεται με φορτηγά από κοντινούς δανειοθαλάμους. Η αρχή της απόθεσης για κάθε λωρίδα γίνεται με την δημιουργία αναχώματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3 Μέθοδος επίπεδων περιοχών για την λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α (Tchobanoglous et. al, 1977)

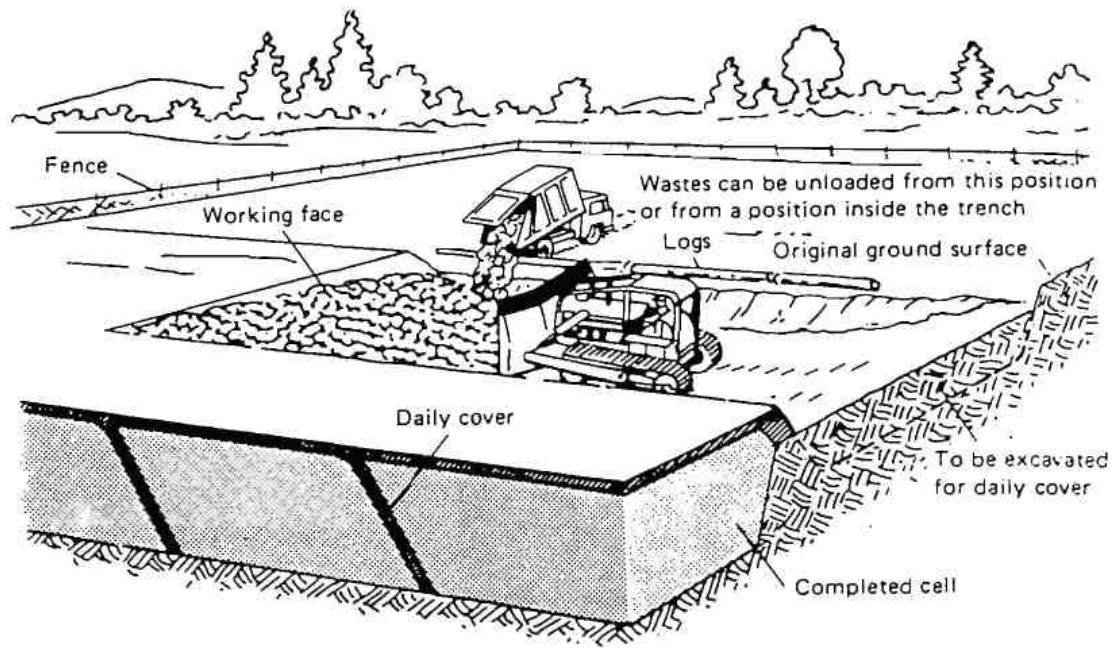
Εάν στην περιοχή δεν υπάρχουν κοντινοί δανειοθάλαμοι τότε χρησιμοποιείται μια παραλλαγή της μεθόδου επίπεδης περιοχής, η μέθοδος ράμπας. Κατά τη μέθοδο αυτή ως υλικό επικάλυψης χρησιμοποιείται το υλικό εκσκαφής από την βάση του επόμενου κελιού όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4



Σχήμα 1.4 Μέθοδος ράμπας για την λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α (Tchobanoglous et. al, 1977)

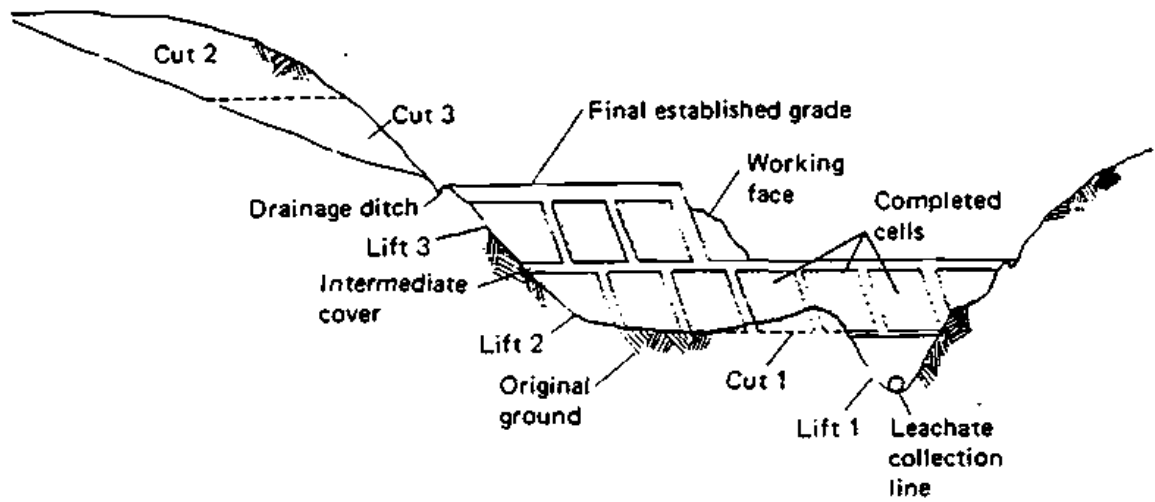
2. Μέθοδος τάφρων. Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για περιοχές, όπου υπάρχει μεγάλο πάχος υλικού επικάλυψης ακριβώς κάτω από τον χώρο απόθεσης και υψηλός υδροφόρος ορίζοντας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.5, η απόθεση γίνεται μέσα σε τάφρους. Η αρχή της διαδικασίας γίνεται με εκσκαφή της πρώτης τάφρου με το υλικό εκσκαφής της οποίας κατασκευάζεται επίχωμα στο πλευρό αντίθετα από το μέτωπο προχώρησης της απόθεσης. Στην συνέχεια μετά την ολοκλήρωση της απόθεσης στην πρώτη τάφρο ως υλικό επικάλυψης χρησιμοποιείται το υλικό εκσκαφής της επόμενης τάφρου.





Σχήμα 1.5 Μέθοδος τάφρων για την λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α  
(Tchobanoglous et. al, 1977)

3 Μέθοδος τοπογραφικών ταπεινώσεων. Σε περιοχές όπου έχουμε φυσικές ή τεχνητές τοπογραφικές ταπεινώσεις, όπως φαράγγια, ρέματα, δανειοθαλάμους, λατομεία κ.τ.λ, η απόθεση γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6. Ως υλικά επικάλυψης χρησιμοποιούνται, υλικά από τα φυσικά πρανή της περιοχής με αποτέλεσμα και την επιθυμητή ελάττωση των κλίσεων. Μεγάλη σημασία στην μέθοδο αυτή έχει η επιφανειακή αποστράγγιση και η μέριμνα για την παροχέτευση των πιθανών επιφανειακών απορροών που χρησιμοποιούσαν ως δίοδο την τοπογραφική ταπείνωση.



Σχήμα 1.6 Μέθοδος των τοπογραφικών ταπεινώσεων για την λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α (Tchobanoglous et. al, 1977)



## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 2<sup>ο</sup>

Υδρολογικό ισοζύγιο και στεγανότητα του χώρου υγειονομικής ταφής.

### 2.1 Γενικά

Το υδρολογικό ισοζύγιο του Χ.Υ.Τ.Α καθώς και η απόδοση των μέτρων στεγάνωσης, είναι οι δύο κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα των διασταλαζόντων υγρών που θα διαφύγουν προς το υπέδαφος και το υπόγειο νερό. Το υδρολογικό ισοζύγιο του Χ.Υ.Τ.Α, καθορίζεται από το υδρολογικό ισοζύγιο της ευρύτερης περιοχής και από τα φυσικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων, ενώ η απόδοση των μέτρων στεγάνωσης εξαρτάται, από το είδος και την ποιότητα κατασκευής του στεγανού υποστρώματος (liner) και του συστήματος στράγγισης (drain).

### 2.2 Υδρολογικό ισοζύγιο του Χ.Υ.Τ.Α.

Το ποσό του νερού, που φτάνει στο σύστημα στράγγισης, το οποίο υπέρκειται του στεγανού υποστρώματος και είναι τοποθετημένο υπό κλίση, μέσα σε αδρανές υλικό υψηλής διαπερατότητας, εξαρτάται από το

ποσό του νερού που διηθείται μέσω του προσωρινού ή τελικού καλύμματος και από την περιεχόμενη υγρασία των απορριμμάτων.

Το ποσό του νερού που διηθείται μέσω του προσωρινού ή τελικού καλύμματος δίνεται από την γνωστή σχέση:

$$I = P - Q - E \pm Aq \quad (2.1)$$

όπου  $I$  = Κατείδυση

$P$  = Ύψος βροχόπτωσης

$Q$  = Επιφανειακή απορροή  $E$  = Εξατμισοδιαπνοή  $Aq$  = Ποσότητες νερού που προσθέτονται ή αφαιρούνται από το σύστημα

Ενώ το ποσό των παραγόμενων διασταλαζόντων υγρών δίνεται από την σχέση:

$$Q_L = i - Q_g \quad (2.2)$$

όπου  $I$  = κατείδυση

$Q_g$  = νερό που απορροφάται από τα απορρίμματα

Όπως είναι φανερό, το ποσό του νερού αυτού, εξαρτάται αφενός από τους κλιματολογικούς και φυσιογραφικούς παράγοντες, όπως η βροχόπτωση, η μέση θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια, οι άνεμοι κ.τ.λ, καθώς και από την περατότητα και την κλίση του επιφανειακού καλύμματος, προσωρινού ή μόνιμου.

Η υγρασία των απορριμμάτων όπως δόθηκε στην παράγραφο 1.3.1 μπορεί να κυμαίνεται από 15-40 % κατά βάρος. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των απορριμμάτων ως προς την υγρασία είναι το σημείο ικανότητας συγκράτησης πεδίου (field capacity), το οποίο ορίζεται ως το περιεχόμενο υγρασίας πάνω από το οποίο έχουμε μετάγγιση νερού προς υποκείμενα στρώματα.

Η ποσότητα  $Q_g$ , που απορροφάται από τα απορρίμματα, εξαρτάται

από την αρχική περιεχόμενη υγρασία τους και την ικανότητα συγκράτησης πεδίου που παρουσιάζουν και δίνεται από την σχέση:

$$Q_g = F - S_m \quad (2.3)$$

όπου  $F$  = ικανότητα συγκράτησης πεδίου (προσδιορίζεται εργαστηριακά).  $S_m$  = αρχική περιεχόμενη υγρασία απορριμμάτων.

Τέλος πρέπει να προσθέσουμε ότι νερό μπορεί να εισέλθει στον Χ.Υ.Τ.Α από τις διακυμάνσεις στάθμης ενός ψηλού υδροφόρου ορίζοντα, αλλά και να παραχθεί μέσα στον ίδιο τον Χ.Υ.Τ.Α ως αποτέλεσμα κάποιων χημικών αντιδράσεων.

### 2.3 Στεγανά υποστρώματα στους Χ.Υ.Τ.Α.

Τα στεγανά υποστρώματα<sup>2</sup> κατασκευάζονται από μια ποικιλία υλικών, φυσικών και τεχνητών. Μια κατάταξη που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε (Kays, W.B., 1977) είναι η εξής:

#### 1. Άκαμπτα

- α) Σκυρόδεμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- β) Οπλισμένο σκυρόδεμα
- γ) Τσιμεντοποιημένο έδαφος
- δ) βιτουμενιούχο σκυρόδεμα (άσφαλτος)

#### 2. Εύκαμπτα (φυσικά υλικά)

- α) Συμπαγοποιημένο έδαφος
- β) Χημικά επεξεργασμένο έδαφος
- γ) Μπεντονίτης

#### 3. Εύκαμπτα (συνθετικά υλικά)

#### α) Γεωμεμβράνες

Πριν προχωρήσουμε σε λεπτομερέστερη περιγραφή των παραπάνω υλικών και των τρόπων με τους οποίους χρησιμοποιούνται, πρέπει να τονίσουμε την σημασία που έχει η καλή προετοιμασία του εδάφους πάνω στο οποίο εδράζονται τα στεγανά υποστρώματα. Κανένα υπόστρωμα όσο συμπαγές και ανθεκτικό και εάν είναι, δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε μεγάλες διαφορικές καθιζήσεις του εδάφους χωρίς διάρρηξη ή διαρροές. Για το λόγο αυτό χρειάζεται πού καλή επιπέδωση και συμπαγοποίηση του εδάφους, καθώς και αφαίρεση των χονδρόκοκκων και αιχμηρών τεμαχίων. Οι ενέργειες αυτές εκτός των άλλων μειώνουν και την περατότητα του εδάφους πράγμα απολύτως επιθυμητό για το υπέδαφος ενός Χ.Υ.Τ.Α.

Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους αστοχεί ένα υπόστρωμα είναι οι ακόλουθοι:

1. Ανεπαρκής συμπαγοποίηση εδάφους θεμελίωσης.
2. Ανομοιόμορφη συμπαγοποίηση εδάφους θεμελίωσης.
3. Ακατάλληλη σύσταση και δομή του εδάφους θεμελίωσης (μεγάλο ποσοστό χονδρόκοκκων).
4. Καθιζήσεις της ευρύτερης περιοχής λόγω φυσικών αιτίων.
5. Τεκτονική δράση.
6. Συρρικνούμενα ή διογκούμενα εδάφη.
7. Δημιουργία πάγου.
8. Φράξιμο του συστήματος στράγγισης.

<sup>2</sup> Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για πλευρική στεγανοποίηση.

Πρέπει επίσης να τονίσουμε ότι ακόμα και τα τέλεια σχεδιασμένα και κατασκευασμένα υποστρώματα δεν μπορούν να αποκλείσουν την πιθανότητα ύπαρξης ενός ποσοστού διαρροής. Η μέχρι τώρα εμπειρία δίνει μεγαλύτερο ποσοστό διαρροών στα εδαφικά υποστρώματα και μυχρότερο ποσοστό στις γεωμεμβράνες. Σε περιπτώσεις υψηλού ενδιαφέροντος, όπως η προστασία ενός παραγωγικού υδροφόρου, πολλές φορές κατασκευάζεται και δεύτερο βοηθητικό υπόστρωμα, με διάφορες διατάξεις, όπως θα δούμε στην συνέχεια.

#### 2.3.1 Ακαμπτα υποστρώματα.

##### α) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Πρόκειται για ένα μείγμα τσιμέντου άμμου και νερού, το οποίο εκτοξεύεται με πίεση πάνω σε προετοιμασμένο έδαφος. Η αναλογία τσιμέντου άμμου είναι  $1/4$  έως  $1/5$  και ο λόγος νερό/τσιμέντο κυμαίνεται από 0,4 έως 0,6. Ο τύπος αυτός υποστρώματος είναι φθηνός και εύκολος στην τοποθέτηση, αλλά η χρήση του δεν ενδείκνυται όταν έχουμε μαλακό έδαφος, λόγω της μικρής αντοχής του σε θραύση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί όμως με πολύ καλά αποτελέσματα, όπου έχουμε βραχώδες υπόβαθρο.

##### β) Οπλισμένο σκυρόδεμα

Το υπόστρωμα κατασκευάζεται με τον ίδιο τρόπο με αυτόν που κατασκευάζονται τα άκαμπτα οδοστρώματα (Π.χ σε αεροδρόμια). Είναι πολύ πιο ανθεκτικό από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αλλά έχει προβλήματα διαρροής από τις ρωγμές συστολής - διαστολής, η στεγανοποίηση των οποίων, είναι δύσκολη και δαπανηρή. Επίσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρανή με κλίση μεγαλύτερη από  $30^\circ$ .

##### γ) Τσιμεντοποιημένο έδαφος.

Εάν στην περιοχή του χώρου απόθεσης έχουμε αμμοχάλικο,

μπορούμε να του προσθέσουμε τσιμέντο και νερό και στην συνέχεια να το συμπαγοποιήσουμε. Είναι πολύ πιο φθηνό από το οπλισμένο σκυρόδεμα, αλλά δεν εξασφαλίζεται η ομογένεια του υλικού, το οποίο μπορεί να παρουσιάζει περιοχές στις οποίες δεν έφτασε το τσιμέντο και είναι μαλακές και διαπερατές.

δ) Βιτονμενιούχο σκυρόδεμα.

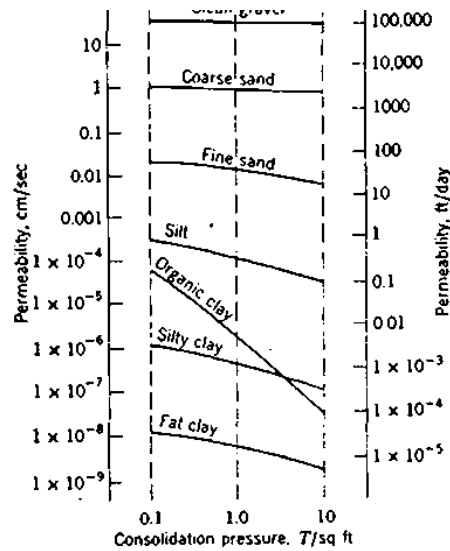
Το υπόστρωμα κατασκευάζεται με τον ίδιο τρόπο που κατασκευάζονται τα εύκαμπτα οδοστρώματα με μεγαλύτερη έμφαση στην στεγανότητα του υλικού. Η τοποθέτηση του γίνεται πολλές φορές σε επάλληλα στρώματα. Το κυριότερο σημείο αμφισβήτησης της καταλληλότητας του υλικού αυτού, είναι η αντοχή του στις χημικές επιδράσεις των πολύ ενεργών και διαβρωτικών διασταλαζόντων υγρών.

### 2.3.2 Εύκαμπτα υποστρώματα (φυσικά υλικά)

α) Συμπαγοποιημένο έδαφος.

Κάτω από κάποιες ευνοϊκές συνθήκες το φυσικό έδαφος μετά από κάποια συμπαγοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στεγανό υπόστρωμα. Η ρυθμιστική παράμετρος για την καταλληλότητα ενός εδάφους είναι η διαπερατότητα του ή αλλιώς η υδραυλική του αγωγιμότητα. Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας που θεωρείται παραδεκτή για ένα στεγανό υπόστρωμα είναι  $10^{-9}$  cm/sec. Έτσι το φυσικό έδαφος πρέπει να διαθέτει μια υδραυλική αγωγιμότητα της τάξης του  $10^{-5}$  έως  $10^{-7}$  cm/sec ώστε μετά την συμπαγοποίηση να προσεγγίζει την επιθυμητή τιμή του  $10^{-9}$  cm/sec. Η τιμή αυτή της υδραυλικής αγωγιμότητας εάν τοποθετηθεί στο νόμο του Darcy για συνηθισμένες τιμές υδραυλικής κλίσης μας δίνει ταχύτητες ροής της τάξης του  $10^{-3}$  έως  $10^{-4}$  m/day, οι οποίες είναι ικανοποιητικά μικρές, δεδομένου ότι ένας ρύπος για να διανύσει μια απόσταση 10 μέτρων θα χρειαζόταν περίπου 27 χρόνια. Στο σχήμα 2.1 που ακολουθεί





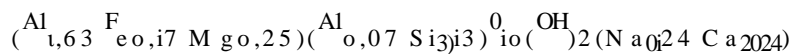
Σχήμα 2.1 Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για τους κυριότερους εδαφικούς τύπους (από Cedegren H. R., 1967)

β) Χημικά επεξεργασμένο έδαφος

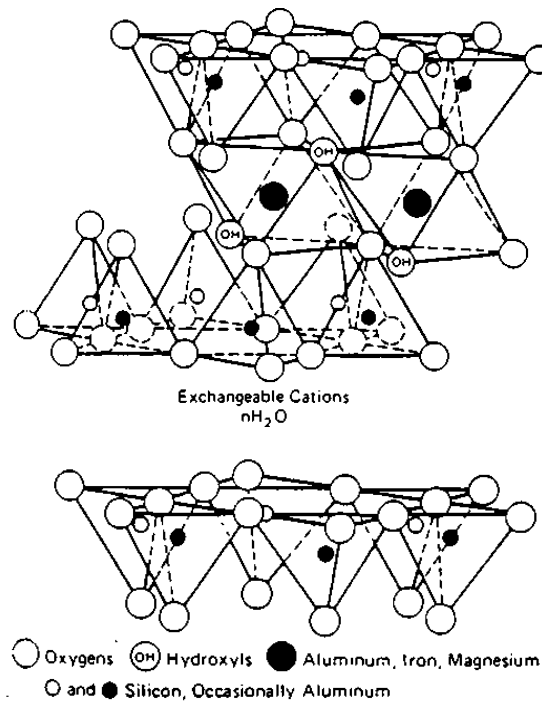
Το υπόστρωμα κατασκευάζεται με την προσθήκη στο έδαφος διαφόρων χημικών, είτε με την μορφή στερεού είτε με την μορφή υγρού είτε με την μορφή σπρέϊ. Τα πιο συνηθισμένα υλικά είναι τα πολυφοσφορικά άλατα και τα κάθε είδους βιτουμινιούχα υγρά.

γ) Μπεντονίτης

Ο Μπεντονίτης ή αλλιώς, η νατριούχος μονμοριλονιτυ^ άργιλος, είναι ένα ένυδρο αλουμινοπυριτικό ορυκτό με τύπο:

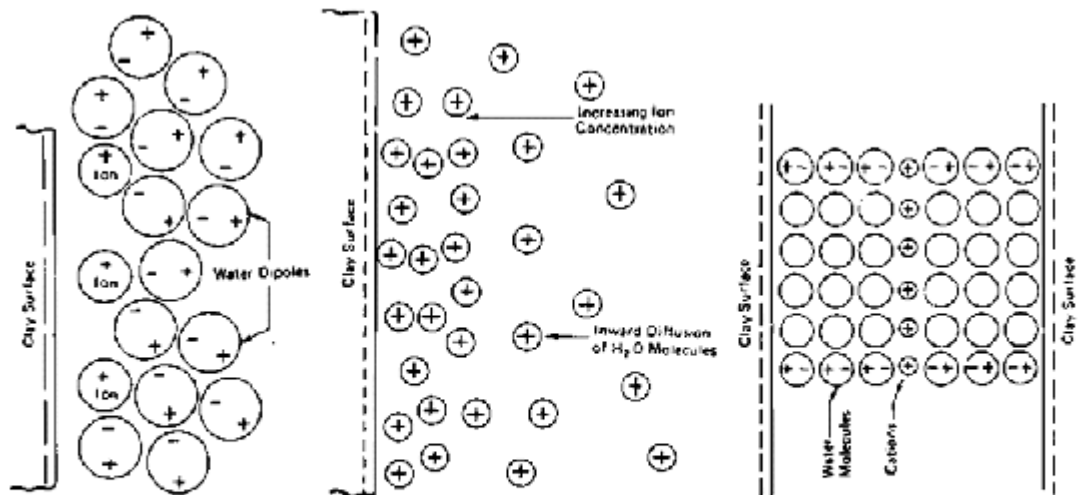


Όπως φαίνεται πρόκειται για ένα πολυσύνθετο ορυκτό του οποίου η κρυσταλλική δομή είναι φυλλώδης με τεμαχίδια που το εύρος τους ξεπερνάει κατά πολύ το πάχος τους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δομική κατανομή των πυριτικών τετραεδρων και των αλουμινούχων οκταέδρων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.



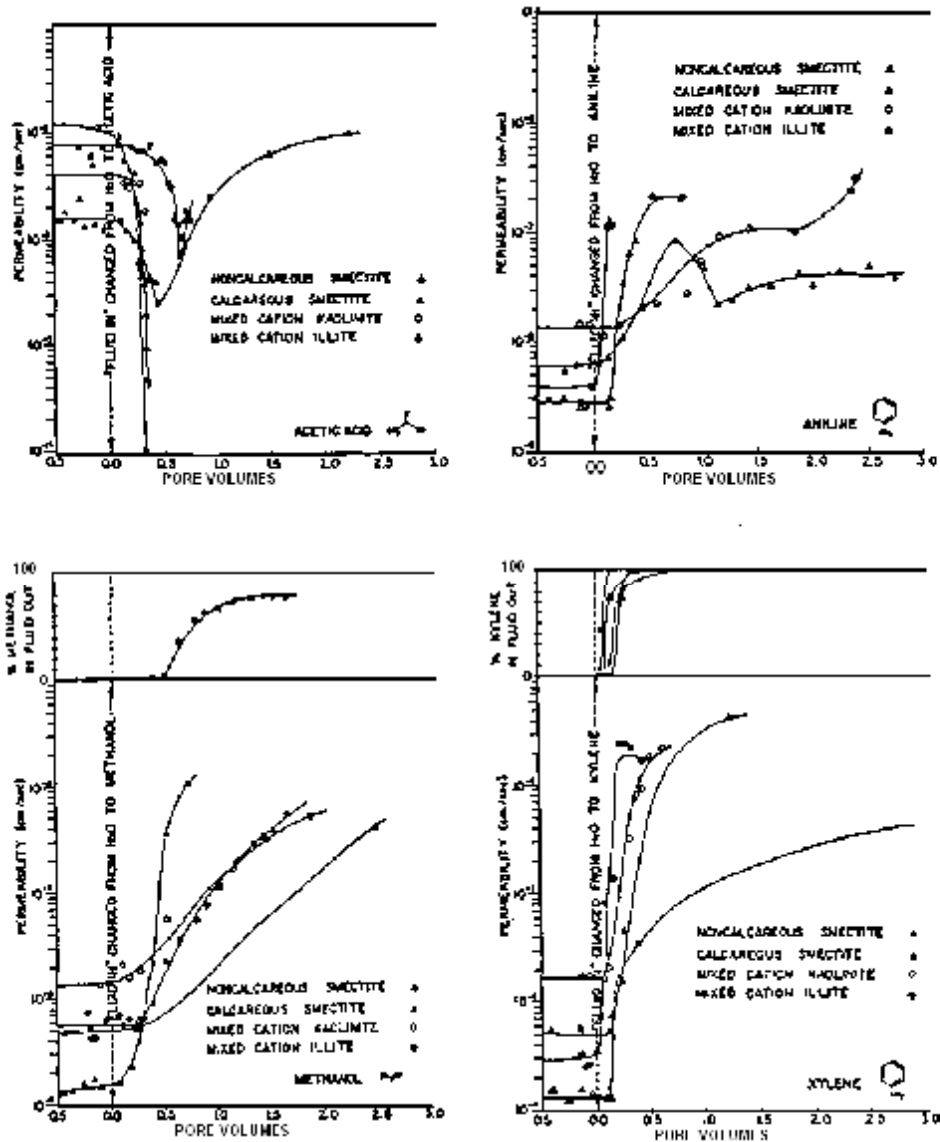
Σχήμα 2.2 Η κρυσταλλική δομή του Μ πεντονίτη (από Grim, R. E., 1968).

Το νερό μπορεί εύκολα να διεισδύει ανάμεσα στα δομικά φύλα του ορυκτού, καθώς και να προσροφάτε πάνω στην επιφάνεια των κρυστάλλων. Η προσρόφηση του νερού στην επιφάνεια των κρυστάλλων δίνει στον Μ πεντονίτη έναν ισχυρό ανιονικό χαρακτήρα, ο οποίος οφείλεται σε ενδοκρυσταλικές δομικές ανακατατάξεις στοιχείων. Ο ανιονικός αυτός χαρακτήρας έχει δύο βασικά αποτελέσματα. Αφενός τα μόρια του νερού των πόρων πολώνονται, ενισχύοντας έτσι την ηλεκτροστατική στρωμάτωση του Μ πεντονίτη και αφετέρου τα κατιόντα που είναι διαλυμένα στο νερό προσροφούνται στην επιφάνεια του Μ πεντονίτη ή αντικαθιστούν άλλα κατιόντα στο κρυσταλλικό του πλέγμα (κατιοανταλλαγή), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3.



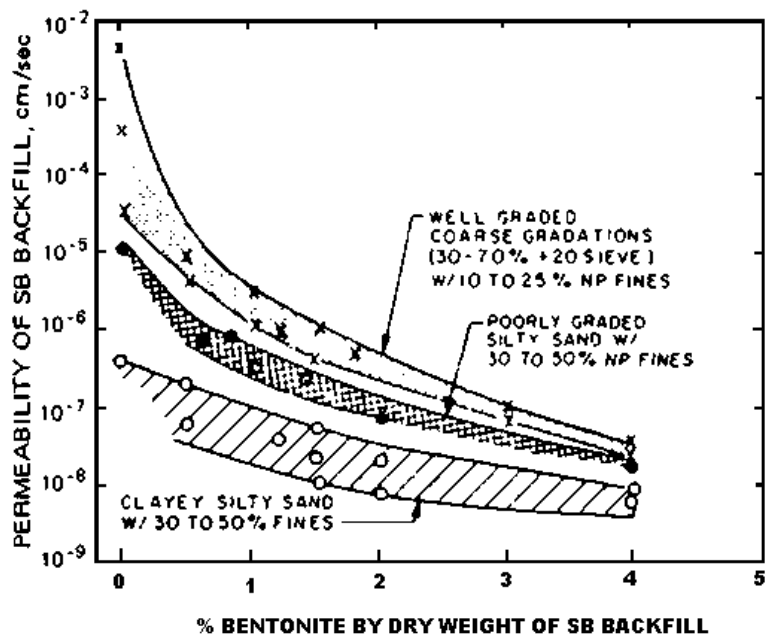
Σχήμα 2.3-Μηχανισμός προσρόφησης των μορίων νερού στο Μπεντονίτη (από Mitchell, J.K., 1976).\*

Το νερό αυτό που παγιδεύεται στους πόρους του Μπεντονίτη λόγω ηλεκτροστατικών δυνάμεων, μειώνει δραστικά την ήδη από την φύση της χαμηλή διαπερατότητα του Μπεντονίτη. Η χρήση του Μπεντονίτη ως στεγανό υπόστρωμα, γνώρισε ευρεία αποδοχή κατά την περασμένη δεκαετία, λόγω του χαμηλού του κόστους και της ευκολίας τοποθέτησης. Ένα πρόβλημα που ανέκυψε ήταν η επίδραση των διασταλαζόντων υγρών στην διαπερατότητα του Μπεντονίτη. Διαπιστώθηκε από διάφορους ερευνητές (Anderson et.al, 1982), ότι τα διασταλάζοντα υγρά που περιέχουν οργανικούς διαλύτες ή υψηλές συγκεντρώσεις οξέων και αλκαλίων, μπορούν να μεταβάλουν την διαπερατότητα του Μπεντονίτη μέχρι και δύο τάξεις μεγέθους. Η επίδραση των οργανικών διαλυτών φαίνεται και στα διαγράμματα του σχήματος 2.4.



Σχήμα 2.4 Επίδραση των οργανικών διαλυτών στην διαπερατότητα του Μ πεντονίτη (από Anderson, D, 1982).

Εκτός από αμιγή Μ πεντονίτη πολλές φορές χρησιμοποιούνται και μείγματα φυσικού εδάφους με Μ πεντονίτη, αφού έχει αποδειχτεί ότι η μείξη αυτή μειώνει δραστικά την διαπερατότητα των διάφορων εδαφικών τύπων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Η επίδραση της προσθήκης Μπεντονίτη στην διαπερατότητα των διάφορων εδαφικοί τύπων, (από D'ArroIomia D. J., 1980).

### 2.3.3 Εύκαμπτα υποστρώματα (Συνθετικά υλικά).

#### α) Γεωμεμβράνες

Οι γεωμεμβράνες κατασκευάζονται από υλικά όπως πλαστικό ή καουτσούκ, σε διάφορους τύπους και παραλλαγές. Η κατασκευή τους βασίζεται στην χημική αντίδραση του πολυμερισμού, κατά την οποία απλά μόρια κάποιου υλικού κάτω από την επίδραση πίεσης και θερμοκρασίας ενώνονται σε μοριακές αλυσίδες. Το γεγονός αυτό αυξάνει την αντοχή και την πυκνότητα των υλικών και τα καθιστά κατάλληλα για χρήση ως στεγανά υποστρώματα.

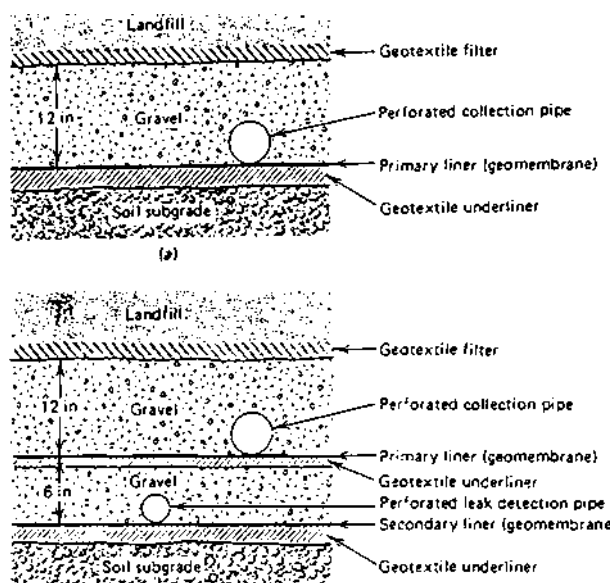
Οι κυριότεροι τύποι γεωμεμβρώνων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1. Στον ίδιο πίνακα αναφέρονται και οι τρόποι με τους οποίους συνδέονται τα διάφορα φύλλα της γεωμεμβράνης στο πεδίο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7.

Πίνακας 2.1 Οι συνηθέστερα χρησιμοποιημένες γεωμεμβράνες και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

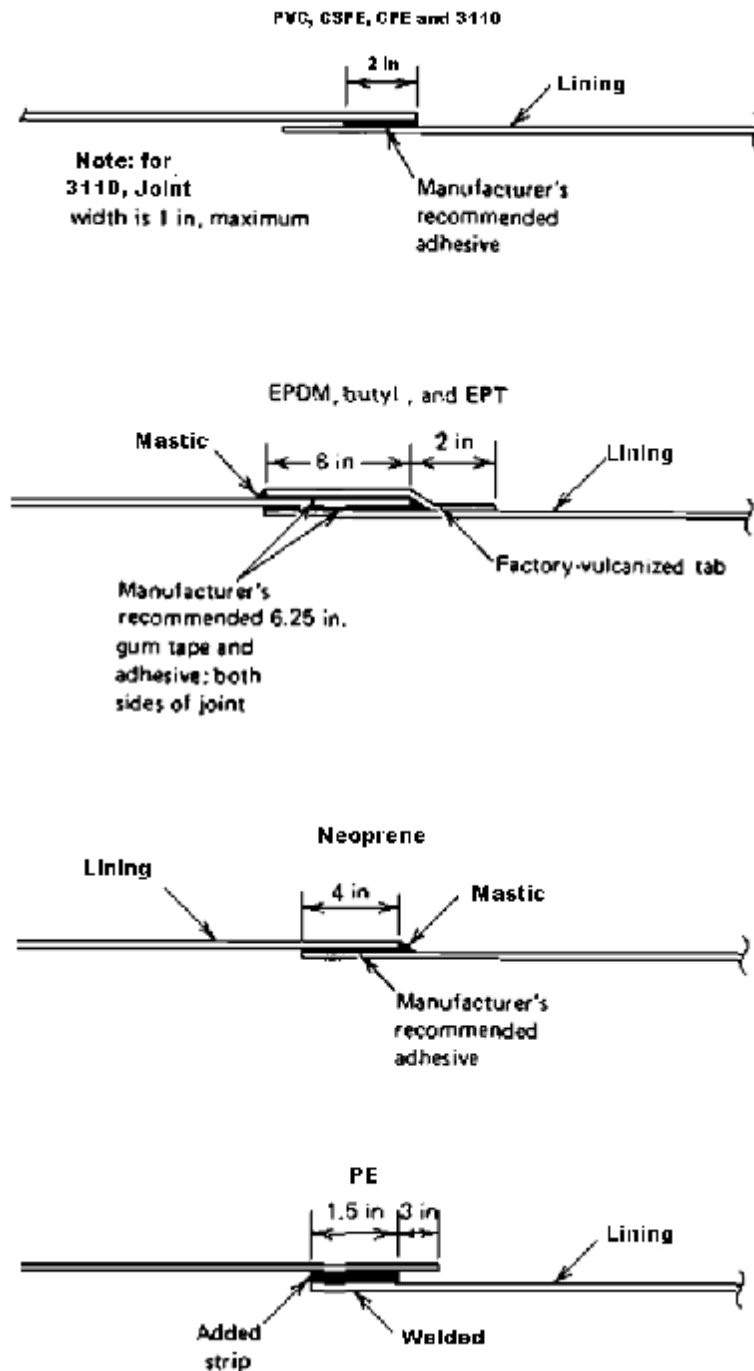
**Πίνακας 2.1** Οι συνηθέστερα χρησιμοποιημένες γεωμεμβράνες και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

Συνομογραφία	Χημική ονομασία	Τάξη πολυμερισμού	Πάχος (mm)	Μέθοδος κόλλησης πεδίου
PVC	Πολυβινυλοχλωρίδιο	Πλαστικό	10-30	Επικάλυψη και κόλλα
PE	Πολυαιθυλένιο	Πλαστικό	20-100	Μεταλλική κόλληση
CPE	Χλωριομένο πολυαιθυλένιο	Πλαστικό	30-50	(Welding) Επικάλυψη και κόλλα
CSPE	Χλωριοθειομένο πολυαιθυλένιο	Πλαστικό	30-50	(Adhesive) Επικάλυψη και κόλλα
3110	Ελαστυοποιημένη πολυολεφίνη	Πλαστικό		(Adhesive)
Butil	Βουτίλιο	Ελαστικό	40-60	Κολλητική ταινία γομπύληρι
EPT	Αιθυλο-προπυλό τερταπολυμερές	Ελαστικό	30-50	Κολλητική ταινία (Gum tape)
EPDM	Αιθυλο-προπυλό δυμομερές	Ελαστικό	20-40	Κολλητική ταινία (Gum tape)
Neoprene	Πολυχλωροπροπάνιο	Ελαστικό	20-60	Επικάλυψη και κόλλα (Adhesive)

Η διάταξη με την οποία οι γεωμεμβράνες συνδυάζονται με τα στρώματα στράγγισης για την κατασκευή του στεγανού υποστρώματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6



Σχήμα 2.6 Η διάταξη με την οποία οι γεωμεμβράνες συνδυάζονται με τα στρώματα στράγγισης για την κατασκευή του στεγανού υποστρώματος



Σχήμα 2.7 Οι τρόποι με τους οποίους συνδέονται τα διάφορα φύλλα των γεωμεμβράνων στο πεδίο (από Kays, W. B., 1977).

Σχετικά με την διατμητική αντοχή των γεωμεμβρανών καθώς και την επίδραση των διασταλαζόντων υγρών στην σύσταση τους παραθέτουμε συνοπτικά στοιχεία στον πίνακα 2.2 που ακολουθεί.

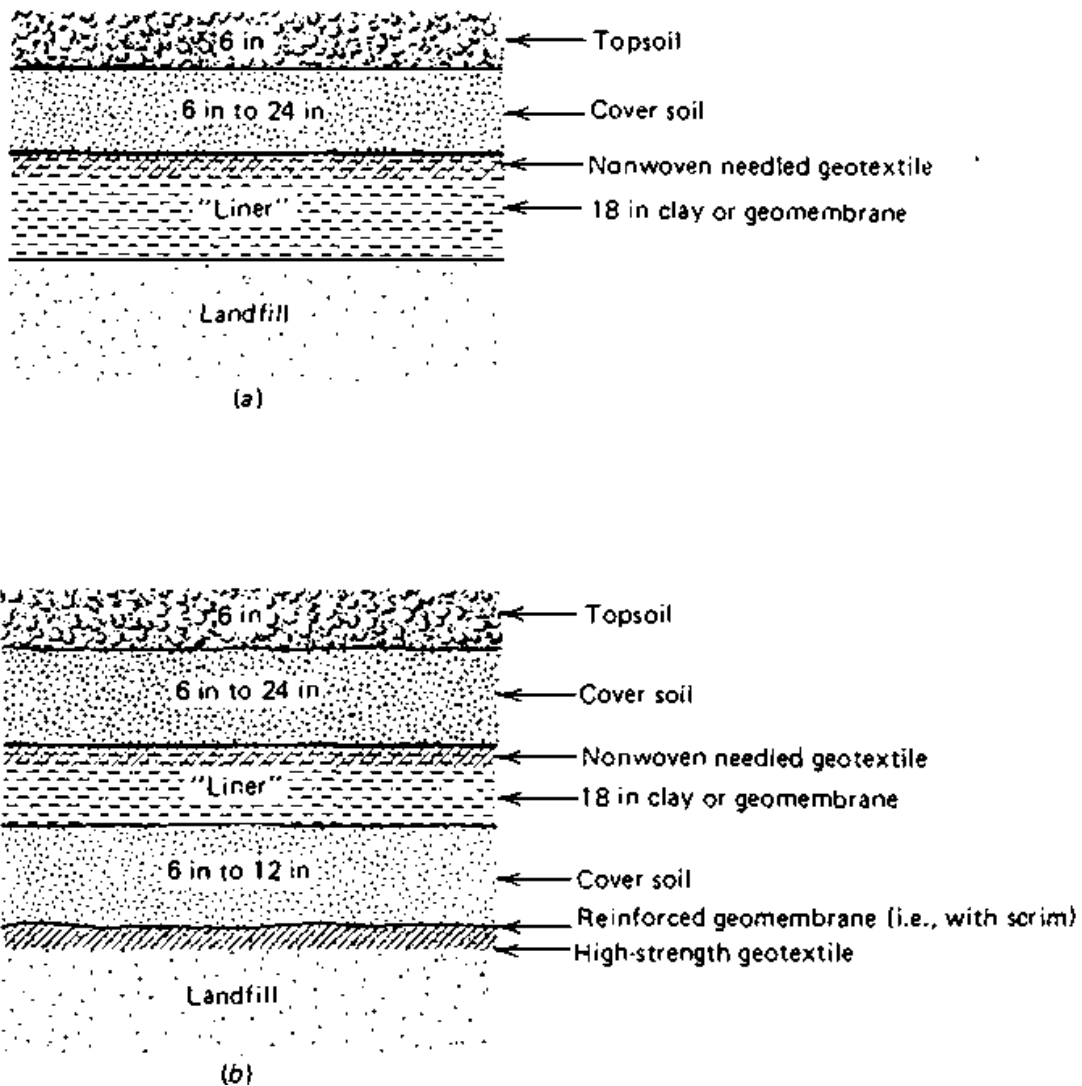
**Πίνακας 2.2** Συμβασιμότητα των κοινών κριτηρίων των γεωμεμβρανών. (από Καραπιά et al. 1975)

Πολυμερές	Πολυαιθυλένιο Υψηλής πυκνότητας (HDPE)		Πολυβινυλοχλωρίδιο	Χλωροαιθυλένιο πολυαιθυλένιο	EPDM	Πολυαιθένη	Πολυβουτίνη	EPDM	Γεωμεμβράνη
Ελαστικό όριο	0,92-0,91		0,91-0,90	1,20-1,20	1,30-1,39	0,90-0,91	1,03-1,10	0,92-1,22	0,91-1,22
Διαπερατότητα υδρατμών (D <sub>υδρ</sub> )	1300-2300		2700-3100	3300-10000	1800-2200	4000-32000	9000-11000	1000	1000
Διαπερατότητα αερίων (D <sub>αερίων</sub> )	200-300		10-450	60-300	375-575	40-400	250-450	4000	2500
Επιμετάλλωση	70 ως 180		70 ως 240	60 ως 200	40 ως 200	60 ως 220	60 ως 380	30 ως 320	70 ως 230
Αντοχή σε οξύ	Ποσότητα καλή		Καλή	Καλή έως εξαιρετική	Καλή έως εξαιρετική	Καλή έως εξαιρετική	Ποσότητα		Καλή
Αντοχή σε βάρος	Καλή έως εξαιρετική		Καλή έως εξαιρετική	Καλή έως εξαιρετική	Καλή έως εξαιρετική	Καλή έως εξαιρετική	Εξαιρετική		Καλή έως εξαιρετική
Αντοχή σε υδρογονοειδή οξέα	Ποσότητα καλή		Ποσότητα καλή	Καλή	Ποσότητα	Ποσότητα			Καλή
Αντοχή σε οργανικούς διαλύτες	Μέτρια		Μέτρια	Καλή	Ποσότητα	Καλή	Καλή	Ποσότητα	Ποσότητα
Αντοχή σε αλκοόλες	Ποσότητα καλή		Ποσότητα καλή	Καλή	Καλή	Καλή	Εξαιρετική	Ποσότητα	Ποσότητα
Αντοχή σε οξείδια	Ποσότητα καλή		Ποσότητα καλή	Καλή	Εξαιρετική	Ποσότητα	Καλή	Μέτρια	Εξαιρετική

## 2.4 Στεγανά καλύμματα.

Τα στεγανά καλύμματα κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο και τα ίδια υλικά όπως και τα στεγανά υποστρώματα. Το βασικό κριτήριο για την επιλογή του υλικού είναι να είναι συμβατό με το περιεχόμενο του Χ.Υ.Τ.Α και να έχει μεγάλο χρόνο ζωής, δεδομένου ότι μετά την περάτωση των εργασιών απόθεσης, ο χώρος αποκαθίσταται και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί με ποικίλους τρόπους. Για τους λόγους αυτούς προτιμούνται συνήθως είτε εδαφικά υλικά αν είναι κατάλληλης περατότητας, είτε Μπεντονίτης, είτε μείγματα Μπεντονίτη και φυσικού εδάφους. Το πάχος του στεγανού καλύμματος καθορίζεται από διάφορους ανεξάρτητους παράγοντες όπως οι υδρολογικές συνθήκες της περιοχής αλλά και οι πιθανές χρήσεις του χώρου μετά την τελική αποκατάσταση. Οι δύο πιο τυπικές μορφές στεγανού καλύμματος παρουσιάζονται στο σχήμα 2.8.



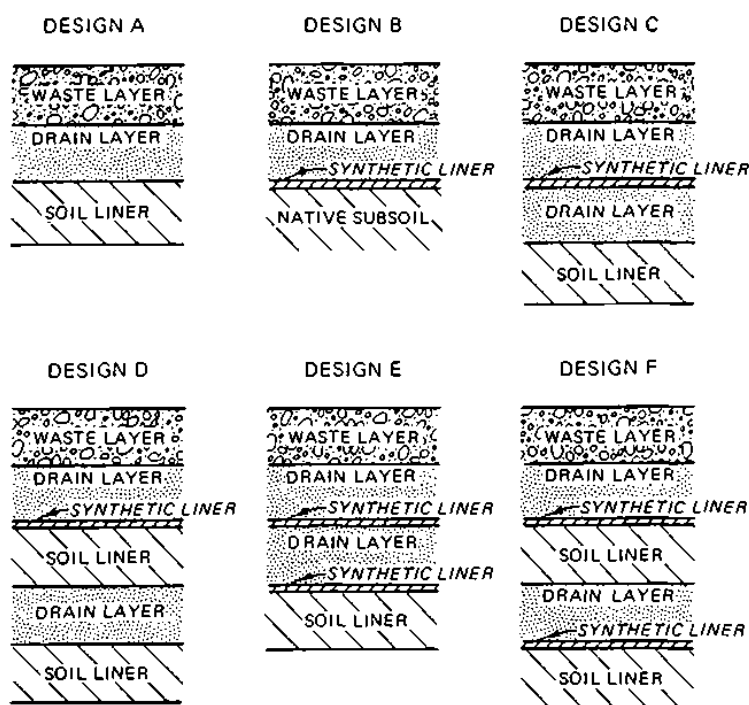


Σχήμα 2.8 Οι δύο πιο τυπικές μορφές στεγανού καλύμματος σε τομή.

2.5 Υπολογισμός της ποσότητας στραγγίσματος που διαφεύγει από τα στεγανά υποστρώματα.

Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε πως οι ιδιότητες του στεγανού υποστρώματος καθώς και του στραγγιστηρίου στρώματος επιδρούν στην ποσότητα του στραγγίσματος που συλλέγεται από το σύστημα των στραγγιστηρίων σωλήνων καθώς και στην ποσότητα του στραγγίσματος

που διαφεύγει από τα εδαφικά-αργιλικά, αλλά και σύνθετα διαρρηγμένα υποστρώματα. Λέγοντας σύνθετα υποστρώματα εννοούμε τα υποστρώματα που αποτελούνται από ένα συνδυασμό φυσικών και συνθετικών υλικών σε επάλληλες στρώσεις για την καλύτερη απόδοση του υποστρώματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 Υποστρώματα που αποτελούνται από ένα συνδυασμό φυσικών και συνθετικών υλικών σε επάλληλες στρώσεις, σε τομή.

Πιο συγκεκριμένα θα εξετάσουμε πως η ποσότητα του στραγγίσματος που διαφεύγει ανά μονάδα επιφάνειας ( $Q_p$ ), εξαρτάται από την κλίση, το εύρος και την υδραυλική αγωγιμότητα του στραγγιστηριου στρώματος καθώς και την υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού-αργιλικού υποστρώματος, θα εξετάσουμε τέλος την επίδραση που έχει στην ποσότητα της διαρροής το ποσοστό επιφάνειας του συνθετικού υποστρώματος (γεωμεμβράνη), το οποίο έχει υποστεί διάρρηξη.

Η μαθηματική ανάλυση που θα χρησιμοποιήσουμε είναι βασισμένη σε ένα μοντέλο που εφαρμόστηκε αρχικά από τους Schroeder et.al

(1984), οι οποίοι προσάρμοσαν κατάλληλα στην δομή του συστήματος στραγγιστήριο στρώμα - εδαφικό υπόστρωμα - γεωμεμβράνη το νόμο του Darcy.

α) Μαθηματική ανάλυση.

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο η ποσότητα του στραγγίσματος που ρέει πλευρικά στο στραγγιστήριο στρώμα κινούμενη προς τον στραγγιστήριο σωλήνα δίνεται από την σχέση:

$$Q_D = C \cdot J \quad (2.4)$$

όπου C [= συντελεστής διόρθωσης.

$K_D$  = υδραυλική αγωγιμότητα στραγγιστηριού στρώματος  $y$  = μέσο κορεσμένο πάχος πάνω από το στεγανό υπόστρωμα  $h_0$  = μέγιστο ύψος στάθμης πάνω από το επίπεδο του στραγγιστηριού σωλήνα  $L$  = οριζόντια προβολή του εύρους του στεγανού υποστρώματος

Ο συντελεστής διόρθωσης C) μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$C = 0,51 + 0,00205 \cdot a \cdot L \quad (2.5)$$

όπου  $a$  = κλίση του στραγγιστηριού στρώματος

Το μέγιστο ύψος στάθμης  $h_0$  μπορεί να υπολογιστεί και από την σχέση:

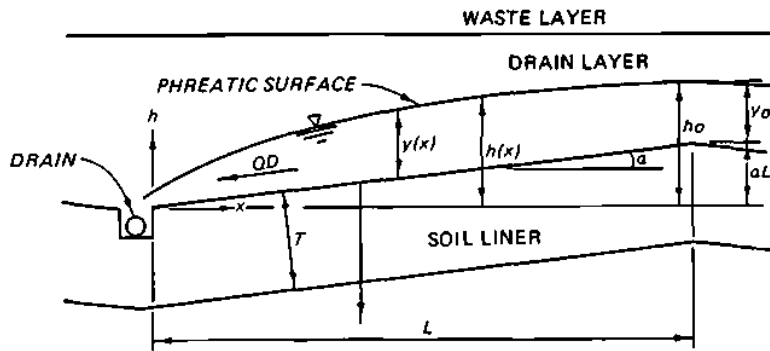
$$h_0 = y_0 + a \cdot L \quad (2.6)$$

όπου  $y_0$  = κορεσμένο βάθος στραγγιστηριού στρώματος στο σημείο  $x=L$   
όπου  $x$  η οριζόντια απόσταση από τον στραγγιστήριο σωλήνα

Το κορεσμένο βάθος  $y_0$  μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από την σχέση:

$$y_0 = \frac{(\bar{y})^{1,16}}{(\alpha \cdot L)^{0,16}} \quad (2.7)$$

Όλα τα παραπάνω μεγέθη παρουσιάζονται γραφικά στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 Γεωμετρική αναπαράσταση του συστήματος στραγγιστήριο στρώμα-στεγανό υπόστρωμα και των συνθηκών ροής σε αυτό.

Βάσει του ίδιου μοντέλου, η ποσότητα του στραγγίσματος που ρέει κατακόρυφα διαμέσου του εδαφικού-αργιλικού στεγανού υποστρώματος, προς το υποκείμενο έδαφος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\dot{Y} + T\alpha$$

$$Q_p = LF \cdot K_p \cdot h^2 \quad (2.8)$$

όπου  $LF$  = κλάσμα διαρροής

$K_p$  = υδραυλική αγωγιμότητα στεγανού εδαφικού-αργιλικού

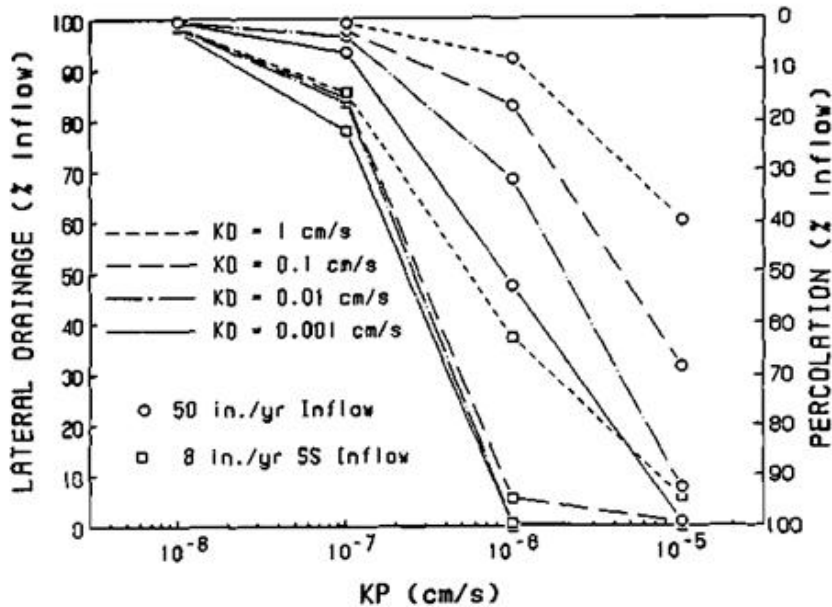
υποστρώματος  $T$  = πάχος στεγανού εδαφικού-αργιλικού υποστρώματος

Ως κλάσμα διαρροής ορίζεται ο λόγος της επιφάνειας του εδάφους διά μέσου του οποίου έχουμε διαρροή κάτω από ένα συνθετικό στεγανό υπόστρωμα το οποίο έχει διαρρήξεις και τοποθετείται στην εξίσωση 2.8 όταν έχουμε να κάνουμε με σύνθετο σύστημα υποστρωμάτων. Όταν έχουμε ένα απλό εδαφικό-αργιλικό υπόστρωμα τότε θεωρούμε το κλάσμα διαρροής ίσο με την μονάδα και η εξίσωση 2.8 είναι ο γνωστός νόμος του Darcy.

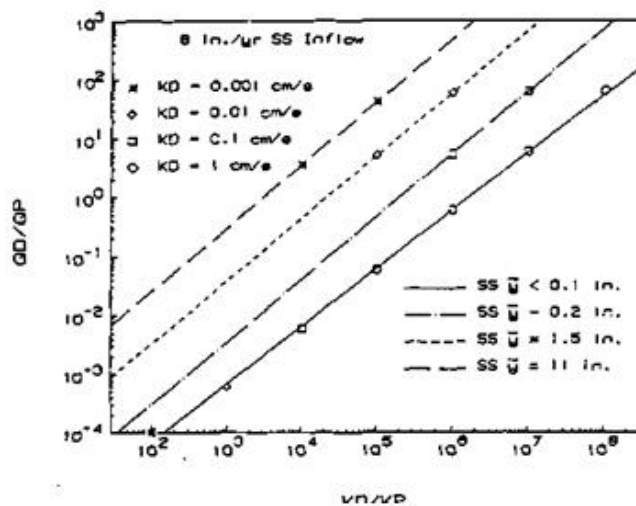
β) Απλά εδαφικά-αργιλικά υποστρώματα.

Η επίδραση των υδραυλικών αγωγιμοτήτων του στεγανού

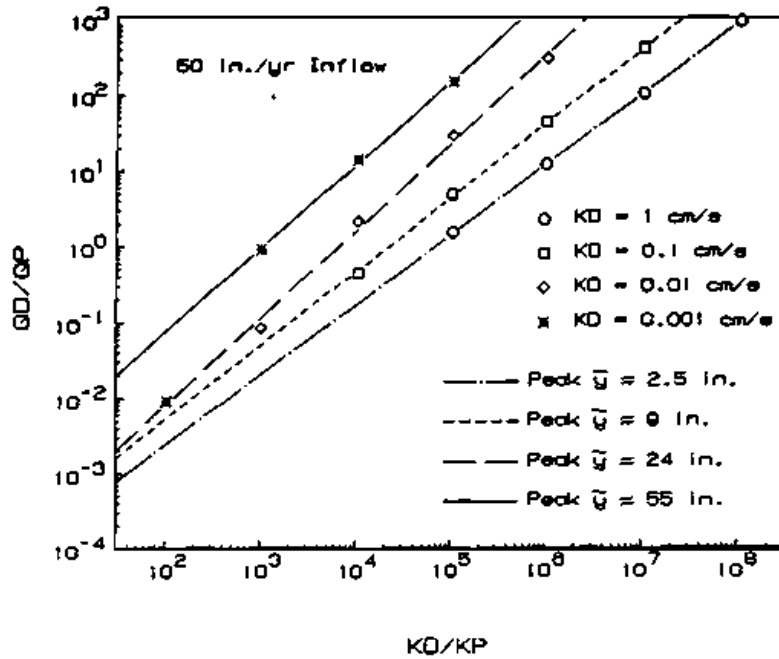
υποστρώματος  $K_p$  και του στραγγιστηριού στρώματος  $K_D$  πάνω στην πλευρική μετάγγιση  $Q_D$  και την κατακόρυφη ροή  $Q_P$  ως συνάρτηση της εισροής υγρού από την μάζα των απορριμμάτων παρουσιάζονται στο σχήμα 2.11



Σχήμα 2.11 Η επίδραση των υδραυλικών αγωγιμοτήτων του στεγανού υποστρώματος  $K_p$  και του στραγγιστηριού στρώματος  $K_D$  πάνω στην πλευρική μετάγγιση  $Q_D$  και την κατακόρυφη ροή  $Q_P$  (από Peyton et. al. 1990)

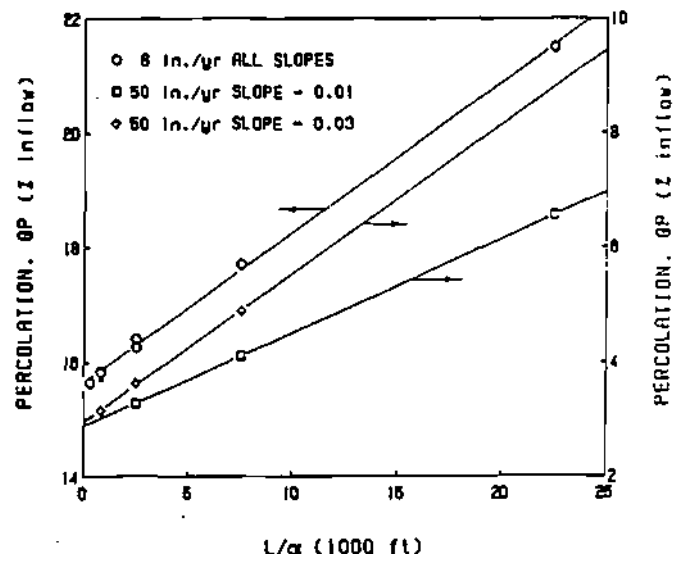


Σχήμα 2.12 Η συσχέτιση του λόγου  $K_p/K_r$  με τον λόγο  $Q_D/Q_P$  για μόνιμη σταθερή ροή (από Peyton et al. 1990)



Σχήμα 2.13 Η συσχέτιση του λόγου  $KD/KP$  με τον λόγο  $QD/QP$  για μη σταθερή ροή (από Peyton et. al. 1990)

Η συσχέτιση του λόγου  $KD/KP$  με τον λόγο  $QD/QP$  για μόνιμη σταθερή, αλλά και μη μόνιμη ροή διασταλαζόντων υγρών από τα απορρίμματα προς το στραγγιστήριο στρώμα παρουσιάζονται στα σχήματα 2.12 και 2.13.



Σχήμα 2.14 Η συσχέτιση του λόγου του εύρους προς την κλίση του στραγγιστηρίου στρώματος με την κατακόρυφη ροή  $Q_p$  (από Peyton et. al. 1990)

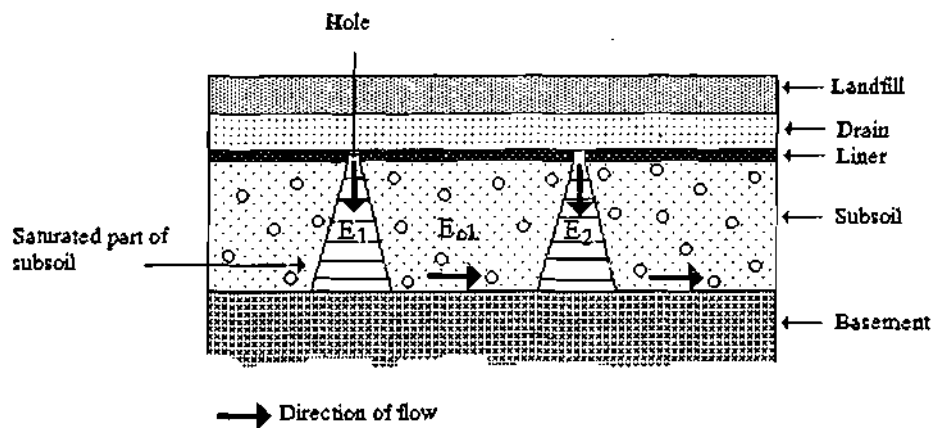
Η συσχέτιση του λόγου του εύρους προς την κλίση του στραγγιστηρίου στρώματος με την κατακόρυφη ροή  $Q$  παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14.

β) Σύνθετα στεγανά υποστρώματα.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε το σύνθετο υπόστρωμα του σχήματος 2.10β, το οποίο υπέρκειται ενός στρώματος εδάφους που μεσολαβεί μέχρι το στεγανό υπόβαθρο. Στην περίπτωση αυτή, αν θεωρήσουμε ότι η γεωμεμβράνη έχει κάποιες οπές, κατά προσέγγιση κυκλικού σχήματος, τότε σαν κλάσμα διαρροής ορίζουμε το γινόμενο, της κορεσμένης επιφάνειας του εδάφους, διά μέσου της οποίας έχουμε κατακόρυφη ροή κάτω από κάθε οπή, επί των αριθμών των οπών όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.15, στο οποίο το κλάσμα διαρροής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{όπου } n = \text{αριθμός των οπών στην γεωμεμβράνη}$$

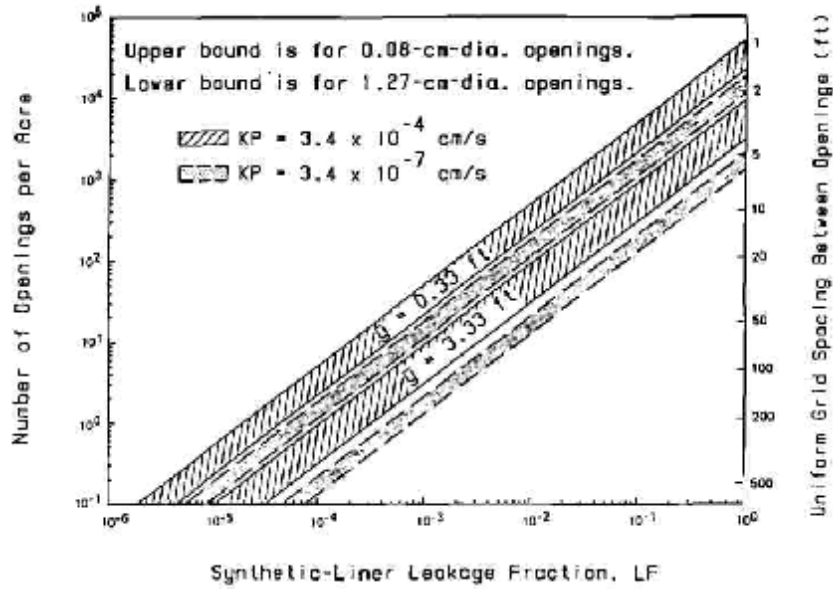
$$L_F = \frac{E_1 + E_2}{E_{ολ}} \cdot n \quad (2.9)$$



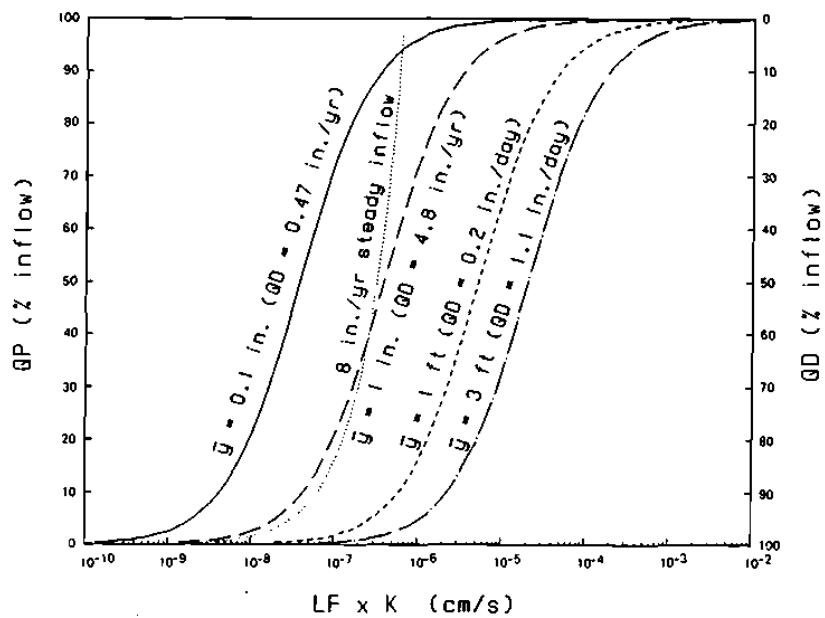
Σχήμα 2.15 Σχηματική αναπαράσταση του κλάσματος διαρροής στα συνθετικά υποστρώματα

Στο σχήμα 2.16 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο το κλάσμα διαρροής επηρεάζεται από την πυκνότητα των οπών ανά μονάδα επιφάνειας για διάφορες υδραυλικές αγωγιμότητες  $K_p$  και μέσα κορεσμένα πάχη  $y$ , ενώ στο σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η επίδραση του γινομένου του κλάσματος διαρροής με την υδραυλική αγωγιμότητα του

υποκείμενου εδάφους, στο ποσό της κατακόρυφης ροής εκφρασμένο σαν ποσοστό επί της εισροής διασταλαζόντων υγρών από τα απορρίμματα, για διάφορα κορεσμένα πάχη  $\gamma$ .



Σχήμα 2.16 Η συσχέτιση του κλάσματος διαρροής με την πυκνότητα των οπών ανά μονάδα επιφάνειας (από Peyton et. al. 1990)

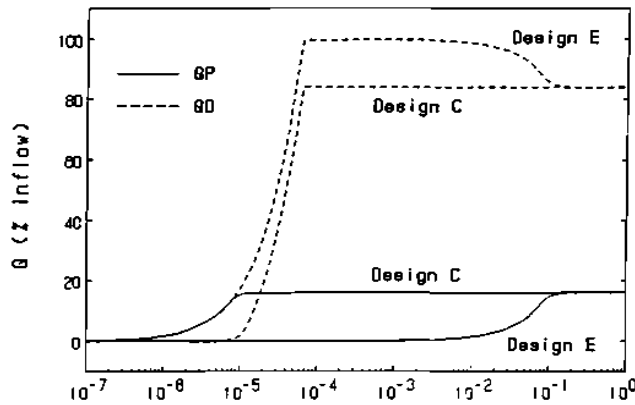


Σχήμα 2.17 Η συσχέτιση του κλάσματος διαρροής με την πλευρική μετάγγιση  $Q_p$  και την κατακόρυφη ροή  $Q_d$  (από Peyton et. al. 1990)

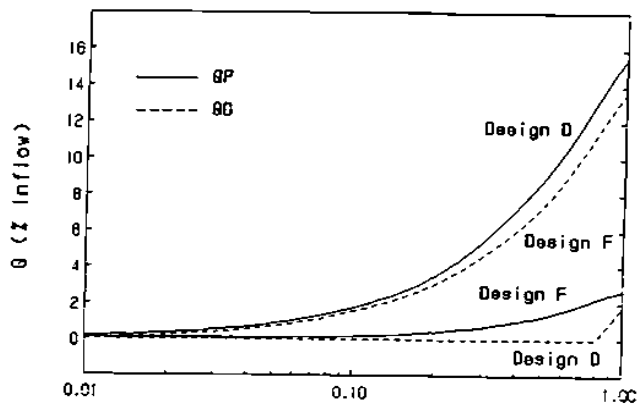


y) Απόδοση των διάφορων σύνθετων στεγανών υποστρωμάτων.

Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε την αποτελεσματικότητα των σύνθετων υποστρωμάτων C έως F του σχήματος 2.10. Αν σε κάθε ένα από αυτά τα συστήματα εφαρμόσουμε την μαθηματική ανάλυση που αναπτύξαμε στην παράγραφο 2.5α, διαπιστώνουμε ότι η πλευρική μετάγγιση και η κατακόρυφη ροή εκφρασμένες σαν ποσοστό επί της εισροής διασταλαζόντων υγρών από τα απορρίμματα, για διάφορα κλάσματα διαρροής των γεωμεμβράνων, αν θεωρήσουμε τα υπόλοιπα μεγέθη που αφορούν το πρόβλημα σταθερά και ίδια για όλα τα συστήματα, είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.18.



Synthetic-Liner Leakage Fraction, LF



Synthetic-Liner Leakage Fraction, LF

Σχήμα 2.18 Η συσχέτιση του κλάσματος διαρροής με την πλευρική μετάγγιση  $Q_D$  και την κατακόρυφη ροή  $Q_P$  για τα διάφορα συστήματα πολλαπλών υποστρωμάτων του σχήματος 2.10 (από Peyton et. al. 1990)

Από το σχήμα αυτό διαπιστώνουμε ότι από τα συστήματα που περιέχουν ένα εδαφικό υπόστρωμα πιο αποτελεσματικό είναι εκείνο με το διπλό συνθετικό υπόστρωμα (E), χωρίς όμως και αυτό να έχει απολύτως ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αντίστοιχα από τα συστήματα που έχουν δυο εδαφικά υποστρώματα πιο αποτελεσματικό είναι εκείνο που έχει και διπλό συνθετικό υπόστρωμα (F), το οποίο φαίνεται να είναι και το αποτελεσματικότερο όλων και συνεπώς το πιο κατάλληλο για περιπτώσεις όπου οι διαρροές πρέπει να περιοριστούν στο ελάχιστο με κάθε κόστος, π.χ. πάνω από παραγωγικούς υδροφόρους με μικρή ακόρεστη ζώνη κ.τ.λ.



## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 3<sup>ο</sup>

Χημικές - βιοχημικές διεργασίες στους Χ.Υ.Τ.Α, παραγωγή και μετανάστευση βιοαερίου και διασταλαζόντων υγρών.

### 3.1 Η δράση των μικροοργανισμών.

Οι μικροοργανισμοί διακρίνονται σε βακτήρια, φύκη, πρωτόζωα, μύκητες, νηματώδη, σκώληκες και προνύμφες εντόμων ενώ οι ιοί σχηματίζουν ξεχωριστή ομάδα. Η ανάπτυξη των μικροοργανισμών εξαρτάται από την ύπαρξη πηγής ενέργειας, την παροχή οξυγόνου και την θερμοκρασία.

Διακρίνονται στους αυτότροφους και τους ετερότροφους. Αυτότροφοι είναι αυτοί που χρησιμοποιούν το διοξείδιο του άνθρακα σαν πηγή άνθρακα για την σύνθεση νέων κυττάρων ενώ οι ετερότροφοι χρησιμοποιούν το οργανικό υλικό ως πηγή άνθρακα. Οι ετερότροφοι οργανισμοί, που χρησιμοποιούν το νεκρό οργανικό υλικό, ονομάζονται και σαπροφυτικοί.

Οι απαιτήσεις σε οξυγόνο διακρίνουν τους μικροοργανισμούς σε τρεις κατηγορίες:

- Σε υποχρεωτικά αερόβιους, δυνάμενους δηλαδή να ζήσουν μόνο σε περιβάλλον που περιέχει οξυγόνο.

- Σε υποχρεωτικά αναερόβιους, δυνάμενους να ζήσουν μόνο απουσία ελεύθερου οξυγόνου.

- Σε επαμφοτερίζοντες, που μπορούν να επιβιώσουν παρουσία ή απουσία ελεύθερου οξυγόνου αν και προτιμούν τις αερόβιες συνθήκες.

Οι απαιτήσεις θερμοκρασίας διακρίνουν τους μικροοργανισμούς επίσης σε τρεις κατηγορίες:

- Θερμόφιλους, με επιθυμητή θερμοκρασία ανάπτυξης πάνω από 40 °C

- Μεσόφιλους, με επιθυμητή θερμοκρασία ανάπτυξης 20-40 °C

- Ψυχρόφιλους, με επιθυμητή θερμοκρασία ανάπτυξης κάτω από τους 20 °C

Από τις ομάδες των μικροοργανισμών που αναφέραμε, αυτές που κυρίως ενδιαφέρουν είναι τα βακτήρια και τα φύκη.

Τα ετερότροφα βακτήρια είναι κυρίως υπεύθυνα για την βιοαποδόμηση του οργανικού υλικού ενώ τα αυτότροφα είναι ενδιαφέροντα για την νιτροποίηση (οξειδωση της αμμωνίας σε νιτρώδη και νιτρικά) και την αναγωγή των θειικών σε θειούχα. Μερικά δε από τα βακτήρια είναι παθογόνα και μπορούν, αν παρασυρθούν από τα διασταλάζοντα υγρά και το υπόγειο νερό, να προκαλέσουν ασθένειες, όπως τύφο και χολέρα.

Τα φύκη είναι αυτότροφοι μικροοργανισμοί, οι οποίοι ρυθμίζουν την περιεκτικότητα σε οξυγόνο και CO<sub>2</sub> στους χώρους διαβίωσης τους ενώ μερικοί παράγουν τοξίνες που δηλητηριάζουν τους ζωντανούς οργανισμούς. Τα διασταλάζοντα υγρά πλούσια σε αμμωνία μπορεί να γίνουν αιτία παραγωγής περίσσειας φυκών στα νερά που τα δέχονται.

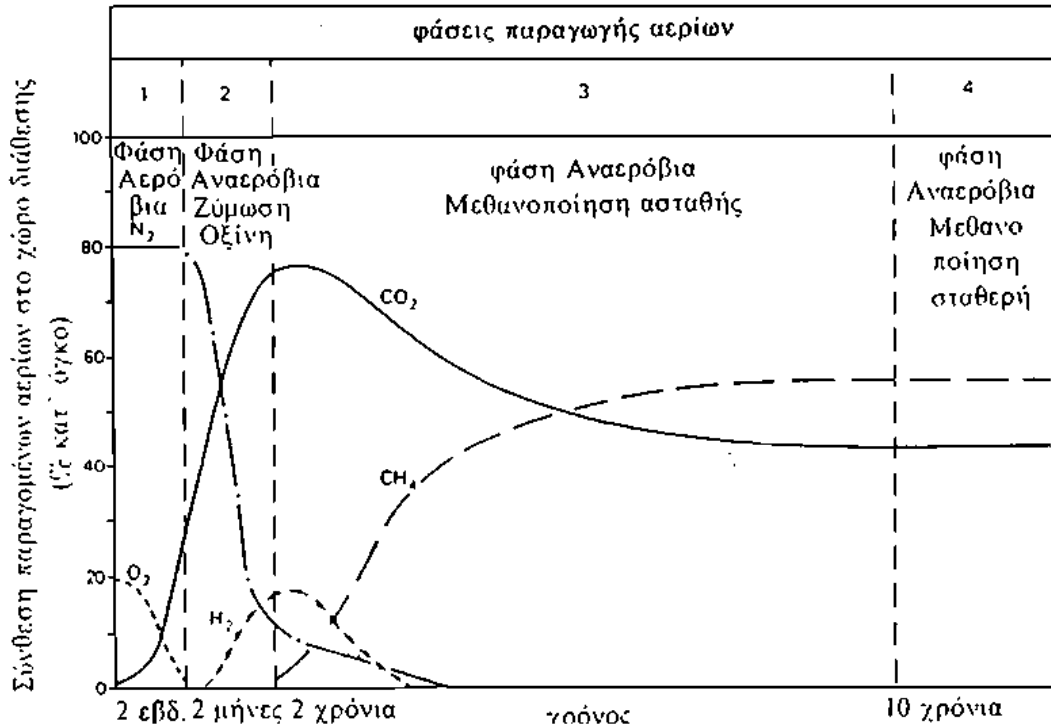
Η θερμοκρασία, που αναπτύσσεται λόγω ζυμώσεων μέσα στην μάζα των απορριμμάτων, έχει επίδραση στην θνησιμότητα των μικροοργανισμών, αφού οι περισσότεροι από αυτούς πεθαίνουν ακαριαία πάνω από τους 60 °C.

### 3.2 Βιοχημικές διεργασίες και παραγωγή βιοαερίου.

Επειδή μέσα στην μάζα των απορριμμάτων υπάρχουν θύλακες εγκλωβισμένου αέρα, η αρχική αποσύνθεση των απορριμμάτων είναι αερόβια βιολογική διεργασία. Μόλις αρχίσει η βιοαποδόμηση, εξαντλείται γρήγορα το οξυγόνο και εφόσον δεν υπάρχει τροφοδότηση η λειτουργία στο χώρο γίνεται αναερόβια. Οι βακτηριακοί πληθυσμοί που εισάγονται σε αυτή την διαδικασία υδρολύουν τα σύνθετα μόρια, όπως οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια και τα μεταβολίζουν, κατά την διάρκεια μιας χρονικής βαθμίδας που καλείται οξυγένεση, σε οξέα, άλατα του οξικού οξέος ( $C_2H_3CO_2H$ ), του προπιονικού οξέος ( $C_3H_5CO_2H$ ), διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου. Η δεύτερη χρονική βαθμίδα λειτουργίας είναι η μεθανογένεση κατά την οποία σχηματίζεται μεθάνιο και διοξειδίου του άνθρακα.

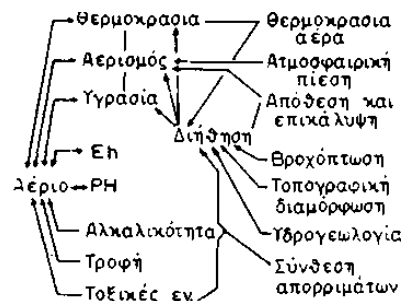
Όπως προαναφέραμε, η παραγωγή αερίων ακολουθεί ένα χρονοδιάγραμμα, με περιόδους στις οποίες υπερσχύει η παραγωγή του ενός ή του άλλου αερίου. Πιο συγκεκριμένα, τις αρχικές εβδομάδες ή μήνες έχουμε κυρίως την παραγωγή  $CO_2$ . Σε 11-40 ημέρες από την απόθεση των απορριμμάτων έχουμε την αιχμή παραγωγής  $CO_2$ . Λόγω του διηθούμενου νερού και των καθιζήσεων, μετακινείται ο αέρας που έχει απομείνει και έτσι έχουμε και την παρουσία  $O_2$  και  $N_2$  στα παραγόμενα αέρια. Σε 180-500 ημέρες μετά την απόθεση οι συνθήκες γίνονται αναερόβιες, το  $O_2$  μειώνεται στο 0 και το  $N_2$  σε περιεκτικότητες κάτω από 1%. Κάτω από αυτές τις συνθήκες ενεργοποιούνται τα μεθανοβακτήρια και τα παραγόμενα αέρια είναι 55-65% μεθάνιο και 35-40%  $CO_2$  και 1-2% ίχνη άλλων αερίων, μεταξύ των οποίων κάποιες πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως το βινυλοχλωρίδιο, που θεωρείται καρκινογόνο. Μετά την πάροδο περίπου μιας δεκαετίας η παραγωγή

αερίων αποκτά σταθερή σύσταση με επικράτηση του μεθανίου. Το χρονοδιάγραμμα παραγωγής αερίων παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 3.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.1 Χρονοδιάγραμμα της παραγωγής αερίων στους χώρους απόθεσης (από Farguhar and Rovers, 1973)

Οι κυριότεροι φυσικοί και χημικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποσότητα, αλλά και το χρονοδιάγραμμα παραγωγής αερίων παρουσιάζονται συνοπτικά στο σχήμα 3.2 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή αερίων στους χώρους απόθεσης (από Farguhar and Rovers, 1973)

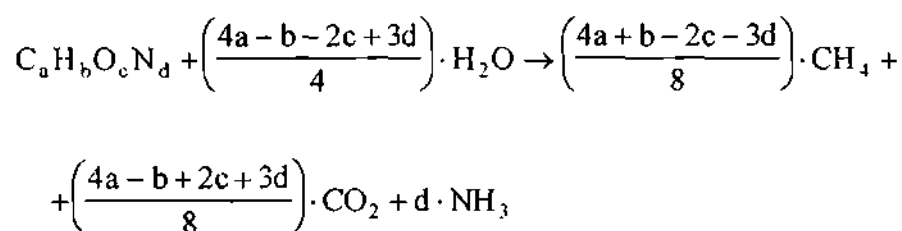
Στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κυριότερα αέρια

που παράγονται σε ένα χώρο απόθεσης απορριμμάτων μαζί με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 3.1 Τα κυριότερα αέρια που παράγονται σε χώρους απόθεσης απορριμμάτων Tchobanoglous et al. 1977

Αέριο	Χημικός τύπος	Μοριακό βάρος	Πυκνότητα (g/l)
Αμμωνία	NH <sub>3</sub>	17,03	0,7708
Διοξείδιο του άνθρακα	CO <sub>2</sub>	44,00	1,9768
Μονοξείδιο του άνθρακα	CO	28,00	1,2501
Υδρογόνο	H <sub>2</sub>	2,01	0,0898
Υδρόθειο	H <sub>2</sub> S	34,08	1,5392
Μεθάνιο	CH <sub>4</sub>	16,03	0,7167
Αζότο	N <sub>2</sub>	28,02	1,2507
Οξυγόνο	O <sub>2</sub>	32,00	1,4289

Για τον υπολογισμό του όγκου των παραγόμενων αερίων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες. Για παράδειγμα, εάν θεωρήσουμε ότι όλα τα οργανικά βιοαποικοδομήσιμα υλικά ενός χώρου απόθεσης απορριμμάτων αντιπροσωπεύονται από τον γενικό χημικό τύπο C<sub>a</sub>H<sub>b</sub>O<sub>c</sub>N<sub>d</sub>, τότε η χημική εξίσωση που εκφράζει την παραγωγή των αερίων είναι:



Η διαδικασία, που πρέπει να ακολουθήσουμε για να προσδιορίσουμε τον όγκο του κάθε παραγόμενου αερίου, με την χρήση της εξίσωσης 3.1 συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογίζουμε το ποσοστό του οργανικού υλικού με την χρήση ενός πίνακα ανάλογου με τον πίνακα 1.2, σε ξηρή όμως βάση, αφαιρώντας το ποσοστό της υγρασίας. Τα υλικά που συνήθως

θεωρούμε οργανικά είναι τα υπολείμματα των φαγητών, το χαρτί, το χαρτόνι, το 50% του ξύλου και το 75% των φυτικών υπολειμμάτων.

2. Προσδιορίζουμε τους συντελεστές  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  του γενικού τύπου  $C_aH_bO_cN_d$  χρησιμοποιώντας τα στοιχεία ενός πίνακα ανάλογου με τον πίνακα 1.6, εάν θεωρήσουμε ότι το ποσοστό του υπολείμματος της καύσης είναι 0 και θέτοντας στην συνέχεια τον αριθμό moles του αζώτου, δηλαδή το  $d$  ίσο με ένα.
3. Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές του βήματος 2 και με την χρήση της εξίσωσης 3.1 υπολογίζουμε το ανά μονάδα βάρους απορριμμάτων ποσοστό του κάθε παραγόμενου αερίου.
4. Πολλαπλασιάζουμε το ποσοστό του κάθε αερίου με το συνολικό βάρος απορριμμάτων του χώρου απόθεσης για να υπολογίσουμε το βάρος του κάθε αερίου που θα παραχθεί συνολικά.
5. Μετατρέπουμε το βάρος κάθε αερίου σε όγκο πολλαπλασιάζοντας με την αντίστοιχη πυκνότητα.

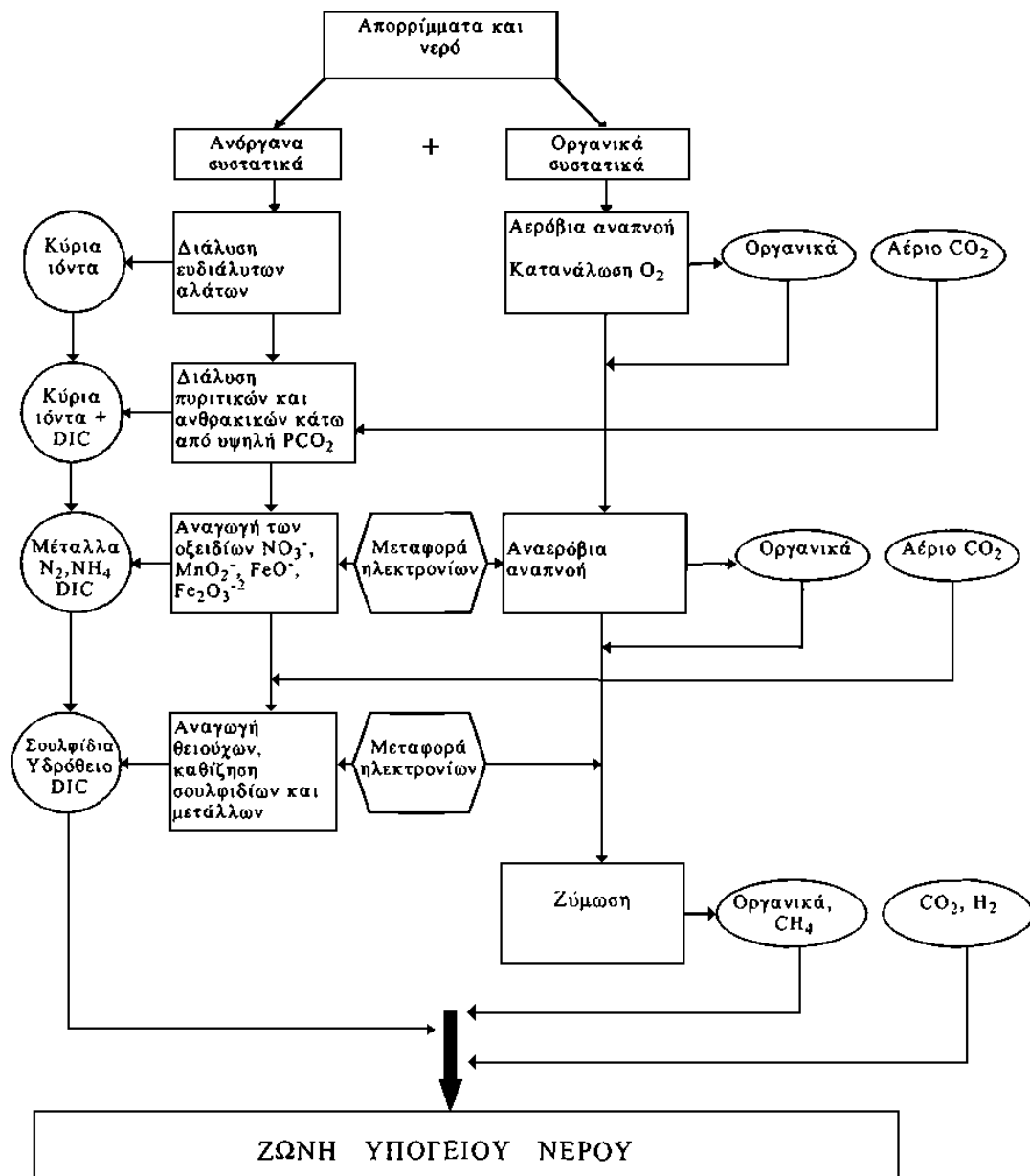
3.3 Βιοχημικές διεργασίες και παραγωγή διασταλαζόντων υγρών.

Ως διασταλάζοντα υγρά ή στράγγισμα χαρακτηρίζουμε το υγρό, το οποίο, διαπερνώντας την μάζα των απορριμμάτων, εμπλουτίζεται σε διαλελυμένες και μη ουσίες. Η ποσότητα του υγρού αυτού είναι συνάρτηση του υδρολογικού ισοζυγίου του χώρου απόθεσης καθώς και της περιεχόμενης υγρασίας των απορριμμάτων, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 2.2. Μια τυπική σύσταση του υγρού αυτού παρουσιάζεται στον πίνακα 3.2.



Πίνακας 3.2 Τυπική χημική σύσταση των διασταλαζόντων υγρών που παράγονται σε χώρους απόθεση απορριμμάτων.

Χημική παράμετρος	Εύρος κύμανσης (mg/l'it)	Τυπική τιμή (mg/l'it)
BOD <sub>5</sub> (Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο)	2000-30000	10000
TOC (Ολικός οργανικός άνθρακας)	1500-2000	6000
COD (Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο)	3000-45000	18000
TDS (Συνολικά διαλυμένα στερεά)	200-1000	500
Οργανικό N <sub>2</sub>	10-600	200
Αμμωνία	10-800	200
Νιτρικά	5-40	25
Συνολικός Φώσφορος	1-70	30
Ορθοφώσφορος	1-50	20
Αλκαλικότητα ως CaCO <sub>3</sub>	1000-10000	3000
pH	5,3-8,5	6
Ολική σκληρότητα ως CaCO <sub>3</sub>	300-10000	3500
Ασβέστιο	200-3000	1000
Μαγνήσιο	50-1500	250
Κάλιο	200-2000	300
Νάτριο	200-2000	500
Χλώριο	100-3000	500
θειικά	100-1500	300
Ολικός Σίδηρος	50-600	60



Σχήμα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση των βιοχημικών διεργασιών στους χώρους απόθεσης (από Cherry et. al., 1982)

Όπως φαίνεται οι συγκεντρώσεις των διαφόρων παραμέτρων παρουσιάζουν πολύ μεγάλες διακυμάνσεις και είναι πολύ επισφαλές να θεωρούμε ότι υπάρχει μια τυπική τιμή, η οποία στον πίνακα 3.2 αναφέρεται εντελώς ενδεικτικά. Πρέπει επίσης να επισημάνουμε ότι ακόμα και μέσα στην μάζα των απορριμμάτων η σύσταση του στραγγίσματος παρουσιάζει αξιοσημείωτες αλλαγές από θέση σε θέση

και ότι η σύσταση αυτή εξαρτάται από την σύσταση (φυσική και χημική) των απορριμμάτων, την φύση του υλικού επικάλυψης, το ποσό της κατείδυσης και την θερμοκρασία.

Η παραγωγή στραγγίσματος είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς χημικών και βιοχημικών διεργασιών. Οι κυριότερες από αυτές είναι η διάλυση των ευδιάλυτων αλάτων και η αποικοδόμηση του οργανικού υλικού, οι οποίες συνοδεύονται και από πολλές άλλες με μικρότερη σημασία, όπως παρουσιάζονται σχηματικά στο σχήμα 3.3.

Πιο συγκεκριμένα, η παρουσία κατιόντων όπως  $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}$  οφείλεται στην διάλυση των χλωριούχων και θειούχων αλάτων των στοιχείων αυτών. Στην συγκέντρωση των στοιχείων αυτών μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά και η διάλυση ορυκτών από το υλικό επικάλυψης του οποίο συνήθως περιέχει ανθρακικό ασβέστιο και αργιλικά ορυκτά.

Η παρουσία του  $\text{SO}_4^{2-}$  στο στράγγισμα είναι σχετικά μικρή και το γεγονός αυτό οφείλεται αφενός στην μικροβιολογική δράση που ανάγει τα θειούχα σε θειικά και αφετέρου στην καθίζηση του θείου με την μορφή μεταλλικών σουλφιδίων. Η πιθανότερη πηγή θειικών στο στράγγισμα είναι οι στάχτες καθώς και τα δομικά αδρανή υλικά που είναι πλούσια σε θειικά άλατα.

Η έντονη αναερόβια μικροβιακή δράση έχει όπως αναφέραμε ως συνέπεια την αποσύνθεση του οργανικού υλικού, η οποία δικαιολογεί τις υψηλές τιμές σε  $\text{BOD}$  και  $\text{TOC}$ , αλλά και την μείωση του δυναμικού οξειδοαναγωγής. Επιπλέον η παραγωγή  $\text{CO}_2$  εμπλουτίζει το στράγγισμα σε  $\text{HCO}_3^-$  και του προσδίδει εντονότερες διαλυτικές ικανότητες.

Η παρουσία οργανικού αζώτου στα υπολείμματα των τροφών είναι η κύρια πηγή αζωτούχων ενώσεων ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ) στο στράγγισμα. Οι έντονα αναγωγικές συνθήκες εμποδίζουν την οξείδωση των αζωτούχων ενώσεων με συνέπεια την υψηλή συγκέντρωση και την διάρκεια των ενώσεων αυτών.

Τα στοιχεία Μ η, Ζ η, Α Ι, και F e προέρχονται από την μερική διάλυση των μεταλλικών αντικειμένων από το ισχυρά διαβρωτικό στράγγισμα.

### 3.4 Μετανάστευση βιοαερίου.

Κατά την μεγαλύτερη χρονική περίοδο ζωής ενός χώρου απόθεσης τα αέρια, που παράγονται, είναι κατά 90% μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Όταν το μεθάνιο αναμειγνύεται με τον αέρα σε αναλογίες 5-15% γίνεται εκρηκτικό, μέσα στο χώρο των απορριμμάτων όμως δεν υπάρχει η απαιτούμενη ποσότητα αέρα για να συμβεί αυτό.

Στην περίπτωση των Χ.Υ.Τ.Α όπου έχουμε το αδιαπέραστο κάλυμμα, το μεθάνιο λόγω της πυκνότητάς του, που είναι μικρότερη του αέρα, μεταναστεύει πλευρικά. Η απόσταση, την οποία διανύει, είναι κυρίως συνάρτηση της διαπερατότητας του στεγανού περιβλήματος, αλλά και του περιβάλλοντος εδάφους και ρυθμίζεται από τον γνωστό νόμο του Darcy:

$$Q = K_{\text{αερίου}} \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \text{με} \quad K_{\text{αερίου}} = K_{\text{νερού}} \cdot \frac{\mu_{\text{νερού}}}{\mu_{\text{αερίου}}} \quad (3.2)$$

όπου  $Q$  = παροχή αερίου

$A$  = διατομή της διόδου διαφυγής του αερίου

$K_{\text{αερίου}}$  = Αγωγιμότητα εδάφους ως προς το αέριο.

$K_{\text{νερού}}$  = υδραυλική αγωγιμότητα

$\mu_{\text{νερού}}$  = ιξώδες νερού

$\mu_{\text{αερίου}}$  = ιξώδες αερίου

Ο νόμος του Darcy ως γνωστό δεν ισχύει για καρστικά συστήματα στα οποία μπορεί να έχουμε μετανάστευση αερίου σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Τέτοιες περιπτώσεις έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία και για τον Ελληνικό χώρο

(Περίπτωση χωματερής Λιοσίων).

Όταν το μεθάνιο βρει διέξοδο κινείται κατακόρυφα προς την ατμόσφαιρα, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο με το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο είναι βαρύτερο από τον αέρα και τείνει να συσσωρευτεί στο κάτω μέρος του χώρου απόθεσης, όπου μπορεί να παραμείνει για πολλά χρόνια. Λόγω του γεγονότος αυτού δημιουργεί υψηλές πιέσεις  $PCO_2$  και έτσι αυξάνει την διαλυτότητα του στο νερό με αποτέλεσμα την αύξηση του  $H_2CO_3$  στο νερό.

Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να διαλυθούν στο νερό και όλα τα υπόλοιπα αέρια που παράγονται στους χώρους απόθεσης. Η συγκέντρωσή τους στο νερό καθορίζεται από το νόμο του Henry:

$$C_s = k_s \cdot P_i \quad (3.3)$$

όπου  $C_s$  = συγκέντρωση κορεσμού του αερίου στο νερό σε ml/l.

$k_s$  = συντελεστής προσρόφησης αερίου σε ml/l.

$P_i$  = μερική πίεση αερίου  $I$ , εκφρασμένη ως λόγος

Οι τιμές των συντελεστών προσρόφησης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3 που ακολουθεί.

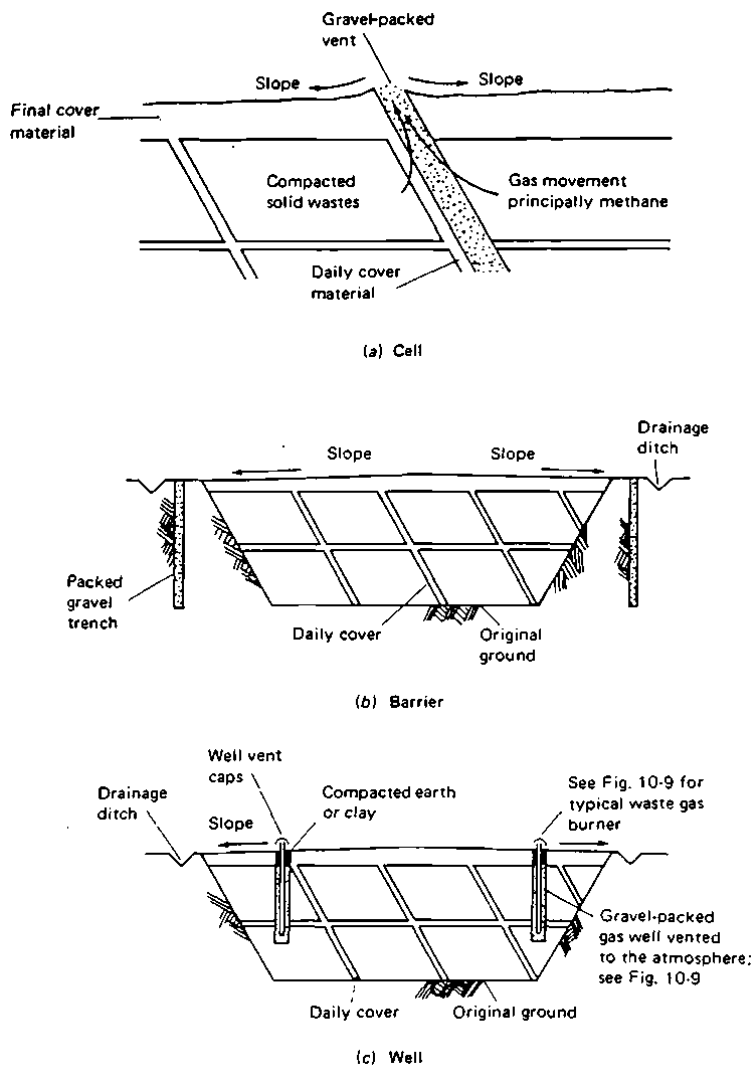
Πίνακας 3.3 Οι συντελεστές προσρόφησης των κυριότερων αερίων που παράγονται στους χώρους απόθεσης για διάφορες θερμοκρασίες, (από Dean, J. A., 1973

Αέριο	θερμοκρασία °C		
	0	10	20
Διοξείδιο του άνθρακα	1713	1194	878
Μονοξείδιο του άνθρακα	35,4	28,2	23,2
Υδρογόνο	21,5	19,6	18,2
Υδροθείο	4670	3399	2582
Μεθάνιο	55,6	41,8	33,1
Αζωτο	23,5	18,6	15,5
Οξυγόνο	48,9	38,0	31,0

Η πλευρική μετανάστευση του μεθανίου μπορεί να ελεγχθεί με την

δημιουργία διόδων προς την ατμόσφαιρα, από υλικά υψηλής διαπερατότητας. Το εύρος αυτών των διόδων πρέπει να είναι τόσο, ώστε να εξασφαλίζει την συνέχεια της διόδου παρά τις καθιζήσεις και τις άλλες δομικές μεταβολές που ενδέχεται να συμβούν στην μάζα των απορριμμάτων. Οι τρεις πιο συνηθισμένοι τύποι τέτοιων διόδων παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4.

Η διοχέτευση του μεθανίου μπορεί να γίνει ανεξέλεγκτα, αλλά αυτό περιέχει διάφορους κινδύνους που θα αναφέρουμε στην συνέχεια, ή ελεγχόμενα με την χρήση συλλεκτηρίου συστήματος, το οποίο απολήγει σε σύστημα συλλογής ή καυστήρα μεθανίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.

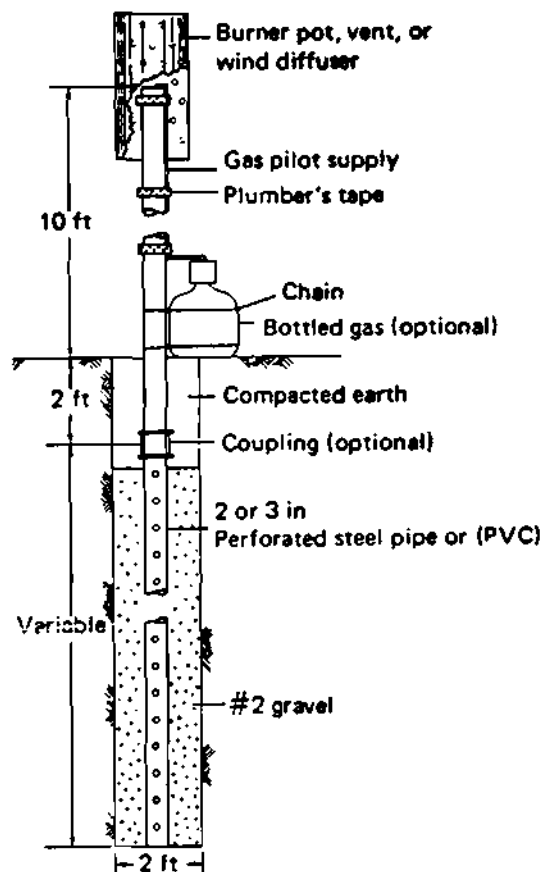


Σχήμα 3.4 Οι τρεις κυριότεροι τύποι διόδων απομάκρυνσης του

βιοαερίου στους χώρους απόθεσης (από Tchobanoglous et. al., 1977)

Τα κυριότερα περιβαλλοντικά προβλήματα από την ανεξέλεγκτη διοχέτευση μεθανίου, αλλά και των άλλων αερίων είναι:

- ▣ Εκρήξεις ή πυρκαγιές, οφειλόμενες στην συσσώρευση αερίων, σε περιορισμένους χώρους, όπως υπόνομοι, κτίρια, φρέατα, κ.τ.λ.
- ▣ Ασφυξία ανθρώπων που εισέρχονται στους παραπάνω χώρους.
- ▣ Επιζήμια αποτελέσματα στις καλλιέργειες ή την βλάστηση που καλύπτει τον χώρο απόθεσης, αλλά και την γύρω περιοχή
- ▣ Προβλήματα ενοχλήσεων κυρίως από τις οσμές.



Σχήμα 3.5 Γεωμετρική αναπαράσταση συστήματος συλλογής και καύσης του βιοαερίου στους χώρους απόθεσης (από Tchobanoglous et. al., 1977)

Το  $\text{CO}_2$  όπως προαναφέραμε είναι βαρύτερο από τον αέρα και

συσσωρεύεται στο κάτω μέρος του χώρου απόθεσης. Για την απομάκρυνση του χρησιμοποιούνται στραγγιστήρια συστήματα παρόμοια με αυτά της συλλογής των διασταλαζόντων υγρών, ενώ πολλές φορές χρειάζεται να γίνει η άντληση του με αντλίες κενού.

3.5 Μετανάστευση διασταλαζόντων υγρών και μόλυνση του υπόγειου νερού.

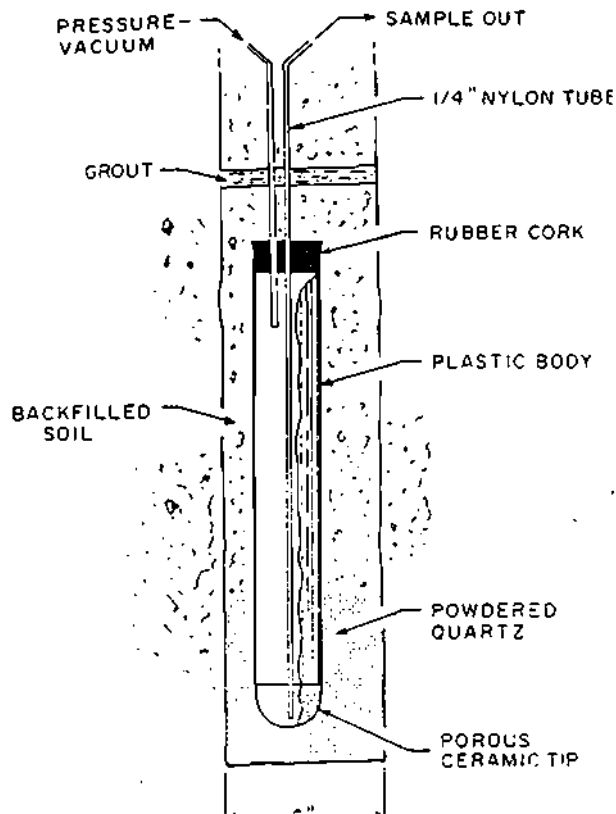
Όσο καλά κατασκευασμένος και αν είναι ένας χώρος απόθεσης, όσον αφορά την στεγανότητα (προδιαγραφές Χ.Υ.Τ.Α.), κάποιες ποσότητες των διασταλαζόντων υγρών διαφεύγουν και μεταγγίζονται στο υποκείμενο έδαφος. Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε τις φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα, από την στιγμή αυτή και μετά και την επίδραση της όλης διαδικασίας στην ποιότητα του υπόγειου νερού.

3.5.1 Τρόποι και συσκευές παρακολούθησης της μετανάστευσης του στραγγίσματος.

α) Ακόρεστη ζώνη.

Οι συσκευές παρακολούθησης στην ακόρεστη ζώνη είναι τα ισόμετρα απορρόφησης της εδαφικής υγρασίας, τα οποία πρέπει να τοποθετούνται κάτω από τον χώρο απόθεσης και σε διάφορα βάθη. Μια τυπική εικόνα σε τομή, ενός τέτοιου λυσιμέτρου φαίνεται στο σχήμα 3.6.

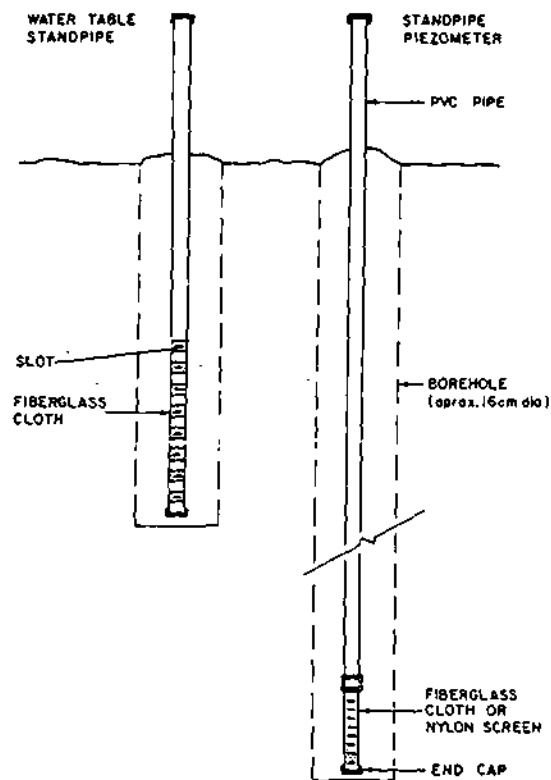




Σχήμα 3.6 Τομή του λυσιμέτρου απορρόφησης (από Parizek and Lane 1970)

Η συσκευή αυτή, η οποία μπορεί να συγκρατήσει μέχρι και ένα λίτρο νερό, αποτελείται από ένα πλαστικό κύλινδρο μήκους 60 cm και εύρους 5 cm, ο οποίος στο κάτω άκρο του καταλήγει σε ένα κεραμικό πορώδες υλικό μήκους 6 cm. Οι οπές του πορώδους αυτού υλικού είναι της τάξης του ενός μικρού (1  $\mu$ ) ή και μικρότερες, αλλά τα περισσότερα σωματίδια, μέχρι και κολλοειδούς μεγέθους, μπορούν να εισέλθουν. Το πάνω μέρος του σωλήνα φράσσεται από λαστιχένιο πώμα. Η όλη διάταξη τοποθετείται μέσα σε ένα κατακόρυφο άνοιγμα του εδάφους, το οποίο γεμίζεται μέχρι ενός σημείου με κονιοποιημένο χαλαζία και το υπόλοιπο με το ίδιο το έδαφος εκσκαφής. Από το λαστιχένιο πώμα εξέρχονται δύο σωλήνες μικρής διαμέτρου που χρησιμεύουν για την δημιουργία πίεσης και την εξαγωγή του δείγματος στην επιφάνεια.

## β) Κορεσμένη ζώνη.



Σχήμα 3.7 Γεωμετρική αναπαράσταση πιεζομέτρων(από Cherry et. al., 1982)

### /. Πιεζόμετρα.

Είναι σωλήνες από PVC που στο κάτω μέρος τους έχουν ένα τέμαχος ίσο περίπου με το πάχος του υδροφόρου, το οποίο αποτελείται από φίλτροσωλήνα της ίδιας διαμέτρου. Μπορούν να εγκατασταθούν σε ελευθέρους και αρτεσιανούς υδροφόρους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.

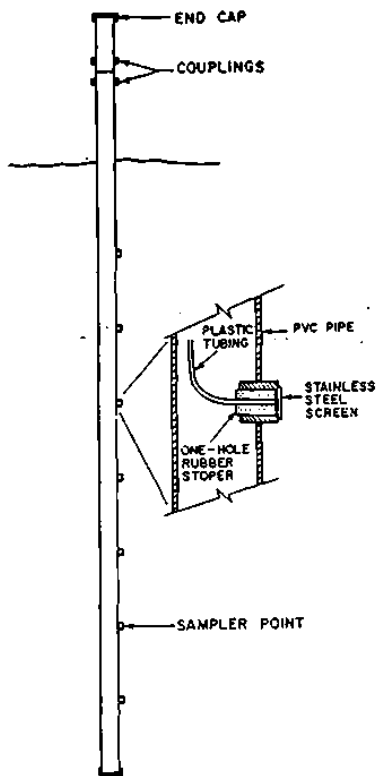
Χρησιμοποιούνται κυρίως για τον προσδιορισμό της στάθμης του υδροφόρου, ώστε να γίνει ορθολογικότερη τοποθέτηση των υπόλοιπων συσκευών παρακολούθησης και λιγότερο για την συλλογή δειγμάτων νερού. Ο κυριότερος λόγος για αυτό είναι ότι αδυνατούμε να διαχωρίσουμε δείγματα από διάφορα βάθη (λόγω της μείξης που συμβαίνει μέσα στο σωλήνα), στοιχείο που είναι απαραίτητο για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για την μετακίνηση του στραγγίσματος.

## 2. Σημειακοί δειγματολήπτες αναρρόφησης, πολλαπλών επιπέδων.

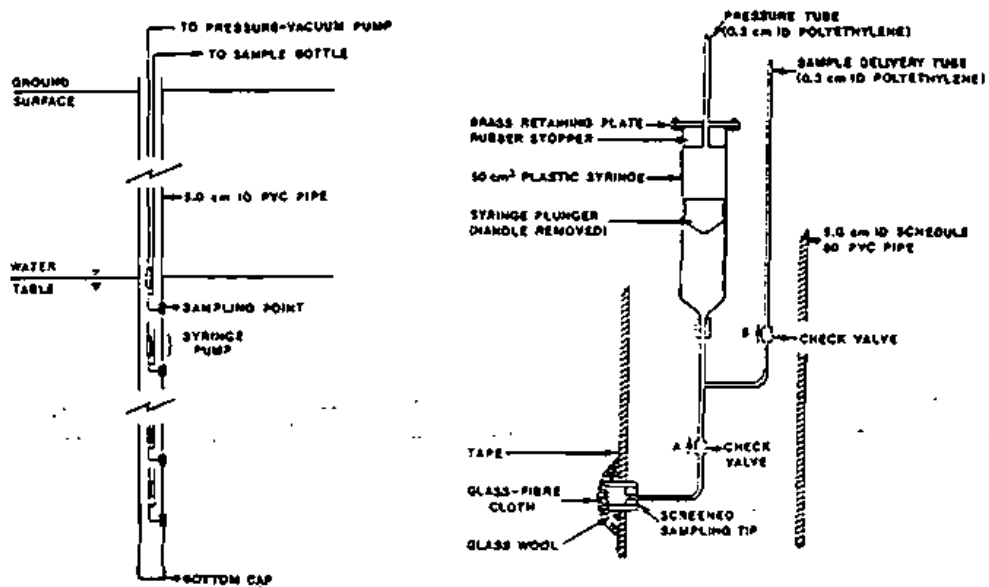
Μια σχηματική αναπαράσταση αυτής της συσκευής παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8. Η συσκευή αποτελείται από σωλήνες PVC διαμέτρου 0,3 cm, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι μέσα σε ένα μεγαλύτερο σωλήνα από PVC διαμέτρου 4,3 cm, ο οποίος είναι τοποθετημένος στην οπή μιας γεώτρησης η οποία στην συνέχεια έχει γεμίσει με χαλαζιακή άμμο. Κάθε ένας από τους μικρούς σωλήνες καταλήγει σε ένα σημείο δειγματοληψίας σε καθορισμένο βάθος, το οποίο προεξέχει ελαφρώς του μεγάλου σωλήνα. Οι συσκευές δειγματοληψίας αποτελούνται από ένα τέμαχος σωλήνα PVC μήκους 1,6 cm και διαμέτρου 2,1 cm, στο εξωτερικό άκρο του οποίου έχει τοποθετηθεί ένα κυκλικό κομμάτι ατσαλιού προσαρμοσμένο με λιώσιμο του PVC. Γύρω από τον μικρό σωλήνα που απολήγει στο σημείο δειγματοληψίας τοποθετούνται δύο λαστιχένια φίλτρα, τα οποία έχουν οπές μιας κατεύθυνσης, επιτρέπουν δηλαδή την είσοδο του νερού αλλά όχι την έξοδο. Το δείγμα ανεβαίνει στην επιφάνεια με την βοήθεια αντλίας κενού.

Με την συσκευή αυτή μπορούμε να παίρνουμε δείγματα από διακριτά βάθη, το μειονέκτημα όμως που παρουσιάζουν είναι ότι είναι δαπανηρά και απαιτούν πολύ χρόνο για την δειγματοληψία. Έχουν τον περιορισμό, ότι δεν μπορούν να εξάγουν δείγματα, από σημεία που βρίσκονται σε βάθος νερού μεγαλύτερο των 8-9 μέτρων.

Μια παραλλαγή αυτού του τύπου δειγματολήπτη είναι ο σημειακός δειγματολήπτης θετικής μετατόπισης, πολλαπλών επιπέδων, ο οποίος χρησιμοποιεί για κάθε σημείο δειγματοληψίας, μια συσκευή αναρρόφησης θετικής μετατόπισης (σύριγγα), η οποία σε συνδυασμό με μια αντλία στην επιφάνεια, χρησιμεύει για την εξαγωγή του δείγματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.9.



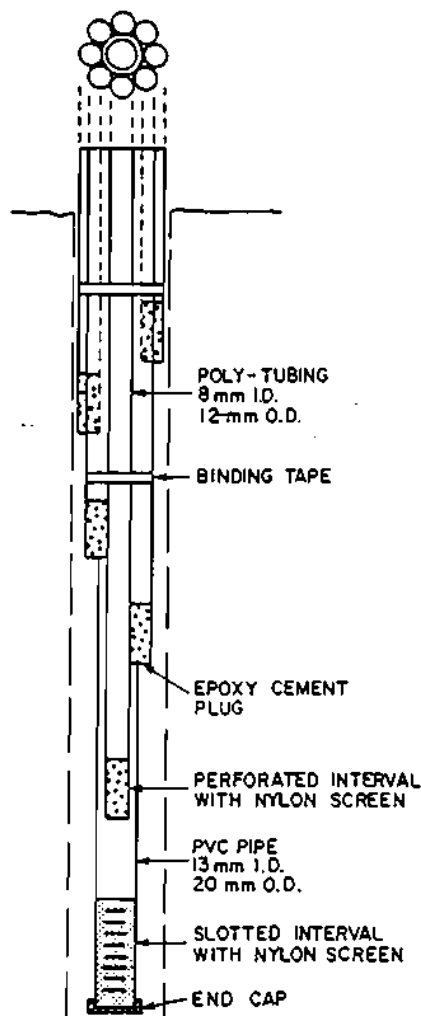
Σχήμα 3.8 Γεωμετρική αναπαράσταση σημειακού δειγματολήπτη αναρρόφησης, πολλαπλών επιπέδων, (από Cherry et. al., 1982)



Σχήμα 3.9. Γεωμετρική αναπαράσταση σημειακού δειγματολήπτη θετικής μετατόπισης, πολλαπλών επιπέδων, (από Cherry et. al., 1982)

### 3. Πιεζόμετρα δέσμης.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.10, πρόκειται για μια σειρά σωλήνων από PVC διαμέτρου 12 cm, οι οποίοι τοποθετούνται ομόκεντρα γύρω από ένα κεντρικό σωλήνα διαμέτρου 15 cm. Οι σωλήνες φτάνουν σε διαφορετικό βάθος ο καθένας και έχουν την δομή του πιεζόμετρου που περιγράψαμε παραπάνω. Το όλο σύστημα τοποθετείται στην οπή γεώτρησης ικανής διαμέτρου, η οποία στην συνέχεια γεμίζεται με χαλαζιακή άμμο. Για την εξαγωγή του δείγματος κάθε σωλήνας χωριστά συνδέεται με αντλία και το δείγμα ανεβαίνει με αναρρόφηση.



Σχήμα 3.10 Γεωμετρική αναπαράσταση πιεζόμετρου δέσμης. (από Cherry et. al., 1982)

3.5.2 Κυριότερες διαδικασίες που καθορίζουν την ποιότητα και τις συστασιακές μεταβολές του στραγγίσματος, αλλά και του υπόγειου νερού που γίνεται αποδέκτης του.

Όταν μια ποσότητα στραγγίσματος διαφύγει από το χώρο απόθεσης, μεταγγίζεται στο υποκείμενο έδαφος, αρχικά κινούμενο στην ακόρεστη ζώνη σχεδόν κατακόρυφα, από υψηλότερα προς χαμηλότερα δυναμικά εδαφικής υγρασίας, με μια διαδικασία γνωστή ως προώθηση εμβόλου ( η δεύτερη σταγόνα στραγγίσματος ωθεί την πρώτη προς τα κάτω αφού με την σειρά της ωθείται από την τρίτη κ.τ.λ.). Στην συνέχεια όταν το στράγγισμα εισέρχεται στην κορεσμένη ζώνη, δημιουργεί ένα θύσανο (plume) αυξημένων συγκεντρώσεων σε σχέση με τις τιμές του υδροφόρου, ο οποίος εξαπλώνεται κατά την διεύθυνση ροής όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11. Το σχήμα αυτό βέβαια αντιπροσωπεύει τα συνολικά διαλελυμένα στερεά, αφού κάθε στοιχείο του στραγγίσματος έχει διαφορετική κινητικότητα και επηρεάζεται από διαφορετικές διεργασίες. Στα σχήματα 3.12α έως και 3.12ρ, φαίνονται οι θύσανοι εξάπλωσης για κάθε στοιχείο χωριστά, όπως μετρήθηκαν από τους Cherry et.al. (1982), για ένα χώρο απόθεσης ο οποίος βρισκόταν πάνω από πολύ μικρή ακόρεστη ζώνη.

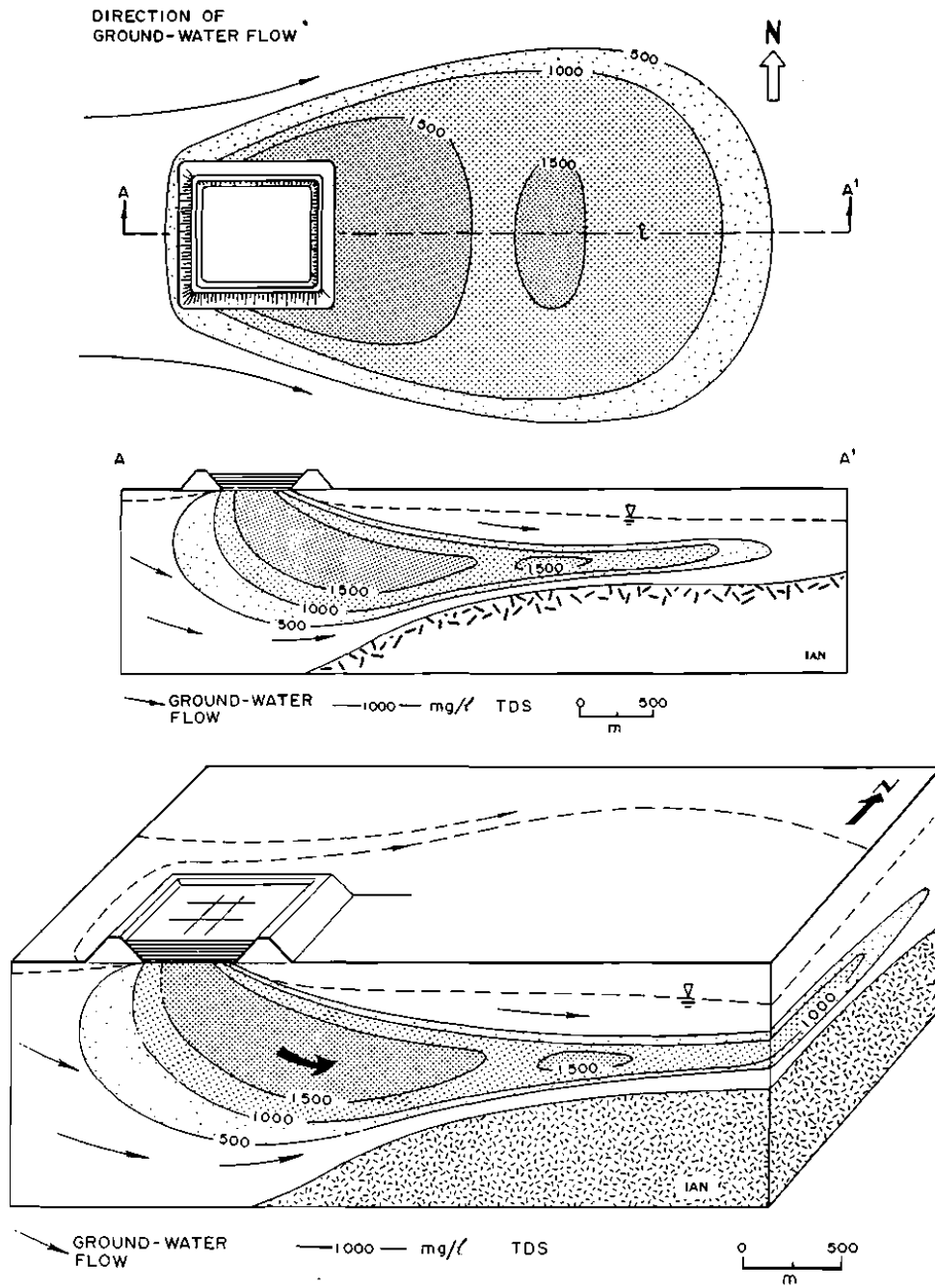
Οι διεργασίες που επηρεάζουν τις κατανομές αυτές των στοιχείων είναι κυρίως οι εξής:

1. Διάχυση
2. Υδροδυναμική διασπορά
3. Κατιοανταλλαγή (περιλαμβάνει και τις διαδικασίες προσρόφησης απορρόφησης)
4. Διάλυση και απόθεση των ανθρακικών ορυκτών και σουλφιδίων
5. Η επίδραση των επιστρώσεων μεταλλικών οξειδίων στους κόκκους
6. Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις]

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε εκτενέστερα σε κάθε μια από τις διεργασίες αυτές, στο ποια στοιχεία επηρεάζουν και με πιο τρόπο.

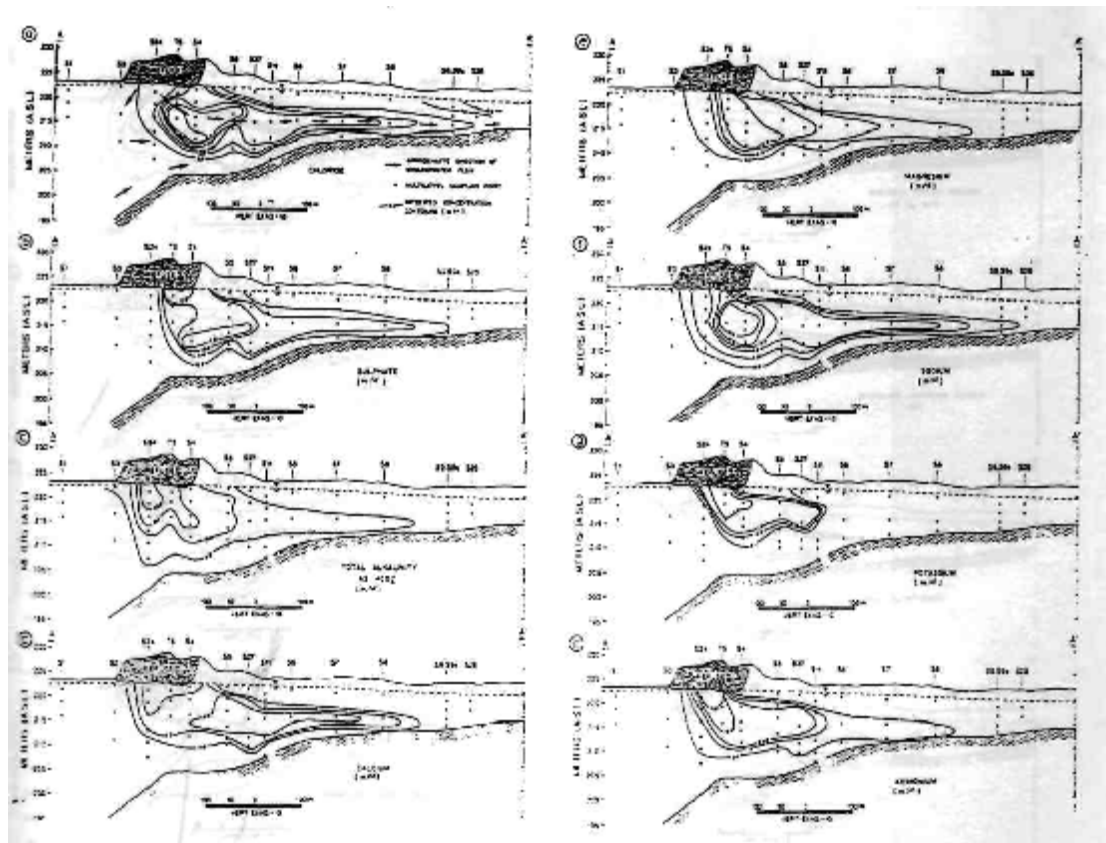
### 1. Διάχυση

Ως διάχυση ορίζεται η κίνηση ιοντικών ή μοριακών στοιχείων και ενώσεων σε ένα διάλυμα, προς την κατεύθυνση της μείωσης της συγκέντρωσης τους. Η διάχυση είναι μια διαδικασία η οποία τελειώνει όταν το διάλυμα έχει πλήρως ομογενοποιηθεί, είναι όμως μια πολύ αργή διαδικασία και έχει δευτερεύουσα σημασία στα πορώδη μέσα. σε σχέση με την υδροδυναμική διασπορά. Σε περιπτώσεις όμως αργίων και άλλων υλικών, όπου η κίνηση του υπόγειου νερού είναι πολύ αργή, παίζει ένα σημαντικό ρόλο.

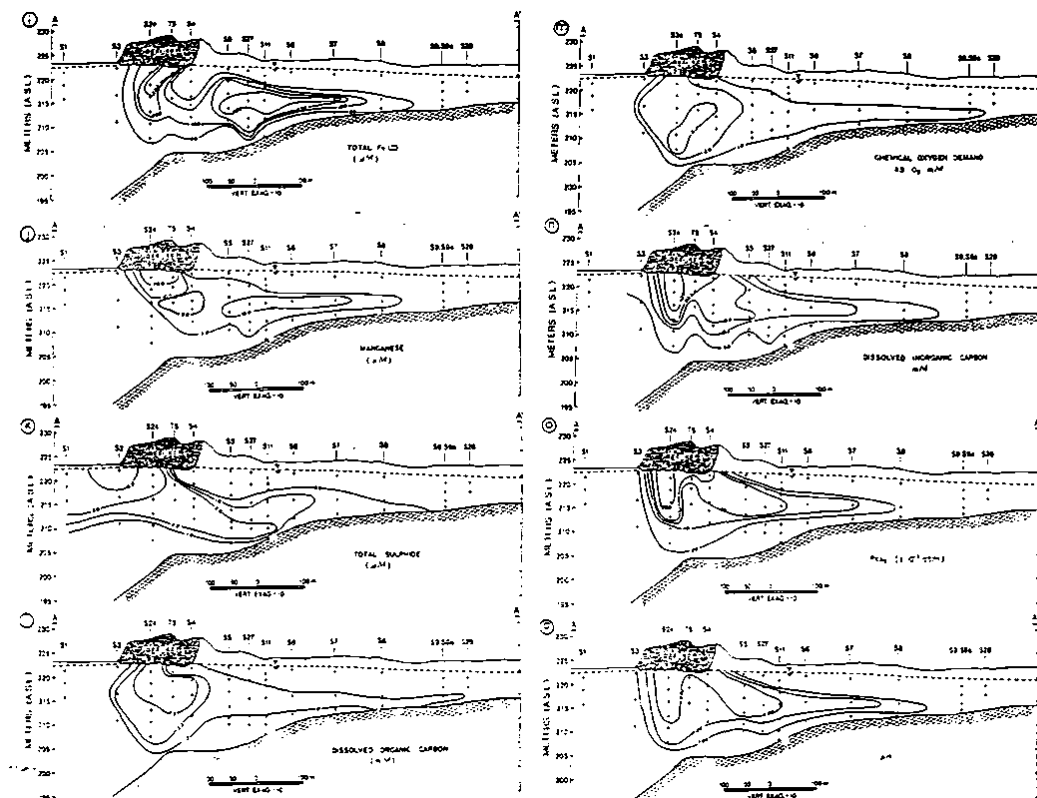


Σχήμα 3.11 Γεωμετρική αναπαράσταση της εξάπλωσης του θυσάνου μόλυνσης κάτω από τους χώρους απόθεσης, (από Watson and Burnett, 1993)





Σχήμα 3.12a-h Γεωμετρική αναπαράσταση της εξάπλωσης του θυσάνου μόλυνσης, για τα διάφορα στοιχεία του στραγγίσματος κάτω από τους χώρους απόθεσης, (από Cherry et. al., 1982)



Σχήμα 3.12i-p Γεωμετρική αναπαράσταση της εξάπλωσης του θυσάνου μόλυνσης, για τα διάφορα στοιχεία του στραγγίσματος κάτω από τους χώρους απόθεσης, (από Cherry et. al., 1982)

Η μάζα της διαχυόμενης ουσίας που περνάει μέσα από μια δεδομένη διατομή λόγω διάχυσης, είναι συνάρτηση του δυναμικού συγκέντρωσης και παρέχεται από την ακόλουθη εξίσωση, γνωστή και ως πρώτος νόμος του Fick:

$$F = -D \frac{dC}{dx}$$

όπου  $F$  = μάζα ουσίας ανά μονάδα κα χρόνου.

= επιφάνεια 1

$D$

= συντελεστής

$dC$

$x$  = διάχυση = δυναμικό

Οι συντελεστές  $D$  είναι γνωστοί για τις περισσότερες διαλυτές

ουσίες και εξαρτώνται από την θερμοκρασία. Οι τιμές τους για τα περισσότερα στοιχεία που συναντάμε στο στράγγισμα είναι από  $1 \times 10^{-9}$  έως  $2 \times 10^{-9}$ . Οι συντελεστές αυτοί ισχύουν για διαλύματα σε ανοιχτούς αγωγούς και δοχεία. Όταν έχουμε να κάνουμε με πορώδη μέσα, όπου λόγω της παρουσίας των κόκκων, οι ουσίες αναγκάζονται να διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις, οι συντελεστές  $D$  χρειάζονται διόρθωση, η οποία παρέχεται από τον τύπο:

$$D^* = \omega \cdot D \quad (3.5)$$

όπου  $\omega$  = συντελεστής που προσδιορίζεται πειραματικά πάντοτε μικρότερος της μονάδας, συνήθως από 0,5 έως 0.01

Αν συνδυάσουμε τον πρώτο νόμο του Fick με την αρχή της συνέχειας, μπορούμε να καταλήξουμε σε μια διαφορική εξίσωση, που συνδέει την συγκέντρωση της διαχυόμενης ουσίας με την απόσταση και τον χρόνο. Για μία διάσταση, η εξίσωση αυτή, γνωστή και ως δεύτερος νόμος του Fick, είναι:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.6)$$

Οι συντελεστές  $D$  είναι γνωστοί για τις περισσότερες διαλυτές ουσίες και εξαρτώνται από την θερμοκρασία. Οι τιμές τους για τα περισσότερα στοιχεία που συναντάμε στο στράγγισμα είναι από  $1 \times 10^{-9}$  έως  $2 \times 10^{-9}$ . Οι συντελεστές αυτοί ισχύουν για διαλύματα σε ανοιχτούς αγωγούς και δοχεία. Όταν έχουμε να κάνουμε με πορώδη μέσα, όπου λόγω της παρουσίας των κόκκων, οι ουσίες αναγκάζονται να διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις, οι συντελεστές  $D$  χρειάζονται διόρθωση, η οποία παρέχεται από τον τύπο:

$$D^* = \omega \cdot D \quad (3.5)$$

όπου  $\omega$  = συντελεστής που προσδιορίζεται πειραματικά πάντοτε μικρότερος της μονάδας, συνήθως από 0,5 έως 0.01

Αν συνδυάσουμε τον πρώτο νόμο του Fick με την αρχή της συνέχειας, μπορούμε να καταλήξουμε σε μια διαφορική εξίσωση, που συνδέει την συγκέντρωση της διαχυόμενης ουσίας με την απόσταση και τον χρόνο. Για μία διάσταση, η εξίσωση αυτή, γνωστή και ως δεύτερος νόμος του Fick, είναι:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.6)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι σε ένα σημείο ενός πορώδους μέσου έχουμε σταθερή παροχή μιας ουσίας με συγκέντρωση  $C_0$ , τότε η συγκέντρωση αυτής της ουσίας σε απόσταση  $x$  και μετά από χρονικό διάστημα  $t$  σύμφωνα με την εξίσωση 3.6, θα παρέχεται από τον τύπο:

$$C(x, t) = C_0 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2} \cdot \sqrt{D^* \cdot t}\right) \quad (3.7)$$

όπου  $\operatorname{erfc}$  = συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος, χαρακτηριστικές τιμές της οποίας παρουσιάζονται στο σχήμα 3.13.

## 2. Υδροδυναμική διασπορά

Πρόκειται για την φυσική διεργασία, κατά την οποία μια ουσία που περιέχεται στο υπόγειο νερό, διασπείρεται στο χώρο λόγω της κίνησης του νερού προς χαμηλότερα δυναμικά ροής. Εάν έχουμε να κάνουμε με μία ουσία, η συγκέντρωση της οποίας δεν επηρεάζεται από χημικές και βιοχημικές διεργασίες, τότε η διαφορική εξίσωση που συνδέει την συγκέντρωση μιας ουσίας με τον χρόνο και την απόσταση, για μία διάσταση και για σταθερή ομοιόμορφη ροή νερού δίνεται από τον τύπο:

$$D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{U}_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.8)$$

όπου  $\bar{U}_x$  = μέση ταχύτητα του υπόγειου νερού κατά την διεύθυνση x

C = συγκέντρωση ουσίας

x = απόσταση

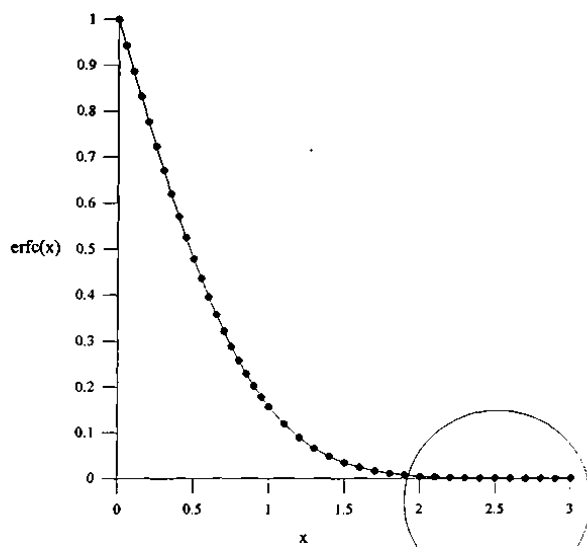
t = χρόνος

$D_x$  = συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς

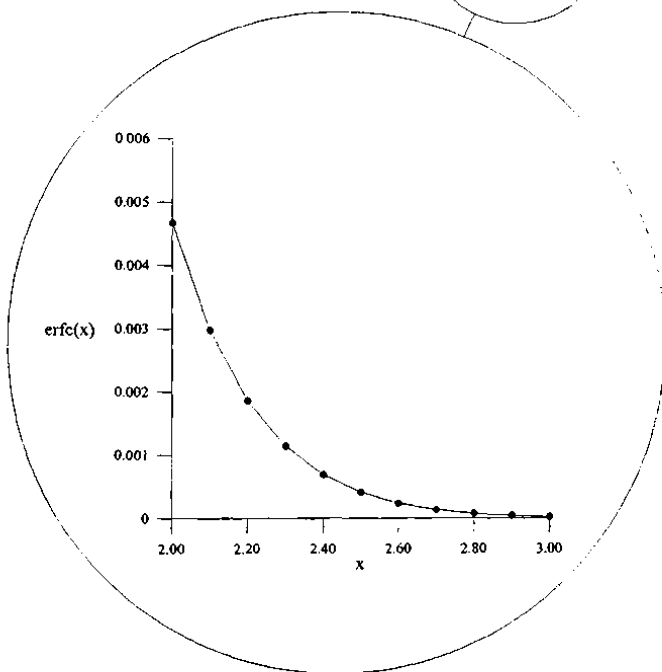
Ο συντελεστής  $D_x$  παρέχεται από την σχέση:

$$D_x = \alpha_x \cdot \bar{U}_x + D^* \quad (3.9)$$

όπου  $\alpha_x$  = χαρακτηριστική ιδιότητα των πορωδών μέσων γνωστή ως ικανότητα διασποράς (Dispersionity), η οποία έχει διαστάσεις μήκους και προσδιορίζεται πειραματικά.  $D^*$  = συντελεστής διάχυσης για πορώδη μέσα.



x	erfc(x)
0	1
0,05	0,943628
0,1	0,887537
0,15	0,832004
0,2	0,777297
0,25	0,723674
0,3	0,671373
0,35	0,620618
0,4	0,571608
0,45	0,524518
0,5	0,4795
0,55	0,436677
0,6	0,396144
0,65	0,357971
0,7	0,322199
0,75	0,288844
0,8	0,257899
0,85	0,229332
0,9	0,203092
0,95	0,179109
1	0,157299
1,1	0,119795
1,2	0,089686
1,3	0,065992
1,4	0,047715
1,5	0,033895
1,6	0,023652
1,7	0,01621
1,8	0,010909
1,9	0,00721
2	0,004678
2,1	0,002979
2,2	0,001863
2,3	0,001143
2,4	0,000689
2,5	0,000407
2,6	0,000236
2,7	0,000134
2,8	0,000075
2,9	0,000041
3	0,000022



Σχήμα 3.13 Αντιπροσωπευτικές τιμές για την συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος.

Η επίλυση της εξίσωσης 3.8 είναι μια ιδιαίτερα περίπλοκη διαδικασία, η οποία για να είναι εφικτή είναι απαραίτητες κάποιες παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές εκφράζονται από σχέσεις που συνδέουν την συγκέντρωση  $C$ , με κάποιες ακραίες τιμές των  $x$  και  $t$ , γνωστές και

ως συνοριακές συνθήκες. Έτσι εάν θεωρήσουμε ότι:

$$C(x, 0) = 0 \quad x \geq 0 \quad (3.10)$$

$$C(0, t) = C_0 \quad t \geq 0 \quad (3.11)$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t \geq 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x - \bar{U}_x \cdot t}{2\sqrt{D_x \cdot t}} \right) + \exp \left( \frac{\bar{U}_x \cdot x}{D_x} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x + \bar{U}_x \cdot t}{2\sqrt{D_x \cdot t}} \right) \right] \quad (3.13)$$

όπου  $\operatorname{erfc}$  = συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος.

Η υδροδυναμική διασπορά είναι η κυρίαρχη διαδικασία διασποράς των χημικών ουσιών στα πορώδη μέσα, όπως οι υδροφόροι. Σε συνηθισμένες συνθήκες ροής, είναι αυτή που κυρίως καθορίζει το σχήμα και την εξάπλωση του θυσάνου μόλυνσης. Ένας επιπλέον λόγος βέβαια είναι και η αυξανόμενη χημική ισχύς του παραγόμενου στραγγίσματος.

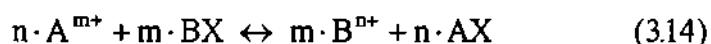
Εάν θελήσουμε να απομονώσουμε την επίδραση της υδροδυναμικής διασποράς από τις υπόλοιπες διεργασίες, αρκεί να μελετήσουμε την συμπεριφορά του  $C I$ , που είναι αποδεδειγμένο ότι είναι ένα αδρανές, έναντι των υπολοίπων διεργασιών, στοιχείο. Επίσης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους λόγους συγκεντρώσεων των κυριότερων στοιχείων προς το χλώριο, για να εντοπίσουμε σε ποια σημεία και σε ποιες χρονικές στιγμές έχουμε την επίδραση κάποιας από τις υπόλοιπες διεργασίες.

### 3. Κατιοανταλλαγή

Με τον όρο κατιοανταλλαγή εννοούμε την διαδικασία κατά την οποία, κάποια κατιόντα διαλυμένα στο νερό, αντικαθιστούν κάποια άλλα κατιόντα, με παρόμοια ιοντική ακτίνα και σθένος, στο κρυσταλλικό πλέγμα κάποιων ορυκτών του υδροφόρου στρώματος.

Η διαδικασία αυτή ποσοτικοποιείται με την χρήση ενός μεγέθους, γνωστού ως ικανότητα κατιοανταλλαγής ( $C E C$ ), το οποίο χαρακτηρίζει

την ικανότητα των ορυκτών ή των συγκεντρώσεων ορυκτών (εδάφη, πετρώματα) να ανταλλάσσουν ιόντα με το υπόγειο νερό καθώς και με την χρήση των σταθερών ισορροπίας των χημικών εξισώσεων που εκφράζουν την κατιοανταλλαγή, γνωστών και ως συντελεστών εκλεκτικότητας (selectivity coefficient). Εάν για παράδειγμα θεωρήσουμε δυο τυχαία κατιόντα A και B και με X συμβολίσουμε την στερεά φάση, τότε η αντίδραση της κατιοανταλλαγής περιγράφεται από την εξίσωση:



όπου m, n = σθένη των στοιχείων A και B

Ο συντελεστής εκλεκτικότητας για την αντίδραση αυτή περιγράφεται από την εξίσωση:

$$K = \frac{[B]^m \cdot [AX]^n}{[A]^n \cdot [BX]^m} \quad (3.15)$$

όπου [A] = ενεργότητα της ουσίας A

Όλα τα ορυκτά μπορούν να πάρουν την θέση του X στην παραπάνω εξίσωση. Βέβαια όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια του εδαφικού σχηματισμού, που δομείται από κάποιο ορυκτό ή ομάδα ορυκτών, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ικανότητα για κατιοανταλλαγή. Οπως είναι λοιπόν αναμενόμενο, οι σχηματισμοί που δομούνται από αργιλικά ορυκτά έχουν και την μεγαλύτερη ικανότητα για κατιοανταλλαγή. Στον πίνακα 3.7 αναφέρονται οι τιμές του συντελεστή CEC για τα κυριότερα αργιλικά ορυκτά.



Πίνακας 3.4 Η ικανότητα για κατιοανταλλαγή των κυριότερων αργιλικών και αργιλικού ικνέθους: ποιητών (από A n n e l o e l. a L 19931

Ορυκτό	CEC, meq/100g
Καολινίτης	3-15
Αλλουσίτης	5-10
Μοντοριλονίτης	80-120
Βερμικουλίτης	100-200
Γλαυκονίτης	5-40
Ιλλίτης	20-50
Χλωρίτης	10-40
Αλλοφανής	>100
Γκετίτης και Αιματίτης	>100
Οργανικό υλικό (C)	150-400 (για pH=8)

Εκτός από το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος, στον σχηματισμό μεγάλη σημασία έχει και η παρουσία του οργανικού υλικού, το οποίο δημιουργεί περιβλήματα γύρω από τους κόκκους και αυξάνει την προσροφητική τους ικανότητα. Λαμβάνοντας υπ' όψη την παρατήρηση αυτή οι B r e e u w s m a e t. a l. (1986), δημιούργησαν μια εμπειρική σχέση για τον προσδιορισμό του C E C ενός σχηματισμού, σε σχέση με το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος και το ποσοστό του οργανικού υλικού:

$$CEC(\text{meq} / 100\text{g}) = 0,7 \cdot (\% \text{ \u03b1ργιλος}) + 3,5 \cdot (\% C) \quad (3.16)$$

Όπως είναι γνωστό στους περισσότερους γεωλογικούς σχηματισμούς (ιδιαίτερα στην χώρα μας), έχουμε την έντονη παρουσία ορυκτών του  $\text{Ca}^{+2}$  όπως ο Α σ β ε σ τ ί τ η ς. Στα διασταλάζοντα υγρά έχουμε σε διάλυση υψηλές συγκεντρώσεις σε κατιόντα όπως  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ . Ο συνδυασμός των παραπάνω δεδομένων, ευνοεί την ανταλλαγή των ενδιάλυση κατιόντων του στραγγίσματος με το ασβέστιο των σχηματισμών. Έτσι είναι συνηθισμένο φαινόμενο κατά την μετανάστευση του στραγγίσματος, να έχουμε μείωση στην συγκέντρωση των στοιχείων

αυτών στο νερό και αύξηση της συγκέντρωσης του ασβεστίου.

Το φαινόμενο της κατιοανταλλαγής μπορούμε να το εισάγουμε στην εξίσωση της υδροδυναμικής διασποράς με την προσθήκη ενός παραπάνω όρου που αντιπροσωπεύει την μεταβολή στην συγκέντρωση του στοιχείου λόγω της κατιοανταλλαγής. Πιο συγκεκριμένα η εξίσωση 3.8 παίρνει την μορφή:

$$D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{U}_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\rho_b}{n} \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.17)$$

όπου  $\rho_b$  = φαινόμενη πυκνότητα του πορώδους μέσου.

$n$  = πορώδες

$S$  = μάζα του χημικού συστατικού που έχει απορροφηθεί από την στερεά φάση ανά μονάδα μάζας του στερεού.

Η ποσότητα  $S$  είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης  $C$  και ισχύει:

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.18)$$

Είναι επίσης συνάρτηση του συντελεστή εκλεκτικότητας  $K$ , σύμφωνα με την σκέψη:

4. Διάλυση και καθίζηση ανθρακικών ορυκτών και σουλφιδίων.

Λόγω των μεγάλων συγκεντρώσεων  $Ca^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$  και ενώσεων του θείου, καθώς και των έντονα αναγωγικών συνθηκών μέσα και κάτω από τον χώρο απόθεσης, το διάλυμα καθίσταται κορεσμένο στα στοιχεία αυτά. Κατά την μετανάστευση του στραγγίσματος έχουμε την καθίζηση κάποιων ανθρακικών ορυκτών κυρίως Ασβεστίτη και Σιδερίτη, καθώς και κάποιων σουλφιδίων όπως  $FeS$  και  $ZnS$  που συνεισφέρουν, ανάλογα και με τις συνθήκες, σημαντικά στην μείωση της συγκέντρωσης των στοιχείων  $S^{+2}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Zn^{+2}$  και άλλων.

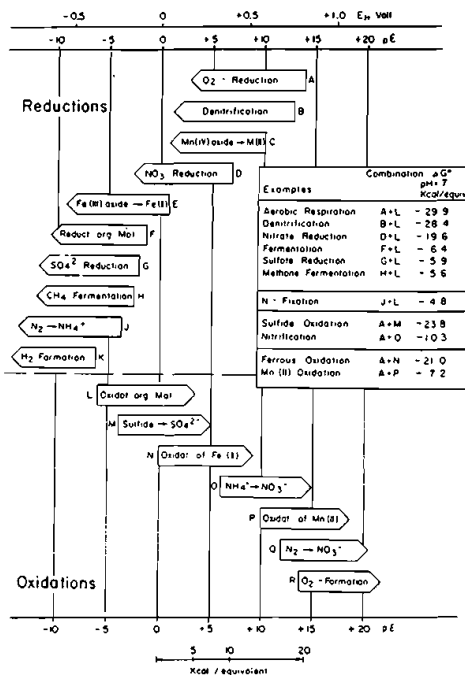
5. Η επίδραση των επιστρώσεων μεταλλικών οξειδίων στους κόκκους.

Κάτω από τις αναγωγικές συνθήκες που επικρατούν κοντά στον χώρο απόθεσης, τα οξείδια κυρίως του  $Fe^{+2}$  και του  $Mn^{+2}$ , δημιουργούν

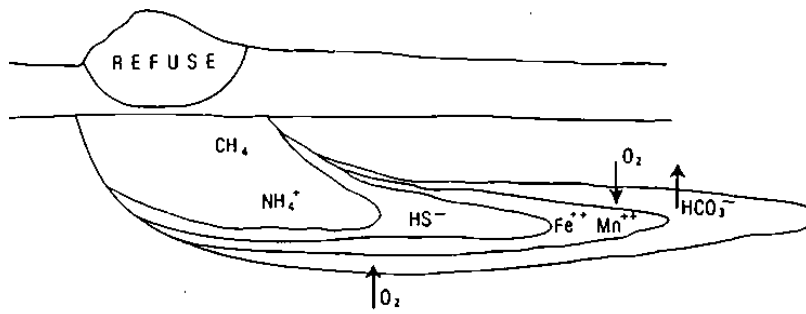
περιβλήματα γύρω από τους κόκκους κυρίως της άμμου. Όταν μετά την πάροδο κάποιου χρόνου, οι συνθήκες αλλάξουν σε πιο οξειδοτικές σε συνδυασμό με μεταβολές του pH, τα περιβλήματα αυτά διαλύονται, ελευθερώνοντας στο διάλυμα ιόντα  $Fe^{+2}$  και  $Mn^{+2}$  αλλά και πολλών βαρέων μετάλλων τα οποία συμπαρασύρονται και καθιζάνουν μαζί με τα οξείδια των  $Fe^{+2}$  και  $Mn^{+2}$ , κατά το πρώτο στάδιο της διαδικασίας.

6. Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις.

Οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, παίζουν σπουδαίο ρόλο, τόσο στην παραγωγή όσο και στην συμπεριφορά του στραγγίσματος κατά την μετανάστευση του στο υπόγειο νερό. Οι αντιδράσεις αυτές έχουν άμεση σχέση με την μικροβιολογική αποικοδόμηση του οργανικού υλικού. Η χρησιμοποίηση του  $O_2$  ως δέκτη ηλεκτρονίων κατά την οξείδωση του οργανικού υλικού, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του δυναμικού οξειδοαναγωγής πριν την εισαγωγή του στραγγίσματος στην ζώνη του υπόγειου νερού. Η μετανάστευση του στραγγίσματος με την παράλληλη προσθήκη οξυγόνου, οδηγεί σε μια σταδιακή

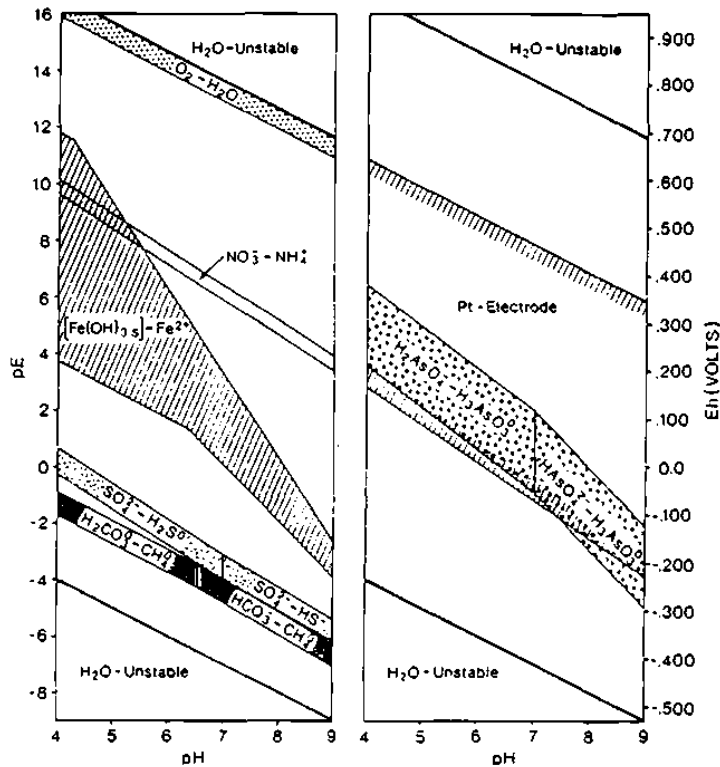


Σχημα 3.14 Η πορεία των κυριότερων οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων, (1981)



Σχήμα 3.15 Η δημιουργία οξειδοαναγωγικής ζώνωσης κάτω από τους χώρους απόθεσης (από Baedeker and Back, 1979)

πορεία αντιδράσεων, η σειρά των οποίων καθορίζεται από το μοντέλο των Stumm and Morgan (1970), που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.14 και η οποία δημιουργεί μια οξειδοαναγωγική ζώνωση στο θύσανο του στραγγίσματος όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15. Η εκτίμηση του δυναμικού οξειδοαναγωγής στα φυσικά ή μολυσμένα νερά είναι μια δύσκολη υπόθεση και γίνεται με δύο κυρίως τρόπους. Η πρώτη και πιο απλή διαδικασία είναι η απευθείας μέτρηση του ηλεκτροχημικού δυναμικού του διαλύματος, με ζεύγος ηλεκτροδίων πλατίνας, η οποία βέβαια πρέπει να γίνεται επί τόπου και με μέριμνα το διάλυμα να διατηρείται στις φυσικές του συνθήκες, αφού και μια μυχή προσθήκη οξυγόνου μπορεί να αλλάξει δραματικά το αποτέλεσμα.



Σχήμα 3.16 Διάγραμμα Eh-pH για τα ζεύγη που συνήθως χρησιμοποιούμε στον προσδιορισμό του δυναμικού οξειδοαναγωγής (από Cherry et. al., 1982)

Η δεύτερη διαδικασία χρησιμοποιεί τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις ισορροπίας κάποιου ζεύγους από ένα οξειδούμενο και ένα αναγόμενο συστατικό, οι συγκεντρώσεις των οποίων μετρούνται στο διάλυμα και με την βοήθεια της εξίσωσης του Nerst, μας δίνουν το δυναμικό οξειδοαναγωγής. Τα ζεύγη που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:  $O_2 - H_2O$ ,  $Fe^{+3} - Fe^{+2}$ ,  $Fe(OH)_3(s) - Fe^{+2}$ ,  $Fe(OH)_3(s) - FeCO_3(s)$ ,  $As(V) - As(III)$ ,  $SO_4^{+2} - HS^-$  και  $NO_3^- - NH_4^+$ . Το ότι χρησιμοποιούμε αυτά τα ζεύγη οφείλεται στο γεγονός ότι η οξειδοαναγωγική τους συμπεριφορά έχει μελετηθεί εκτενώς και έχει εκφραστεί με διαγράμματα Eh-pH όπως αυτά του σχήματος 3.16 και γιατί καλύπτουν όλο σχεδόν το εύρος των αναμενόμενων τιμών του δυναμικού οξειδοαναγωγής.

### 3.6 Τελική αποκατάσταση ενός χώρου απόθεσης.

Όταν ένας χώρος απόθεσης έχει κατασκευαστεί με τις προδιαγραφές ενός Χ.Υ.Τ.Α, μετά το πέρας των εργασιών απόθεσης και την τοποθέτηση της τελικής επικάλυψης, πρέπει να αποκατασταθεί με την διαμόρφωση ενός τελικού συμβατού με την περιοχή ανάγλυφου και προαιρετικά με φυτοκάλυψη και αισθητική διαμόρφωση του τοπίου.

Η αποκατάσταση των χώρων διάθεσης είναι ο καλύτερος τρόπος για να αποκατασταθεί η κλονισμένη εμπιστοσύνη του κοινού, για τους χώρους αυτούς. Η μελέτη αποκατάστασης του χώρου πρέπει να αποτελεί ένα μέρος του ολοκληρωμένου σχεδιασμού της λειτουργίας του χώρου διάθεσης και να ικανοποιεί τις περιβαλλοντικές ανάγκες της εκάστοτε περιοχής. Η εκπόνηση της μελέτης αποκατάστασης απαιτεί την συνεργασία διαφόρων ειδικοτήτων επιστημόνων όπως εδαφομηχανικού, υδραυλικού μηχανικού, υδρογεωλόγου, αρχιτέκτονα τοπίου, γεωπόνου και ειδικών κατασκευαστών.

Το σχέδιο αποκατάστασης που θα προδιαγράψει μια χρήση ή χρήσεις, για τον αποκατεστημένο χώρο διάθεσης, θα πρέπει να είναι εύκαμπτο διότι κατά την διάρκεια ζωής ενός τέτοιου χώρου, που μπορεί να ξεπερνάει τα 20 χρόνια, οι συνθήκες και οι απαιτήσεις αλλάζουν δραματικά. Στον πίνακα 3.5 γίνονται συγκρίσεις μεταξύ των προβλημάτων που παρουσιάζονται, κατά την επιλογή μιας χρήσης για τον αποκατεστημένο χώρο διάθεσης.

Πίνακας 3.5 Συγκριτικός πίνακας προβλημάτων αποκατάστασης (από Roberts et al. 1985)

Χρήση μετά την αποκατάσταση του χώρου διάθεσης									
Προβλήματα Βιομνία	Διαμον	Ελαφριά	Καλλιέργεια	Βοσκή	Σπορ έκταση	αναφυγή φύση	Δάσος	Δημόσια	Αγρια ή
Καθίζηση	11	1	3	12	4	4	4		
Διασταλάζοντα υγρά	12	1	2	2	3	3	2	4	
Αέρια	12	1	2	13	2	3	4		
Μόλυνση υπόγειου	13	1	2	3	3	3	3	3	νερού
Παράσυρση ελαφρών	12	1	2	12	4	2	4	4	απορριμμάτων
Ανάπτυξη φυτών	14	1	2	2	4	3	3	4	
Αντοχή εδάφους	14	2	3	13	4	2	4		
Προφίλ εδάφους	14	1	4	2	4	4	4	4	
Σύνολο βαθμών	8	22	9	20	13	24	27	23	31

## BIBΛIOΓPAΦIA

- Ø Anderson, D., 'Does Landfill Leachate Make Clay Liners More Permeable', Civil Eng, ASCE September 1982, pp 66-69
- Ø Barber, M. J., and Back, W., 1979 'Hydrogeological processes and chemical reactions at a landfill, Groundwater 17, pp 429-437.
- Ø Coats, H. R., 'Seepage, Drainage and Flow Nets', Wiley, New York, 1977.
- Ø Cherry, J. T., (ed), 1983. 'Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study', Special issue J. Hydrol., pp 1389
- Ø Eliason, R., 1986. 'Refuse collection and disposal, in R.W. Alcott (ed)', American Civil Engineering Practice, Wiley, New York, 1986.
- Ø Farquhar, G. L., and Roves, F. T., 1973. 'Gas production during refuse decomposition', Water Air Soil Pollut, 2, pp 483-493
- Ø Fawcett, R. N., and Hughes, G. M., 1969 'Sanitary landfill design', Industrial Water Engineering vol. 6, No 8 pp 26-28
- Ø Grim, R. E., 'Clay Mineralogy', 2nd ed, McGraw Hill, New York, 1968
- Ø Munnick, J., 1985. "Geotechnical Site Report". ~~UNIVERSITY OF CALIFORNIA, RIVERSIDE~~
- Ø Munnick, J., Evans, J., Munnick, B., 1990 "Engineering Geology of the Riverside Landfill". ~~UNIVERSITY OF CALIFORNIA, RIVERSIDE~~ ~~107-108~~ ~~109-108~~
- Ø Kay, W. B., 'Construction of Lining for Reservoirs, Tanks, and



Pollution Control Facilities",

- Ø Kumar, J., and Jaldika J. O., "Selecting and Installing Synthetic Pond Lining", Chem. Eng, February 5, 1973, p 67.
- Ø Moxley, B., 1991. "Synthetic Linings" *Water Pollution Control*, pp 157
- Ø Mitchell, J. K., "Fundamentals of Soil Behavior", Wiley, New York, 1976.
- Ø Paizek, R. R., and Lane, C. W., 1970 "Soil-water sampling using pan and deep pressure vacuum lysimeters", Jour. Hydrol. 11, pp 1-21
- Ø Peyton, R. L., Schroeder, P. R., 1990 "Evaluation of landfill-liner designs", Journal of Environmental Engineering vol 116, No 3, pp 421-437
- Ø Rouse, C., 1986. "Environmental Pollution Control" *Water Pollution Control*, pp 157
- Ø Stump W., and Morgan, J. J., 1981. "Aquatic chemistry", 2nd ed John Wiley and Sons, New York, pp 780
- Ø Zaoui, A. E., 1972. "Ground water pollution and sanitary landfills -A critical review", Groundwater, vol. 10 No 1, pp 3-16