

. Γεωτεχνικές έρευνες υπεδάφους

6.1 Γενικά

Γεωτεχνικές έρευνες του εδάφους και του υπόγειου νερού εκτελούνται στα ακόλουθα αντικείμενα της Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής:

1. Κατά τη διερεύνηση για τον εντοπισμό κατάλληλων θέσεων προκειμένου να δημιουργηθούν νέοι χώροι απόθεσης αποβλήτων ή να επεκταθούν ήδη λειτουργούντες.
2. Κατά το σχεδιασμό συστημάτων προστασίας από τη ρύπανση ή περιορισμού της περαιτέρω επέκτασης της ρύπανσης.
3. Κατά τη διερεύνηση της πιθανής ρύπανσης εδαφών και υδροφορέων , δηλαδή προκειμένου να προσδιορισθεί η έκταση και το μέγεθος της ρύπανσης.
4. Κατά το σχεδιασμό μέτρων περιβαλλοντικής αποκατάστασης περιοχών που έχουν ρυπανθεί (απορρύπανση, επαναχρησιμοποίηση κλπ).
5. Κατά το σχεδιασμό συστημάτων παρακολούθησης της συμπεριφοράς έργων προστασίας από τη ρύπανση (π.χ. έλεγχος διαφυγών από ταμιευτήρες υγρών αποβλήτων ή χώρους απόθεσης στερεών αποβλήτων).

Στις περιπτώσεις (1) και (2), οι γεωτεχνικές έρευνες εκτελούνται με το συνήθη τρόπο (δηλαδή χωρίς ιδιαίτερα μέτρα προστασίας), επειδή, κατά τεκμήριο, τα εδάφη που διερευνώνται δεν έχουν ρυπανθεί. Αντίθετα, κατά την εκτέλεση των γεωτεχνικών ερευνών στις περιπτώσεις (3), (4) και (5) θα πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερα μέτρα προστασίας και ασφάλειας για να αποφευχθούν τυχόν δυσμενείς συνέπειες από την έκθεση του προσωπικού σε επικίνδυνες ουσίες ή γενικότερα από διαφυγές ρύπων προς το περιβάλλον.

Στο Κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται κατ' αρχήν οι γεωτεχνικές έρευνες και δοκιμές που συνήθως χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση γεω-περιβαλλοντικών θεμάτων και στη συνέχεια περιγράφονται τα ειδικά μέτρα προστασίας και ασφάλειας που απαιτούνται κατά τις γεωτεχνικές έρευνες σε περιοχές που έχουν ρυπανθεί.

6.2 Συνήθεις γεωτεχνικές έρευνες

Κατά τη διερεύνηση γεωτεχνικών θεμάτων μεγάλης σημασίας ή μεγάλης έκτασης, οι γεωτεχνικές έρευνες εκτελούνται συνήθως σε τρεις φάσεις: κατά την αναγνώριση, την προκαταρκτική έρευνα και τη λεπτομερή έρευνα. Οι φάσεις αυτές συνήθως συναρτώνται με τα αντίστοιχα στάδια εκπόνησης των μελετών (προκαταρκτική μελέτη, προμελέτη και οριστική μελέτη).

Η φάση της γεωτεχνικής αναγνώρισης συνήθως περιλαμβάνει τη συγκέντρωση και αξιολόγηση των διαθέσιμων τοπογραφικών δεδομένων, γεωλογικών στοιχείων, αεροφωτογραφιών, στοιχείων από προηγούμενες γεωτεχνικές έρευνες στην ευρύτερη περιοχή και επιτόπου επισκέψεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις κατά τη φάση της αναγνώρισης εκτελούνται και γεωφυσικές

διασκοπήσεις. Σκοπός των γεωτεχνικών ερευνών κατά τη φάση της αναγνώρισης είναι:

- (α) Ο εντοπισμός πιθανών προβλημάτων που θα πρέπει να διερευνηθούν κατά τις επόμενες φάσεις των ερευνών.
- (β) Η σύνταξη του προγράμματος των γεωτεχνικών ερευνών της επόμενης φάσης (συνήθως προκαταρκτική έρευνα).

Η έκταση της προκαταρκτικής γεωτεχνικής έρευνας εξαρτάται από το είδος του έργου και τα αποτελέσματα της αναγνώρισης. Η προκαταρκτική έρευνα συνήθως περιλαμβάνει τη διάνοιξη ερευνητικών φρεάτων, την εκτέλεση περιορισμένου αριθμού γεωτρήσεων και την εκτέλεση κάποιων εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής ή/και βραχομηχανικής. Σε ορισμένες περιπτώσεις κατά την προκαταρκτική έρευνα εκτελούνται και γεωφυσικές διασκοπήσεις. Σκοπός της προκαταρκτικής έρευνας είναι η διαπίστωση της εδαφικής στρωματογραφίας (είδος και πάχος των εδαφικών στρώσεων), των υδραυλικών συνθηκών (στάθμες και δίαυτοι του υπογείου ορίζοντα) και των φυσικών, μηχανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων των εδαφικών στρώσεων σε βαθμό λεπτομέρειας ανάλογο της σημασίας και της έκτασης του έργου. Όσον αφορά τον ελάχιστο αριθμό των γεωτρήσεων που θα πρέπει να εκτελούνται κατά τη φάση της προκαταρκτικής έρευνας σε διάφορα έργα περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος, συνιστώνται ενδεικτικά τα εξής (NJDEP, 1984):

1. Έρευνα για χώρους διάθεσης στερεών αποβλήτων:

ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ		
Έκταση (στρέμματα)	Αριθμός γεωτρήσεων	
	Σύνολο	Βαθείες γεωτρήσεις
< 40	4	1
40 - 200	8	2
200 - 400	14	4
400 - 800	20	5
> 800	24 + 1*	6 + 1*

* μια γεώτρηση για κάθε 40 στρέμματα πλέον των 800 στρεμμάτων

2. Ταμειυτήρες υγρών αποβλήτων:

Γεωτρήσεις κατά μήκος του περιμετρικού αναχώματος σε αποστάσεις 30-100 m, αναλόγως της έκτασης του έργου και των εδαφικών συνθηκών. Πρόσθετες γεωτρήσεις σε θέσεις τεχνικών έργων (έργα εισόδου, υπερχειλίσης κλπ).

3. Διαφράγματα στεγάνωσης και απομόνωσης:

Γεωτρήσεις σε αποστάσεις 100-150 m κατά μήκος του διαφράγματος αναλόγως του είδους του έργου και των εδαφικών συνθηκών.

Η έκταση και το είδος της λεπτομερούς έρευνας εξαρτώνται από το είδος του έργου και τις εδαφικές συνθήκες. Συστάσεις σχετικά με τις συνιστώμενες έρευνες δίνονται στα NAVFAC (1982) και ASCE (1976).

Οι γεωτεχνικές έρευνες διακρίνονται σε *επιτόπου έρευνες* που εκτελούνται στο ύπαιθρο και σε *εργαστηριακές δοκιμές* που εκτελούνται στο εργαστήριο σε εδαφικά δείγματα που λαμβάνονται κατά τις επιτόπου έρευνες.

6.2.1 Επιτόπου έρευνες

Οι επιτόπου έρευνες περιλαμβάνουν τις γεωφυσικές έρευνες, τη διάνοιξη ερευνητικών φρεάτων, τη διάνοιξη γεωτρήσεων και την εκτέλεση επιτόπου δοκιμών.

6.2.1.1 Γεωφυσικές έρευνες

Οι γεωφυσικές έρευνες εκτελούνται για τη διερεύνηση μεγάλων εκτάσεων ταχέως και με μικρό κόστος, με σκοπό τον προσδιορισμό της κατά προσέγγιση στρωματογραφίας. Οι μέθοδοι βασίζονται στον εντοπισμό της διεπιφάνειας μεταξύ επάλληλων εδαφικών στρώσεων με σημαντική διαφορά ιδιοτήτων και αύξηση των τιμών των μηχανικών παραμέτρων με το βάθος. Κατά συνέπεια, οι γεωφυσικές μέθοδοι δεν δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα στις περιπτώσεις που συμβαίνουν συχνές εναλλαγές εδαφικών στρώσεων με το βάθος, στις περιπτώσεις που οι ιδιότητες μεταξύ των γειτονικών στρώσεων δεν διαφέρουν σημαντικά (και συνεπώς δεν υπάρχει διακριτή επιφάνεια) καθώς και στις περιπτώσεις που μια στρώση με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες υπέρκειται μιας στρώσης με υποδεέστερες ιδιότητες. Οι γεωφυσικές έρευνες απαιτούν και τη διάνοιξη ενός αριθμού γεωτρήσεων για τη βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων τους. Χαρακτηριστική περίπτωση βέλτιστης απόδοσης των γεωφυσικών μεθόδων είναι ο εντοπισμός της θέσης του βραχώδους υποβάθρου (π.χ. ασβεστολίθου) σε περίπτωση που οι στρώσεις που υπέρκεινται του υποβάθρου αποτελούνται από μαλακές αργίλους ή χαλαρές άμμους. Αντίθετα, οι γεωφυσικές μέθοδοι γενικώς δεν δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα στην περίπτωση εναλλασσόμενων στρώσεων αποσαθρωμένων και υγιών βραχωδών σχηματισμών ή στην περίπτωση που οι σχηματισμοί που υπέρκεινται του βραχώδους υποβάθρου είναι συνεκτικά κορήματα, σκληρές άργιλοι, μάργες κλπ.

Οι κυριότερες γεωφυσικές μέθοδοι είναι:

- (α) Σεισμικές μέθοδοι όπως: η μέθοδος της διάθλασης (refraction), της ανάκλασης υψηλής ευκρίνειας (high resolution reflection) και οι μέθοδοι που εκτελούνται εντός γεωτρήσεων (uphole, downhole, crosshole).
- (β) Ηλεκτρικές μέθοδοι όπως η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- (γ) Άλλες μέθοδοι όπως μαγνητικές μέθοδοι, μέθοδοι βαρύτητας κλπ.

6.2.1.2 Τα ερευνητικά φρέατα

Τα ερευνητικά φρέατα εκσκάπτονται με συνήθη μηχανικά μέσα και συνήθως φθάνουν σε βάθος 4-5 μέτρων. Συνήθως χρησιμοποιούνται κατά τις έρευνες για εντοπισμό θέσεων δανειοθαλάμων ή για τη λήψη εδαφικών δειγμάτων μεγάλου όγκου ή πολύ καλής ποιότητας.

6.2.1.3 Οι γεωτρήσεις

Οι γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση του υπεδάφους σε βάθη μεγαλύτερα από τα βάθη που διερευνώνται με ερευνητικά φρέατα. Για τη διάνοιξη των γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται οι εξής μέθοδοι:

- (α) Η ελικοειδής διάτρηση (hollow-stem continuous flight auger). Η μέθοδος συνίσταται στην προώθηση μέσω περιστροφής ενός κοίλου σωλήνα με ελικοειδές σπείρωμα στην εξωτερική πλευρά. Διαταραγμένα εδαφικά δείγματα λαμβάνονται από το υλικό που εισέρχεται στο εσωτερικό του σωλήνα αλλά και το υλικό που συγκρατείται στις σπείρες του τοιχώματος.
- (β) Η υδραυλική διάτρηση (wash-type boring), κατά την οποία η προώθηση της γεώτρησης γίνεται μέσω ενός μεταλλικού στελέχους με την εισπίεση νερού που παρασύρει τα εδαφικά τεμάχια προς την επιφάνεια. Η μέθοδος είναι ταχεία και έχει μικρό κόστος. Το κύριο μειονέκτημά της είναι η αδυναμία λήψεως αντιπροσωπευτικών εδαφικών δειγμάτων. Κυρίως χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που απλώς ζητείται να εντοπισθεί η θέση του βραχώδους υποβάθρου που υπόκειται χαλαρών εδαφικών σχηματισμών.

- (γ) Η κρουστική διάτρηση (percussion drilling, shell and auger, cable tool, churn drilling), κατά την οποία η προώθηση της γεώτρησης γίνεται με θρυμματισμό των πετρωμάτων στον πυθμένα της οπής μέσω κρούσης. Η έξοδος των εδαφικών τεμαχίων από την οπή γίνεται συνήθως με την κυκλοφορία νερού που παρασύρει τα εδαφικά θραύσματα. Κατά τη μέθοδο αυτή λαμβάνονται μόνον διαταραγμένα εδαφικά δείγματα.
- (δ) Η περιστροφική διάτρηση (rotary drilling) κατά την οποία η προχώρηση της οπής γίνεται με την περιστροφή της γεωτρητικής στήλης η οποία στο άκρο της φέρει ειδική κοπτική κεφαλή. Η κοπτική κεφαλή μπορεί να είναι συμπαγής (π.χ. “τρίφτερο”) ή κοίλη (κορώνα). Η ψύξη της κοπτικής κεφαλής γίνεται με νερό το οποίο κατά την κυκλοφορία του παρασύρει τα εδαφικά θραύσματα. Στην περίπτωση της χρήσης κοίλης κοπτικής κεφαλής, συνήθως η διάτρηση συνδυάζεται με ταυτόχρονη δειγματοληψία με την τοποθέτηση κατάλληλου δειγματολήπτη μεταξύ της κοπτικής κεφαλής και της διατρητικής στήλης. Η περιστροφική διάτρηση είναι η συνηθέστερη μέθοδος εκτέλεσης γεωτρήσεων στην Ελλάδα.

Κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων συνήθως γίνεται και εδαφική δειγματοληψία μέσω κατάλληλων δειγματοληπτών (samplers). Οι τύποι των δειγματοληπτών που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:

- (α) Ο διαιρετός δειγματολήπτης (split barrel) που συνδυάζεται με την εκτέλεση της επιτόπου δοκιμής Πρότυπης Διείσδυσης (Standard Penetration Test - SPT). Ο δειγματολήπτης αυτός έχει εσωτερική διάμετρο 1.375 ιντσών (35 mm) και μήκος 45-75 cm. Τα εδαφικά δείγματα που λαμβάνονται είναι διαταραγμένα λόγω της κρουστικής μεθόδου προώθησης που συνδέεται με την εκτέλεση της δοκιμής SPT. Χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία εδαφικών υλικών.
- (β) Οι δειγματολήπτες με ελικοειδές σπείρωμα (hollow stem auger). Η εσωτερική διάμετρος του δειγματολήπτη είναι συνήθως 3-4 ίντσες (75-100 mm). Η προχώρηση του δειγματολήπτη γίνεται μέσω περιστροφής και το δείγμα που λαμβάνεται είναι διαταραγμένο. Χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία εδαφικών υλικών.
- (γ) Οι δειγματολήπτες λεπτού τοιχώματος τύπου Shelby, Osterberg (υδραυλικού εμβόλου), Denison και σταθερού εμβόλου (stationary piston). Οι δειγματολήπτες αυτοί προωθούνται με πίεση και χρησιμοποιούνται για τη λήψη αδιατάρακτων δειγμάτων σε σχετικώς μαλακά/χαλαρά εδαφικά υλικά. Η εσωτερική διάμετρος των δειγματοληπτών αυτών είναι 2.875 - 3.875 ίντσες (73-100 mm) και το μήκος τους συνήθως 30 ίντσες (75 cm).
- (δ) Οι δειγματολήπτες σκληρών πετρωμάτων (καροταρίες) που χρησιμοποιούνται για τη δειγματοληψία σκληρών εδαφών και βράχων κατά την περιστροφική προώθηση της γεώτρησης. Οι καροταρίες είναι τριών τύπων: απλού τοιχώματος (single tube), διπλού τοιχώματος (double tube) και τριπλού τοιχώματος (triple tube). Οι καροταρίες διπλού και τριπλού τοιχώματος χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση δειγμάτων καλύτερης ποιότητας (αδιατάρακτων), επειδή το εδαφικό δείγμα δεν επηρεάζεται από το νερό που χρησιμοποιείται για την ψύξη της κοπτικής κεφαλής κατά τη διάνοιξη της γεώτρησης. Συχνά εδαφικά δείγματα ανακτώνται με την απλή καροταρία με χρήση της λεγόμενης “μεθόδου φραγμού”. Κατά τη μέθοδο αυτή η καροταρία προωθείται (με περιστροφή) χωρίς την κυκλοφορία νερού για την ψύξη της κοπτικής κεφαλής, με συνέπεια το εδαφικό δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό. Όμως, λόγω της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, το δείγμα ξηραίνεται και συνεπώς δεν μπορεί να θεωρηθεί ως αδιατάρακτο.

6.2.1.4 Επιτόπου δοκιμές

Οι κυριότερες επιτόπου δοκιμές που χρησιμοποιούνται κατά τις γεωτεχνικές έρευνες εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών είναι:

(α) *Η δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης* (Standard Penetration Test - SPT)

Η δοκιμή συνίσταται στην προώθηση του διαιρετού δειγματολήπτη Terzaghi με κρουστική μέθοδο (πτώση βάρους 140 λιβρών από ύψος 30 ιντσών) και την καταγραφή του αριθμού (N) των κρούσεων που απαιτούνται για την προώθηση του δειγματολήπτη κατά 12 ίντσες (30 cm). Κατά την εκτέλεση της δοκιμής λαμβάνεται και διαταραγμένο εδαφικό δείγμα στο εσωτερικό του διαιρετού δειγματολήπτη. Η εκτέλεση της δοκιμής περιγράφεται στην προδιαγραφή ASTM D 1586. Η δοκιμή συνήθως εκτελείται σε τακτά διαστήματα προώθησης της γεώτρησης (π.χ. ανά 1.50 - 2.00 μέτρα βάθους) και έτσι προκύπτει διάγραμμα της κατανομής του αριθμού κρούσεων N με το βάθος. Η δοκιμή SPT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της σχετικής πυκνότητας των αμμωδών εδαφών και της συνεκτικότητας (αντοχής) των αργιλικών εδαφών. Η χρησιμοποίηση της δοκιμής σε υλικά απορριμμάτων συνήθως δίνει αποτελέσματα με ευρύτατη διασπορά (που οφείλεται στην τυχαία σύνθεση των απορριμμάτων) και συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της πυκνότητάς των.

(β) *Η δοκιμή Διείσδυσης Κώνου* (Cone Penetration Test - CPT)

Η δοκιμή συνίσταται στη συνεχή προχώρηση εντός του εδάφους ενός μεταλλικού στελέχους με κωνική αιχμή (κώνος γωνίας 60°) εμβαδού 10 cm² με ταχύτητα 1-2 cm/sec. Κατά την προχώρηση του στελέχους μετράται η αντίσταση στη διείσδυση της αιχμής και η πλευρική τριβή σε τμήμα της πλευρικής επιφάνειας του μεταλλικού στελέχους. Η εκτέλεση της δοκιμής περιγράφεται λεπτομερώς στην προδιαγραφή ASTM D3441. Από τις μετρούμενες τιμές της αντοχής αιχμής (q_c) και της πλευρικής τριβής (f_s) μπορούν να συναχθούν συμπεράσματα για το είδος και τη μηχανική αντοχή των εδαφικών σχηματισμών που συναντώνται κατά τη διείσδυση του κώνου. Η δοκιμή δεν επιτρέπει τη λήψη εδαφικών δειγμάτων. Σε ορισμένες διατάξεις της δοκιμής κώνου, εκτός από τα μεγέθη q_c και f_c μετράται και η πίεση πόρων στην περιοχή της αιχμής του κώνου.

(γ) *Η δοκιμή Πρεσιόμετρου* (Pressuremeter test)

Η δοκιμή συνίσταται στην πλευρική διόγκωση ενός κυλινδρικού στοιχείου το οποίο τοποθετείται στο εσωτερικό της γεώτρησης και αρχικά έχει διάμετρο ίση με τη διάμετρο της οπής της γεώτρησης. Κατά τη δοκιμή μετράται η διόγκωση που προκαλείται από μια συγκεκριμένη αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του κυλινδρικού στοιχείου. Από τις μετρούμενες τιμές της πίεσης και της αντίστοιχης διόγκωσης μπορούν να συναχθούν συμπεράσματα για το μέτρο ελαστικότητας και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους.

(δ) *Η δοκιμή Πτερυγίου* (Field Vane test)

Η δοκιμή συνίσταται στην τοποθέτηση εντός του εδάφους (π.χ. στον πυθμένα της οπής μιας γεώτρησης) ενός μεταλλικού στοιχείου που αποτελείται από δυο κατακόρυφα μεταλλικά ελάσματα κάθετα μεταξύ τους. Τα ελάσματα συνδέονται με κατακόρυφο μεταλλικό στέλεχος το οποίο φθάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και μπορεί να περιστραφεί με ειδικό μηχανισμό. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής (που περιγράφεται στην προδιαγραφή ASTM D2573) περιστρέφεται το μεταλλικό στέλεχος με τα μεταλλικά ελάσματα και μετράται η ροπή που απαιτείται για την περιστροφή. Από τα δεδομένα αυτά μπορούν να συναχθούν συμπεράσματα για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού.

(ε) *Η δοκιμή φόρτισης πλάκας*

Κατά τη δοκιμή αυτή φορτίζεται με κατακόρυφο φορτίο μια μεταλλική πλάκα (διαμέτρου 30 cm) που τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους και μετράται η υποχώρηση που αντιστοιχεί σε κάθε βαθμίδα της φόρτισης. Η δοκιμή περιγράφεται στην προδιαγραφή ASTM D1194. Από τη δοκιμή μπορούν να συναχθούν συμπεράσματα για το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ακριβώς κάτω από την πλάκα. Το κυριότερο μειονέκτημα της δοκιμής είναι ότι το βάθος επιρροής (δηλαδή το πάχος του εδαφικού στρώματος που επηρεάζεται από τη δοκιμή) είναι μικρό με συνέπεια οι μετρούμενες ιδιότητες να αντιπροσωπεύουν μια μικρή εδαφική στρώση πάχους της τάξεως των 50 cm κάτω από την πλάκα. Η εκτέλεση της δοκιμής σε μεγαλύτερα βάθη δεν είναι ευχερής λόγω των απαιτούμενων εκσκαφών.

(στ) *Μέτρηση της στάθμης του υπογείου ορίζοντα*

Η μέτρηση της στάθμης του υπογείου ορίζοντα γίνεται με όργανα που ονομάζονται πιεζόμετρα. Τα όργανα αυτά συνήθως είναι τεσσάρων τύπων:

1. Τα κοινά πιεζόμετρα ή πιεζόμετρα ανοικτού σωλήνα (stand-pipe piezometers) τα οποία αποτελούνται από ένα κατακόρυφο σωλήνα που διαθέτει οπές στο κατώτερο τμήμα του. Το νερό εισέρχεται στο σωλήνα και δημιουργεί στάθμη η οποία μετράται με κατάλληλη βολίδα. Από την παρατηρούμενη στάθμη υπολογίζεται η υδατική πίεση στην περιοχή μέτρησης του σωλήνα.
2. Τα πιεζόμετρα κεραμικής κεφαλής (ceramic tip piezometers), τα οποία αποτελούνται από μια κεραμική κεφαλή που επιτρέπει την είσοδο του νερού αλλά όχι και του αέρα. Η κεραμική κεφαλή που τοποθετείται στον πυθμένα μιας γεώτρησης συνδέεται με την επιφάνεια του εδάφους με δυο λεπτούς πλαστικούς σωλήνες μέσω των οποίων μετράται η υδατική πίεση στη στάθμη της κεραμικής κεφαλής.
3. Τα πιεζόμετρα με διεπιφάνεια αέρα-νερού (air-actuated piezometers). Τα πιεζόμετρα αυτά έχουν επίσης μια κεραμική κεφαλή εντός της οποίας υπάρχει μια ελαστική μεμβράνη. Η μεμβράνη πιέζεται από τη μια πλευρά από πεπιεσμένο αέρα και από την άλλη από το υπόγειο νερό. Η πίεση του αέρα ρυθμίζεται από την επιφάνεια μέχρις ότου γίνει ίση με την πίεση του υπογείου νερού. Με τον τρόπο αυτό μετράται η πίεση του υπογείου νερού.
4. Τα ηλεκτρικά πιεζόμετρα (electrical piezometers). Τα πιεζόμετρα αυτά περιέχουν μια εύκαμπτη μεταλλική μεμβράνη της οποίας η παραμόρφωση μετράται με ηλεκτρικούς μετρητές (strain gauges). Η πίεση του υπογείου νερού ασκείται στη μεταλλική μεμβράνη η οποία παραμορφώνεται και το ηλεκτρικό σήμα που καταγράφεται λόγω της παραμόρφωσης της μεμβράνης επιτρέπει τον υπολογισμό της πίεσης του υπογείου νερού.

(ζ) *Μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας*

Η μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους συνήθως γίνεται με τις δοκιμές εισπίεσεως. Οι δοκιμές αυτές βασίζονται στην εισπίεση νερού στο εσωτερικό μιας γεώτρησης και τη μέτρηση των διαφυγών (απωλειών) που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη πίεση ή, ισοδύναμα, στη μέτρηση της πίεσης που αντιστοιχεί σε ορισμένες διαφυγές. Υπάρχουν τριών τύπων δοκιμές εισπίεσεως:

1. Η δοκιμή τύπου Lugeon, κατά την οποία γίνεται εισπίεση μέχρι 1 MPa και μετρώνται οι διαφυγές.
2. Η δοκιμή τύπου Maag, κατά την οποία η γεώτρηση πληρούται με νερό και στη συνέχεια η στάθμη του νερού αφήνεται να πέφτει λόγω των διαφυγών και μετράται ο ρυθμός πτώσης της στάθμης.

3. Η δοκιμή τύπου Lefranc, κατά την οποία η οπή της γεώτρησης διατηρείται πλήρης με νερό και μετράται η παροχή τροφοδοσίας που είναι απαραίτητη για τη διατήρηση σταθερής στάθμης.

Η αξιολόγηση των ανωτέρω μετρήσεων επιτρέπει την εκτίμηση του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους.

Η μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους μπορεί να γίνει και με δοκιμαστικές αντλήσεις. Κατά τις δοκιμές αυτές αντλείται μια γεώτρηση με ορισμένη παροχή και μετράται η επιτυγχανόμενη ταπείνωση της στάθμης στην ίδια τη γεώτρηση και σε δορυφορικά πιεζόμετρα που κατασκευάζονται σε διάφορες αποστάσεις από την αντλούμενη γεώτρηση. Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει τις μεθόδους εκτίμησης των υδραυλικών χαρακτηριστικών των εδαφών μέσω δοκιμαστικών αντλήσεων.

6.2.2 Εργαστηριακές δοκιμές

Οι εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής που εκτελούνται κατά τις συνήθειες γεωτεχνικές έρευνες είναι:

1. Δοκιμές κατατάξεως
 - 1.1 Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα
 - 1.2 Κοκκομετρική ανάλυση με υγρόμετρο
 - 1.3 Προσδιορισμός ορίων Atterberg
 - 1.4 Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας
 - 1.5 Προσδιορισμός φαινομένου βάρους εδάφους
 - 1.6 Προσδιορισμός ειδικού βάρους κόκκων
 - 1.7 Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε οργανικά
2. Δοκιμές συμπτκνωσιμότητας
 - 2.1 Προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης και μέγιστης ξηρής πυκνότητας (δοκιμή Proctor)
 - 2.2 Δοκιμή CBR
3. Δοκιμές συμπιεστότητας
 - 3.1 Δοκιμή συμπίεσομέτρου
4. Δοκιμές μηχανικής αντοχής
 - 4.1 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης
 - 4.2 Διαφόρων τύπων τριαξονικές δοκιμές
 - 4.3 Απλή διάτμηση
 - 4.4 Απευθείας διάτμηση
 - 4.5 Δακτυλιοειδής διάτμηση
5. Δοκιμές διαπερατότητας
 - 5.1 Δοκιμή σταθερού φορτίου
 - 5.2 Δοκιμή μειούμενου φορτίου

Οι ανωτέρω δοκιμές περιγράφονται αναλυτικά στις προδιαγραφές ASTM (American Society for Testing Materials). Για ορισμένες από τις δοκιμές αυτές υπάρχουν και αντίστοιχες Ελληνικές Προδιαγραφές.

Οι εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής που εκτελούνται κατά τις συνήθειες γεωτεχνικές έρευνες είναι:

1. Δοκιμές κατατάξεως
 - 1.1 Προσδιορισμός ειδικού βάρους και πυκνότητας
 - 1.2 Προσδιορισμός υδραπορροφητικότητας
2. Δοκιμές μηχανικής αντοχής
 - 2.1 Δοκιμή μοναξονικής θλίψης (uniaxial compression)
 - 2.2 Δοκιμή σημειακής φόρτισης (point load)

- 2.3 Δοκιμή θλίψης κατά γενέτειρα (Brazilian test)
- 3. Δοκιμές καταλληλότητας αδρανών υλικών
 - 3.1 Δοκιμή υγείας
 - 3.2 Δοκιμή αντοχής σε φθορά και κρούση (Los Angeles test)
 - 3.3 Δοκιμή ευθρυπτότητας (slake durability test)

6.3 Ειδικές γεωτεχνικές έρευνες

Σε περιοχές που έχουν ρυπανθεί ή υπάρχει υποψία ότι μπορεί να έχουν ρυπανθεί από απόβλητα που πιθανώς είναι επικίνδυνα ή τοξικά, πρέπει να εκτελούνται πέραν των συνήθων ερευνών και άλλες (ειδικές) γεωτεχνικές έρευνες για τον εντοπισμό και τον ποσοτικό προσδιορισμό της ρύπανσης.

Σύμφωνα με το σχετικό Βρετανικό Προκαταρκτικό Κανονισμό DD175 (1988), σκοπός των γεωτεχνικών ερευνών σε περιοχές που πιθανόν να έχουν ρυπανθεί είναι:

- (1) Να προσδιορισθούν οι πιθανοί κίνδυνοι για τους εργαζόμενους των υπό κατασκευήν έργων, τους μελλοντικούς κατοίκους των έργων αλλά και για το περιβάλλον της περιοχής γενικότερα.
- (2) Να προσδιορισθεί ο βαθμός ρύπανσης του εδάφους και των υπογείων υδάτων, και συνεπώς να αποφασισθεί αν απαιτείται η λήψη άμεσων μέτρων επέμβασης (π.χ. μέτρων απορρύπανσης) ή αν θα απαιτηθεί η λήψη τέτοιων μέτρων στο μέλλον.
- (3) Να παράσχουν τις απαραίτητες γεωτεχνικές πληροφορίες για τη λήψη των αναγκαίων μέτρων προστασίας από τη ρύπανση ή την πιθανή επέκταση της ρύπανσης.
- (4) Να εντοπισθούν τα εδαφικά υλικά τα οποία, λόγω επικινδυνότητας, πιθανόν απαιτείται να απομακρυνθούν και να διατεθούν σε ειδικούς χώρους απόθεσης.
- (5) Να παράσχουν τις μετρήσεις αναφοράς της ρύπανσης, ως προς τις οποίες θα πρέπει να συγκρίνονται οι μελλοντικές μετρήσεις της ρύπανσης μετά την εκτέλεση κάποιου προγράμματος απορρύπανσης.
- (6) Να παράσχει τα απαραίτητα στοιχεία για τη σύγκριση διαφόρων θέσεων ως προς το βαθμό ρύπανσης.

Κατά την εκτέλεση των γεωτεχνικών ερευνών σε περιοχές που έχουν ρυπανθεί θα πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα προστασίας και ασφάλειας. Στις ΗΠΑ τα μέτρα προστασίας και ασφάλειας κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες αναλόγως του βαθμού ρύπανσης:

1. Η κατηγορία 4 (Level D) περιλαμβάνει έρευνες σε περιοχές όπου δεν έχουν εντοπισθεί επικίνδυνα ή τοξικά απόβλητα. Τα μέτρα προστασίας συνίστανται στη χρήση συνήθους στολής εργασίας (φόρμα, προστατευτικό κράνος, μπότες) και ειδικά προστατευτικά γυαλιά σε ορισμένες περιπτώσεις.
2. Η κατηγορία 3 (Level C) περιλαμβάνει συνήθεις έρευνες σε χώρους διάθεσης αστικών στερεών αποβλήτων. Τα μέτρα προστασίας συνίστανται στη χρήση προστατευτικής στολής μιας χρήσεως, υποδημάτων ασφαλείας, προστατευτικού κράνους, πλαστικών γαντιών, πλήρους προστασίας του προσώπου και συστήματος καθαρισμού του εισπνεόμενου αέρα.
3. Η κατηγορία 2 (Level B) απαιτεί τη χρήση αυτόνομης αναπνευστικής συσκευής (self-contained breathing apparatus - SCBA), αδιαπέρατης προστατευτικής στολής μιας χρήσεως, προστατευτικές μπότες και γάντια.

4. Η κατηγορία 1 (Level A) αφορά τις περιπτώσεις όπου αναμένονται οι δυσμενέστερες δυνατές συνθήκες ρύπανσης. Απαιτείται η χρήση πλήρους προστατευτικής στολής και αυτόνομης αναπνευστικής συσκευής.

Κατά την εκτέλεση των γεωτεχνικών ερευνών σε περιοχές που έχουν ρυπανθεί θα πρέπει να γίνεται περιοδικός έλεγχος για την ύπαρξη εκρηκτικών αερίων (ιδίως κατά την εκτέλεση γεωτρήσεων). Συγκεκριμένα, εάν η συγκέντρωση του μεθανίου προσεγγίσει το 15% που αποτελεί το κατώτερο όριο εκρηκτικότητας (lower explosive limit - LEL) απαιτείται ο άμεσος αερισμός του χώρου και η παύση των εργασιών στην περιοχή. Η παρουσία μεθανίου είναι συνηθέστατη στους χώρους απόθεσης αστικών απορριμμάτων λόγω της παραγωγής του κατά την αναερόβια σήψη των οργανικών ουσιών.

Οι ειδικές γεωτεχνικές έρευνες που εκτελούνται σε περιοχές που έχουν ρυπανθεί περιλαμβάνουν χημικές αναλύσεις δειγμάτων του εδάφους και του υπογείου νερού. Οι αναλύσεις που συνήθως γίνονται στο έδαφος και το υπόγειο νερό (κατά περίπτωση) φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες.

ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΔΑΦΙΚΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ

Κατιόντα	Ανιόντα	Λοιπές αναλύσεις
pH	Ανθρακικά	Ικανότητα ανταλλαγής ιόντων (CEC)
Ασβέστιο	Φωσφορικά	Ικανότητα προσρόφησης ιόντων (CAC)
Μαγνήσιο	Χλωριόντα	Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)
Νάτριο	Ανιόντα αζώτου	Υδρογονάνθρακες πετρελαιοειδών
Μαγγάνιο	Ανιόντα πυριτίου	Πτητικά οργανικά
Σίδηρος		Λοιποί υδρογονάνθρακες
Κάλιο		BTEX

ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Γενικές αναλύσεις	Ανόργανες αναλύσεις		Οργανικές αναλύσεις
pH	<u>Κατιόντα</u>	<u>Ανιόντα</u>	Βενζόλιο
Οξικότητα/αλκαλικότητα	Νάτριο	Χλωριόντα	Αιθυλο-βενζόλιο
Ολικά στερεά	Μαγνήσιο	Νιτρικά	Τολουόλιο
Διηθούμενα στερεά	Ασβέστιο	Νιτρώδη	Ξυλένιο
Πτητικά στερεά	Κάλιο	Φωσφορικά	Υδρογονάνθρακες
Διαλυμένο οξυγόνο	Μαγγάνιο	Πυριτικά	πετρελαιοειδών
Διαλυμένο CO ₂	Σίδηρος	Θειικά	Άλλες αναλύσεις
Διαλυμένο μεθάνιο	Αμμωνία		
Αγωγιμότητα	<u>Λοιπά</u>	<u>Μέταλλα</u>	
Θερμοκρασία	Αρσενικό	Μόλυβδος	
Ox/redox	Βάριο	Υδράργυρος	
Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	Κάδμιο	Σελήνιο	
Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	Χρώμιο	Άργυρος	
Βιοχημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)			

Τα αποδεκτά όρια της ρύπανσης από τους διάφορους ρύπους παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2.

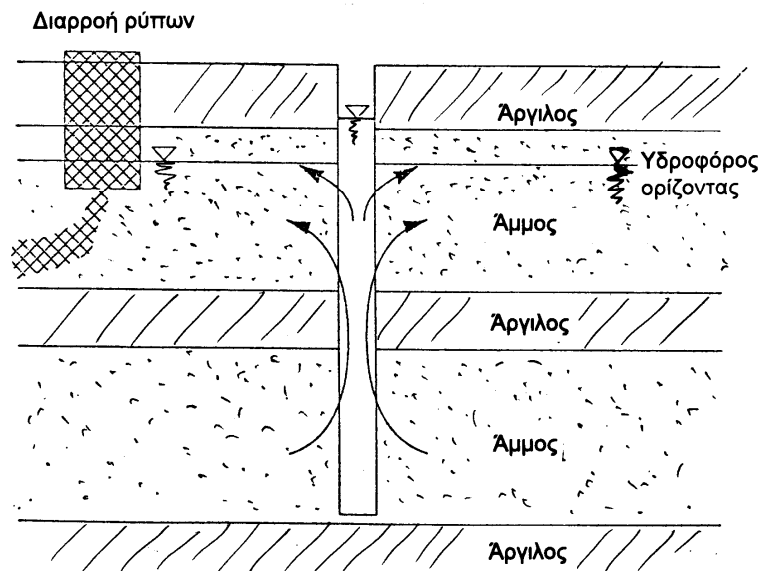
Κατά τις γεωτεχνικές έρευνες σε περιοχές που έχουν ρυπανθεί, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφεύγεται η πιθανή επέκταση της ρύπανσης λόγω των ερευνητικών εργασιών. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να δίνεται προσοχή:

1. Στην κατάλληλη διάθεση των αποβλήτων από τις γεωτεχνικές εργασίες (π.χ. επιστρέφοντα νερά της γεώτρησης, εδαφικά δείγματα, ύδατα έκπλυσης των μηχανημάτων κλπ).
2. Στην αποφυγή επέκτασης της ρύπανσης λόγω επικοινωνίας μεταξύ επάλληλων υδροφορέων μέσω της οπής της γεώτρησης, κυρίως μετά το πέρας των γεωτρητικών εργασιών (Σχήματα 6.1 και 6.2). Για το λόγο αυτό οι οπές των γεωτρήσεων μετά το πέρας των εργασιών θα πρέπει να σφραγίζονται επιμελώς με τσιμεντένεμα.

6.4 Έλεγχος της συμπτυνσιμότητας των εδαφών

Σε περίπτωση επαναχρησιμοποίησης χώρων απόθεσης στερεών αποβλήτων, συνήθως απαιτείται η συμπίκνωση των επιτόπου υλικών για τη βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η απόθεση των στερεών αποβλήτων στους χώρους απόθεσης γίνεται ανεξέλεγκτα. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση συμπτυνμένων αργιλικών στρώσεων για την υδραυλική απομόνωση χώρων απόθεσης αποβλήτων είναι συνήθης. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται τόσο ως μονωτικές στρώσεις στον πυθμένα (κάτω από τη στρώση συλλογής του στραγγίσματος) όσο και κατά την τελική κάλυψη των χώρων, με κύριο σκοπό τον περιορισμό της κατείσδυσης ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, τα οποία τελικώς αυξάνουν τον όγκο του ρυπογόνου υγρού στραγγίσματος. Στις ανωτέρω περιπτώσεις, μέσω της συμπίκνωσης, επιτυγχάνονται η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών και η μείωση της υδραυλικής τους αγωγιμότητας.

Η επιτόπου συμπίκνωση των εδαφικών υλικών γίνεται με διάφορους τρόπους αναλόγως της φύσης αλλά και της προβλεπόμενης χρήσης τους μετά τη συμπίκνωση. Η συμπίκνωση των στερεών αποβλήτων, όπως π.χ. των αστικών απορριμμάτων, στερεών αποβλήτων ορυχείων, αδρανών προϊόντων κατεδαφίσεων (μπάζων), συνήθως γίνεται με τη μέθοδο της δυναμικής συμπίκνωσης. Κατά τη μέθοδο αυτή, τα υλικά συμπτυνώνονται με την ενέργεια που προκαλείται από τις



Σχήμα 6.1: Επικοινωνία μεταξύ επάλληλων υδροφορέων μέσω της οπής της γεώτρησης

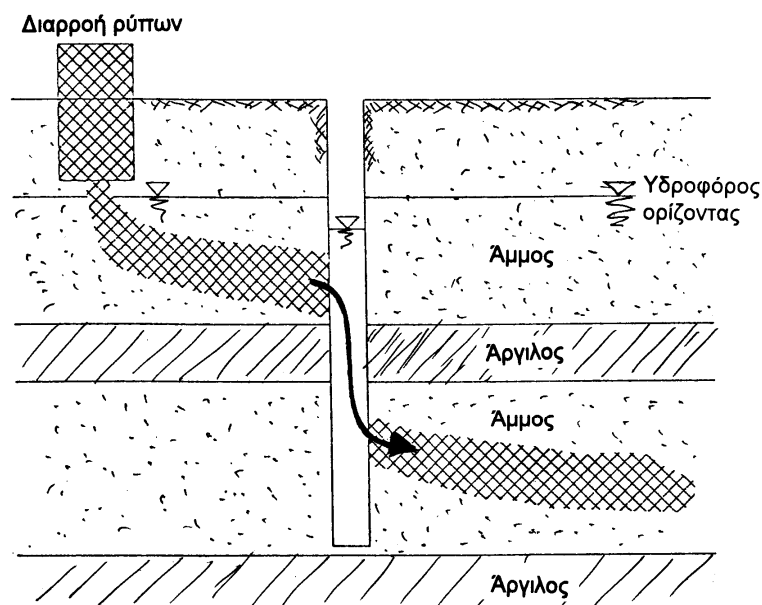
επαναλαμβανόμενες πτώσεις μεταλλικής πλάκας βάρους 1-2 τόννων από ύψος 20-30 μέτρων. Η διαδικασία των διαδοχικών πτώσεων γίνεται με κατάλληλο γεράνο ο οποίος ανυψώνει τη μεταλλική πλάκα και στη συνέχεια της επιτρέπει την ελεύθερη πτώση από το προβλεπόμενο ύψος. Η μέθοδος της δυναμικής συμπύκνωσης είναι πολύ αποδοτική, έχει μικρό κόστος (σε σχέση με άλλες μεθόδους συμπύκνωσης) και μπορεί να γίνει σε μικρό χρονικό διάστημα. Το κυριότερο μειονέκτημά της είναι οι δονήσεις που προκαλούνται κατά την πτώση του βάρους. Η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συμπύκνωση των κορεσμένων αργιλικών υλικών.

Η συμπύκνωση των αργιλικών υλικών για τη χρησιμοποίησή τους ως στεγανωτικών μεμβρανών (clay liners) γίνεται με τις συνήθεις μεθόδους συμπύκνωσης των αργίλων, δηλαδή με διαδοχικές διελεύσεις κατάλληλων οδοστρωτήρων σε στρώσεις μικρού πάχους (15-30 cm) και με την κατάλληλη υγρασία συμπυκνώσεως. Με τη συμπύκνωση:

1. Μειώνεται η συμπίεστικότητα του εδάφους και συνεπώς οι υποχωρήσεις μετά την κατασκευή του έργου.
2. Αυξάνεται η διατμητική αντοχή και συνεπώς ο συντελεστής ασφαλείας των πρανών.
3. Βελτιώνεται η φέρουσα ικανότητα και συνεπώς αυξάνεται η επιτρεπόμενη τάση έδρασης των θεμελίων των έργων.
4. Ελέγχονται οι μεταβολές του όγκου που προέρχονται από τον παγετό και μεταβολές της υγρασίας.
5. Οι ιδιότητες του εδάφους γίνονται περισσότερο ομοιόμορφες, δηλαδή μειώνεται η τυχαία ανομοιομορφία των φυσικών εδαφικών σχηματισμών.

Η συμπύκνωση των εδαφών με την προσθήκη μηχανικής ενέργειας μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα κοκκώδη εδάφη η προσφορότερη ίσως μέθοδος συμπύκνωσης είναι η δόνηση (π.χ. με δονητικούς οδοστρωτήρες ή με ελεύθερη πτώση βάρους). Τα συνεκτικά εδάφη στο εργαστήριο συμπυκνώνονται με πολλαπλές πτώσεις βάρους, ενώ στα χωματουργικά έργα χρησιμοποιούνται μηχανικοί οδοστρωτήρες.

Οι βασικές μέθοδοι συμπύκνωσης των εδαφών μελετήθηκαν από τον R.R. Proctor στις ΗΠΑ περί το 1930, ο οποίος ανέπτυξε την κυριότερη εργαστηριακή

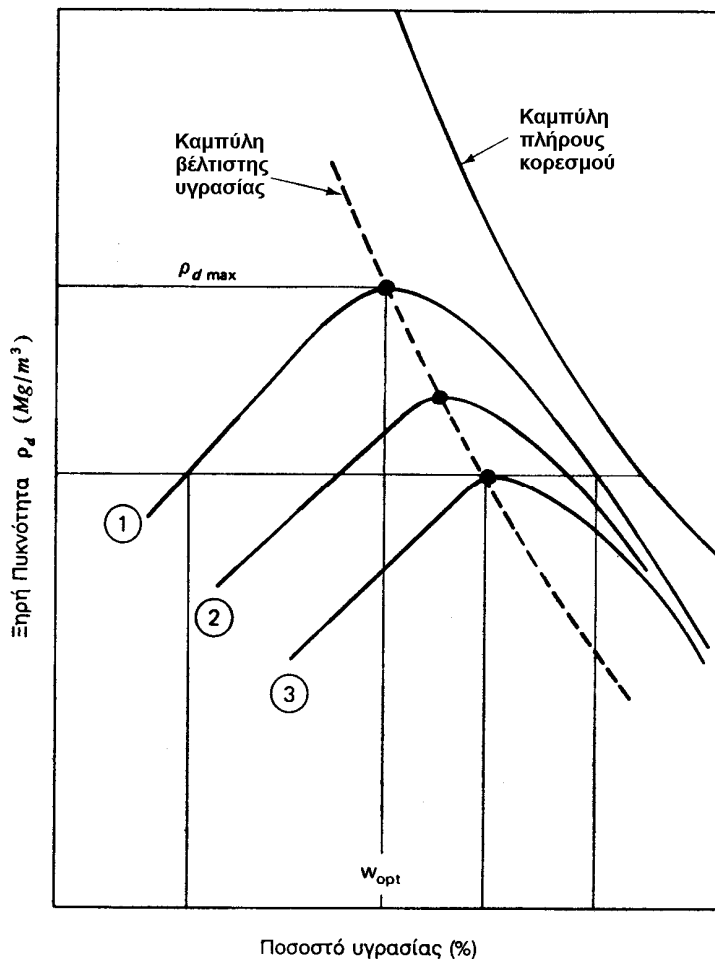


Σχήμα 6.2: Επέκταση της ρύπανσης προς βαθύτερους υδροφορείς μέσω της σπής της γεώτρησης

μέθοδο μελέτης της συμπίκνωσης εδαφών, που φέρει το όνομά του (μέθοδος Proctor). Κατά τις έρευνες του Proctor διαπιστώθηκε ότι, με την προσθήκη μηχανικής ενέργειας σε ένα εδαφικό δοκίμιο, η επιτυγχανόμενη συμπίκνωση (που εκφράζεται ποσοτικά με την πυκνότητα του ξηρού υλικού ρ_d) εξαρτάται από:

- (i) το είδος του εδαφικού υλικού
- (ii) την ενέργεια συμπίκνωσης ανά μονάδα όγκου του δοκιμίου και
- (iii) την υγρασία του εδάφους κατά τη συμπίκνωση.

Κατά την εργαστηριακή δοκιμή Proctor, η συμπίκνωση του εδαφικού δείγματος γίνεται σε μεταλλικό δοχείο ορισμένου όγκου με πτώση σφύρας συγκεκριμένου βάρους από ορισμένο ύψος και η ενέργεια συμπίκνωσης μετράται με τον αριθμό των πτώσεων της σφύρας ή, ακριβέστερα, με τη συνολική ενέργεια πτώσης της σφύρας ανά μονάδα όγκου του εδαφικού δείγματος. Το Σχήμα 6.3 παρουσιάζει τις τυπικές καμπύλες συμπίκνωσης της δοκιμής Proctor σε διάγραμμα της επιτυγχανόμενης ξηρής πυκνότητας ως προς την υγρασία του δείγματος κατά τη συμπίκνωση. Οι καμπύλες συμπίκνωσης, όπως οι καμπύλες (1), (2) και (3) προσδιορίζονται με τη συμπίκνωση αρκετών δειγμάτων που έχουν ποικίλα ποσοστά υγρασίας και τη μέτρηση της ξηρής πυκνότητας που επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση. Κάθε μια από τις καμπύλες (1), (2) και (3) αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ενέργεια συμπίκνωσης: η μέγιστη ενέργεια αντιστοιχεί στην καμπύλη (1) και η ελάχιστη στην καμπύλη (3). Οι καμπύλες συμπίκνωσης παρουσιάζουν ένα μέγιστο,



Σχήμα 6.3: Καμπύλη συμπίκνωσης εδαφών

που αντιστοιχεί στην ξηρή πυκνότητα που επιτυγχάνεται όταν η συμπτύκνωση γίνει στη λεγόμενη *βέλτιστη υγρασία* (w_{opt}). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η καμπύλη βέλτιστης υγρασίας για διάφορες τιμές της ενέργειας συμπτύκνωσης και η καμπύλη *πλήρους κορεσμού* ($S = 100\%$), που αντιστοιχεί στην εξίσωση:

$$\rho_d = \rho_d(w) = \frac{\rho_w}{w + (\rho_w / \rho_s)}$$

Η μορφή της καμπύλης πλήρους κορεσμού εξαρτάται μόνον από την πυκνότητα των στερεών κόκκων (ρ_s), επειδή η πυκνότητα του νερού είναι $\rho_w = 1 \text{ Mg/m}^3$. Γενικώς, μπορούν να προσδιορισθούν οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε οποιονδήποτε βαθμό κορεσμού από την εξίσωση:

$$\rho_d = \frac{\rho_w S}{w + (\rho_w / \rho_s) S}$$

Η κωδωνοειδής μορφή των καμπύλων συμπτύκνωσης είναι αρκετά ενδιαφέρουσα. Κατά τη συμπτύκνωση σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης, όσο αυξάνει το ποσοστό υγρασίας, τα αργιλικά πλακίδια αναπτύσσουν μεγαλύτερες διπλές στρώσεις οι οποίες κατά κάποιον τρόπο τα “λιπαίνουν” και καθιστούν ευκολότερη την αναδιάταξή τους σε πυκνότερη δομή. Με την περαιτέρω αύξηση της υγρασίας (πάνω από το w_{opt}), η ξηρή πυκνότητα αρχίζει να μειώνεται, επειδή η προσθήκη νερού απομακρύνει πλέον τους στερεούς κόκκους (αντί απλώς να γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων) και η πυκνότητα του νερού είναι μικρότερη από την πυκνότητα των στερεών κόκκων που αντικαθιστά ($\rho_w < \rho_s$). Η κωδωνοειδής μορφή των καμπύλων συμπτύκνωσης κατά την εργαστηριακή δοκιμή Proctor εμφανίζεται και κατά την επιτόπου συμπτύκνωση των εδαφών και μάλιστα η χρησιμότητα της εργαστηριακής δοκιμής συμπτύκνωσης βασίζεται ακριβώς στην αναλογία αυτή. Ειδικότερα, αν “βαθμονομηθούν” οι μέθοδοι επιτόπου συμπτύκνωσης (δηλαδή αν προσδιορισθεί η ενέργεια συμπτύκνωσης που αντιστοιχεί σε μια διέλευση συγκεκριμένου οδοστρωτήρα), μπορεί να προσδιορισθεί ο απαιτούμενος *αριθμός διελεύσεων* και η *υγρασία συμπτύκνωσης* για να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός συμπτύκνωσης (ξηρή πυκνότητα) επιτόπου, με βάση τις εργαστηριακές καμπύλες συμπτύκνωσης.

Η σημασία της υγρασίας του εδάφους κατά τη συμπτύκνωση δεν περιορίζεται στην επίτευξη της μέγιστης ξηρής πυκνότητας. Η δομή και συνεπώς οι μηχανικές ιδιότητες των συνεκτικών εδαφών εξαρτώνται επίσης από την υγρασία συμπτύκνωσης. Η υγρασία συμπτύκνωσης επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των συνεκτικών εδαφών ως εξής:

- (1) Η *διαπερατότητα* των συνεκτικών εδαφών μειώνεται με τη αύξηση της υγρασίας συμπτύκνωσης μέχρι μια ελάχιστη τιμή περί τη βέλτιστη υγρασία συμπτύκνωσης. Με την περαιτέρω αύξηση της υγρασίας, η διαπερατότητα αυξάνει ελαφρά ή παραμένει σταθερή. Επίσης, για συγκεκριμένη υγρασία συμπτύκνωσης, η διαπερατότητα μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας συμπτύκνωσης.
- (2) Η *συμπίεστότητα* των συμπτύκνωμένων αργίλων εξαρτάται από την ένταση της φόρτισης (πίεσης). Σε χαμηλές πιέσεις, οι άργιλοι που έχουν συμπτύκνωθεί σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης είναι περισσότερο συμπίεστοί. Σε υψηλές πιέσεις ισχύει ακριβώς το αντίθετο.
- (3) Η τάση για *διόγκωση* (κατά την έκθεση στο νερό) είναι μεγαλύτερη σε αργίλους που έχουν συμπτύκνωθεί σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης. Αντίθετα, η τάση για *συρρίκνωση* κατά την ξήρανση των συνεκτικών εδαφών είναι μεγαλύτερη σε αργίλους που έχουν συμπτύκνωθεί σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης.

- (4) Η επιρροή της υγρασίας συμπίκνωσης στη *διατμητική αντοχή* των συνεκτικών εδαφών είναι σύνθετη, αλλά συνήθως εδαφικά δείγματα που έχουν συμπτυκνωθεί σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης έχουν μεγαλύτερη αντοχή από αντίστοιχα δείγματα που έχουν συμπτυκνωθεί σε μεγαλύτερη υγρασία. Αν, όμως, τα δείγματα εκτεθούν στο νερό και διογκωθούν πριν από τη διάτμηση, η συμπεριφορά αντιστρέφεται, επειδή τα ξηρότερα δείγματα διογκώνονται περισσότερο.

Συνεπώς, η επιλογή της υγρασίας συμπίκνωσης των εδαφικών υλικών στα χωματουργικά έργα δεν είναι μονοσήμαντη αλλά εξαρτάται από το είδος του εδαφικού υλικού, το είδος του έργου¹ και τα διαθέσιμα μηχανήματα. Στις συνήθεις περιπτώσεις επιχωμάτων οδοποιίας, άργιλοι χαμηλής και μέσης πλαστιμότητας συμπτυκνώνονται με υγρασία περί τη βέλτιστη τιμή ($w_{opt} \pm 2\%$), ενώ άργιλοι μεγάλης πλαστιμότητας συμπτυκνώνονται με υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης. Στην περίπτωση συμπίκνωσης των αργίλων για την κατασκευή στεγανωτικών μεμβρανών (clay liners) η κρίσιμη ιδιότητα είναι η διαπερατότητα, και συνεπώς η συμπίκνωση των αργίλων γίνεται συνήθως με υγρασία ελαφρά μεγαλύτερη της μέγιστης τιμής.

6.5 Βιβλιογραφικές αναφορές

- NJDEP (1984) "Field Sampling Procedures Manual", New Jersey Department of Environmental Protection, Division of Hazardous Site Mitigation.
- NAVFAC DM 7.1 (1982) "Soil Mechanics Design Manual", U.S. Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, VA.
- ISSMFE (1979) "State of the Art on Current Soil Sampling", ISSMFE, Subcommittee on Soil Sampling.
- ASCE (1976) "Subsurface investigation for Design of Foundation of Buildings", ASCE Manual and Report of Engineering Practice, No 56.
- Hvorslev M.J. (1962) "Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes, ASCE.
- British Standard for Development DD 175 (1988) "Code of Practice for the identification of potentially contaminated land and its Investigation", British Standard Institution.
- British Drilling Association (1992) "Guidance notes for the safe drilling of landfills and contaminated land", British Drilling Association, Essex, England.
- British Standards Institution (1981), "Code of Practice for site investigations" BS 5930:1981, London.

¹ δηλαδή την κρίσιμη ιδιότητα που θα πρέπει να βελτιωθεί

Χώροι διάθεσης στερεών αποβλήτων

7.1 Γενικά

Η εξεύρεση των πλέον κατάλληλων περιοχών (από γεωτεχνικής απόψεως) και η βελτίωση της τεχνολογίας κατασκευής των χώρων διάθεσης στερεών αποβλήτων αποτελούν κάποιους από τους κυριότερους σκοπούς της Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, το 70% των αστικών αποβλήτων και το 35% των βιομηχανικών αποβλήτων στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατέληγαν πριν από τα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας σε “χωματερές”¹ (Street, 1994). Ενώ γίνεται προσπάθεια να μειωθεί ο όγκος των απορριμμάτων που καταλήγουν σε χώρους ταφής, η διαχείριση απορριμμάτων με τη μέθοδο της ταφής δεν είναι δυνατόν να εκλείψει. Κατά συνέπεια, η βελτίωση της τεχνολογίας και οι νομοθετικές απαιτήσεις που αφορούν την κατασκευή των χώρων απόθεσης στερεών αποβλήτων έχουν σημαντικές οικονομικές συνέπειες.

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1950, το σύνολο σχεδόν των στερεών αποβλήτων απετίθετο σε “χωματερές” χωρίς ιδιαίτερα μέτρα προστασίας για την αποφυγή της ρύπανσης του υπεδάφους. Ως θέσεις “χωματερών” συνήθως επιλέγοντο φυσικές κοιλάδες σε θέσεις σχετικά απομακρυσμένες από αστικές περιοχές ή εγκαταλειμμένα ορυχεία, λατομεία κλπ. Από άγνοια ή ελλιπή αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων από τη ρύπανση του υπεδάφους, δεν λαμβάνονταν τεχνικά μέτρα σφράγισης του πυθμένα των “χωματερών”, και η όποια προστασία του περιβάλλοντος βασιζόταν αποκλειστικά στους μηχανισμούς φυσικής υποβάθμισης του ρυπαντικού φορτίου κατά τη διήθηση των ρύπων διαμέσου του εδάφους και στις ευνοϊκές συνέπειες της αραίωσης² των τυχόν διηθήσεων (natural attenuation landfills).

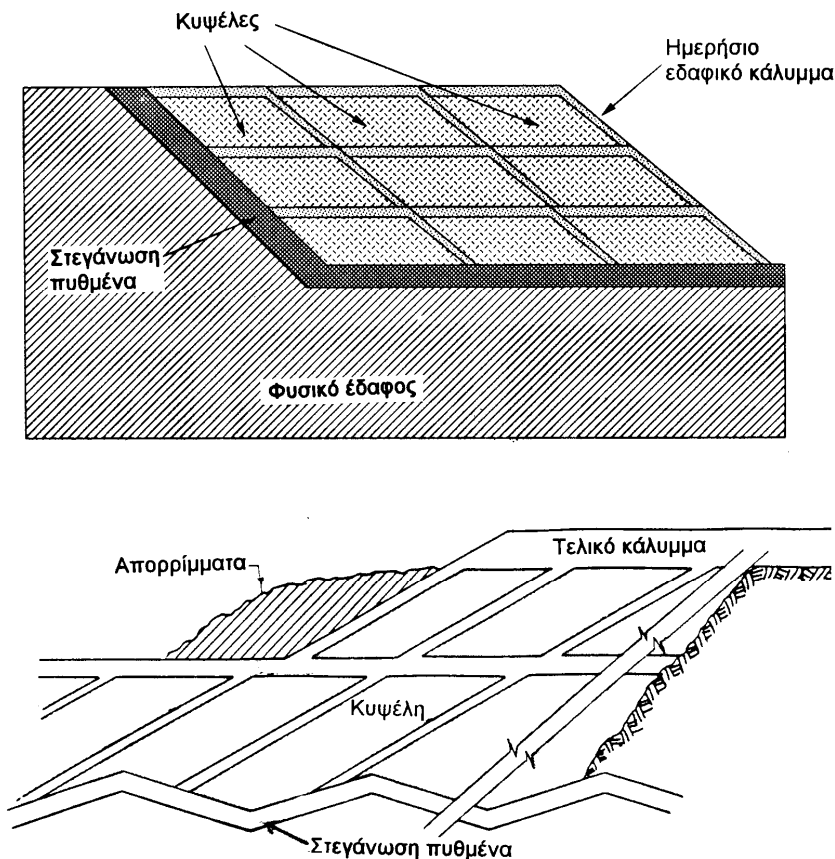
Με την ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας, αλλά κυρίως με τη βαθμιαία ευαισθητοποίηση των κοινωνικών ομάδων σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος, άρχισε να επιβάλλεται η κατασκευή σύγχρονων υγειονομικών αποδεκτών στερεών αποβλήτων (sanitary landfills) που συχνά ονομάζονται και Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Τυπικά η απόθεση των αποβλήτων στους χώρους αυτούς γίνεται σε κυψέλες πάχους μέχρι 5 μέτρων περίπου οι οποίες καθημερινά καλύπτονται με γαιώδη υλικά πάχους 0.15 - 0.30 μέτρων για τον περιορισμό των αναθυμιάσεων, του κινδύνου αυτανάφλεξης των απορριμμάτων, της διασποράς των απορριμμάτων από τα πουλιά και της κατείσδυσης των υδάτων των βροχοπτώσεων. Στον πυθμένα των σύγχρονων αποδεκτών στερεών αποβλήτων κατασκευάζεται χαμηλής περατότητας σφραγιστική στρώση (liner) για την αποφυγή της ρύπανσης του υπεδάφους, και σύστημα συλλογής και απομάκρυνσης των ρυπογόνων υγρών στραγγισμάτων των

¹ τα υπόλοιπα είναι υγρά απόβλητα που είτε αποθηκεύονται σε ταμιευτήρες είτε διατίθενται σε υγρούς αποδέκτες (συνήθως μετά από κάποια επεξεργασία)

² κατά τη γνωστή αρχή (που δυστυχώς κάποιες φορές εκλαμβάνεται ως άδεια ρύπανσης): “the solution to pollution is dilution”

απορριμμάτων και του παραγόμενου βιο-αερίου. Μια τυπική σχηματική διάταξη ενός υγειονομικού αποδέκτη στερεών αποβλήτων φαίνεται στα Σχήματα 7.1 και 7.2. Σημειώνεται ότι η χρήση αδιαπέρατων μεμβρανών στον πυθμένα των αποδεκτών στερεών αποβλήτων άρχισε να εφαρμόζεται στην Ελλάδα κατά τη δεκαετία του 1980, ενώ οι πρώτοι χώροι υγειονομικής ταφής με σύγχρονα συστήματα συλλογής και απομάκρυνσης του υγρού στραγγίσματος και του βιο-αερίου κατασκευάστηκαν στην Ελλάδα μετά το 1990.

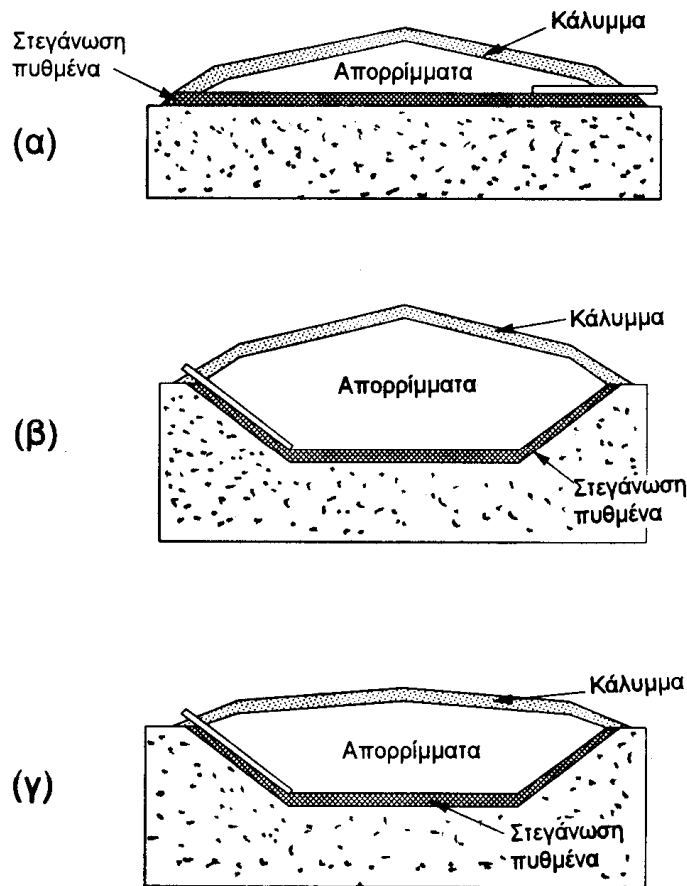
Ο αντικειμενικός σκοπός ενός σύγχρονου αποδέκτη στερεών αποβλήτων συνήθως δεν είναι σαφής ούτε αντιληπτός κατά τον ίδιο τρόπο από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς. Έτσι, για τον ιδιοκτήτη του έργου (δήμος ή κοινότητα), αντικειμενικός σκοπός είναι η απόθεση των αποβλήτων με κόστος κατασκευής και λειτουργίας το οποίο να συμβιβάζεται με τις υπάρχουσες οικονομικές δυνατότητες. Για το μηχανικό, αντικειμενικός σκοπός είναι να κατασκευάσει ένα έργο το οποίο να βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση που περιέχει ως κύριες μεταβλητές (α) το κόστος, (β) την επιτυγχανόμενη ασφάλεια έναντι ρύπανσης του περιβάλλοντος και (γ) την όχληση των περιοίκων. Τέλος, για τους κατοίκους της περιοχής γύρω από το έργο, αντικειμενικός σκοπός είναι ο μηδενισμός των επιρροών του έργου στην υγεία τους, τον τρόπο ζωής τους και την αξία της περιουσίας τους. Από τα ανωτέρω, είναι προφανές ότι η επιλογή της θέσης και ο σχεδιασμός ενός σύγχρονου αποδέκτη στερεών αποβλήτων είναι θέματα περίπλοκα, όχι τόσο από τεχνικής πλευράς, όσο λόγω των (εν μέρει λογικών) αντιδράσεων των διαφόρων κοινωνικών ομάδων. Βεβαίως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, για την επιλογή της θέσης και για το σχεδιασμό των συγχρόνων αποδεκτών στερεών αποβλήτων, υφίστανται νομοθετικοί



Σχήμα 7.1: Τυπική διάταξη χώρου υγειονομικής διάθεσης στερεών αποβλήτων

περιορισμοί (κανονισμοί) που καθορίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις σχεδιασμού με σκοπό τον περιορισμό σε αποδεκτά όρια της όχλησης των περιοίκων και της πιθανότητας αστοχίας του έργου. Οι βασικές απαιτήσεις των κανονισμών αυτών παρουσιάζονται σε επόμενα εδάφια, και ιδιαίτερα στην Ενότητα 7.9.

Ένα θέμα το οποίο συνήθως ανακύπτει κατά το σχεδιασμό ενός σύγχρονου αποδέκτη στερεών αποβλήτων είναι η απάντηση στο ερώτημα, αν κατά τη λειτουργία του έργου θα υπάρχουν διαρροές ρύπων προς το υπέδαφος. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό εξαρτάται από την έννοια της λέξης “διαρροή”. Εάν ως διαρροή θεωρηθεί η απρόβλεπτη διαφυγή ρύπων προς το υπέδαφος, τότε η απάντηση είναι ότι “δεν θα υπάρχουν διαρροές”. Εάν ο ορισμός της λέξης “διαρροή” περιλαμβάνει την οποιαδήποτε διαφυγή, τότε η απάντηση είναι ότι “θα υπάρχουν διαρροές”, επειδή κανένα από τα τεχνικώς διαθέσιμα υλικά δεν είναι απόλυτα στεγανό, αλλά ακόμη και εάν υποθεθεί ότι είναι δυνατόν να κατασκευασθεί ένα σύστημα σφράγισης του πυθμένα πρακτικά αδιαπέρατο, τούτο πιθανότατα θα έχει κόστος που υπερβαίνει τις οικονομικές δυνατότητες της συγκεκριμένης κοινωνίας (ή ορθότερα, τις προτεραιότητες χρήσης των διαθέσιμων οικονομικών πόρων). Κατά συνέπεια, ο αντικειμενικός σκοπός του συγκεκριμένου έργου είναι να επιτευχθεί η διάθεση των αποβλήτων με χρήση των διαθέσιμων οικονομικών πόρων και με την ελάχιστη δυνατή ρύπανση του περιβάλλοντος. Είναι σαφές, όμως, ότι οποιοδήποτε τεχνικό έργο έχει κάποια πιθανότητα να αστοχήσει, δηλαδή να μη συμπεριφερθεί όπως μελετήθηκε. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση αστοχίας, η ρύπανση του



Σχήμα 7.2: Τυπική διάταξη αποδέκτη στερεών αποβλήτων
(α) υπέργειος (β) ημι-υπόγειος (γ) υπόγειος

περιβάλλοντος από το συγκεκριμένο έργο θα υπερβαίνει τα αποδεκτά όρια ρύπανσης για τα οποία μελετήθηκε το έργο. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα παρακολούθησης της συμπεριφοράς του έργου, ώστε η πιθανή αστοχία να εντοπισθεί έγκαιρα, να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα επέμβασης για την αποκατάστασή της και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθούν οι δυσμενείς περιβαλλοντικές συνέπειες από την αστοχία.

Στο Κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται στοιχεία της τεχνολογίας κατασκευής σύγχρονων αποδεκτών στερεών αποβλήτων. Ο όρος “στερεά απόβλητα” αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 και περιλαμβάνει τα πάσης φύσεως απόβλητα³ με εξαίρεση:

1. Τα αστικά λύματα (domestic sewage)
2. Τα παραπροϊόντα μεταλλευτικών δραστηριοτήτων (mining waste)
3. Ειδικά πυρηνικά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας
4. Απόβλητα μή-συγκεντρωμένης διάθεσης (non-point-source discharge), τα οποία περιλαμβάνουν τα γεωργικά φάρμακα και τα λιπάσματα.

Από πλευράς τεχνολογίας των χώρων διάθεσης, τα στερεά απόβλητα συνήθως διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

1. Αστικά απορρίμματα
2. Αδρανή οικοδομικά υλικά κατεδαφίσεων
3. Βιομηχανικά απόβλητα
4. Γαιώδη υλικά που έχουν ρυπανθεί (π.χ. τα γαιώδη προϊόντα απορρύπανσης μιας περιοχής με αφαίρεση της επιφανειακής εδαφικής στρώσης)
5. Επικίνδυνα ή τοξικά απόβλητα.

Τα θέματα που εξετάζονται στο Κεφάλαιο αυτό αφορούν όλες τις ανωτέρω κατηγορίες αποβλήτων, με έμφαση όμως στα αστικά απορρίμματα που αποτελούν το 80% περίπου του συνόλου των στερεών αποβλήτων.

7.2 Κριτήρια επιλογής της θέσης του αποδέκτη

Στην επιλογή της κατάλληλης θέσης για τη δημιουργία ενός σύγχρονου αποδέκτη στερεών αποβλήτων (συνήθως αστικών απορριμμάτων) υπεισέρχονται διάφοροι παράγοντες, όπως η απόσταση από την πηγή γένεσης των αποβλήτων, το κλίμα, η γεωλογία/υδρογεωλογία, η απόσταση από αεροδρόμια, οι διαθέσιμες εκτάσεις, αλλά κυρίως οι αντιδράσεις των διάφορων κοινωνικών ομάδων. Οι κάτοικοι μιας περιοχής αν και γενικά δέχονται ότι είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αποδέκτη στερεών αποβλήτων, ταυτόχρονα αντιδρούν έντονα στην κατασκευή του σε θέση που βρίσκεται στην περιοχή τους⁴. Η αντίδραση αυτή κυρίως αφορά την πιθανή όχληση και τη μείωση της αξίας των ακινήτων στην περιοχή παρά το φόβο για πιθανές επιπτώσεις από την ενδεχόμενη ρύπανση. Στις περιπτώσεις αυτές έχει αποδειχθεί ότι η ενημέρωση των κατοίκων (σε πρώιμη φάση του έργου) για τον τρόπο λειτουργίας ενός σύγχρονου αποδέκτη στερεών αποβλήτων και η περιγραφή όλων των μέτρων που προβλέπεται να ληφθούν για τον περιορισμό της όχλησης συχνά δρουν αποφασιστικά στον περιορισμό των κοινωνικών αντιδράσεων και στην αποδοχή της κατασκευής του έργου στη συγκεκριμένη περιοχή. Μια άλλη μέθοδος για την αντιμετώπιση των κοινωνικών αντιδράσεων σχετικά με την επιλογή της θέσης κατασκευής ενός νέου αποδέκτη στερεών αποβλήτων είναι η επέκταση ενός ήδη υπάρχοντος αποδέκτη, δεδομένου ότι συνήθως υπάρχουν πολύ λιγότερες

³ δηλαδή όχι μόνον απόβλητα στερεάς φάσης

⁴ συνήθως το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως σύνδρομο NIMBY (not in my back-yard)

αντιδράσεις για την επέκταση μιας ήδη λειτουργούσας μονάδας παρά για την ανάπτυξη μιας νέας σε άλλη θέση. Τέλος, μια άλλη εναλλακτική λύση είναι η νέα μονάδα να κατασκευασθεί σε μια περιοχή όπου ήδη υπάρχουν και άλλες μονάδες διάθεσης στερεών αποβλήτων.

Στην επιλογή της θέσης κατασκευής ενός σύγχρονου χώρου διάθεσης (αποδέκτη) στερεών αποβλήτων λαμβάνονται υπόψη και συναξιολογούνται τα εξής τεχνικά στοιχεία:

1. Χάρτες και λοιπά στοιχεία αποτύπωσης της περιοχής που περιλαμβάνουν:

- (α) Τοπογραφικούς χάρτες για τον εντοπισμό κατάλληλων φυσικών κοιλωμάτων, την κατανόηση του συστήματος φυσικής αποστράγγισης της περιοχής, την παρουσία υδροβιοτόπων, περιοχών που πλημμυρίζουν συχνά, καλλιεργήσιμων εκτάσεων κλπ.
- (β) Αεροφωτογραφίες για τον προσδιορισμό της χλωρίδας της περιοχής, των καλλιεργήσιμων εκτάσεων, συστημάτων υδρογεωτρήσεων ύδρευσης κλπ.
- (γ) Κυκλοφοριακοί χάρτες με σκοπό τον προσδιορισμό του διαθέσιμου κυκλοφοριακού δικτύου για τη μεταφορά των αποβλήτων από την πηγή γένεσης στο χώρο απόθεσης.
- (δ) Γεωλογικοί και υδρογεωλογικοί χάρτες για τον προσδιορισμό του είδους των πετρωμάτων και των υδροφορέων, τη δίαυτα του υπόγειου νερού, την παρουσία πηγών, τη διαθεσιμότητα δανειοθαλάμων για την απόληψη των εδαφικών υλικών ημερήσιας κάλυψης των απορριμμάτων κλπ.
- (ε) Υδρογεωλογικά και μετεωρολογικά στοιχεία που αφορούν το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις), τη θερμοκρασία και την αναμενόμενη εξατμισοδιαπνοή. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τις ποσότητες των επιφανειακών υδάτων που θα πρέπει να αποστραγγισθούν (ώστε να μην αυξηθεί ο όγκος του υγρού στραγγίσματος). Τέλος, η ένταση και διεύθυνση των ανέμων επηρεάζει τη διάδοση οσμών, ρύπων και σκόνης προς τα κατάντη.

2. Στοιχεία για το είδος, την ποσότητα και τη σύνθεση των αποβλήτων. Το κυριότερο στοιχείο που πρέπει να καθορισθεί είναι εάν πρόκειται για επικίνδυνα ή μή-επικίνδυνα απόβλητα. Στην περίπτωση μή-επικινδύνων αποβλήτων, θα πρέπει να διευκρινισθεί αν πρόκειται για αμιγώς αστικά ή για μίγμα με βιομηχανικά απόβλητα. Στην περίπτωση αστικών αποβλήτων θα πρέπει να διευκρινισθεί αν στα συνήθη αστικά απορρίμματα θα περιέχονται και απόβλητα άλλων τύπων σε σημαντικές ποσότητες (π.χ. ορυκτέλαια αυτοκινήτων – παρόλο που υπάρχει ειδική οδηγία, η 87/101/EEC, για τη διάθεση των χρησιμοποιημένων ορυκτελαίων – ή απόβλητα από παρανόμως λειτουργούσες και ρυπαίνουσες βιοτεχνίες-βιομηχανίες). Στην περίπτωση των βιομηχανικών αποβλήτων θα πρέπει να διευκρινισθεί το είδος των αποβλήτων, το ρυπαντικό τους φορτίο και οι αναμενόμενες ποσότητες.

Η εκτίμηση της ποσότητας των αναμενόμενων αποβλήτων σε περίπτωση αστικών απορριμμάτων γίνεται συνήθως με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία από άλλες “χωματερές” στην ίδια περιοχή. Σε περίπτωση έλλειψης τέτοιων στοιχείων και για προκαταρκτικές εκτιμήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ημερήσια παραγωγή 1-2 kg απορριμμάτων ανά άτομο ή ισοδύναμα 1.5 - 3.0 lt ανά άτομο. Στον όγκο των αποβλήτων που προκύπτει με βάση τον προβλεπόμενο πληθυσμό της περιοχής και την ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων ανά άτομο, θα πρέπει να προστεθεί και ο όγκος των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την καθημερινή κάλυψη των απορριμμάτων. Μια λογική εκτίμηση της σχέσης των εδαφικών υλικών προς τα απορρίμματα είναι 1:4 - 1:5.

3. Οι προοπτικές ανακύκλωσης ή καύσης των απορριμμάτων στο εγγύς μέλλον. Με τους τρόπους αυτούς μπορεί να μειωθεί σημαντικά ο προβλεπόμενος όγκος των απορριμμάτων και να τροποποιηθεί ο σχεδιασμός του αποδέκτη των απορριμμάτων (π.χ. στην περίπτωση που ο αποδέκτης θα χρησιμοποιείται τελικώς για την απόρριψη της στάκτης των καύσεων αντί των απορριμμάτων).
4. Στοιχεία για τις ήδη διαθέσιμες “χωματερές” και τις δυνατότητες επέκτασής τους, αντί της κατασκευής νέου αποδέκτη.
5. Το κόστος κατασκευής του νέου αποδέκτη, που περιλαμβάνει το κόστος των ερευνών και μελετών, το κόστος κατασκευής του έργου, το σύνθετος κόστος λειτουργίας του (μεταφορά των απορριμμάτων, συλλογή και επεξεργασία του υγρού στραγγίσματος, συλλογή και επεξεργασία του βιο-αερίου, καθημερινή κάλυψη του χώρου) αλλά και το κόστος της παρακολούθησης της συμπεριφοράς του αποδέκτη και το πιθανό κόστος της απαιτούμενης επέμβασης σε περίπτωση αστοχίας του έργου και ρύπανσης του υπεδάφους.

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ελάχιστων αποστάσεων ενός αποδέκτη αστικών απορριμμάτων, συνήθως εφαρμόζονται τα εξής:

1. Ελάχιστη απόσταση 300 μέτρων από λίμνες. Η ελάχιστη απόσταση θα πρέπει να αυξηθεί σε περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα επιφανειακής απορροής των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων από την περιοχή του αποδέκτη προς τη λίμνη.
2. Ελάχιστη απόσταση 100 μέτρων από ποταμούς.
3. Απαγόρευση κατασκευής ΧΥΤΑ σε περιοχές που υπάρχει πιθανότητα να πλημμυρίζουν. Συνήθως ως όριο χρησιμοποιείται η πιθανότητα πλημμύρας για βροχόπτωση με περίοδο επαναφοράς 100 ετών.
4. Ελάχιστη απόσταση 300 μέτρων από εθνικές οδούς, εθνικά πάρκα κλπ. Ο περιορισμός αυτός τίθεται κυρίως για αισθητικούς λόγους και μπορεί να μειωθεί εάν κατασκευασθεί κατάλληλο διάφραγμα οπτικής απομόνωσης (π.χ. συστοιχία δένδρων).
5. Απαγόρευση κατασκευής χώρων ταφής απορριμμάτων σε προστατευόμενους βιοτόπους και υδροβιοτόπους.
6. Ελάχιστη απόσταση 3000 μέτρων από αεροδρόμια που χρησιμοποιούνται από αεριωθούμενα αεροσκάφη και 1500 μέτρων από αεροδρόμια που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από ελικοφόρα αεροσκάφη (USEPA, Subtitle D Regulations). Ο περιορισμός αυτός επιβάλλεται για την αποφυγή όχλησης των αεροπλάνων από τα πουλιά που συνήθως συγκεντρώνονται στις περιοχές των “χωματερών”.
7. Ελάχιστη απόσταση 400 μέτρων από πηγάδια υδρεύσεως. Η απόσταση αυτή μπορεί να αυξηθεί σε περίπτωση ύπαρξης πηγαδιών προς τα κατόντη του αποδέκτη. Ο περιορισμός αυτός δεν καλύπτει την περίπτωση οργανωμένων υδρογεωτρήσεων για την ύδρευση οικισμών, όπου η ελάχιστη απόσταση θα πρέπει να καθορίζεται μετά από ειδική υδρογεωλογική μελέτη.
8. Ελάχιστη απόσταση 60 μέτρων από τεκτονικά ρήγματα τα οποία εκτιμάται ότι έχουν ενεργοποιηθεί κατά το Ολόκαινο.

Εκτός από τους ανωτέρω περιορισμούς, στην επιλογή των χώρων για την κατασκευή αποδεκτών στερεών αποβλήτων εφαρμόζονται τα εξής τεχνικά κριτήρια:

1. Γεωτεχνικά κριτήρια

1.1 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα του εδάφους επηρεάζει την ταχύτητα εξάπλωσης των ρύπων προς τους υδροφορείς της περιοχής σε περίπτωση αστοχίας των τεχνικών

μέτρων σφράγισης του πυθμένα του αποδέκτη. Είναι προφανές ότι εδάφη μικρής διαπερατότητας προτιμώνται για την κατασκευή ΧΥΤΑ.

1.2 Το pH του εδαφικού νερού

Το pH επηρεάζει τη διαλυτότητα των βαρέων μετάλλων. Υψηλότερες τιμές του pH είναι προτιμότερες γιατί αντιστοιχούν σε μικρότερες τιμές διαλυτότητας.

1.3 Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC)

Χαρακτηρίζει την ικανότητα του εδάφους να αδρανοποιεί ποικίλους ρύπους μέσω των μηχανισμών ανταλλαγής κατιόντων. Υψηλότερες τιμές του δείκτη CEC είναι προτιμότερες.

1.4 Φύση των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων

Επηρεάζει τις απαιτήσεις θεμελίωσης του έργου (π.χ. συμπύκνωση του φυσικού εδάφους πριν από την κατασκευή της στεγανωτικής μεμβράνης), τις συνθήκες ευστάθειας των περιμετρικών πρανών της εκσκαφής (σε περίπτωση υπόγειου αποδέκτη), τις πιθανές υποχωρήσεις κλπ. Γενικώς, η παρουσία σιφρών αργιλικών εδαφών⁵ είναι προτιμητέα τόσο λόγω της μικρής τους συμπίεστότητας όσο και λόγω της μικρής τους διαπερατότητας.

1.5 Διαθέσιμα υλικά

Θα πρέπει στην περιοχή να διατίθενται δανειοθάλαμοι σχετικώς αδιαπέρατων εδαφικών υλικών για την καθημερινή κάλυψη των απορριμμάτων. Οι απαιτούμενοι όγκοι των εδαφικών υλικών είναι σημαντικοί (20 - 25% του όγκου των απορριμμάτων).

2. Γεωλογικά κριτήρια

2.1 Φύση και εμφάνιση του υποβάθρου

Η παρουσία ασβεστολίθων σε μικρό βάθος και ιδίως επιφανειακά δεν είναι ευνοϊκή για την κατασκευή χώρων υγειονομικής ταφής, λόγω της πιθανής καρστικοποίησής τους και της ως εκ τούτου αύξησης της διαπερατότητας. Το ίδιο ισχύει και για άλλους τύπους βραχωδών σχηματισμών που εμφανίζουν έντονη ρηγμάτωση. Γενικώς, η παρουσία εδαφικού καλύμματος μεγάλου πάχους είναι ευνοϊκή.

2.2 Τεκτονικά ρήγματα

Η παρουσία τεκτονικών ρηγμάτων δεν είναι ευνοϊκή λόγω της γενικώς αυξημένης διαπερατότητας κατά μήκος των αξόνων των ρηγμάτων αλλά και των πιθανών μετακινήσεων (στις περιπτώσεις ενεργών ρηγμάτων).

3. Υδρογεωλογικά κριτήρια

3.1 Παρουσία υδροφορέων

Η παρουσία υδροφορέων με αξιόλογο δυναμικό (ανεξαρτήτως του εάν βρίσκονται υπό καθεστώς εκμετάλλευσης) σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους αποτελεί απαγορευτικό παράγοντα για την κατασκευή ΧΥΤΑ στην περιοχή λόγω της πιθανής ανεξέλεγκτης ρύπανσης σε περίπτωση αστοχίας των τεχνικών μέτρων στεγάνωσης του αποδέκτη των αποβλήτων. Σε περίπτωση υδροφορέων που βρίσκονται υπό καθεστώς εκμετάλλευσης για την ύδρευση οικισμών, οι περιορισμοί είναι ακόμη αυστηρότεροι (όσον αφορά το απαιτούμενο ελάχιστο βάθος).

3.2 Ποιότητα του υπόγειου νερού

Περιοχές στις οποίες οι υδροφορείς έχουν φτωχή ποιότητα υπόγειου νερού (π.χ. λόγω υπαλμύρυνσης ή ρύπανσης από διαφορετικά αίτια) είναι προτιμητέες για την κατασκευή ΧΥΤΑ.

⁵ με χαμηλή στάθμη υπογείου ορίζοντα

3.3 Δίαιτα του υπόγειου νερού

Περιοχές στις οποίες η κίνηση του υπόγειου νερού είναι τέτοια ώστε να το απομακρύνει από κατοικημένες περιοχές ή όπου η κατακόρυφη κίνηση του υπόγειου νερού γίνεται από κάτω προς τα άνω είναι προτιμητέες για την κατασκευή αποδεκτών απορριμμάτων. Επίσης, περιοχές με μικρή εποχιακή διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού είναι προτιμητέες, επειδή με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η διασπορά των ρύπων από τη μερικώς κορεσμένη ζώνη προς τον υδροφόρο. Τέλος, είναι προφανές ότι προτιμητέες είναι οι περιοχές όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται σε μεγάλο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

4. Τοπογραφικά κριτήρια

4.1 Κλίση του φυσικού εδάφους

Είναι προτιμότερες περιοχές σχεδόν οριζόντιες ή με κατά το δυνατόν μικρές κλίσεις (μέχρι 15 - 20 %). Στην περίπτωση μεγαλύτερων κλίσεων είναι πιθανή η επέκταση της ρύπανσης μέσω της ανεξέλεγκτης επιφανειακής απορροής των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

4.2 Διαβρωσιμότητα του εδάφους

Περιοχές με έντονα τοπογραφικά χαρακτηριστικά διάβρωσης του εδάφους δεν συνιστώνται για την κατασκευή ΧΥΤΑ, λόγω της ανάγκης περιορισμού της διάβρωσης των εδαφικών υλικών από τα επιφανειακά νερά με περιμετρικά αναχώματα, αναβαθμούς ανάσχεσης των πλημμυρών κλπ.

5. Επιφανειακή υδρολογία

5.1 Ένταση και κατανομή των βροχοπτώσεων

Οι έντονες βροχοπτώσεις σε μια περιοχή δεν ευνοούν την κατασκευή χωματερών λόγω της ανάγκης αποστράγγισης των υδάτων, ώστε να περιορίζεται κατά το δυνατόν ο όγκος του υγρού στραγγίσματος.

5.2 Εξατμισοδιαπνοή

Έντονη εξατμισοδιαπνοή περιορίζει τον όγκο του υγρού στραγγίσματος. Αντίθετα, δεν ευνοεί την κατασκευή χωματερών με αργιλικές στεγανωτικές μεμβράνες (clay liners), λόγω της ρηγμάτωσης της αργίλου από τη συρρίκνωση που προκαλείται κατά την ξήρανση.

5.3 Λίμνες, ποταμοί, πηγάδια, πηγές, πλημμυριζόμενες εκτάσεις κλπ.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θα πρέπει να τηρούνται οι ελάχιστες αποστάσεις από τα ανωτέρω.

7.3 Παραγωγή στραγγίσματος και βιο-αερίου

7.3.1 Γενικά

Η παραγωγή στραγγίσματος (leachate) και βιο-αερίου στους αποδέκτες αστικών απορριμμάτων (αλλά και άλλων τύπων στερεών αποβλήτων) αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό τους. Ειδικώς τα αστικά απορρίμματα περιέχουν ποικίλα οργανικά υλικά (π.χ. υπολείμματα τροφών, χαρτί, υφάσματα, φυτικές ύλες, ελαστικά και πλαστικά υλικά) τα οποία με την πάροδο του χρόνου αποσυντίθενται. Η αποσύνθεση των ανωτέρω οργανικών ουσιών γίνεται με την παρουσία υγρασίας, κατάλληλης θερμοκρασίας και συχνά οξυγόνου⁶. Η υγρασία που είναι απαραίτητη για την αποσύνθεση προέρχεται από τη φυσική

⁶ όπως αναφέρεται λεπτομερώς στα επόμενα, η παρουσία οξυγόνου δεν είναι πάντοτε απαραίτητη για την αποσύνθεση των οργανικών ουσιών

υγρασία των απορριμμάτων⁷, από την κατείσδυση της βροχόπτωσης (ιδίως στις περιπτώσεις που η κάλυψη των απορριμμάτων είναι ανεπαρκής) αλλά και από το νερό που παράγεται από τις χημικές αντιδράσεις της ίδιας της αποσύνθεσης. Συγκεκριμένα, κατά την αποσύνθεση οι οργανικές ύλες των απορριμμάτων διασπώνται από ένζυμα (τα οποία παράγονται από βακτήρια) με τρόπο ανάλογο με τη χώνευση της τροφής από τον άνθρωπο. Κατά την αποσύνθεση παράγεται διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και άλλα αέρια (υδροθείο, άζωτο κλπ), ενώ ταυτόχρονα εκλύεται έντονη θερμότητα λόγω της εξώθερμης φύσης των αντιδράσεων της αποσύνθεσης. Τα αέρια που παράγονται κατά την αποσύνθεση των απορριμμάτων αποτελούν το λεγόμενο βιο-αέριο. Το παραγόμενο βιο-αέριο κινείται προς τα επάνω και φθάνει στην επιφάνεια όπου και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε μεθάνιο, το βιο-αέριο είναι εύφλεκτο. Σημειώνεται ότι μίγμα μεθανίου με αέρα σε ποσοστό μεθανίου⁸ 15% κατ' ελάχιστον αποτελεί εκρηκτικό μίγμα. Επιπλέον, το βιο-αέριο μπορεί να διαλυθεί στο υγρό στράγγισμα και να επαυξήσει το ρυπαντικό του φορτίο.

Το νερό που παράγεται κατά την αποσύνθεση μαζί με τη φυσική υγρασία των απορριμμάτων και τις τυχόν διηθούμενες ποσότητες νερού λόγω των βροχοπτώσεων αποτελούν το υγρό στράγγισμα (leachate). Ως γνωστόν, στους πόρους των απορριμμάτων μπορεί να συγκρατηθεί κάποια ποσότητα νερού (μέσω των τριχοειδών δυνάμεων και της συνάφειας). Όταν η ποσότητα του νερού υπερβεί τη δυνατότητα συγκράτησης των πόρων, αρχίζει η κίνηση του στραγγίσματος προς τα κάτω. Καθώς το στράγγισμα κινείται διαμέσου της μάζας των απορριμμάτων, διαλύει και παρασύρει διάφορες ρυπογόνες ουσίες οι οποίες αποτελούν το ρυπαντικό φορτίο του στραγγίσματος. Εάν ο πυθμένας του αποδέκτη δεν είναι επαρκώς στεγανός, το στράγγισμα διεισδύει στο υποκείμενο έδαφος και τελικώς μπορεί να φθάσει στον υποκείμενο υδροφόρο και να τον ρυπάνει. Ακόμη όμως και στις περιπτώσεις που ο πυθμένας του ΧΥΤΑ έχει επαρκή στεγανότητα, το ύψος της στρώσης του συγκεντρούμενου στραγγίσματος βαθμιαία αυξάνει με αποτέλεσμα να αυξάνει το υδραυλικό φορτίο στη στεγανωτική στρώση του πυθμένα και συνεπώς να αυξάνει η πιθανότητα διαφυγής του στραγγίσματος διαμέσου ρωγμών, κατασκευαστικών ατελειών κλπ. Για τους ανωτέρω λόγους, είναι απαραίτητη η αποστράγγιση του στραγγίσματος από τον πυθμένα του αποδέκτη.

Στους σύγχρονους αποδέκτες στερεών αποβλήτων προβλέπεται ειδικό σύστημα συλλογής και απαγωγής του βιο-αερίου και του υγρού στραγγίσματος, ώστε να αποκλείεται η ανεξέλεγκτη διαφυγή τους στο περιβάλλον.

7.3.2 Μηχανισμοί αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών

Οι μηχανισμοί που περιγράφονται στο εδάφιο αυτό αφορούν γενικώς την αποσύνθεση των οργανικών ουσιών και βεβαίως ισχύουν και στην περίπτωση των αστικών απορριμμάτων (αλλά και πολλών άλλων κατηγοριών στερεών αποβλήτων) τα οποία περιέχουν οργανικές ύλες σε σημαντικό ποσοστό. Σύμφωνα με μετρήσεις (Barlaz κ.α. 1989), η μέση χημική σύσταση των αστικών απορριμμάτων στις ΗΠΑ είναι η ακόλουθη:

⁷ η φυσική υγρασία των απορριμμάτων κυμαίνεται μεταξύ 10-20% κατ' όγκο

⁸ το ποσοστό αυτό ονομάζεται ελάχιστο όριο εκρηκτικότητας (lower explosive limit - LEL)

ΜΕΣΗ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΗΠΑ (1989)		
Είδος	Χημική ουσία	% κατά βάρος
Βιολογικώς αποδομήσιμες ουσίες	Κυτταρίνη	51.2
	Ημι-κυτταρίνη	11.9
	Πρωτεΐνες	4.2
	Λιγνίνη	15.2
	Άμυλο	0.5
	Πηκτίνη	3.0
	Ευδιάλυτα Σάκχαρα	0.3
	ΣΥΝΟΛΟ:	86.3
Λοιπές ουσίες	Μέταλλα, Γυαλί κλπ.	13.7

Από τον ανωτέρω πίνακα προκύπτει ότι το 85% περίπου των ουσιών που περιέχονται στα αστικά απορρίμματα είναι οργανικές και μπορούν να αποσυντεθούν.

Η βιολογική αποσύνθεση των οργανικών ουσιών προκαλείται από τρεις τύπους βακτηρίων:

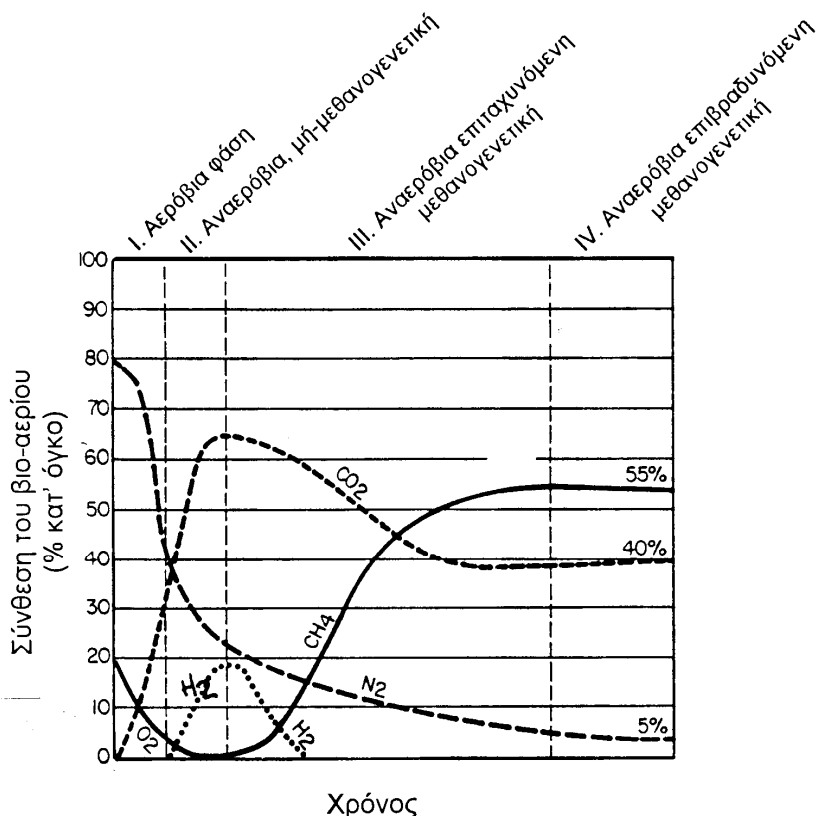
1. τα αερόβια βακτήρια τα οποία δραστηριοποιούνται μόνον με την παρουσία οξυγόνου
2. τα αναερόβια βακτήρια τα οποία δραστηριοποιούνται μόνον κατά την απουσία οξυγόνου και
3. τα επαμφοτερίζοντα (facultative) τα οποία μπορούν να προσαρμοσθούν και να δραστηριοποιηθούν είτε ως αερόβια είτε ως αναερόβια, αναλόγως των συνθηκών.

Με βάση τη δράση των ανωτέρω τύπων βακτηρίων, η διαδικασία της αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών διακρίνεται συνήθως σε τέσσερις φάσεις, οι οποίες συμβαίνουν διαδοχικά από την πρώτη προς την τέταρτη:

1. Αερόβια φάση (οξειδωση)
2. Αναερόβια όξινη ή μή-μεθανογενετική φάση
3. Αναερόβια επιταχυνόμενη μεθανογενετική φάση
4. Αναερόβια επιβραδυνόμενη μεθανογενετική φάση

Η αερόβια φάση της αποσύνθεσης (οξειδωση) ενεργοποιείται αμέσως μετά την απόθεση των απορριμμάτων λόγω της παρουσίας οξυγόνου στα κενά των απορριμμάτων. Κατά την οξειδωση παράγεται νερό, διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και οργανικά οξέα. Λόγω της εντόνως εξώθερμης φύσης της οξειδωσης, παράγεται σημαντική θερμότητα η οποία ανυψώνει τη θερμοκρασία των απορριμμάτων στους $50 - 60^\circ \text{C}$, ενώ έχουν μετρηθεί ακόμη και θερμοκρασίες 70°C . Η αερόβια φάση συνήθως διαρκεί μερικές μόνον ημέρες και περατώνεται λόγω της εξάντλησης του οξυγόνου. Αν και κατά την αερόβια φάση παράγεται κάποια ποσότητα νερού, συνήθως το νερό αυτό συγκρατείται εντός της μάζας των απορριμμάτων⁹ και δεν δημιουργεί υγρό στράγγισμα. Τέλος, το βιο-αέριο που παράγεται κατά την αερόβια φάση της αποσύνθεσης αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από διοξείδιο του άνθρακα.

⁹ λόγω του υψηλού πορώδους και του μικρού βαθμού συμπύκνωσης των απορριμμάτων



Σχήμα 7.3: Σύνθεση του βιο-αερίου κατά τις διάφορες φάσεις αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών

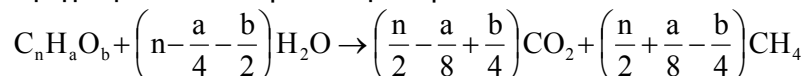
Η δεύτερη φάση της αποσύνθεσης αρχίζει μετά την κατανάλωση του συνόλου του οξυγόνου που περιέχεται στα κενά των απορριμμάτων, οπότε παύει η δράση των αεροβίων βακτηρίων και το σύστημα μετατρέπεται σε αναερόβιο. Με την πάροδο του χρόνου και την αποσύνθεση των οργανικών ουσιών με τη δράση των αναερόβιων βακτηρίων, αυξάνει η συγκέντρωση των καρβοξυλικών οξέων¹⁰, το pH μειώνεται (όξινη φάση), μέρος της κυτταρίνης και της ημι-κυτταρίνης αποσυντίθεται (και παρουσιάζεται μια πολύ μικρή παραγωγή μεθανίου), ενώ η έντονη παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα συνεχίζεται μέσω της μετατροπής των σακχάρων σε αλκοόλες και καρβοξυλικά οξέα¹¹. Η παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και του υδρογόνου (H₂) κατά τη φάση αυτή (φάση II) φαίνεται στο Σχήμα 7.3. Η πολύ μικρή παραγωγή μεθανίου κατά την όξινη φάση οφείλεται στις χαμηλές τιμές του pH που δεν επιτρέπουν τη μεθανογένεση. Σε συνήθεις ΧΥΤΑ η δεύτερη φάση της αποσύνθεσης μπορεί να κρατήσει αρκετούς μήνες έως και ολίγα έτη. Η θερμότητα που παράγεται κατά τη δεύτερη φάση της αποσύνθεσης είναι πολύ μικρότερη από αυτήν που παράγεται κατά την προηγούμενη φάση.

Η μετάβαση στην τρίτη φάση της αποσύνθεσης (τη μεθανογένεση) απαιτεί την αύξηση του pH, οι χαμηλές τιμές του οποίου εμποδίζουν την παραγωγή μεθανίου. Με την πάροδο του χρόνου, την παύση της περαιτέρω παραγωγής καρβοξυλικών οξέων

¹⁰ που οφείλεται κυρίως στη μετατροπή των σακχάρων σε αλκοόλες και στη συνέχεια σε καρβοξυλικά οξέα (μια διαδικασία ανάλογη με το "ξύνισμα" του κρασιού). Τα καρβοξυλικά οξέα, ή οργανικά οξέα, έχουν όξινες ιδιότητες λόγω της καρβοξυλικής ρίζας (-COOH) που περιέχουν. Το οξικό οξύ (CH₃COOH) είναι ένα από τα συνηθέστερα οργανικά οξέα που παράγονται κατά την αναερόβια αποσύνθεση των οργανικών υλών (κυρίως της κυτταρίνης και της ημι-κυτταρίνης).

¹¹ κατά τη μετατροπή αυτή παράγονται και μικρές ποσότητες υδρογόνου

λόγω εξάντλησης των σακχάρων και την έκπλυση των παραχθέντων καρβοξυλικών οξέων από την κατεισδύουσα βροχόπτωση ή/και την κατανάλωσή τους από τα βακτήρια, αυξάνει βαθμιαία το pH. Τότε αρχίζει η φάση της έντονης μεθανογένεσης (Σχήμα 7.3) με τη δράση των (αναερόβιων) μεθανογενετικών βακτηρίων, τα οποία δρουν σε πρακτικώς ουδέτερο pH (μεταξύ 6.8 και 7.4). Τα βακτήρια αυτά καταναλώνουν ουσίες όπως καρβοξυλικά οξέα, μεθανόλη, μεθυλαμίνες, ακετάσες, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα και παράγουν μεθάνιο. Έτσι, κατά την τρίτη φάση της αποσύνθεσης, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται και αυξάνει η συγκέντρωση του μεθανίου που φθάνει το 50-60% του συνόλου του παραγόμενου βιο-αερίου. Γενικώς, ο ανωτέρω μηχανισμός της υδρόλυσης της κυτταρίνης ($C_6H_{10}O_5$) και της ημι-κυτταρίνης ($C_5H_8O_4$) προς διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο περιγράφεται από την αντίδραση:



Η φάση της έντονης παραγωγής μεθανίου σε έναν αποδέκτη μπορεί να διαρκέσει επί μια δεκαετία περίπου. Κατά τη φάση αυτή η παραγωγή θερμότητας είναι μικρή (πολύ μικρότερη από την παραγωγή θερμότητας κατά την αερόβια φάση της αποσύνθεσης).

Η τέταρτη και τελευταία φάση της αποσύνθεσης χαρακτηρίζεται από την επιβράδυνση της παραγωγής μεθανίου λόγω της εξάντλησης των καρβοξυλικών οξέων και της περαιτέρω αύξησης του pH (7.5-8.0). Κατά τη φάση αυτή, η σχετική περιεκτικότητα του βιο-αερίου σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα παραμένει πρακτικώς σταθερή με αναλογία 50-60% περίπου μεθάνιο και 50-40% διοξείδιο του άνθρακα, ενώ η παραγόμενη θερμότητα είναι πολύ μικρή.

Συνοπτικά, τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τεσσάρων φάσεων της αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ	
Φάση	Χαρακτηριστικά
(I) Αερόβια αποσύνθεση	Οξειδωση μέσω αερόβιων βακτηρίων Παραγωγή CO_2 Έντονη θερμότητα Διάρκεια: μερικές ημέρες
(II) Αναερόβια όξινη μή-μεθανογενετική	Υδρόλυση κυτταρίνης και σακχάρων προς αλκοόλες και στη συνέχεια προς καρβοξυλικά οξέα. Μή παραγωγή μεθανίου λόγω χαμηλού pH. Παραγωγή CO_2 και H_2 Χαμηλές τιμές του pH (5.5-6.0) Διάρκεια: αρκετοί μήνες έως ολίγα έτη
(III) Αναερόβια επιταχυνόμενη μεθανογενετική	Κατανάλωση των καρβοξυλικών οξέων (με έντονη παραγωγή μεθανίου) λόγω αύξησης του pH Έντονη παραγωγή CH_4 Μέσες τιμές του pH (6.8-7.4) Διάρκεια: έως και δέκα έτη
(IV) Αναερόβια επιβραδυνόμενη μεθανογενετική	Σταθεροποίηση παραγωγής μεθανίου Αύξηση του pH (7.5-8.0) Διάρκεια: μερικά έτη

Σε όλες τις φάσεις της αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών παράγεται και νερό το οποίο συνεισφέρει στον όγκο του υγρού στραγγίσματος. Με την αυξανόμενη παραγωγή νερού και τη βαθμιαία συμπίεση των απορριμμάτων από το βάρος των υπερκειμένων αλλά και τη μείωση του όγκου τους (λόγω της αποσύνθεσης), το στραγγισμα κινείται προς τα κάτω και συγκεντρώνεται στον πυθμένα του αποδέκτη.

Αντίστοιχα, το παραγόμενο βιο-αέριο διαφεύγει βαθμιαία και κινείται προς την επιφάνεια του εδάφους.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το βιο-αέριο γενικώς αποτελείται από μεθάνιο σε ποσοστό 50-70%, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό είναι διοξείδιο του άνθρακα (30-40%) και διάφορες άλλες ουσίες σε μικρά ποσοστά (π.χ. ελαφρά πετρελαιοειδή, υδρογόνο, υδρόθειο, αλλά και ίχνη χλωριούχου βινυλίου¹²). Η συνολική παραγωγή μεθανίου στους συνήθεις αποδέκτες κυμαίνεται μεταξύ 40 και 120 λίτρων μεθανίου ανά χιλιόγραμμο απορριμμάτων. Όσον αφορά το ρυθμό παραγωγής του μεθανίου, με βάση τα στοιχεία της διεθνούς βιβλιογραφίας εκτιμάται ένας μέσος ετήσιος ρυθμός περί τα 5-10 λίτρα μεθανίου ανά χιλιόγραμμο απορριμμάτων¹³.

Η σύνθεση του ρυπαντικού φορτίου του υγρού στραγγίσματος ποικίλει αναλόγως του χρόνου μέτρησης, δηλαδή της φάσης αποσύνθεσης στην οποία βρίσκεται ο αποδέκτης. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία από 15 αποδέκτες αστικών απορριμμάτων της Γερμανίας που είχαν ηλικίες μεταξύ 1-12 ετών προέκυψαν τα στοιχεία που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (Ehrig, 1988):

ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΓΡΟΥ ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΑΤΟΣ (Συγκέντρωση σε mg/l)		
Ρύπος	Όξινη αναερόβια φάση	Μεθανογενετική φάση
BOD*	13000	180
COD**	22000	3000
SO ₄	500	80
Ca	1200	60
Mg	470	180
Fe	780	15
Mn	25	0.7
Zn	5	0.6
pH	6.1	8.0
BOD/COD	0.58	0.06
*BOD = Biological Oxygen Demand **COD = Chemical Oxygen Demand		

ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΓΡΟΥ ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΑΤΟΣ (Συγκέντρωση σε µg/l)	
Ρύπος	Μέση συγκέντρωση
Αρσενικό	160
Κάδμιο	6
Κοβάλτιο	55
Νικέλιο	200
Μόλυβδος	90
Χρώμιο	300
Χαλκός	80
Υδράργυρος	10

7.4 Τυπικές διατάξεις των σύγχρονων αποδεκτών

Ένα από τα πρώτα θέματα που θα πρέπει να προσδιορισθεί κατά το σχεδιασμό ενός σύγχρονου αποδέκτη στερεών αποβλήτων είναι η θέση του ως προς την επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή εάν πρόκειται για υπέργειο, ημι-υπόγειο ή υπόγειο αποδέκτη (Σχήμα 7.2). Τα υπέργεια έργα προτιμώνται κυρίως σε περιπτώσεις όπου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε μικρό βάθος από την

¹² το οποίο είναι γνωστό καρκινογόνο

¹³ με την παραδοχή ότι σε μια λειτουργούσα “χωματερή” συνυπάρχουν όλες οι φάσεις της αποσύνθεσης

επιφάνεια και συνεπώς η όποια εκσκαφή θα μειώσει το πάχος της εδαφικής στρώσης μεταξύ του πυθμένα του αποδέκτη και της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Οι υπέργειες κατασκευές έχουν επίσης το πλεονέκτημα ότι το διήθημα ή στράγγισμα (leachate) που συγκεντρώνεται στον πυθμένα του αποδέκτη μπορεί να αποστραγγισθεί δια βαρύτητας (δηλαδή χωρίς άντληση). Τέλος, η κατασκευή της στεγανωτικής στρώσης στον πυθμένα του ΧΥΤΑ είναι περισσότερο ευχερής αφού κατασκευάζεται στην επιφάνεια του εδάφους. Οι ημι-υπόγειες και οι υπόγειες κατασκευές πλεονεκτούν ως προς τη χωρητικότητα και επιπλέον τα προϊόντα των εκσκαφών μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ως υλικά για την καθημερινή κάλυψη του αποδέκτη. Τέλος, οι υπόγειες κατασκευές έχουν το πλεονέκτημα ότι η περιοχή μπορεί να επιπεδωθεί μετά την πλήρωσή της και να επαναχρησιμοποιηθεί.

Οι σύγχρονοι αποδέκτες στερεών αποβλήτων διαθέτουν ειδικά συστήματα για τον έλεγχο και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ειδικότερα, τα συστήματα αυτά έχουν τους εξής σκοπούς:

1. Να ελαχιστοποιήσουν την κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων (βροχόπτωση, χιονόπτωση και επιφανειακές απορροές) εντός του σώματος του ΧΥΤΑ, ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν ο όγκος του υγρού στραγγίσματος.
2. Να συγκεντρώσουν και να απαγάγουν με κατάλληλο τρόπο το υγρό στράγγισμα (leachate) και το παραγόμενο βιο-αέριο.
3. Να ελαχιστοποιήσουν τη διαφυγή του στραγγίσματος προς το υπέδαφος.

Για την πραγματοποίηση των ανωτέρω σκοπών οι σύγχρονοι αποδέκτες στερεών αποβλήτων διαθέτουν:

1. Ειδική στεγανωτική στρώση στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρηνή (base liner).
2. Σύστημα συλλογής και απαγωγής του υγρού στραγγίσματος (leachate collection system).
3. Σύστημα συλλογής και ελεγχόμενης απαγωγής του βιο-αερίου.
4. Ειδικό κάλυμμα στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ τόσο κατά τις ενδιάμεσες φάσεις πλήρωσης του χώρου (καθημερινή κάλυψη) όσο και μετά την τελική του πλήρωση (τελική κάλυψη).

Το Σχήμα 7.4 παρουσιάζει μερικές τυπικές διατάξεις σύγχρονων αποδεκτών στερεών αποβλήτων. Στα επόμενα εδάφια περιγράφεται αναλυτικά η τεχνολογία μελέτης και κατασκευής των ανωτέρω συστημάτων προστασίας από τη ρύπανση.

7.5 Στεγανωτικές στρώσεις πυθμένα

Όλοι οι σύγχρονοι αποδέκτες στερεών αποβλήτων διαθέτουν στεγανωτικές στρώσεις στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρηνή, που έχουν σκοπό να ελαχιστοποιήσουν τη διαφυγή του υγρού στραγγίσματος προς το υπέδαφος. Οι στρώσεις μπορεί να είναι :

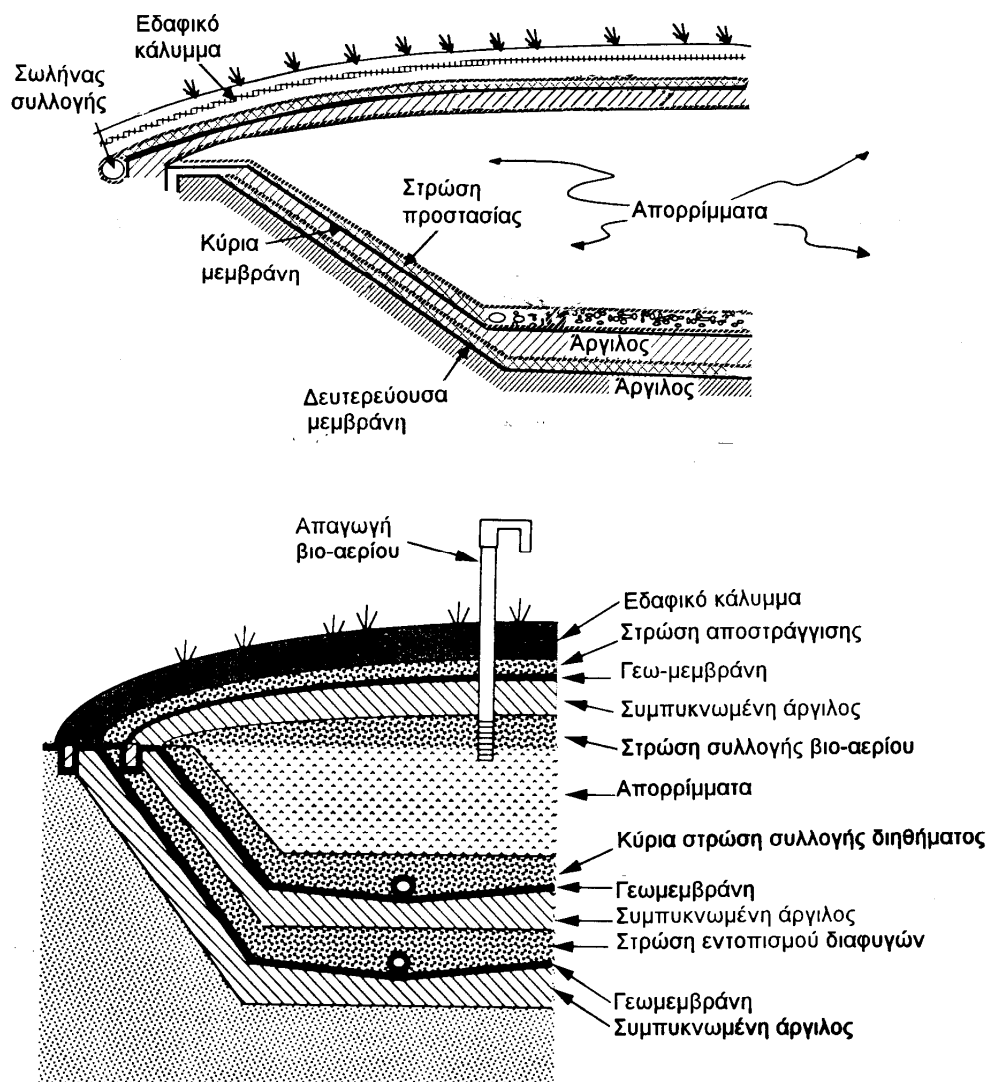
1. Απλή στρώση συμπακνωμένης αργίλου (compacted clay liner).
2. Μεμβράνη από συνθετικό υλικό (synthetic liner), όπως το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE) κλπ.
3. Σύνθετη στεγανωτική μεμβράνη (composite liner), που αποτελείται από μια συνθετική μεμβράνη τοποθετημένη πάνω σε μια στρώση συμπακνωμένης αργίλου.
4. Γεω-συνθετική αργιλική στεγανωτική μεμβράνη (geo-synthetic clay liner), που αποτελείται από συνδυασμό μιας λεπτής αργιλικής στρώσης (πάχους μερικών χιλιοστών) και ενός ή δύο συνθετικών υλικών.

5. Διπλή στεγανωτική στρώση με ενδιάμεση αποστραγγιστική στρώση (για τον εντοπισμό και τη συλλογή των πιθανών διαφυγών διαμέσου της ανώτερης στεγανωτικής στρώσης). Το σύστημα αυτό προσφέρει τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια έναντι διαφυγών και χρησιμοποιείται συνήθως στους αποδέκτες επικινδύνων ή τοξικών αποβλήτων. Η κάθε μια από τις δυο στεγανωτικές στρώσεις μπορεί να είναι κάποια από τις ανωτέρω περιπτώσεις (1), (2), (3) ή (4).

Στα επόμενα περιγράφονται οι παραπάνω τύποι στεγανωτικών στρώσεων.

7.5.1 Στρώσεις συμπυκνωμένης αργίλου

Στρώσεις συμπυκνωμένης αργίλου χρησιμοποιούνταν συχνά στο παρελθόν ως η μοναδική επένδυση του πυθμένα αποδεκτών μή-επικινδύνων αποβλήτων. Οι νεώτεροι όμως κανονισμοί απαιτούν και τη χρήση συνθετικής μεμβράνης στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρηνή. Στις περιπτώσεις αποδεκτών επικινδύνων στερεών αποβλήτων, οι συμπυκνωμένες αργιλικές στρώσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με κάποια άλλη στεγανωτική επένδυση (π.χ. συνθετικές μεμβράνες ή γεω-συνθετικές μεμβράνες). Όπως αναφέρθηκε σε



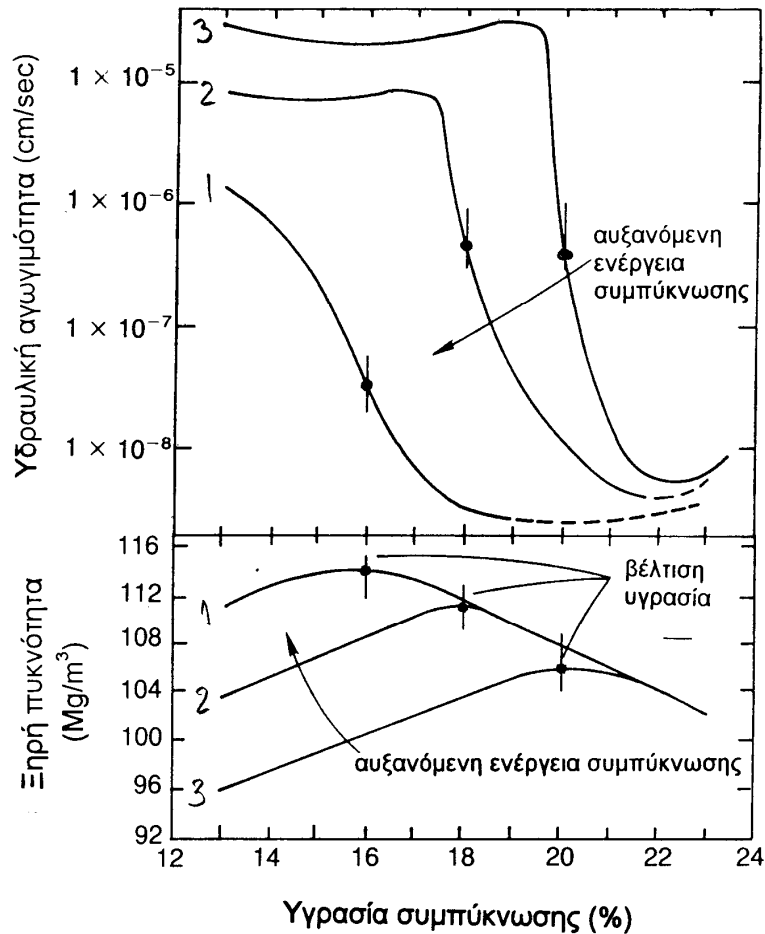
Σχήμα 7.4: Τυπική διάταξη ενός σύγχρονου αποδέκτη στερεών αποβλήτων

προηγούμενο Κεφάλαιο, τα αργιλικά υλικά¹⁴ όταν συμπυκνωθούν με κατάλληλη υγρασία αποκτούν μικρή διαπερατότητα και μπορούν να λειτουργήσουν ως στεγανωτική μεμβράνη. Κατά τη χρήση όμως των συμπυκνωμένων αργιλικών υλικών ως στεγανωτικών μεμβρανών στον πυθμένα και τις παρειές των σύγχρονων αποδεκτών στερεών αποβλήτων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

1. Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (διαπερατότητας) της συμπυκνωμένης αργιλικής στρώσης θα πρέπει γενικώς να είναι μικρότερος από το 10^{-9} m/sec. Ως ενδεικτικές απαιτήσεις για την επίτευξη του ανωτέρω περιορισμού είναι:
 - (α) Ποσοστό λεπτοκόκκου κλάσματος (< No 200): κατ' ελάχιστον 20 - 30 %
 - (β) Δείκτης πλαστικότητας: κατ' ελάχιστον 7 - 10 %
 - (γ) Ποσοστό χαλίκων (> No 4, d = 4.75 mm): μικρότερο από 30 %
 - (δ) Μέγιστη διάσταση κόκκου: 25 - 50 mm

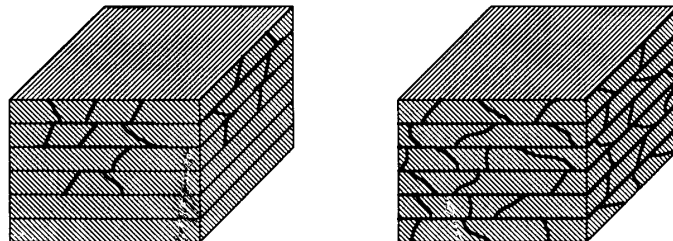
Οι ανωτέρω είναι ενδεικτικές τιμές των αντίστοιχων ιδιοτήτων, και συνεπώς ο επιτυγχανόμενος συντελεστής διαπερατότητας θα πρέπει πάντοτε να ελέγχεται με επαρκή αριθμό δοκιμών μέτρησης της διαπερατότητας. Ανεξάρτητα όμως από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, κατά την επιλογή των υλικών κατασκευής της αργιλικής στεγανωτικής στρώσης θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή και σε κατασκευαστικά θέματα που συνδέονται κυρίως με τη διαφορά κλίμακας μεταξύ των εργαστηριακών δοκιμών και της επιτόπου συμπεριφοράς της συμπυκνωμένης αργιλικής στρώσης. Έτσι, π.χ. η παρουσία υψηλού ποσοστού χαλίκων (50-60%) μπορεί να μην αυξάνει την υδραυλική αγωγιμότητα πάνω από το αποδεκτό όριο κατά τις εργαστηριακές δοκιμές όπου η ανάμειξη των υλικών είναι ικανοποιητική. Κατά τις επιτόπου εργασίες συμπύκνωσης, όμως, είναι πολύ πιθανόν να προκληθεί απόμειξη των υλικών και να δημιουργηθούν θύλακες με αυξημένο ποσοστό χαλίκων (άνω του 60%), όπου η διαπερατότητα θα είναι ασφαλώς αυξημένη και θα προκληθούν διαρροές.
2. Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας των αργιλικών υλικών επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία συμπύκνωσης και την εφαρμοζόμενη ενέργεια. Το Σχήμα 7.5 παρουσιάζει τυπικές καμπύλες της μεταβολής της υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορες τιμές της υγρασίας κατά τη συμπύκνωση και την εφαρμοζόμενη ενέργεια συμπύκνωσης. Η υδραυλική αγωγιμότητα προφανώς μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας συμπύκνωσης. Επιπλέον, η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται σημαντικά (κατά 10-100 φορές) με την αύξηση της υγρασίας συμπύκνωσης κατά 2-3% πάνω από τη βέλτιστη τιμή. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση χρήσης των συμπυκνωμένων αργίλων ως στεγανωτικών μεμβρανών συνιστάται η υγρασία της συμπύκνωσης να είναι ελαφρά μεγαλύτερη (κατά 2% περίπου) από τη βέλτιστη υγρασία.
3. Τα αργιλικά υλικά όταν ξηρανθούν συρρικνώνονται και ρηγματώνονται. Η τάση για συρρίκνωση γενικώς αυξάνει με την αύξηση του δείκτη πλαστικότητας της αργίλου. Οι αργιλικές στεγανωτικές μεμβράνες στον πυθμένα ΧΥΤΑ γενικώς εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία πριν από την αρχική κάλυψή τους, με συνέπεια να ξηραίνονται και να υπάρχει κίνδυνος να ρηγματωθούν. Για τους λόγους αυτούς:

¹⁴ δηλαδή τα γαιώδη υλικά που περιέχουν ένα σημαντικό ποσοστό λεπτοκόκκου κλάσματος (διερχόμενο από το κόσκινο No 200 - d < 75 μ m)



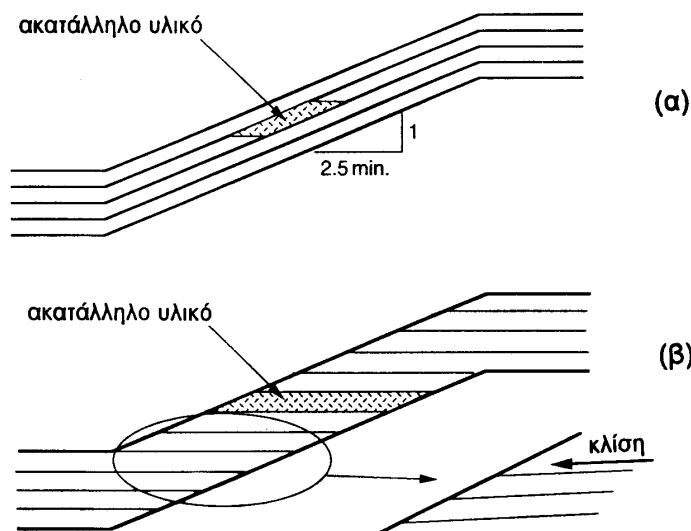
Σχήμα 7.5: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας των συμπυκνωμένων αργίλων με την ενέργεια και την υγρασία κατά τη συμπίκνωση

- (α) Δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αργιλικά υλικά υψηλής πλαστικότητας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο δείκτης πλαστικότητας θα πρέπει να είναι μικρότερος του 30-35%, ιδίως στις περιπτώσεις όπου προβλέπεται αξιόλογη ξήρανση του υλικού.
- (β) Η συμπίκνωση των επάλληλων στρώσεων της αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης θα πρέπει να γίνεται ταχέως ώστε να αποφεύγεται η παρατεταμένη έκθεση της επιφάνειας της αργίλου στην ηλιακή ακτινοβολία, η ξήρανσή της και συνεπώς η ρηγμάτωσή της (Σχήμα 7.6).
- (γ) Η τελική επιφάνεια της συμπυκνωμένης αργιλικής μεμβράνης θα πρέπει να καλύπτεται ταχέως, ώστε να αποφεύγεται η ξήρανση και η ως εκ τούτου



Σχήμα 7.6: Τυπική ξήρανση των επάλληλων στρώσεων συμπυκνωμένης αργιλικής μεμβράνης

- ρηγμάτωσή της. Επιπλέον, η πλήρωση του αποδέκτη στερεών αποβλήτων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η στεγανωτική μεμβράνη του πυθμένα να καλύπτεται ταχέως από την πρώτη στρώση αποβλήτων η οποία θα προστατεύσει τη μεμβράνη και από την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.
- (δ) Σε περιοχές έντονου ψύχους, η αργιλική στεγανωτική στρώση θα πρέπει να προστατεύεται και από τον παγετό. Για τις Ελληνικές κλιματικές συνθήκες, η κάλυψη της αργιλικής μεμβράνης με την αμμώδη στρώση συλλογής του υγρού στραγγίσματος είναι συνήθως επαρκής για την αποφυγή βλαβών της αργιλικής στρώσης λόγω παγετού.
4. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται κατά τη συμπύκνωση της αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης στις παρειές του αποδέκτη στερεών αποβλήτων (Σχήμα 7.7). Η συμπύκνωση σε οριζόντιες στρώσεις δεν συνιστάται, επειδή γενικώς η διαπερατότητα κατά μήκος των διεπιφανειών μεταξύ των επάλληλων στρώσεων είναι αυξημένη με συνέπεια πιθανές διαφυγές του στραγγίσματος. Αν τελικώς επιλεγεί η συμπύκνωση σε οριζόντιες στρώσεις, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε η διεπιφάνεια μεταξύ των επάλληλων στρώσεων να έχει κλίση προς το εσωτερικό του αποδέκτη. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι διαφυγές του υγρού στραγγίσματος εκτός του αποδέκτη (υπό την προϋπόθεση βεβαίως ότι το στράγγισμα απομακρύνεται από τον πυθμένα του ΧΥΤΑ και δεν δημιουργεί στάθμη).
5. Οι χημικές ουσίες που περιέχονται στο υγρό στράγγισμα μπορούν να προσβάλουν τη συμπυκνωμένη αργιλική στρώση και να μεταβάλουν τις ιδιότητές της (π.χ. να αυξήσουν τη διαπερατότητα ή να τη διαβρώσουν πλήρως). Συγκεκριμένα:
- (α) Ισχυρά οξέα και βάσεις μπορούν να διαλύσουν τα αργιλικά ορυκτά και να διαβρώσουν την αργιλική μεμβράνη. Ορισμένα οξέα όπως το υδροφθορικό και το φωσφορικό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα από την άποψη αυτή.
- (β) Ποικίλες ανόργανες και οργανικές ουσίες του υγρού στραγγίσματος μπορούν να μεταβάλουν το πάχος της διπλής στρώσης των αργιλικών ορυκτών, να τροποποιήσουν τη δομή τους και να μεταβάλουν την υδραυλική τους αγωγιμότητα. Τα θέματα αυτά εξετάστηκαν λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4. Υπενθυμίζεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. ηλεκτρολύτες, οργανικές ενώσεις), προκαλείται θρόμβωση (flocculation) της δομής των αργιλικών



Σχήμα 7.7: Συμπύκνωση αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης στις παρειές του αποδέκτη στερεών αποβλήτων (α) παράλληλα με την κλίση του πρανούς και (β) σε οριζόντιες στρώσεις

ορυκτών με συνέπεια τη ρηγμάτωση της αργίλου και την αύξηση της διαπερατότητας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται “συναίρεση” (syneresis) και οι αναπτυσσόμενες ρωγμές “συναιρετικές ρωγμές”.

Για τους ανωτέρω λόγους, θα πρέπει να εκτελούνται ειδικές δοκιμές συμβατότητας (compatibility tests) για τον έλεγχο της επιρροής του αναμενόμενου στραγγίσματος των απορριμμάτων στα συγκεκριμένα αργιλικά υλικά που προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης.

Πάντως, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση μιας απλής αργιλικής στεγανωτικής μεμβράνης στον πυθμένα ενός αποδέκτη στερεών αποβλήτων είναι πιθανόν να παρουσιάσει αξιόλογες διαρροές στραγγίσματος προς το περιβάλλον για κάποιον από τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Έτσι, στους περισσότερους αποδέκτες στερεών αποβλήτων χρησιμοποιούνται σύνθετες στεγανωτικές στρώσεις που περιλαμβάνουν και άλλες στρώσεις εκτός από την αργιλική μεμβράνη¹⁵.

7.5.2 Συνθετικές μεμβράνες

Μέχρι το 1982 η στεγάνωση του πυθμένα των αποδεκτών στερεών αποβλήτων συνίστατο σχεδόν αποκλειστικά από στρώσεις συμπυκνωμένης αργίλου¹⁶. Όμως η χρήση της συμπυκνωμένης αργίλου ως μοναδικής στεγανωτικής μεμβράνης παρουσιάζει δυο βασικά μειονεκτήματα:

1. Είναι δυσχερής (αν όχι αδύνατη) η κατασκευή μιας εκτεταμένης στρώσης συμπυκνωμένης αργίλου χωρίς περιοχές αυξημένης διαπερατότητας (π.χ. λόγω της τυχαίας παρουσίας κάποιας ποσότητας χονδρόκοκκου υλικού).
2. Είναι δύσκολο να αποφευχθεί η ρηγμάτωση μιας εκτεταμένης στρώσης συμπυκνωμένης αργίλου λόγω ξήρανσης και συρρίκνωσης.

Τα μειονεκτήματα αυτά θεραπεύονται από τις λεγόμενες συνθετικές μεμβράνες (synthetic liners) ή γεω-μεμβράνες (geomembrane liners) των οποίων η βιομηχανική παραγωγή παρουσίασε ραγδαία ανάπτυξη στις αρχές της δεκαετίας του 1980 λόγω αντίστοιχης ανάπτυξης της τεχνολογίας των πολυμερών. Έτσι, σήμερα η χρήση συνθετικών μεμβρανών στον πυθμένα και τις παρειές των αποδεκτών των περισσότερων στερεών (αλλά και υγρών) αποβλήτων είναι επιβεβλημένη από τους Κανονισμούς όλων των προηγμένων χωρών.

Τρεις κατηγορίες πολυμερών προσφέρονται για την κατασκευή γεω-μεμβρανών: τα θερμοσκληρυνόμενα ελαστομερή, τα βιτουμινούχα (ασφαλτικά) πολυμερή και τα θερμοπλαστικά πολυμερή. Τα θερμοσκληρυνόμενα ελαστομερή χρησιμοποιούνται σπανίως για τη στεγάνωση του πυθμένα ΧΥΤΑ λόγω της δυσχέρειας στη συρραφή των φύλλων τους σε συνθήκες εργοταξίου. Τα βιτουμινούχα πολυμερή επίσης χρησιμοποιούνται σε λίγες περιπτώσεις, κυρίως λόγω της μικρής μηχανικής τους αντοχής¹⁷. Έτσι, το σύνολο σχεδόν των συνθετικών γεω-μεμβρανών που χρησιμοποιούνται στους αποδέκτες στερεών αποβλήτων υπάγονται στην κατηγορία των θερμοπλαστικών. Τα θερμο-πλαστικά υλικά έχουν την

¹⁵ Εξαίρεση αποτελούν οι αποδέκτες αδρανών προϊόντων κατεδαφίσεων (μπάζων), όπου το ρυπαντικό φορτίο των υλικών είναι γενικώς μικρό και δεν παράγονται αξιόλογες ποσότητες υγρού στραγγίσματος

¹⁶ σε πολλές περιπτώσεις, ιδίως παλαιότερων “χωματερών”, δεν προβλεπόταν η κατασκευή ειδικής στεγανωτικής στρώσης στον πυθμένα και η όποια προστασία από τη ρύπανση επαφίετο στη φυσική εξασθένηση του ρυπαντικού φορτίου κατά την κίνηση του υγρού στραγγίσματος διαμέσου των υποκείμενων εδαφικών στρώσεων

¹⁷ το κύριο πλεονέκτημα των βιτουμινούχων πολυμερών είναι η αντοχή τους στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV) και συνεπώς χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις παρατεταμένης έκθεσης της μεμβράνης στην ηλιακή ακτινοβολία

ιδιότητα να μαλακώνουν (λιώνουν) όταν θερμανθούν και να επανέρχονται πρακτικώς στην αρχική τους κατάσταση αφού ψυχθούν. Τα κυριότερα είδη θερμοπλαστικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή γεω-μεμβρανών είναι:

1. Το πολυ-αιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High Density Poly-Ethylene, HDPE) με λεία ή τραχεία επιφάνεια.
2. Το πολυ-αιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (Low Density Poly-Ethylene, LDPE) με λεία ή τραχεία επιφάνεια.
3. Το χλωριωμένο πολυ-αιθυλένιο (Chlorinated Poly-Ethylene, CPE) είτε απλό είτε ενισχυμένο (οπλισμένο) με πλέγμα από συνθετικές ίνες για την αύξηση της μηχανικής αντοχής σε εφελκυσμό.
4. Το χλωρο-θειωμένο πολυ-αιθυλένιο (Chloro-sulfonated Poly-Ethylene, CSPE), συνήθως ενισχυμένο (οπλισμένο) με πλέγμα από συνθετικές ίνες για την αύξηση της μηχανικής αντοχής σε εφελκυσμό.
5. Το χλωριούχο πολυ-βινύλιο (Poly-Vinyl Chloride, PVC).

Τα ανωτέρω θερμοπλαστικά υλικά συνήθως κατεργάζονται με διάφορα πρόσμικτα (additives) που έχουν ως σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Έτσι, προκύπτουν τελικώς πολλές ποικιλίες υλικών με διάφορα εμπορικά ονόματα. Οι συνθετικές γεωμεμβράνες κυκλοφορούν στο εμπόριο με τη μορφή φύλλων πάχους 0.3-3 χιλιοστών¹⁸ (ή και περισσότερο) σε ρολλά εύρους 5-8 μέτρων και μήκους μερικών δεκάδων μέτρων. Η παραγωγή των φύλλων από τη θερμοπλαστική μάζα του πολυμερούς γίνεται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

1. Με πίεση διαμέσου του κενού που δημιουργείται από δυο κυλινδρικούς σωλήνες που περιστρέφονται με αντίθετη φορά (extrusion, calendering). Με τον τρόπο αυτό παράγονται οι απλές γεω-μεμβράνες (δηλαδή οι μή-οπλισμένες).
2. Με βαφή και εμποτισμό (spread coating) της θερμοπλαστικής ύλης πάνω σε ένα πλέγμα από συνθετικές ίνες οι οποίες αποτελούν και τον οπλισμό της γεωμεμβράνης.

Η καταλληλότητα των γεω-μεμβρανών ως στεγανωτικών υλικών στον πυθμένα των σύγχρονων αποδεκτών εξαρτάται από τις ιδιότητές τους. Οι κυριότερες ιδιότητες των γεω-μεμβρανών είναι (σε παρένθεση δίνεται ο αριθμός της Αμερικανικής προδιαγραφής ASTM για τον έλεγχο της συγκεκριμένης ιδιότητας):

1. Φυσικές ιδιότητες
Όπως το πάχος της μεμβράνης (D751), το ειδικό βάρος (D792 ή D1505), το βάρος ανά μονάδα επιφάνειας (D1910), η διαπερατότητα (E96), η περιεκτικότητα σε άνθρακα (D1603) κλπ.
2. Μηχανικές ιδιότητες
Όπως η εφελκυστική αντοχή και η αντίστοιχη παραμόρφωση (D638), η αντοχή έναντι σχισίματος (D1004), η αντοχή έναντι διατρήσεως (FTMS 101 B), η ψαθυρότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες (D746), η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (794), η αντοχή σε ρηγμάτωση (D1693), η αντοχή σε γήρανση (D573, D1349) κλπ.
3. Χημικές ιδιότητες
Όπως η αντοχή σε διόγκωση (D570), η αντοχή έναντι του όζοντος (D1149) και η αντοχή έναντι υπεριώδους ακτινοβολίας (D3334, G23, G26, G53). Επιπλέον, προσδιορίζεται η αντοχή έναντι του υγρού στραγγίσματος των απορριμμάτων με τη μέθοδο 9090 της U.S.EPA (1985) που ελέγχει τη συμβατότητα της γεω-μεμβράνης με συνήθεις ρύπους των υγρών στραγγισμάτων ΧΥΤΑ.
4. Βιολογικές ιδιότητες

¹⁸ το πάχος των γεω-μεμβρανών συνήθως μετράται σε mils (1mm = 40 mils)

Όπως η αντοχή στην ανάπτυξη μηκύτων (G21) και έναντι βακτηρίων (G22). Στις ανωτέρω δοκιμές ελέγχονται κυρίως τα πρόσμικτα υλικά της μεμβράνης δεδομένου ότι τα πολυμερή υλικά είναι αδρανή έναντι τέτοιων επιδράσεων. Επίσης θα πρέπει να ελέγχεται η αντοχή της μεμβράνης στα τρωκτικά και στη διάτρηση από τις ρίζες διάφορων φυτών (ζιζανίων).

Τυπικές τιμές των ανωτέρω ιδιοτήτων για θερμοπλαστικές γεω-μεμβράνες είναι:

Ιδιότητα	Απλή μεμβράνη	Ενισχυμένη μεμβράνη (οπλισμένη)
Εφελκυστική αντοχή (kN/m)	10 - 50	20 - 200
Παραμόρφωση θραύσεως (%)	100 - 500	10 - 30
Ανηγμένο βάρος (kg/m ²)	0.3 - 1.5	0.6 - 2.0

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα που επηρεάζουν τη στεγανότητα είναι η προσεκτική συρραφή των φύλλων. Είναι προφανές ότι λόγω της μεγάλης έκτασης της επιφάνειας που καλύπτεται με τη γεω-μεμβράνη απαιτούνται συρραφές μήκους πολλών χιλιομέτρων. Οι συρραφές των μεμβρανών γίνονται με τρεις τρόπους:

1. Με κανονική συγκόλληση (extrusion welding) κατά την οποία ένα πρόσθετο θερμό θερμοπλαστικό υλικό τοποθετείται στην επαφή των δυο μεμβρανών οι οποίες λιώνουν και συγκολλώνται. Η μέθοδος αυτή είναι ανάλογη της ηλεκτροσυγκόλλησης των μεταλλικών φύλλων. Η κανονική συγκόλληση χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε γεω-μεμβράνες από πολυ-αιθυλένιο (HDPE, LDPE).
2. Με θερμική επεξεργασία, δηλαδή με θέρμανση των δυο φύλλων της μεμβράνης στην περιοχή της επικάλυψης (χωρίς πρόσθεση άλλου υλικού) και συγκόλλησή τους λόγω της υψηλής θερμοκρασίας. Η θέρμανση συνήθως γίνεται μέσω ηλεκτρικώς θερμαινόμενου μεταλλικού στελέχους το οποίο έρχεται σε επαφή με τις μεμβράνες στην περιοχή που επικαλύπτονται.
3. Με διάφορες άλλες μεθόδους όπως με υπερήχους, με χημικούς διαλύτες κλπ.

Οι συρραφές των γεω-μεμβρανών είναι τα ασθενέστερα σημεία στα οποία υπάρχει πιθανότητα διαρροών. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι για τον έλεγχο των συγκολλήσεων στις θέσεις συρραφής των μεμβρανών. Μια από τις συνηθέστερες μεθόδους συρραφής είναι η επίθεση δυο φύλλων κατά 10-20 cm περίπου και η διπλή συρραφή τους με δυο παράλληλες συγκολλήσεις. Στη συνέχεια, η ποιότητα της συρραφής δοκιμάζεται με εισπίεση νερού στο θύλακα που δημιουργείται μεταξύ των δυο επάλληλων φύλλων και των δυο ραφών. Τυχόν ατέλειες στη συγκόλληση εντοπίζονται μέσω της παρατηρούμενης απώλειας πίεσης και της διαφυγής νερού. Στατιστικές μετρήσεις που έγιναν για τη διερεύνηση της συχνότητας των ατελειών στη συρραφή των μεμβρανών δείχνουν ότι, αναλόγως της μεθόδου συρραφής και της ικανότητας και επιμέλειας του τεχνίτη, η συχνότητα των ατελειών είναι από μία ανά 10 μέτρα ραφής έως μία ανά 300 μέτρα ραφής. Έτσι, για τις συνήθεις διαστάσεις των φύλλων των μεμβρανών, οι πιθανές ατέλειες κυμαίνονται μεταξύ των δέκα ατελειών ανά στρέμμα καλυπτόμενης επιφάνειας και των τριών ατελειών ανά δέκα στρέμματα καλυπτόμενης επιφάνειας. Λόγω των διαφυγών που αναμένονται στις θέσεις των ατελειών των ραφών, συνήθως χρησιμοποιούνται σύνθετες στεγανωτικές μεμβράνες¹⁹, όπως αναφέρεται στο επόμενο εδάφιο.

Οι συνθετικές μεμβράνες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε διάτρηση από αιχμηρά αντικείμενα και σχίζονται εύκολα. Επίσης είναι γενικώς ευαίσθητες στην υπεριώδη ακτινοβολία αν και προσφάτως έχουν κατασκευασθεί συνθετικές γεω-μεμβράνες με

¹⁹ δηλαδή συνδυασμός συνθετικής μεμβράνης και συμπτυκνωμένης αργιλικής στρώσης

ειδικά πρόσμικτα οι οποίες έχουν ικανοποιητική αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό:

- (1) Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση και συρραφή των φύλλων της μεμβράνης ώστε να αποφευχθούν βλάβες από αιχμηρά αντικείμενα κλπ.
- (2) Οι μεμβράνες θα πρέπει να καλύπτονται με την (αμμώδη) στρώση συλλογής και αποστράγγισης του στραγγίσματος αμέσως μετά την τοποθέτησή τους, ώστε αφενός να προστατεύονται από σχίσσιμο και διάτρηση και αφετέρου να μην εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία.

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κυριότερων τύπων θερμοπλαστικών και βιτουμενιούχων συνθετικών μεμβρανών. Οι μεμβράνες που εξετάζονται είναι:

1. Θερμοπλαστικές μεμβράνες
 - Πολυαιθυλενίου (HDPE, LDPE)
 - Χλωριωμένου Πολυαιθυλενίου (CPE)
 - Χλωρο-θειωμένου Πολυαιθυλενίου (CSPE)
 - Χλωριούχου Πολυβινυλίου (PVC)
2. Βιτουμενιούχες μεμβράνες
 - Βουτυλίου (BR)
 - Αιθυλενίου-Προπυλενίου (EPDM)

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ						
Ιδιότητα	HDPE LDPE	CPE	CSPE	PVC	BR	EPDM
Αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΚΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ
Αντοχή σε υψηλές/χαμηλές θερμοκρασίες	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΚΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ
Αντοχή στη διάτρηση	ΚΑΚΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΚΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΚΗ	ΜΕΤΡΙΑ
Μηχανική αντοχή	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΚΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΚΗ	ΚΑΛΗ
Αντοχή στα βακτήρια	ΚΑΛΗ	ΚΑΚΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ
Αντοχή στα πετρελαιοειδή	ΚΑΚΗ	ΚΑΚΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΚΗ	ΚΑΚΗ
Ευχέρεια στη συρραφή	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΚΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΚΗ	ΚΑΚΗ

Σε περίπτωση κατασκευής του αποδέκτη στερεών αποβλήτων σε περιοχή όπου η μόνιμη στάθμη του υπογείου ορίζοντα είναι υψηλότερη από τη στάθμη του πυθμένα του αποδέκτη (ή όταν υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης επικρεμάμενου υδροφόρου ορίζοντα με στάθμη υψηλότερη από τη στάθμη του αποδέκτη), η στεγανωτική μεμβράνη του πυθμένα και των πρανών θα πρέπει να ελέγχεται έναντι υδροστατικής ανύψωσης. Στις παραπάνω περιπτώσεις υπάρχει κίνδυνος να συγκεντρωθεί νερό στην κατώτερη επιφάνεια της στεγανωτικής μεμβράνης και να προκληθεί ανύψωση της μεμβράνης. Ο κίνδυνος αυτός είναι αυξημένος στις αρχικές φάσεις της λειτουργίας του έργου, όταν δηλαδή ο αποδέκτης είναι άδειος. Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να κατασκευάζεται ειδικό σύστημα αποστράγγισης του φυσικού εδάφους κάτω από τη στεγανωτική στρώση του πυθμένα του ΧΥΤΑ, ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση των υπογείων υδάτων και η αύξηση των υδροστατικών πιέσεων.

Κατά το σχεδιασμό των στεγανωτικών στρώσεων στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρανή των σύγχρονων χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), το πάχος της συνθετικής γεωμεμβράνης καθορίζεται από τους εξής παράγοντες:

1. Τις ελάχιστες απαιτήσεις των Κανονισμών για το συγκεκριμένο τύπο αποδέκτη.

2. Τυχόν ειδικές απαιτήσεις (όπως π.χ. η πιθανή κυκλοφορία βαρέων οχημάτων επί της μεμβράνης κλπ).
 3. Τη μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται στη μεμβράνη λόγω του βάρους της στρώσης κάλυψης της μεμβράνης στα πρηνή του αποδέκτου.
- Η μέθοδος υπολογισμού για την τελευταία αυτή περίπτωση παρουσιάζεται παρακάτω.

Έλεγχος εφελκυσμού και μήκους αγκυρώσεως της μεμβράνης (Σχήμα 7.8):

Το βάρος της εδαφικής στρώσης (πάχους d) που υπέρκειται της μεμβράνης είναι:

$$W = \gamma L d$$

Εάν (FS_u) είναι ο συντελεστής ασφάλειας σε ολίσθηση μεταξύ της μεμβράνης και του υποκείμενου εδάφους (γωνία τριβής δ_u) και (FS_o) είναι ο συντελεστής ασφάλειας σε ολίσθηση μεταξύ της μεμβράνης και του υπερκείμενου εδάφους (γωνία τριβής δ_o) τότε:

$$FS_o = \frac{(W \cos \beta) \tan \delta_o}{W \sin \beta} = \frac{\tan \delta_o}{\tan \beta}$$

$$F = \frac{W \cos \beta \tan \delta_u}{FS_u}$$

$$T = W \sin \beta - F$$

και το απαιτούμενο πάχος (t) της μεμβράνης είναι:

$$t = (FS_t) \frac{T}{\sigma_y}$$

όπου (σ_y) είναι η εφελκυστική αντοχή της μεμβράνης και (FS_t) είναι ο απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας.

Εφαρμογή:

Κλίση πρηνούς 1:3 (άρα $\beta = 18.4^\circ$), $d = 0.30$ m,
 $\delta_u = \delta_o = 21^\circ$, $L = 50$ m, $\gamma = 18$ kN/m³, $FS_u = 2$, $\sigma_y = 40$ MPa, $FS_t = 3$

Οπότε:

$$W = 270 \text{ kN/m}, \quad F = 49.2 \text{ kN/m}, \quad T = 36 \text{ kN/m}$$

$$t = 3 \times \frac{36}{40000} = 0.0027 \text{ m} = 2.7 \text{ mm}$$

Εκτός του ελέγχου εφελκυστικής αντοχής, πρέπει να γίνεται και έλεγχος του μήκους (l) αγκυρώσεως της μεμβράνης στο ανάντη άκρο του πρηνούς. Το Σχήμα 7.8 παρουσιάζει τα γεωμετρικά στοιχεία που απαιτούνται για τον έλεγχο του μήκους αγκυρώσεως. Η αγκύρωση της μεμβράνης γίνεται μέσω της τριβής που αναπτύσσεται στην κάτω επιφάνεια της μεμβράνης λόγω του βάρους (W) της επίχωσης (πάχους D) πάνω από τη μεμβράνη. Συγκεκριμένα :

$$W = \gamma D l$$

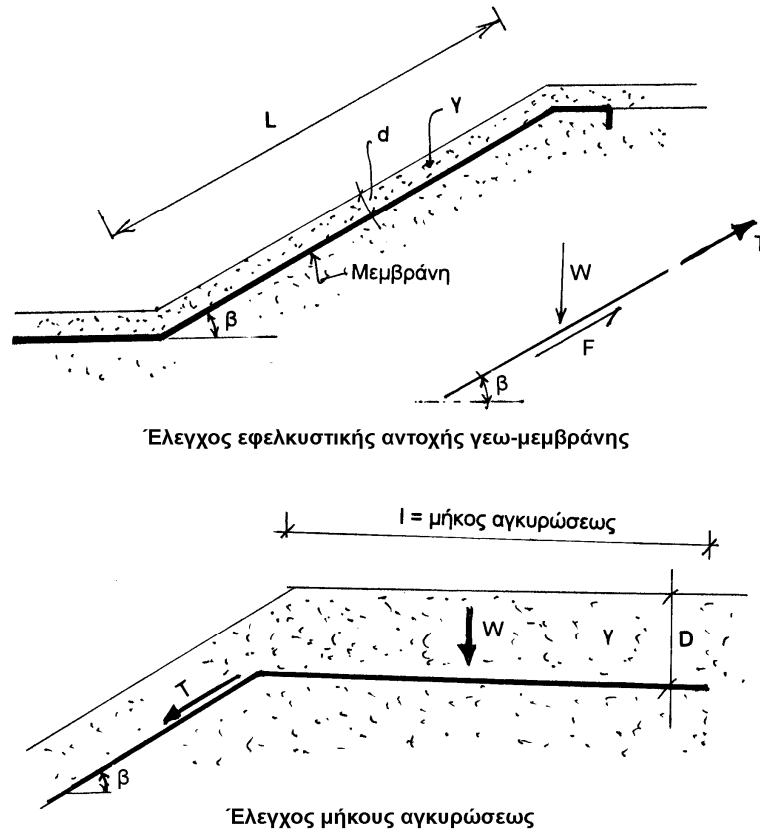
$$\text{Αντοχή τριβής:} \quad T_u = (W + T \sin \beta) \tan \delta_u$$

$$\text{Δύναμη εξόλκεσης:} \quad T_o = T \cos \beta$$

όπου (δ_u) είναι η γωνία τριβής μεταξύ της μεμβράνης και του υποκείμενου εδάφους, και T η μέγιστη εφελκυστική δύναμη επί της μεμβράνης. Έτσι, ο διαθέσιμος συντελεστής ασφαλείας είναι :

$$FS = \frac{T_u}{T_o}$$

Συνδυασμός των ανωτέρω σχέσεων δίνει το απαιτούμενο μήκος αγκυρώσεως:



Σχήμα 7.8: Έλεγχος εφελκυστικής αντοχής και μήκους αγκυρώσεως της γεω-μεμβράνης

$$l = \left\{ \frac{(FS)}{\tan \delta_u} - \tan \beta \right\} \frac{T \cos \beta}{\gamma D}$$

Εφαρμογή:

Από το προηγούμενο παράδειγμα:

$T = 36 \text{ kN/m}$, $\delta_u = 21^\circ$, $\beta = 18.4^\circ$, $FS = 1.5$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $D = 1.5 \text{ m}$

Οπότε: $l = 4.50 \text{ m}$

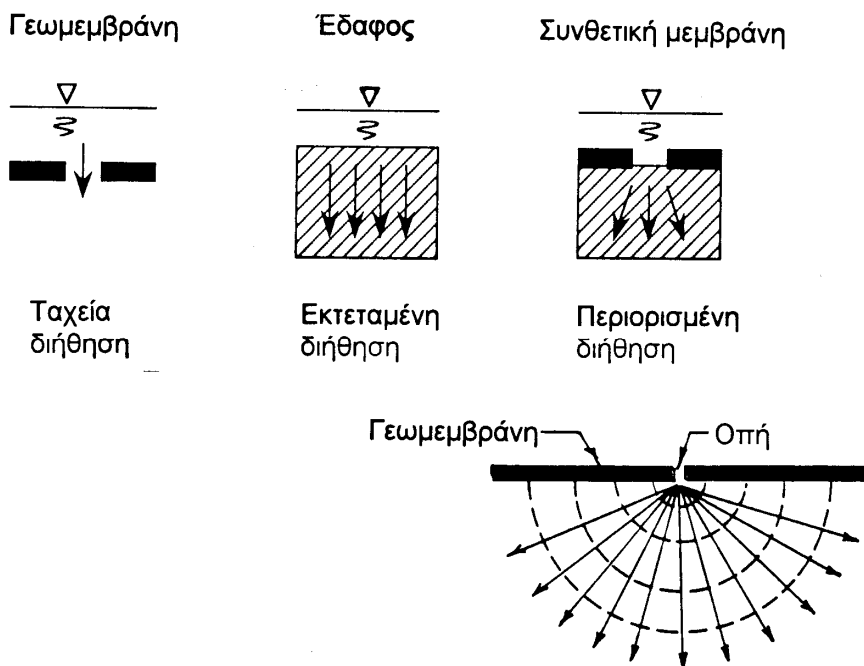
7.5.3 Σύνθετες μεμβράνες

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, οι συνθετικές γεω-μεμβράνες έχουν τυχαίες ατέλειες (κυρίως κατά μήκος των συρραφών μεταξύ γειτονικών φύλλων), με συνέπεια τη διαφυγή υγρού στραγγίσματος προς το υπέδαφος διαμέσου των οπών της μεμβράνης στις θέσεις των ατελειών. Το μειονέκτημα αυτό των απλών συνθετικών μεμβρανών αναιρείται σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση των λεγόμενων σύνθετων μεμβρανών (composite liners). Οι σύνθετες μεμβράνες αποτελούνται από μια συνθετική μεμβράνη η οποία τοποθετείται στην άνω επιφάνεια μιας συμπυκνωμένης αργιλικής στρώσης.

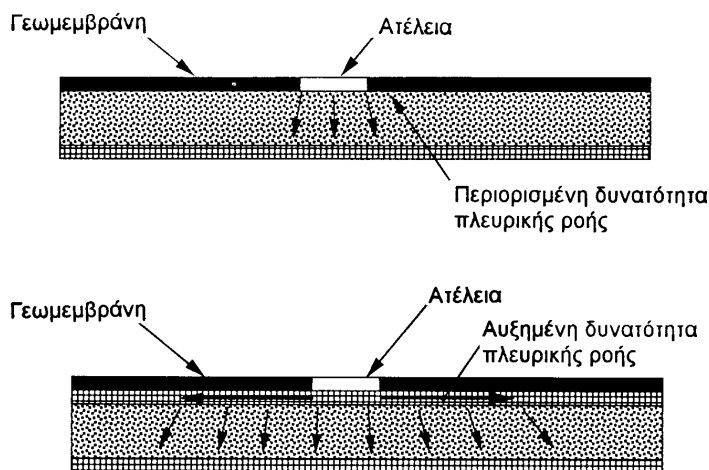
Το Σχήμα 7.9 παρουσιάζει το μηχανισμό της δραστήριας μείωσης της διήθησης διαμέσου μιας μικρής οπής της συνθετικής μεμβράνης στην περίπτωση σύνθετης μεμβράνης (δεξί μέρος του σχήματος). Το αριστερό μέρος του σχήματος παρουσιάζει τη διαφυγή στραγγίσματος διαμέσου μιας μικρής οπής της συνθετικής μεμβράνης

χωρίς υποκείμενη αργιλική στρώση. Ακόμη και στην περίπτωση μιας πολύ μικρής οπής, η διηθούμενη παροχή είναι μεγάλη. Το κεντρικό μέρος του σχήματος δείχνει τη διήθηση διαμέσου μιας αργιλικής στρώσης χωρίς υπερκείμενη συνθετική μεμβράνη. Η διηθούμενη παροχή μπορεί να είναι σημαντική (ακόμη και για μικρές τιμές της διαπερατότητας της αργίλου), λόγω της μεγάλης επιφάνειας επαφής του στραγγίσματος με την υποκείμενη άργιλο. Το δεξί μέρος του σχήματος παρουσιάζει τη λειτουργία της σύνθετης μεμβράνης στην περίπτωση μιας μικρής οπής της συνθετικής μεμβράνης: η διηθούμενη παροχή είναι μικρή, επειδή η όποια διήθηση διαμέσου της οπής υποχρεώνεται στη συνέχεια να διέλθει διαμέσου της υποκείμενης αργιλικής στρώσης που έχει μικρή διαπερατότητα.

Η καλή λειτουργία της σύνθετης μεμβράνης βασίζεται στην τέλεια επαφή (πρόσφυση) μεταξύ της συνθετικής μεμβράνης και της υποκείμενης αργιλικής στρώσης. Το Σχήμα 7.10 παρουσιάζει τη λειτουργία της σύνθετης μεμβράνης σε περίπτωση καλής πρόσφυσης (άνω μέρος) και κακής πρόσφυσης (κάτω μέρος). Στην περίπτωση κακής πρόσφυσης, η διαρροή στραγγίσματος διαμέσου μιας μικρής οπής της συνθετικής μεμβράνης συνοδεύεται από κίνηση του στραγγίσματος στην οριζόντια διεύθυνση κάτω από τη συνθετική μεμβράνη. Με τον τρόπο αυτό η επιφάνεια “προσβολής” της υποκείμενης αργιλικής στρώσης από το στραγγίσμα μεγαλώνει πολύ, με συνέπεια τη σημαντική αύξηση της παροχής που διηθείται διαμέσου της αργιλικής στρώσης. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει υπολογισθείσες παροχές διηθήσεως ρύπου διαμέσου (α) μιας συνθετικής γεω-μεμβράνης, (β) μιας συμπυκνωμένης αργιλικής στρώσης και (γ) μιας σύνθετης μεμβράνης που αποτελείται από τις ανωτέρω δυο στρώσεις.



Σχήμα 7.9: Περιορισμός των διαφυγών στραγγίσματος στις θέσεις των ατελειών της συνθετικής μεμβράνης μέσω της υποκείμενης αργιλικής στρώσης



Σχήμα 7.10: Λειτουργία της σύνθετης μεμβράνης στην περίπτωση (α) καλής επαφής και (β) μη-καλής επαφής, μεταξύ της συνθετικής μεμβράνης και της υποκείμενης αργιλικής στρώσης

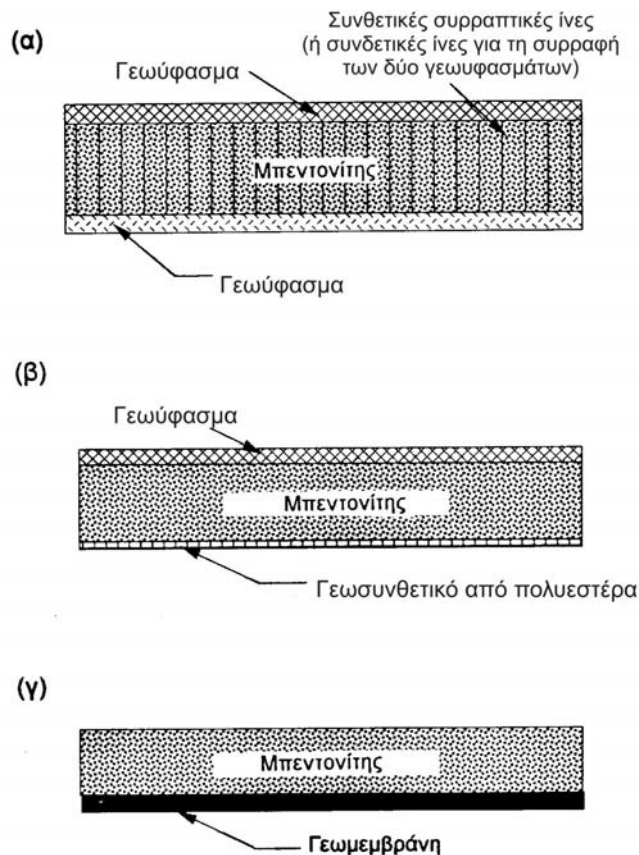
Τύπος μεμβράνης	Παροχή διηθήσεως (Λίτρα ανά ημέρα ανά στρέμμα)
Γεωμεμβράνη*	2500
Συμπυκνωμένη άργιλος**	115
Σύνθετη μεμβράνη (κακή πρόσφυση)	47
Σύνθετη μεμβράνη (καλή πρόσφυση)	5

* με 2 οπές ανά στρέμμα

** $k = 10^{-9}$ m/sec

Κατά την τοποθέτηση των σύνθετων μεμβρανών θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην αποφυγή βλάβης της συνθετικής μεμβράνης από σχίσιμο ή διάτρηση με αιχμηρά αντικείμενα. Επίσης, θα πρέπει να γίνεται έλεγχος της στεγανότητας των συρραφών των φύλλων σύμφωνα με τις σχετικές προδιαγραφές. Τέλος, η συνθετική μεμβράνη θα πρέπει να προστατεύεται κατά το δυνατόν από την υπεριώδη ακτινοβολία (π.χ. με ταχεία κάλυψή της με την αμμώδη στρώση συλλογής και αποστράγγισης του στραγγίσματος). Η προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία στην περίπτωση των σύνθετων μεμβρανών θα πρέπει να γίνεται και για την αποφυγή της ξήρανσης, συρρίκνωσης και τελικώς ρηγμάτωσης της συμπυκνωμένης αργιλικής στρώσης που υπόκειται της συνθετικής γεω-μεμβράνης. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο σε χώρες με έντονη ηλιοφάνεια (όπως η Ελλάδα), επειδή κατά την έκθεση της συνθετικής μεμβράνης στην ηλιακή ακτινοβολία αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες²⁰.

²⁰ οι συνθετικές γεω-μεμβράνες είναι συνήθως μελανού χρώματος και ως εκ τούτου απορροφούν έντονα την ηλιακή ακτινοβολία



Σχήμα 7.11: Διάφοροι τύποι γεω-συνθετικών αργιλικών μεμβρανών (GCL)

7.5.4 Γεω-συνθετικές μεμβράνες

Οι γεω-συνθετικές αργιλικές μεμβράνες (Geosynthetic Clay Liners, GCL) αποτελούν ένα σχετικά πρόσφατο επίτευγμα της τεχνολογίας στεγανωτικών μεμβρανών για τον πυθμένα και τα περιμετρικά πρανή των σύγχρονων αποδεκτών στερεών και υγρών αποβλήτων. Η μεμβράνη τύπου GCL αποτελείται από μια λεπτή αργιλική²¹ στρώση (πάχους λίγων εκατοστών του μέτρου) η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ δυο λεπτών γεωυφασμάτων (πάχους εκάστου 0.75-1.5 mm περίπου), ή εναλλακτικά αποτελείται από μια λεπτή αργιλική στρώση (πάχους λίγων εκατοστών) συγκολλημένη επί μιας λεπτής συνθετικής μεμβράνης (πάχους 1-2 mm). Το Σχήμα 7.11 παρουσιάζει τυπικές περιπτώσεις γεω-συνθετικών αργιλικών μεμβρανών. Η λειτουργία των γεω-συνθετικών αργιλικών μεμβρανών τύπου (α) και (β) στο Σχήμα 7.11 είναι αντίστοιχη της στρώσης συμπυκνωμένης αργίλου, ενώ η λειτουργία της μεμβράνης GCL τύπου (γ) είναι αντίστοιχη με τη λειτουργία της σύνθετης μεμβράνης που περιγράφηκε παραπάνω. Το πλεονέκτημα της γεω-συνθετικής αργιλικής μεμβράνης είναι ότι διατίθεται έτοιμη στο εμπόριο και συνεπώς δεν απαιτείται η χωριστή κατασκευή της κάθε στρώσης στο εργοτάξιο. Συνεπώς αποφεύγονται τα πιθανά προβλήματα αυξημένης διαπερατότητας της συμπυκνωμένης αργίλου λόγω τυχαίας απόμειξης των υλικών στο εργοτάξιο. Επιπλέον, λόγω της βιομηχανικής της παραγωγής, η γεω-συνθετική αργιλική μεμβράνη εξασφαλίζει την καλή πρόσφυση

²¹ συνήθως από μοντμοριλονίτη (μπεντονίτη)

μεταξύ των επάλληλων στρώσεων και συνεπώς επιτυγχάνει πολύ μικρές τιμές διαπερατότητας με υψηλή αξιοπιστία σε μεγάλη κλίμακα.

7.5.5 Υπολογισμός προστασίας πυθμένα ΧΥΤΑ

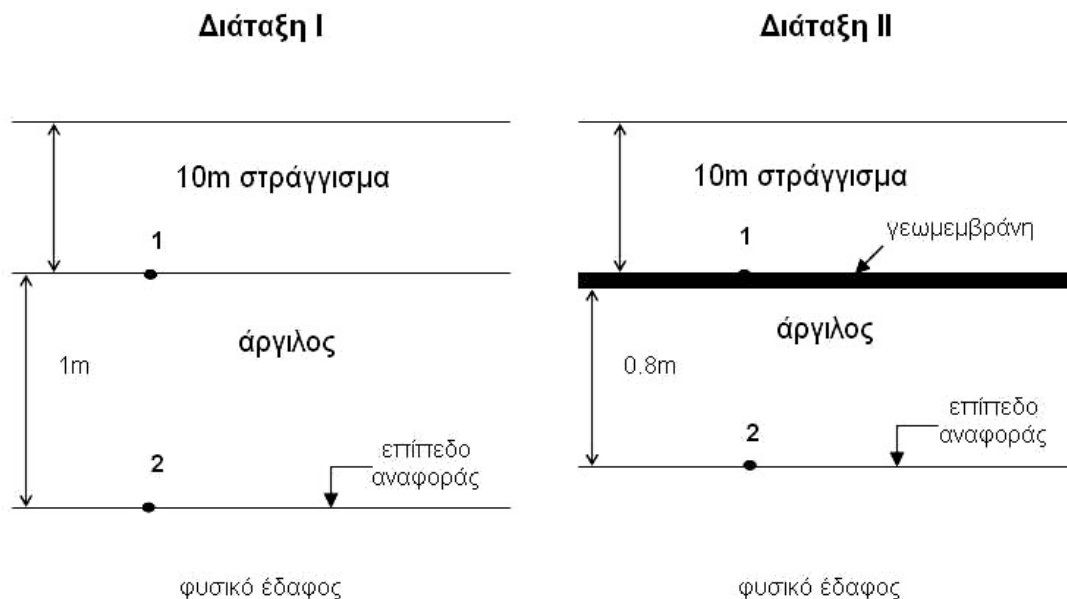
Καθώς η έννοια της “προστασίας” που προσφέρει ο πυθμένας έναντι διαρροών του στραγγίσματος δεν ορίζεται από τους κανονισμούς, ο μελετητής, συγκρίνοντας εναλλακτικές διατάξεις, καλείται να ποσοτικοποιήσει την προστασία θεωρώντας τα εξής μεγέθη: υδραυλική αγωγιμότητα, παροχή, και χρόνο άφιξης ρύπου ή χρόνο άφιξης κάποιου συγκεκριμένου κλάσματος της συγκέντρωσης του ρύπου (στο στράγγισμα) στα σημεία ελέγχου (δηλαδή τα φρέατα δειγματοληψίας). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, όπως θα δείξει και το πιο κάτω αριθμητικό παράδειγμα, η επίτευξη μιας τιμής υδραυλικής αγωγιμότητας, ή η ελαχιστοποίηση της παροχής ή του όγκου του διηθούμενου στραγγίσματος διαμέσου του πυθμένα δεν είναι επαρκή κριτήρια σχεδιασμού.

Αριθμητικό παράδειγμα υπολογισμού προστασίας πυθμένα (Σχήμα 7.12)

Λόγω αστοχίας του συστήματος στράγγισης χώρου υγειονομικής ταφής, έχει μαζευτεί στράγγισμα ύψους 10 μέτρων. Να εκτιμηθεί η προστασία (έναντι εξάπλωσης των ρύπων του στραγγίσματος στο φυσικό έδαφος) που προσφέρουν (I) μία στρώση συμπυκνωμένης αργίλου πάχους $d_a = 1\text{m}$ και (II) μία σύνθετη στρώση που αποτελείται από συμπυκνωμένη άργιλο πάχους $d_a = 0.8\text{m}$ και γεωμεμβράνη πάχους $d_\mu = 1.5\text{ mm}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.12.

Δεδομένα:

- Άργιλος Υδραυλική Αγωγιμότητα $k_a = 10^{-9}\text{ m/s}$ Πορώδες $n_a = 0.4$
- Γεωμεμβράνη Υδραυλική Αγωγιμότητα $k_\mu = 10^{-13}\text{ m/s}$ Πορώδες $n_\mu = 0.02$
- Συντελεστής διάχυσης/διασποράς $D = 32\text{ cm}^2 / \text{έτος}$
- Θεωρείται ότι έχουν αποκατασταθεί συνθήκες μόνιμης ροής



Σχήμα 7.12: Υπολογισμός προστασίας εναλλακτικών διατάξεων για την περίπτωση διαρροών από στράγγισμα ύψους 10 m

Θα υπολογιστούν: (α) Υδραυλική αγωγιμότητα στην κατακόρυφη διεύθυνση
 (β) Παροχή στραγγίσματος (l/m^2 - έτος)
 (γ) Χρόνος άφιξης μετώπου ρύπου λόγω μεταγωγής (έτη)
 (δ) Χρόνος άφιξης συγκέντρωσης ρύπου $C = 0.01C_0$ λόγω μεταγωγής & διάχυσης/διασποράς (έτη)

(α) Υπολογισμός υδραυλικής αγωγιμότητας

$$k_I = k_\alpha = 10^{-9} \text{ m/s}$$

Για τη διάταξη II εφαρμόζεται η εξίσωση που δίνει την ισοδύναμη υδραυλική αγωγιμότητα για επάλληλα στρώματα πάχους d_i και υδραυλικής αγωγιμότητας k_i :

$$k_{II} = \frac{\sum d_i}{\sum \frac{d_i}{k_i}} = \frac{d_\alpha + d_\mu}{\frac{d_\alpha}{k_\alpha} + \frac{d_\mu}{k_\mu}} = \frac{0.8m + 0.0015m}{\frac{0.8m}{10^{-9} \frac{m}{s}} + \frac{0.0015m}{10^{-13} \frac{m}{s}}} = 5.1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$$

Σχόλιο: Ο υπολογισμός μίας ενιαίας τιμής υδραυλικής αγωγιμότητας στη διεύθυνση την κάθετη προς τη στρωματογραφία, όπως π.χ. για τη σύνθετη διάταξη II, επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών διατάξεων σύνθετων στρώσεων στεγάνωσης.

(β) Υπολογισμός παροχής

Χρειάζεται να επιλυθεί το πρόβλημα κατακόρυφης μονοδιάστατης ροής, που ουσιαστικά συνίσταται στον υπολογισμό της κλίσης του υδραυλικού φορτίου. Η κατάντη επιφάνεια της στρώσης στεγάνωσης θεωρείται ως επίπεδο αναφοράς για τη μέτρηση του υψομετρικού φορτίου z . Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι η πίεση του νερού στο ίδιο επίπεδο είναι ατμοσφαιρική ($P_{w2} = 0$).

Στην ανάντη επιφάνεια της στρώσης στεγάνωσης

(σημείο 1 στο Σχήμα 7.12 – Διάταξη I):

$$h_1 = P_{w1}/\gamma_w + z_1 = 10m + 1m = 11m$$

Στην κατάντη επιφάνεια της στρώσης στεγάνωσης

(σημείο 2 στο Σχήμα 7.12 – Διάταξη I):

$$h_2 = P_{w2}/\gamma_w + z_2 = 0m + 0m = 0m$$

Για αυτές τις τιμές του υδραυλικού φορτίου, η υδραυλική κλίση είναι:

$$i_I = \frac{\Delta h_I}{\Delta L_I} = \frac{h_1 - h_2}{d_\alpha} = \frac{11m}{1m} = 11$$

Με ανάλογους υπολογισμούς για τη διάταξη II:

$$i_{II} = \frac{\Delta h_{II}}{\Delta L_{II}} = \frac{h_1 - h_2}{d_\alpha + d_\mu} = \frac{10.8m}{0.8m} = 13.5$$

Υπολογισμός παροχών (βλέπε Κεφάλαιο 3):

$$Q_I = k_I i_I A = 10^{-9} \frac{m}{s} \times 11 \times 1m^2 = 11 \times 10^{-9} \frac{m^3}{s} = 347 \frac{lt}{ετωζ}$$

$$Q_{II} = k_{II} i_{II} A = 5.1 \times 10^{-11} \frac{m}{s} \times 13.5 \times 1m^2 = 6.8 \times 10^{-10} \frac{m^3}{s} = 21.6 \frac{lt}{ετωζ}$$

(γ) Υπολογισμός χρόνου άφιξης μετώπου ρύπου

Για το χρόνο άφιξης του μετώπου ρύπου λόγω μεταγωγής, χρειάζεται να υπολογιστεί η μέση γραμμική ταχύτητα ροής σε πορώδες μέσο $\bar{v}$ (βλέπε Κεφάλαιο 3).

Διάταξη I

$$v_I = k_I i_I = 10^{-9} \frac{m}{s} \times 11 = 1.1 \times 10^{-8} \frac{m}{s}$$

$$\bar{v}_a = \frac{v_I}{n_a} = \frac{1.1 \times 10^{-8} \frac{m}{s}}{0.4} = 2.75 \times 10^{-8} \frac{m}{s}$$

Ο χρόνος άφιξης ρύπου λόγω μεταγωγής δίνεται ως ο λόγος της απόστασης από την πηγή του ρύπου (την ανάντη επιφάνεια της στεγανωτικής στρώσης) έως το σημείο που μας ενδιαφέρει (την κατόντη επιφάνεια της στεγανωτικής στρώσης) με τη μέση γραμμική ταχύτητα:

$$T_I = \frac{d_a}{\bar{v}_a} = \frac{1m}{2.75 \times 10^{-8} \frac{m}{s}} = 421\eta\mu. \rightarrow \underline{T_I = 1.15 \text{ έτη}}$$

Διάταξη II

$$v_{II} = k_{II} i_{II} = 5.1 \times 10^{-11} \frac{m}{s} \times 13.5 = 6.8 \times 10^{-10} \frac{m}{s}$$

$$T_{II} = \frac{d_\mu}{v_\mu} + \frac{d_a}{v_a} = \frac{d_\mu}{v_{II}/n_\mu} + \frac{d_a}{v_{II}/n_a} = \frac{0.0015m}{6.8 \times 10^{-10} \frac{m}{s} / 0.02} + \frac{0.8m}{6.8 \times 10^{-10} \frac{m}{s} / 0.4}$$

$$\rightarrow T_{II} = (0.5 + 5447) \text{ ημέρες} \rightarrow \underline{T_{II} = 15 \text{ έτη}}$$

(δ) Υπολογισμός χρόνου άφιξης συγκέντρωσης ίσης με 0.01 της συγκέντρωσης του διαφυγόντος στραγγίσματος

Χρησιμοποιούμε τη λύση της εξίσωσης της μονοδιάστατης μεταφοράς ρύπου (εξίσωση 5.13). Χρειαζόμαστε δύο βασικές παραμέτρους: τη γραμμική ταχύτητα ροής $\bar{v}$ (από το πρόβλημα ροής) και το συντελεστή διάχυσης/διασποράς D (από τα δεδομένα).

Διάταξη I

$$\bar{v}_a = 2.75 \times 10^{-6} \text{ cm/s} = 86.7 \text{ cm/ έτος}$$

$$\frac{\bar{v}_a x}{D} = \frac{86.7 \times 100}{32} = 271 \rightarrow \text{μπορούμε να αγνοήσουμε το δεύτερο όρο της λύσης}$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \bar{v}t}{2\sqrt{Dt}} \right) = 0.01$$

$$\text{έστω } \beta = \frac{x - \bar{v}t}{2\sqrt{Dt}} \rightarrow \operatorname{erfc} \beta = 0.02 \rightarrow \beta = 1.645$$

$$1.645 = \frac{100 - 86.7t}{2\sqrt{32t}}$$

$$\text{για } \sqrt{t} = T \rightarrow 1.645 = \frac{100 - 86.7T^2}{11.31T} \rightarrow T = 0.97 \rightarrow \underline{t_I = 0.99 \text{ έτη}}$$

Διάταξη II

Θα υπολογίσουμε μεταφορά του ρύπου μόνο μέσω της αργίλου:

$$\bar{v}_a = \frac{6.8 \times 10^{-8} \frac{cm}{s}}{0.4} = 5.36 \text{ cm/έτος}$$

$$\frac{\bar{v}_a x}{D} = \frac{5.36 \times 80}{32} = 13.4 \rightarrow \text{μπορούμε να αγνοήσουμε το δεύτερο όρο της λύσης}$$

$$1.645 = \frac{80 - 5.36t}{2\sqrt{32t}}$$

$$\text{για } \sqrt{t} = T \rightarrow 1.645 = \frac{80 - 5.36T^2}{11.31T} \rightarrow T=2.5 \rightarrow \underline{t_u = 6.25 \text{ έτη}}$$

Σχόλια:

- Υπενθυμίζεται ότι δεν είναι υπέρ της ασφάλειας να αγνοείται η συμβολή της διάχυσης και της διασποράς, ιδιαίτερα για υλικά χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας.
- Τονίζεται ότι πρέπει να εξασφαλιστεί όχι μόνο μικρή υδραυλική αγωγιμότητα και μικρή παροχή, αλλά και μεγάλος χρόνος άφιξης συγκέντρωσης ρύπου. Αυτός ο συνδυασμός είναι αδύνατο να επιτευχθεί μόνο με γεωμεμβράνη, γιατί ενώ πληροί τους δύο πρώτους περιορισμούς, αποτυγχάνει στον τρίτο.

7.6 Σύστημα συλλογής του στραγγίσματος

Η συλλογή και απομάκρυνση του υγρού στραγγίσματος (leachate) των απορριμμάτων που συγκεντρώνεται στον πυθμένα των αποδεκτών στερεών αποβλήτων είναι τελείως απαραίτητη για την επιτυχή λειτουργία του συστήματος στεγανώσεως. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το υγρό στράγγισμα που συγκεντρώνεται στον πυθμένα των “χωματερών” οφείλεται:

1. Στην κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχόπτωση, χιόνι) και στην εισροή επιφανειακών υδάτων, λόγω πλημμελούς κάλυψης και περιμετρικής αποστράγγισης του χώρου.
2. Στη φυσική υγρασία των απορριμμάτων.
3. Στο νερό που παράγεται κατά τις χημικές αντιδράσεις αποσύνθεσης των οργανικών ουσιών.

Το υγρό στράγγισμα έχει αξιόλογο ρυπαντικό φορτίο και συνεπώς η τυχόν διαφυγή του στο υπέδαφος μπορεί να προκαλέσει σημαντική ρύπανση του περιβάλλοντος. Ακόμη και στην περίπτωση ύπαρξης στεγανωτικής μεμβράνης στον πυθμένα του αποδέκτη, το υγρό στράγγισμα που συγκεντρώνεται (αν δεν απομακρυνθεί με κατάλληλο σύστημα αποστράγγισης) δημιουργεί στάθμη, αυξάνει το υδραυλικό φορτίο στην υποκείμενη στεγανωτική μεμβράνη και ως εκ τούτου πολλαπλασιάζεται η παροχή διηθήσεως διαμέσου των ατελειών της αλλά και του υποκείμενου εδαφικού υλικού. Για το λόγο αυτό:

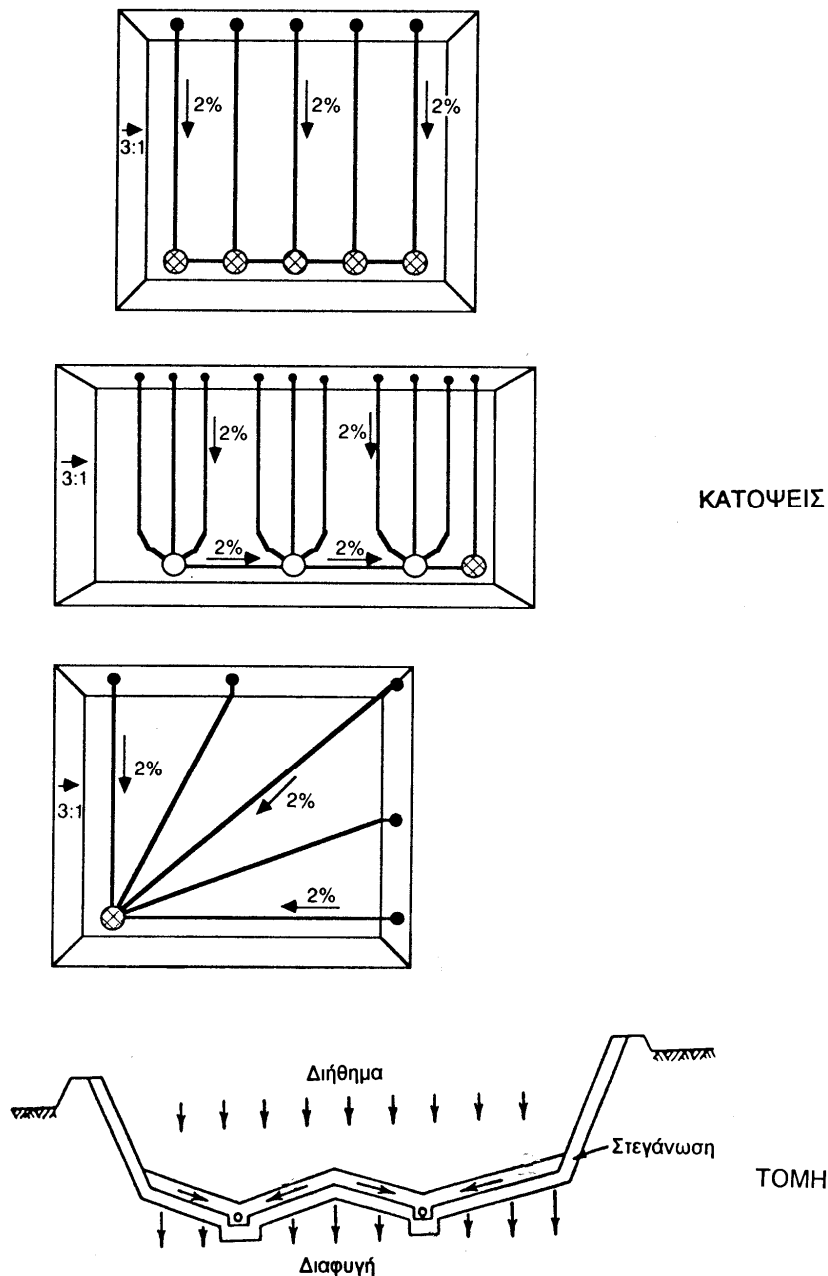
1. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή συστήματος περιμετρικής αποστράγγισης του ΧΥΤΑ, ώστε να αποφεύγεται η εισροή επιφανειακών υδάτων στο χώρο του αποδέκτη.
2. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην καθημερινή κάλυψη των απορριμμάτων με εδαφικό υλικό το οποίο θα πρέπει να επιπεδώνεται, η επιφάνειά του να διαμορφώνεται με κατάλληλες κλίσεις και να προβλέπεται σύστημα συγκέντρωσης και απαγωγής των ομβρίων υδάτων (μέσω τάφρων, φρεατίων κλπ).

3. Πάνω από τη στεγανωτική μεμβράνη του πυθμένα του αποδέκτη θα πρέπει να κατασκευάζεται ειδικό σύστημα συλλογής και απομάκρυνσης του στραγγίσματος.

Τυπικές διατάξεις τέτοιων έργων φαίνονται στο Σχήμα 7.13.

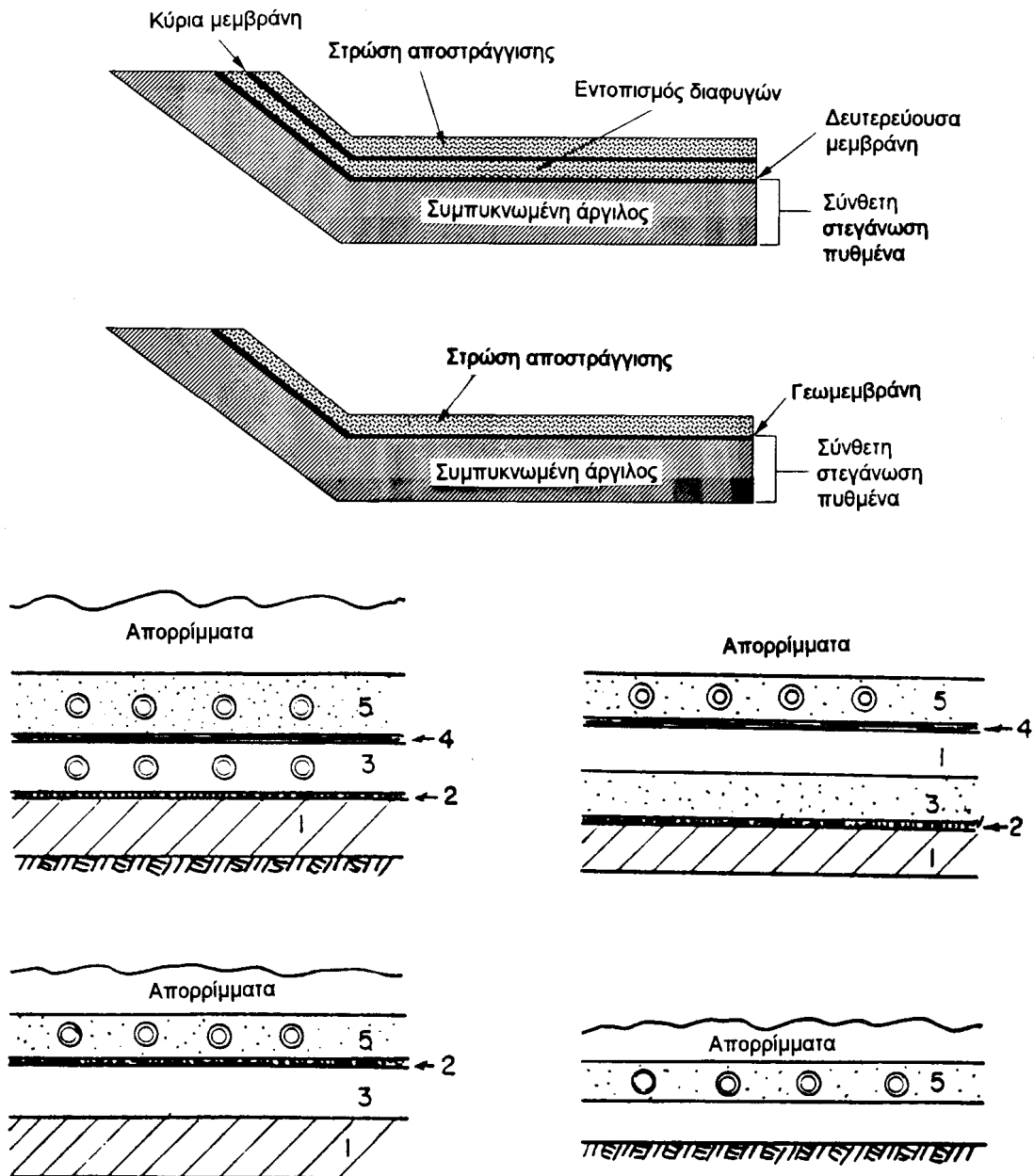
Στην περίπτωση πρόβλεψης διπλής στεγανωτικής μεμβράνης στον πυθμένα του ΧΥΤΑ (όπως π.χ. απαιτείται στους αποδέκτες επικινδύνων αποβλήτων), τότε θα πρέπει να κατασκευάζονται και δυο συστήματα συλλογής και αποστράγγισης του στραγγίσματος:

(1) Το κύριο σύστημα συλλογής του στραγγίσματος (primary leachate collection system), το οποίο κατασκευάζεται στην επιφάνεια της ανώτερης στεγανωτικής μεμβράνης. Το σύστημα αυτό συνήθως αποτελείται από μια στρώση ελευθέρως στραγγιζόμενου εδαφικού υλικού (π.χ. αμμοχάλικο) πάχους 30-40 cm η οποία προστατεύεται ως εξής:



Σχήμα 7.13: Σύστημα συλλογής και αποστράγγισης του στραγγίσματος από τον πυθμένα αποδέκτη

- (α) Στην ανώτερη επιφάνειά της φέρει στρώση φίλτρου από άμμο (πάχους 15-20 cm) ή διαπερατό συνθετικό γεω-ύφασμα (geotextile) με σκοπό την κατακράτηση των στερεών κόκκων που τυχόν αιωρούνται εντός του στραγγίσματος (ώστε να μην αποφραχθεί η υποκείμενη στρώση στράγγισης).
- (β) Στην κατώτερη επιφάνειά της φέρει ειδικό συνθετικό γεω-ύφασμα για την προστασία της υποκείμενης στεγανωτικής μεμβράνης από τη διάτρηση (λόγω των χαλίκων της στρώσης στράγγισης).
- Κατά θέσεις, εντός της στρώσης στράγγισης τοποθετούνται και διάτρητοι



Συστήματα στεγάνωσης: 1 συμπιεσμένη άργιλος μικρής διαπερατότητας, 2 εύκαμπτη μεμβράνη (flexible membrane liner-FML), 3 σύστημα συλλογής/παρακολούθησης του στραγγίσματος, 4 εύκαμπτη μεμβράνη (FML), 5 πρωτεύον σύστημα συλλογής του στραγγίσματος

Σχήμα 7.14: Τυπικές διατάξεις απλών και διπλών συστημάτων αποστράγγισης του στραγγίσματος

σωλήνες για τη συλλογή και ταχεία αποστράγγιση του στραγγίσματος. Οι σωλήνες αυτοί οδηγούνται σε φρεάτια απ' όπου το στράγγισμα απάγεται είτε με φυσική ροή, είτε (συνηθέστερα) με άντληση.

- (2) Το δευτερεύον σύστημα συλλογής του στραγγίσματος (secondary leachate collection system). Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια αποστραγγιστική στρώση (άμμο πάχους 20-30 cm, διαπερατό συνθετικό γεω-ύφασμα κλπ) που τοποθετείται μεταξύ των δυο στεγανωτικών μεμβρανών. Όπως στο πρωτεύον σύστημα, έτσι και στο δευτερεύον προβλέπεται σύστημα συλλογής του τυχόν διαφεύγοντος στραγγίσματος μέσω σωλήνων, φρεατίων, άντλησης κλπ. Το δευτερεύον σύστημα συλλογής του στραγγίσματος έχει τους εξής σκοπούς:

- (α) Να εντοπίζει τη θέση και το μέγεθος των τυχόν διαρροών στραγγίσματος διαμέσου της ανώτερης (κύριας) στεγανωτικής στρώσης.
- (β) Να συλλέξει και να απαγάγει τις ανωτέρω διαφυγές.
- (γ) Να λειτουργήσει ως κύρια αποστραγγιστική στρώση στην περίπτωση που η ανώτερη αποστραγγιστική στρώση καταστραφεί (π.χ. λόγω απόφραξης από στερεά υλικά του στραγγίσματος, ανάπτυξη μυκήτων κλπ).

Το Σχήμα 7.14 παρουσιάζει τυπικές διατάξεις απλών και διπλών συστημάτων συλλογής και αποστράγγισης του στραγγίσματος από τον πυθμένα χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις του συστήματος συλλογής και αποστράγγισης του υγρού στραγγίσματος προβλέπονται από τους κανονισμούς των διάφορων χωρών. Έτσι, για παράδειγμα, οι Αμερικανικοί Κανονισμοί (USEPA, 1985) έχουν τις εξής ελάχιστες απαιτήσεις για την κύρια στρώση στράγγισης στην περίπτωση αποδεκτών επικινδύνων αποβλήτων:

- (1) Πάχος 30 cm τουλάχιστον
- (2) Υδραυλική αγωγιμότητα $k > 0.01$ cm/sec (Σημείωση: προσφάτως υπάρχει η τάση η τιμή αυτή να αυξηθεί στο 1 cm/sec)
- (3) Κλίση της στρώσης 2% τουλάχιστον (για τη διευκόλυνση της αποστράγγισης)
- (4) Ύπαρξη διάτρητων σωλήνων στο εσωτερικό της στρώσης
- (5) Ύπαρξη στρώσης φίλτρου πάνω από τη στρώση στράγγισης
- (6) Η στρώση αποστράγγισης πρέπει να κατασκευάζεται στο σύνολο του πυθμένα και των παρειών του αποδέκτη.

Ένα από τα κυριότερα θέματα των συστημάτων συλλογής και αποστράγγισης του στραγγίσματος είναι η αποφυγή της έμφραξής τους (clogging) κατά τη λειτουργία του ΧΥΤΑ αλλά και για τουλάχιστον 30 χρόνια μετά την τελική κάλυψη του αποδέκτη (δηλαδή μέχρις ότου εξασθενήσει επαρκώς το ρυπαντικό φορτίο του στραγγίσματος). Η έμφραξη του συστήματος αποστράγγισης μπορεί να συμβεί για τους εξής λόγους:

- (1) Συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών ουσιών του στραγγίσματος στους πόρους της στρώσης αποστράγγισης.
- (2) Ανάπτυξη μικροοργανισμών (κυρίως μυκήτων) στο εσωτερικό της στρώσης αποστράγγισης με συνέπεια τη μείωση του ενεργού πορώδους.

Για την αποφυγή της έμφραξης θα πρέπει τα υλικά της στρώσης στράγγισης να είναι χονδρόκοκκα (π.χ. χάλικες), η διαπερατότητά τους να είναι υψηλή (π.χ. > 0.01 cm/sec ή και ακόμη υψηλότερη), η στρώση να έχει επαρκές πάχος (άνω των 30 cm), να διαθέτει διάτρητους σωλήνες στράγγισης και τέλος να υπάρχει σύστημα φίλτρου στην ανώτερη επιφάνεια της στρώσης στράγγισης.

7.7 Σύστημα τελικής κάλυψης

Το σύστημα τελικής κάλυψης ενός αποδέκτη στερεών αποβλήτων έχει ως σκοπό τον περιορισμό της κατείσδυσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχόπτωσης, χιονιού) μετά την πλήρωση του αποδέκτη ώστε να περιορισθεί ο παραγόμενος όγκος του υγρού στραγγίσματος, αλλά και τη διαμόρφωση της επιφάνειας του αποδέκτη έτσι ώστε να μπορεί να επανενταχθεί στο περιβάλλον. Το σύστημα τελικής κάλυψης αποτελείται από επάλληλες στρώσεις, κάθε μια από τις οποίες εξυπηρετεί έναν συγκεκριμένο σκοπό. Μια τυπική διάταξη έργου τελικής κάλυψης αποτελείται από τις εξής στρώσεις (από κάτω προς τα πάνω):

1. Μια στρώση επιπέδωσης (grading layer) πάχους 15-60 cm. Η στρώση αυτή έχει σκοπό την επιπέδωση της επιφάνειας των απορριμμάτων ώστε να καταστεί ευχερής η κατασκευή των επόμενων στρώσεων. Η στρώση επιπέδωσης συνήθως αποτελείται από χονδρόκοκκα υλικά (π.χ. αμμοχάλικα). Σε περίπτωση που τα υποκείμενα υλικά (απορρίμματα) είναι ιδιαίτερα ασταθή και συμπιεστά, συχνά η στρώση επιπέδωσης ενισχύεται με ένα συνθετικό γεώ-πλεγμα αξιόλογης εφελκυστικής αντοχής.
2. Μια σφραγιστική στρώση (barrier layer) η οποία αποτελεί την κύρια στεγανωτική στρώση για τον περιορισμό της κατείσδυσης των επιφανειακών υδάτων. Η στρώση αυτή αποτελείται είτε από συμπυκνωμένη άργιλο (πάχους 0.50 μέτρων περίπου) είτε από μια συνθετική γεω-μεμβράνη πάχους 1-2 mm (40-80 mils).
3. Μια προστατευτική στρώση που έχει σκοπό να προστατεύει την υποκείμενη σφραγιστική στρώση από τις εναλλαγές της θερμοκρασίας (παγετός και έντονη θερμότητα) που θα μπορούσαν να προκαλέσουν την ξήρανση της αργιλικής σφραγιστικής στρώσης και τη ρηγμάτωσή της. Τέλος, η στρώση αυτή έχει σκοπό να επιτρέψει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών. Η προστατευτική στρώση έχει πάχος 30-100 cm, αναλόγως της περιοχής και του είδους της υποκείμενης σφραγιστικής στρώσης.
4. Μια επιφανειακή γαιώδης στρώση (φυτικές γαίες) πάχους 10-20 cm για την αρχική ανάπτυξη των φυτών.

7.8 Σύστημα απαγωγής του βιο-αερίου

Κατά την αποσύνθεση των οργανικών ουσιών παράγονται σημαντικές ποσότητες αερίων (βιο-αέριο). Συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται λεπτομερώς στο Εδάφιο 7.3, κατά την αερόβια αποσύνθεση των οργανικών ουσιών παράγεται κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), ενώ κατά την αναερόβια αποσύνθεση παράγεται κυρίως μεθάνιο (CH_4) αλλά και διοξείδιο του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι βαρύτερο από τον αέρα και συνεπώς κινείται κυρίως προς τον πυθμένα του αποδέκτη, όπου τελικώς διαλύεται εντός του υγρού στραγγίσματος. Αντίθετα, το μεθάνιο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και ως εκ τούτου ανέρχεται προς την επιφάνεια των απορριμμάτων, εγκλωβίζεται κάτω από τη στρώση κάλυψης και τελικώς, αν δεν υπάρχει κατάλληλο σύστημα ελεγχόμενης απομάκρυνσής του, διαφεύγει στον αέρα μέσω των ρωγμών της σφραγιστικής στρώσης. Για την αποφυγή των ανωτέρω ανεξέλεγκτων διαφυγών του μεθανίου, οι αποδέκτες αστικών απορριμμάτων θα πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με σύστημα συλλογής και ελεγχόμενης απαγωγής²² του βιο-αερίου.

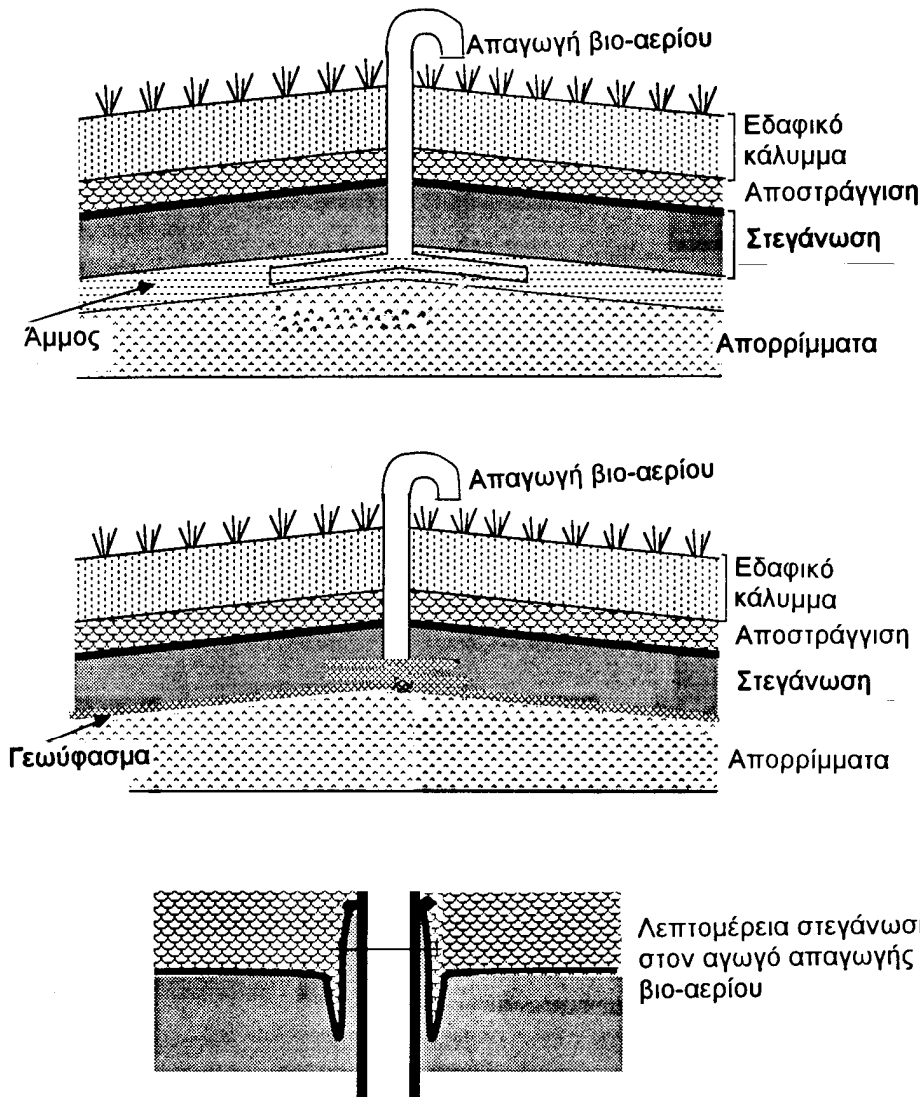
Τα συστήματα συλλογής και απαγωγής του βιο-αερίου υπάγονται σε δυο κατηγορίες: τα συστήματα παθητικής απαγωγής και τα συστήματα ενεργητικής

²² κυρίως μέσω απλής καύσης ή παραγωγής ενέργειας

απαγωγής. Στα επόμενα παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των δυο συστημάτων απαγωγής του βιο-αερίου.

Τα συστήματα παθητικής απαγωγής συνήθως χρησιμοποιούνται σε μικρούς αποδέκτες αστικών απορριμμάτων (δηλαδή χωρητικότητας μέχρι 40000 m³ περίπου) και σε όλους τους υπόλοιπους τύπους αποδεκτών στερεών αποβλήτων, δηλαδή γενικώς στις περιπτώσεις όπου αναμένονται μικρές ποσότητες βιο-αερίου. Το σύστημα αποτελείται από απλούς αγωγούς εξαερισμού (Σχήμα 7.15) που τοποθετούνται στα υψηλότερα σημεία της στρώσης κάλυψης του ΧΥΤΑ. Η συχνότητα των αεραγωγών είναι συνήθως ένας αγωγός ανά 4-8 στρέμματα.

Τα συστήματα ενεργητικής απαγωγής αποτελούνται από μια συστοιχία βαθειών γεωτρήσεων που είναι εφοδιασμένες με διάτρητους σωλήνες. Οι κεφαλές των σωλήνων είναι συνδεδεμένες με οριζόντιους αγωγούς που καταλήγουν σε αντλητικό συγκρότημα το οποίο εφαρμόζει υποπίεση (αναρρόφηση). Με τον τρόπο αυτό το βιο-αέριο αντλείται και στη συνέχεια οδηγείται σε σύστημα απλής καύσης ή παραγωγής ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το βιο-αέριο απλώς απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Η δυνατότητα απελευθέρωσης του βιο-αερίου



Σχήμα 7.15: Τυπικές διατάξεις συστημάτων παθητικής απαγωγής του βιο-αερίου

στην ατμόσφαιρα καθορίζεται από τους εξής παράγοντες:

1. Από τις χημικές ουσίες που περιέχονται στο βιο-αέριο. Εάν περιέχονται επικίνδυνοι ρύποι όπως χλωριούχο βινύλιο ή βενζόλιο, τότε η καύση του αερίου είναι απαραίτητη.
 2. Από τη θέση του αποδέκτη και τις παραγόμενες ποσότητες του βιο-αερίου. Εάν ο αποδέκτης βρίσκεται κοντά σε κατοικημένες περιοχές, οπότε η δυσοσμία του μεθανίου είναι ενοχλητική, τότε η καύση του βιο-αερίου είναι προτιμητέα.
- Όσον αφορά το βάθος των γεωτρήσεων συλλογής του βιο-αερίου και τις αποστάσεις μεταξύ τους συνιστώνται τα εξής:
1. Οι γεωτρήσεις θα πρέπει να διεισδύουν στον αποδέκτη σε βάθος ίσο με το 80-90% του συνολικού πάχους των απορριμμάτων.
 2. Οι αποστάσεις μεταξύ των γεωτρήσεων θα πρέπει να είναι της τάξεως των 60-80 μέτρων.

7.9 Θεσμικό πλαίσιο για αποδέκτες στερεών αποβλήτων

7.9.1 Γενικά

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το θεσμικό πλαίσιο που περιλαμβάνει τις ελάχιστες απαιτήσεις για την κατασκευή αποδεκτών στερεών αποβλήτων ποικίλει από χώρα σε χώρα. Με την εισαγωγή της Οδηγίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τους χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων (99/31/EC), προβλέπεται ότι θα επιτευχθεί κάποια ομοιομορφία ως προς τις ελάχιστες απαιτήσεις για τους αποδέκτες στερεών αποβλήτων. Θα πρέπει βέβαια να αναφερθεί ότι η ανωτέρω Οδηγία δεν καλύπτει όλες λεπτομέρειες του σχεδιασμού των χώρων διάθεσης στερεών αποβλήτων. Αντίθετα, διάφορες χώρες της Ε.Ε. έχουν λεπτομερείς Κανονισμούς που περιλαμβάνουν αναλυτικά τις ελάχιστες απαιτήσεις που ισχύουν στην συγκεκριμένη χώρα. Στα επόμενα παρουσιάζονται κατ' αρχήν οι βασικές αρχές της Ευρωπαϊκής Οδηγίας και στη συνέχεια συνοψίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις σε ορισμένες από τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και στις ΗΠΑ.

7.9.2 Ευρωπαϊκές Οδηγίες για τη διάθεση των αποβλήτων

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπισθεί μεγάλος αριθμός Οδηγιών που καθορίζουν το θεσμικό πλαίσιο για την διάθεση των αποβλήτων και η εφαρμογή τους είναι υποχρεωτική στις χώρες της Ένωσης (βλέπε και Κεφάλαιο 2). Οι κυριότερες από τις Οδηγίες αυτές κατά χρονολογική σειρά είναι:

75/439/EEC: Council Directive of 16 June 1975 on the disposal of waste oils.

75/442/EEC: Council Directive of 15 July 1975 on waste. Amended by 91/156/EEC.

78/176/EEC: Council Directive of 20 February 1978 on waste from the titanium dioxide industry.

78/319/EEC: Council Directive of 20 March 1978 on toxic and dangerous waste.

83/29/EEC: Council Directive of 24 January 1983 amending Directive 78/176/EEC.

89/428/EEC: Council Directive of 21 June 1989 on procedures for harmonising the programmes for the reduction and eventual elimination of pollution caused by waste from the titanium dioxide industry.

91/156/EEC: Council Directive of 18 March 1991 amending Directive 75/442/EEC on waste.

91/689/EEC: Council Directive of 3 December 1991 on hazardous waste, OJ L 377 31.12.91 p.20.

96/59/EC: Council Directive of 16 September 1996 on the disposal of polychlorinated biphenyls and polychlorinated terphenyls (PCB/PCT).

99/31/EC: Council Directive of 26 April 1999 on the landfill of waste.

Από τις ανωτέρω Οδηγίες, η 75/442/EEC αποτελεί τη μητρική Οδηγία και περιλαμβάνει το γενικό πλαίσιο για τη διάθεση αποβλήτων. Το πλαίσιο αυτό συμπληρώθηκε με την πολύ σημαντική Οδηγία 99/31/EC, η οποία δίνει γενικές κατευθύνσεις σχετικά με (1) τις διαδικασίες αποδοχής αποβλήτων στο χώρο ταφής, (2) τις υποχρεώσεις για έλεγχο και παρακολούθηση τόσο κατά τη διάρκεια λειτουργίας όσο και στο στάδιο της μετέπειτα φροντίδας καθώς και (3) τα απαραίτητα μέτρα για να συμμορφωθούν υφιστάμενοι χώροι ανεξέλεγκτης ταφής στις απαιτήσεις της Οδηγίας. Οι βασικές αρχές της Οδηγίας 99/31/EC είναι:

1. Επιβάλλεται για τους χώρους ταφής αστικών αποβλήτων η σταδιακή μείωση του του οργανικού βιοδιασπάσιμου κλάσματος. Η Οδηγία απαιτεί αυτή η μείωση να επιτευχθεί σταδιακά έως το 2016, οπότε το οργανικό κλάσμα δεν θα μπορεί να υπερβαίνει το 35% (κατά βάρος) του συνόλου. Με άλλα λόγια, η Οδηγία προσφέρει κίνητρα για ανάπτυξη εναλλακτικών τρόπων διαχείρισης για τα ευκόλως διασπάσιμα απόβλητα, έμμεσα υποδεικνύοντας ότι η ταφή δεν είναι η πλέον κατάλληλη λύση γι'αυτήν την κατηγορία αποβλήτων.
2. Επιβάλλεται ο διαχωρισμός των αποδεκτών στερεών αποβλήτων στις εξής κατηγορίες αποβλήτων:
 - (α) Επικίνδυνα απόβλητα
 - (β) Αστικά και λοιπά μή-επικίνδυνα απόβλητα
 - (γ) Αδρανή απόβλητα (κυρίως προϊόντα οικοδομικών κατεδαφίσεων) και απαγορεύεται η συναπόθεση (multi-disposal) ουσιών διαφόρων κατηγοριών στον ίδιο αποδέκτη.
3. Απαγορεύεται η διάθεση ορισμένων τύπων αποβλήτων σε κοινές χωματερές (π.χ. ραδιενεργά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας, νοσοκομειακά απόβλητα μολυσματικής φύσεως κλπ).
4. Καθορίζονται κριτήρια για την επιλογή της θέσης κατασκευής νέων αποδεκτών στερεών αποβλήτων.
5. Επιβάλλεται η χρήση κατάλληλων φυσικών (αργιλικών) ή συνθετικών μεμβρανών στον πυθμένα των χώρων διάθεσης στερεών αποβλήτων για την προστασία του εδάφους και του υπόγειου νερού από την επέκταση της ρύπανσης.
6. Επιβάλλεται η κατασκευή ειδικών έργων για τον έλεγχο των επιφανειακών απορροών γύρω από τον ΧΥΤΑ και την απαγωγή του στραγγίσματος και του βιο-αερίου.
7. Καθορίζεται αναλυτικά η διαδικασία που θα πρέπει να ακολουθείται για την έγκριση της μελέτης και τον έλεγχο της λειτουργίας των αποδεκτών στερεών αποβλήτων.
8. Δίνονται οδηγίες για την τελική κάλυψη και την αποκατάσταση της επιφάνειας των αποδεκτών μετά την πλήρωσή τους.

7.9.3 Ελάχιστες απαιτήσεις στη Γαλλία

Στη Γαλλία ισχύει ο διαχωρισμός των στερεών αποβλήτων στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- Κατηγορία I - Βιομηχανικά απόβλητα
- Κατηγορία II - Αστικά απόβλητα

Κατηγορία III - Αδρανή απόβλητα

Η συναπόθεση αποβλήτων διαφόρων κατηγοριών στον ίδιο αποδέκτη απαγορεύεται. Για αποδέκτες στερεών αποβλήτων Κατηγορίας I ισχύουν οι εξής περιορισμοί:

1. Η υπόβαση του πυθμένα και των περιμετρικών πρανών του αποδέκτη θα πρέπει να αποτελείται από εδαφικό υλικό με υδραυλική αγωγιμότητα μικρότερη από 10^{-9} m/sec και πάχος τουλάχιστον 5 μέτρων.
2. Στον πυθμένα και τα πρανή θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη στεγανωτική μεμβράνη.
3. Πάνω από τη στεγανωτική μεμβράνη του πυθμένα και των πρανών θα πρέπει να υπάρχει σύστημα αποστράγγισης του στραγγίσματος (με υδραυλική αγωγιμότητα μεγαλύτερη των 10^{-4} m/sec). Το σύστημα αυτό θα πρέπει να έχει επαρκή αποχετευτική ικανότητα ώστε να μην επιτρέπει τη δημιουργία στρώσης υγρού στραγγίσματος πάχους άνω των 30 cm.

Για αποδέκτες στερεών αποβλήτων Κατηγορίας II οι περιορισμοί είναι λιγότερο αυστηροί και περιλαμβάνουν:

1. Υπόβαση του πυθμένα από γαιώδη υλικά πάχους τουλάχιστον 5 m με υδραυλική αγωγιμότητα μικρότερη από 10^{-6} m/sec.
2. Τελική κάλυψη της επιφάνειας με υλικό μικρής διαπερατότητας.

Τέλος, δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί για αποδέκτες αποβλήτων Κατηγορίας III.

7.9.4 Ελάχιστες απαιτήσεις στη Γερμανία

Στη Γερμανία έχει τεθεί ως απώτερος στόχος (δηλαδή μετά από μια 15-ετία) η καύση του συνόλου των αστικών και βιομηχανικών στερεών αποβλήτων, οπότε θα υπάρχει ανάγκη για τη διάθεση μόνον της τέφρας (η οποία έχει πολύ μικρότερο ρυπαντικό φορτίο). Μέχρι τότε, οι αποδέκτες στερεών αποβλήτων διακρίνονται στις εξής Κατηγορίες:

Κατηγορία I - Γαιώδη υλικά που έχουν ρυπανθεί²³

Κατηγορία II - Αδρανή υλικά (π.χ. υλικά κατεδαφίσεων)

Κατηγορία III - Αστικά απορρίμματα

Κατηγορία IV - Βιομηχανικά απόβλητα

Κατηγορία V - Τοξικά ή επικίνδυνα απόβλητα

Η συναπόθεση αποβλήτων διαφόρων κατηγοριών στον ίδιο αποδέκτη απαγορεύεται.

Για τους αποδέκτες αστικών απορριμμάτων (Κατηγορία III), ισχύουν οι εξής ελάχιστες απαιτήσεις:

Σύνθετη στεγανωτική στρώση στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρανή του αποδέκτη, η οποία να αποτελείται από:

- (α) μια συνθετική γεω-μεμβράνη από υψηλής πυκνότητας πολυ-αιθυλένιο (HDPE)
- (β) μια στρώση συμπαγωμένης αργίλου πάχους 0.75 m με συντελεστή διαπερατότητας μικρότερο από 5×10^{-10} m/sec.

Επίσης προβλέπεται η κατασκευή στρώσης συλλογής και απαγωγής του υγρού στραγγίσματος και του βιο-αερίου και η τελική κάλυψη του αποδέκτη μετά την πλήρωσή του.

Για τους αποδέκτες αδρανών υλικών (Κατηγορία II), απαιτείται επίσης σύνθετη στεγανωτική στρώση από συνθετική γεω-μεμβράνη και στρώση συμπαγωμένης αργίλου πάχους 0.50 m με συντελεστή διαπερατότητας μικρότερο από 10^{-9} m/sec.

²³ π.χ. εδαφικά υλικά που αφαιρούνται από περιοχές που έχουν ρυπανθεί και θα πρέπει να διατεθούν σε ειδικούς αποδέκτες

Για τους αποδέκτες επικίνδυνων ή τοξικών αποβλήτων ισχύουν οι εξής περιορισμοί:

1. Υπόβαση του πυθμένα από άργιλο με διαπερατότητα μικρότερη από 10^{-7} m/sec και πάχος άνω των 3 μέτρων.
2. Ανωτάτη στάθμη του υπογείου ορίζοντα σε απόσταση μεγαλύτερη του ενός μέτρου από την κατωτάτη στάθμη του πυθμένα του αποδέκτη.
3. Σύνθετη στεγανωτική στρώση στον πυθμένα και τα περιμετρικά πρανή από:
 - (α) Συνθετική γεω-μεμβράνη πάχους τουλάχιστον 2.5 mm.
 - (β) Στρώση συμπυκνωμένης αργίλου πάχους τουλάχιστον 1.5 m με διαπερατότητα μικρότερη από 5×10^{-10} m/sec.
 - (γ) Κλίση της επιφάνειας του πυθμένα μεγαλύτερη από 3% (για τη στράγγιση του στραγγίσματος).
4. Στρώση τελικής κάλυψης της επιφάνειας που αποτελείται από τα εξής (από κάτω προς τα άνω):
 - (α) Διαπερατή στρώση διαμόρφωσης πάχους άνω των 30 cm με διαπερατότητα άνω του 10^{-3} m/sec.
 - (β) Εύκαμπτη συνθετική γεω-μεμβράνη πάχους άνω των 2.5 mm.
 - (γ) Στρώση συμπυκνωμένης αργίλου πάχους άνω των 50 cm με διαπερατότητα μικρότερη από 5×10^{-10} m/sec και κλίση της επιφάνειας μεγαλύτερη από 5%.

7.9.5 Ελάχιστες απαιτήσεις στη Βρετανία

Στη Βρετανία δεν υπάρχουν συγκεκριμένες ελάχιστες απαιτήσεις των Κανονισμών για τους αποδέκτες στερεών αποβλήτων, αλλά το κάθε συγκεκριμένο έργο σχεδιάζεται με βάση το είδος των αποβλήτων που πρόκειται να δεχθεί τις τοπικές γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, την πιθανότητα ρύπανσης του περιβάλλοντος και τις πιθανές επιπτώσεις από την ενδεχόμενη ρύπανση (δηλαδή την απόσταση από εκμεταλλεύσιμους υδροφορείς, κατοικημένες περιοχές κλπ). Πάντως, συνήθως, η στεγάνωση του πυθμένα των αποδεκτών αστικών απορριμμάτων γίνεται μέσω σύνθετης γεω-μεμβράνης που αποτελείται από συνθετική μεμβράνη πολυαιθυλενίου (HDPE) πάχους 1-2 mm και στρώση συμπυκνωμένης αργίλου πάχους ενός μέτρου ($k < 10^{-9}$ m/sec). Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις, πάνω από τη στεγανωτική μεμβράνη κατασκευάζεται στρώση αποστράγγισης και σύστημα συλλογής και απαγωγής του στραγγίσματος.

7.9.6 Ελάχιστες απαιτήσεις στις ΗΠΑ

Η διάθεση των αποβλήτων (στερεών και υγρών) στις ΗΠΑ διέπεται από την Πράξη Προστασίας και Εκμετάλλευσης Φυσικών Πόρων (Resource Conservation and Recovery Act - RCRA). Η Πράξη αυτή συμπληρώθηκε το 1984 με ειδικούς περιορισμούς για τα επικίνδυνα και τα λοιπά στερεά απόβλητα (Hazardous and Solid Waste Amendments - HSWA). Σύμφωνα με τα ανωτέρω, τα στερεά απόβλητα διακρίνονται σε δυο κατηγορίες (όσον αφορά τον τρόπο διάθεσης):

1. Τα επικίνδυνα/τοξικά απόβλητα των οποίων οι αποδεκτοί τρόποι διάθεσης καθορίζονται στο "Εδάφιο C" (Subtitle C Regulations).
2. Τα μή-επικίνδυνα απόβλητα που περιλαμβάνουν τα αστικά απορρίμματα, τις ιλύες που προκύπτουν από τη βιολογική επεξεργασία των αστικών λυμάτων και τις στάκτες από την καύση των αστικών απορριμμάτων. Οι αποδεκτοί τρόποι διάθεσης αυτών των αποβλήτων καθορίζονται στο "Εδάφιο D" (Subtitle D Regulations).

Κατά το σχεδιασμό αποδεκτών για τη διάθεση αποβλήτων του Εδαφίου D (μή-επικίνδυνα) εφαρμόζονται δυο μέθοδοι²⁴:

1. Η ικανοποίηση των ελάχιστων απαιτήσεων του Κανονισμού. Οι απαιτήσεις αυτές για τη στεγάνωση του πυθμένα και των περιμετρικών πρανών είναι (από κάτω προς τα πάνω):
 - (α) Στρώση συμπακνωμένης αργίλου πάχους 60 cm με διαπερατότητα μικρότερη από 10^{-9} m/sec.
 - (β) Εύκαμπτη συνθετική μεμβράνη κατάλληλης ποιότητας και επαρκούς πάχους.
 - (γ) Σύστημα συλλογής και απομάκρυνσης του υγρού στραγγίσματος.
2. Η ικανοποίηση του λεγόμενου επιθυμητού αποτελέσματος (performance standard) όσον αφορά τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Η απαίτηση αυτή επιβάλλει ότι το σύστημα στεγάνωσης του πυθμένα του αποδέκτη θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε οι συγκεντρώσεις 24 συγκεκριμένων ρύπων στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα σε αποστάσεις 0-150 μέτρων από τον πυθμένα της χωματερής να μην υπερβαίνουν τις ελάχιστες αποδεκτές συγκεντρώσεις που καθορίζονται στην Πράξη του Πόσιμου Νερού (The Safe Drinking Water Act).

Κατά το σχεδιασμό της στεγάνωσης του πυθμένα των αποδεκτών για τη διάθεση των επικίνδυνων αποβλήτων του Εδαφίου C, απαιτείται η χρησιμοποίηση διπλής στρώσης στεγάνωσης που αποτελείται από τα εξής (από κάτω προς τα πάνω):

1. Στρώση συμπακνωμένης αργίλου πάχους 90 cm με διαπερατότητα μικρότερη από 10^{-9} m/sec.
2. Κατώτερη στεγανωτική συνθετική γεω-μεμβράνη πάχους τουλάχιστον 30 mils (0.75 mm) αλλά συνήθως χρησιμοποιείται πάχος 60-100 mils (1.5-2.5 mm).
3. Διαπερατή στρώση για τον εντοπισμό των διαρροών της ανώτερης στεγανωτικής στρώσης. Η στρώση αυτή αποτελείται από κοκκώδες υλικό με διαπερατότητα μεγαλύτερη από 10^{-2} m/sec και πάχος 30 cm. Η στρώση θα πρέπει να περιέχει και σύστημα διάτρητων σωλήνων για την απαγωγή και μέτρηση του όγκου του στραγγίσματος που τυχόν διαφεύγει από την ανώτερη στεγανωτική στρώση.
4. Ανώτερη στεγανωτική συνθετική γεω-μεμβράνη πάχους 45 mils (1 mm περίπου) αλλά συνήθως χρησιμοποιείται μεμβράνη πάχους 1.5 - 2.5 mm.
5. Ανώτερη στρώση στράγγισης που αποτελείται από κοκκώδες υλικό με διαπερατότητα μεγαλύτερη από 10^{-2} m/sec και πάχος 30 cm. Η στρώση θα πρέπει να περιέχει σύστημα διάτρητων σωλήνων για την απαγωγή του στραγγίσματος. Εναλλακτικά, αντί του κοκκώδους υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί και συνθετικό αποστραγγιστικό γεώ-πλεγμα με επαρκή διαπερατότητα.

Όσον αφορά το σύστημα τελικής κάλυψης των αποδεκτών επικίνδυνων αποβλήτων (του Εδαφίου C), τούτο θα πρέπει να αποτελείται από τις εξής στρώσεις (από κάτω προς τα άνω):

1. Εδαφική στρώση ισοπέδωσης πάχους 60 cm με διαπερατότητα μικρότερη από 10^{-9} m/sec.
2. Συνθετική στεγανωτική μεμβράνη πάχους 20 mils (0.5 mm) με κλίση μεγαλύτερη από 2%.
3. Αποστραγγιστική στρώση πάχους 30 cm με διαπερατότητα μεγαλύτερη από 10^{-5} m/sec.
4. Στρώση φυτικής γης πάχους 60 cm και διαμόρφωση της επιφάνειας με κλίση 3-5%.

²⁴ όχι εναλλακτικά, αλλά σε ορισμένες Πολιτείες των ΗΠΑ απαιτείται η εφαρμογή της μιας μεθόδου και σε άλλες Πολιτείες η εφαρμογή της άλλης μεθόδου

7.9.7 Το θεσμικό πλαίσιο στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα ισχύει το θεσμικό πλαίσιο για αποδέκτες στερεών αποβλήτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αναφέρθηκε παραπάνω. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, οι κανονισμοί για τα ΧΥΤΑ δίνονται από δύο Κοινές Υπουργικές Αποφάσεις:

1. Κοινή Υπουργική Απόφαση 114218/1997 (ΦΕΚ 1016B): Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων. Δίνει λεπτομερείς οδηγίες για την χωροθέτηση, κατασκευή και λειτουργία ΧΥΤΑ και ελάχιστες απαιτήσεις σχεδιασμού. Η ΚΥΑ 114218/1997 αναφέρεται σχεδόν αποκλειστικά σε χώρους ταφής αστικών αποβλήτων, με μια σύντομη μόνο αναφορά σε χώρους ταφής αδρανών αποβλήτων. Στο μέλλον αναμένεται να εκδοθεί αντίστοιχη ΚΥΑ και για τα επικίνδυνα απόβλητα.

2. Κοινή Υπουργική Απόφαση 29407/3508/2002 (ΦΕΚ 1572B): Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων. Προσαρμόζει την 99/31/EC (την οποία σε μεγάλο βαθμό μεταφράζει) στην ελληνική νομοθεσία. Όσον αφορά το τεχνικό περιεχόμενο της ΚΥΑ 114218/1997, η ΚΥΑ 29407/3508/2002 δεν επέφερε σημαντικές αλλαγές. Συνεπώς, η ΚΥΑ 114218/1997 παραμένει η βασική ρυθμιστική διάταξη για τη χωροθέτηση ενός ΧΥΤΑ, τις τεχνικές προδιαγραφές κατασκευής και λειτουργίας του, και τις απαιτήσεις για τελική κάλυψη και επανένταξη του χώρου στο περιβάλλον.

7.10 Αποδέκτες αποβλήτων ορυχείων

Τα παραπροϊόντα των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων (mining waste), αν και δεν υπάγονται στην κατηγορία των “στερεών αποβλήτων” (βλέπε Κεφάλαιο 2), αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα μελέτης της Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, και για το λόγο αυτό εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει υποβάλει πρόταση οδηγίας για τη διαχείριση των αποβλήτων της εξορυκτικής βιομηχανίας [COM(2003) 319 final/COD 2003/0107], η οποία δεν έχει όμως ακόμα οριστικοποιηθεί. Τα παραπροϊόντα αυτά συχνά είναι πρακτικώς αδρανή (δηλαδή δεν έχουν αξιόλογο ρυπαντικό φορτίο) αλλά σε πολλές περιπτώσεις περιέχουν επικίνδυνες/τοξικές ουσίες σε μικρή συγκέντρωση. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι παράγονται σε πολύ μεγάλες ποσότητες με συνέπεια η τελική τους διάθεση να έχει υψηλό κόστος. Τα απόβλητα των ορυχείων υπάγονται σε τρεις κατηγορίες, αναλόγως της φύσης τους (η οποία όμως καθορίζει και τις μεθόδους της τελικής τους διάθεσης): τα στερεά, τα υδαρή και τα υγρά. Στα επόμενα εξετάζονται χωριστά οι ανωτέρω τρεις κατηγορίες.

7.10.1 Στερεά απόβλητα ορυχείων

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται γαιώδη υλικά μεγάλου όγκου τα οποία είτε είναι αδρανή είτε έχουν μικρό ρυπαντικό φορτίο, όπως:

(α) Τα υπερκείμενα και ενδιάμεσα άγονα των ορυχείων ανοικτής εκμετάλλευσης (open-pit mining). Στην Ελλάδα τέτοια απόβλητα παράγονται σε μεγάλες ποσότητες στα λιγνιτορυχεία της Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου και της Μεγαλόπολης. Συγκεκριμένα, με τη βελτίωση της τεχνολογίας των χωματουργικών μηχανημάτων έχει πλέον καταστεί οικονομικά συμφέρουσα η εκμετάλλευση λιγνιτορυχείων με σχέση αγόνων/κοίτασμα 3/1 έως 3.5/1, δηλαδή για κάθε τόνο λιγνίτη συμφέρει να εκσκάπτονται και να απορρίπτονται 3-3.5 m³ αγόνων υλικών

(αμμοιλλών, αργίλων, μαργών κλπ). Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει στοιχεία της ΔΕΗ για την ετήσια παραγωγή λιγνίτη και την αφαίρεση αγόνων υλικών:

ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΛΙΓΝΙΤΗ ΚΑΙ ΑΓΟΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΕΗ		
Λιγνιτικό κέντρο	Λιγνίτης (εκατομμύρια τόνοι)	Άγονα (εκατομμύρια m ³)
Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου	43	140
Μεγαλόπολης	12	45

Από τον ανωτέρω πίνακα προκύπτει ότι στα δυο κύρια λιγνιτικά κέντρα της Ελλάδος παράγονται ετησίως περί τα 200 εκατομμύρια κυβικά μέτρα αγόνων που θα πρέπει να απορριφθούν. Τα άγονα αυτά υλικά είναι γενικώς αδρανή, όμως η απόθεσή τους παρουσιάζει τα εξής γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα:

- (1) Ανάγκη εκτεταμένων χώρων απόθεσης. Η απόθεση των αγόνων των λιγνιτορυχείων γίνεται συνήθως εντός του ορυχείου, το οποίο με τον τρόπο αυτό επαναπληρώνεται και αποκαθίσταται η αρχική του μορφή. Όμως, συχνά το πρόγραμμα εκμετάλλευσης του ορυχείου επιβάλλει τη χρησιμοποίηση και άλλων χώρων απόθεσης εκτός του ορυχείου.
- (2) Ευστάθεια των πρानών των αποθέσεων που γενικώς έχουν μεγάλο ύψος: τυπικά οι αποθέσεις σε χώρους εκτός του ορυχείου έχουν πάχος 40-80 μέτρα, ενώ οι αποθέσεις εντός του ορυχείου έχουν πάχος που μπορεί να φθάσει και τα 250 μέτρα (ίσο με το βάθος του ορυχείου). Είναι προφανές ότι η ευστάθεια των πρानών της απόθεσης είναι κρίσιμη και τυχόν αστοχία τους μπορεί να έχει πολύ δυσμενείς συνέπειες. Τα προβλήματα ευστάθειας των πρานών επιτείνονται από το γεγονός ότι τα υλικά των αποθέσεων είναι αναμοχλευμένα (λόγω της εκσκαφής), είναι χαλαρά επειδή γενικώς αποτίθενται χωρίς να συμπυκνωθούν, συνήθως έχουν σχετικώς υψηλή περιεκτικότητα σε νερό και είναι συχνά αργιλικής φύσεως. Κατά συνέπεια, η διατμητική τους αντοχή είναι μικρή (λόγω της αναμόχλευσης και της έλλειψης συμπίκνωσης), ενώ μετά την απόθεσή τους αναπτύσσονται σημαντικές υδατικές πιέσεις πόρων (λόγω της υψηλής υγρασίας, της αργιλικής τους φύσεως και του μεγάλου πάχους των υπερκείμενων στρώσεων). Οι παράγοντες αυτοί είναι ιδιαίτερα δυσμενείς για τις συνθήκες ευστάθειας των πρανών. Στις αποθέσεις των αγόνων του Λιγνιτικού κέντρου της Πτολεμαΐδας διαπιστώθηκε ότι η μικρή διατμητική αντοχή των υλικών οφείλεται και στις δονήσεις που υφίστανται τα υλικά κατά τη μεταφορά τους με ταινιοδρόμους μήκους αρκετών χιλιομέτρων προς τους χώρους απόθεσης. Οι δονήσεις αυτές προκαλούν πλήρη καταστροφή της δομής των υλικών, με συνέπεια την άφιξή τους στην περιοχή απόθεσης με τη μορφή υδαρούς ιλύος.
- (3) Υποχωρήσεις της επιφάνειας των χώρων απόθεσης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι αποθέσεις των αγόνων έχουν μεγάλο πάχος (έως και 250 μέτρα) και αποτελούνται από χαλαρά υλικά που γενικώς έχουν αποτεθεί χωρίς συμπίκνωση. Είναι προφανές ότι τα υλικά αυτά είναι πολύ συμπιεστά και υφίστανται μεγάλες υποχωρήσεις λόγω του ιδίου βάρους των αποθέσεων (συνίζηση). Οι υποχωρήσεις αυτές εξελίσσονται βαθμιαία και συχνά διαρκούν επί δεκαετίες, λόγω στερεοποίησης και ερπυσμού. Συμπιέσεις της τάξεως του 2-4% (δηλαδή υποχώρηση 2-4 μέτρων για κάθε 100 μέτρα πάχους της απόθεσης) είναι αρκετά συνήθεις. Συνεπώς, στην περίπτωση που οι χώροι απόθεσης πρόκειται τελικώς να χρησιμοποιηθούν για την ανέγερση κτιρίων κλπ, θα πρέπει είτε να προβλέπεται η βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών

- κατά την απόθεση (π.χ. τοποθέτηση αποστραγγιστικών σωλήνων, συμπίκνωση των υλικών), είτε η μελέτη της θεμελίωσης των έργων να λαμβάνει υπόψη τις πολύ μεγάλες υποχωρήσεις του εδάφους εκ συνιζήσεως.
- (β) Τα στερεά απόβλητα που προκύπτουν μετά την εκμετάλλευση του κοιτάσματος. Λόγω της μικρής περιεκτικότητας του κοιτάσματος σε μέταλλευμα, οι ποσότητες των αποβλήτων που παράγονται μετά την αφαίρεση του μεταλλεύματος είναι τεράστιες. Έτσι, π.χ. τα συνήθη κοιτάσματα χαλκού περιέχουν 1-2 kg καθαρού μετάλλου ανά τόνο μεταλλεύματος, ενώ στα χρυσορυχεία η σχέση είναι πολύ μικρότερη (0.5 gr χρυσού ανά τόνο μεταλλεύματος). Κατά συνέπεια, το σύνολο σχεδόν της ποσότητας του κοιτάσματος πρέπει να απορριφθεί. Συνήθως τα απόβλητα αυτά έχουν αξιόλογο ρυπαντικό φορτίο λόγω των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία του μεταλλεύματος για την ανάκτηση του καθαρού μετάλλου.

Στην κατηγορία των στερεών αποβλήτων της εκμετάλλευσης υπάγεται και η τέφρα των λιγνιτορυχείων που προκύπτει από την καύση του λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω των μεγάλων ποσοτήτων λιγνίτη που καίγονται αλλά και της υψηλής περιεκτικότητας του λιγνίτη σε τέφρα, οι παραγόμενες ποσότητες τέφρας είναι σημαντικές. Σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ, η ετησίως παραγόμενη τέφρα στα λιγνιτορυχεία Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου είναι 15 εκατομμύρια κυβικά μετρα περίπου, ενώ στη Μεγαλόπολη παράγονται ετησίως περί τα 5 εκατομμύρια κυβικά μέτρα τέφρας. Η παραγόμενη τέφρα έχει ιδιότητες υδραυλικού κονιάματος (δηλαδή αποκτά μηχανική αντοχή με την πάροδο του χρόνου) και συνεπώς η συναπόθεση της τέφρας με τα άγονα βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του σύμμικτου υλικού.

7.10.2 Υδαρή υπολείμματα εκμετάλλευσης ορυχείων (tailings)

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται τα υδαρή υπολείμματα του μεταλλεύματος που απομένουν μετά την εξαγωγή του καθαρού μετάλλου μέσω φυσικών ή χημικών μεθόδων. Τα υλικά αυτά έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- (1) Γενικώς είναι λεπτόκοκκα, με ποσοστό λεπτοκόκκου κλάσματος (διερχόμενο από το κόσκινο Νο 200) που φθάνει το 80%. Τούτο οφείλεται στην κονιοποίηση του μεταλλεύματος που γίνεται για την πληρέστερη εξαγωγή του μετάλλου. Συχνά τα υλικά αυτά διακρίνονται σε δυο κατηγορίες αναλόγως της περιεκτικότητάς τους σε λεπτόκοκκα: στα αμμώδη (sandy tailings), με ποσοστό λεπτοκόκκου κλάσματος έως 30%, και στα ιλυώδη (slimes), με ποσοστό λεπτοκόκκου κλάσματος άνω του 30%.
- (2) Έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (συνήθως 100-200%) λόγω της μεθόδου επεξεργασίας του μεταλλεύματος που συνήθως απαιτεί την έκπλυση με νερό. Κατά συνέπεια, τα απόβλητα της επεξεργασίας αποτελούν ένα υδαρές αργιλικό μίγμα με τη μορφή ιλύος που έχει υγρασία αρκετά μεγαλύτερη από το όριο υδαρότητας, και ως εκ τούτου πολύ μικρή διατμητική αντοχή. Η μεταφορά και απόθεση των υλικών αυτών γίνεται με υδραυλικές μεθόδους (με σωληνώσεις).
- (3) Συνήθως έχουν υψηλό ρυπαντικό φορτίο που οφείλεται κυρίως στις χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του μετάλλου. Έτσι, για παράδειγμα, τα υδαρή υπολείμματα των χρυσορυχείων περιέχουν κυανιούχα λόγω της συνήθως χρησιμοποιούμενης μεθόδου ανάκτησης του χρυσού με έκπλυση του κονιοποιημένου μεταλλεύματος (heap leaching). Η μέθοδος αυτή τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται με συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς για την ανάκτηση και άλλων μετάλλων (χαλκού, αργύρου, ουρανίου) και συνεπώς τα

περιβαλλοντικά προβλήματα σε περίπτωση πλημμελούς διάθεσης των υπολειμμάτων θα είναι σημαντικά.

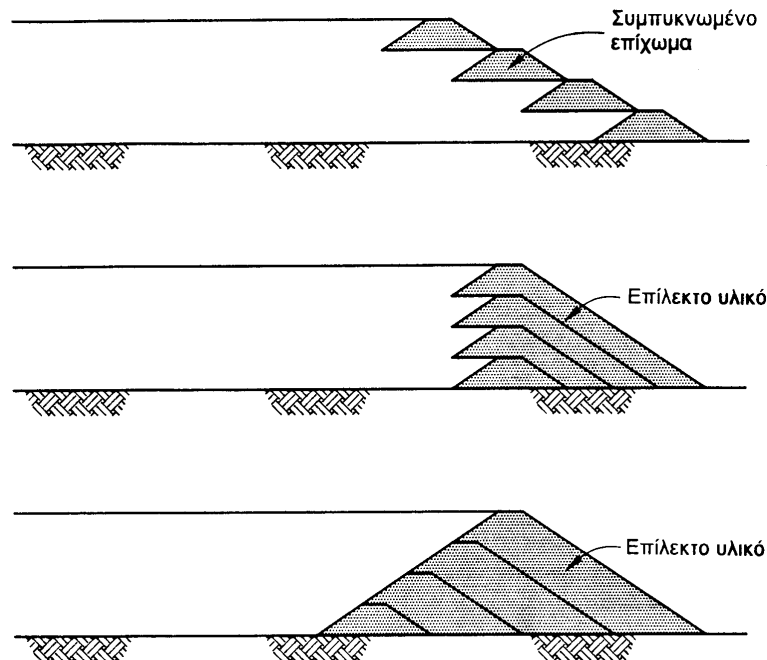
Η διάθεση των υδαρών υπολειμμάτων της εκμετάλλευσης μεταλλευμάτων γίνεται σε ταμιευτήρες (tailings lagoons), στους οποίους τα υλικά μεταφέρονται και απορρίπτονται με υδραυλικές μεθόδους (συνήθως με άντληση του υδαρούς υλικού μέσω σωληνώσεων). Οι ταμιευτήρες αυτοί δημιουργούνται με την κατασκευή περιμετρικών αναχωμάτων (tailings dams), όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.16. Τα αναχώματα κατασκευάζονται είτε από τα ίδια υλικά των υπολειμμάτων (μετά από ξήρανση και κατάλληλη συμπύκνωση) ή από άλλα (κοκκώδη) υλικά που προέρχονται από δανειοθαλάμους της περιοχής. Η κατασκευή των περιμετρικών αναχωμάτων γίνεται βαθμιαία και ακολουθεί την πλήρωση του ταμιευτήρα. Σημειώνεται ότι τα υδαρή υλικά που αποτίθενται εντός του ταμιευτήρα βαθμιαία ξηραίνονται (λόγω της εξάτμισης) και τελικώς ο ταμιευτήρας περιέχει μια παχύρρευστη ιλύ ή ακόμη και ξηρό υλικό (αναλόγως των κλιματικών συνθηκών). Τα κυριότερα γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα των ταμιευτήρων αυτών είναι:

- (1) Οι πιθανές διαφυγές ρύπων διαμέσου του πυθμένα προς το υπέδαφος. Για την αντιμετώπιση των διαφυγών αυτών λαμβάνονται διάφορα μέτρα που εξαρτώνται από το είδος και το ρυπαντικό φορτίο των αποβλήτων και τις γεωτεχνικές και υδρογεωλογικές συνθήκες του υπεδάφους. Σε περιπτώσεις αποβλήτων με υψηλό ρυπαντικό φορτίο χρησιμοποιείται επένδυση του πυθμένα με συνθετική γεω-μεμβράνη και στη συνέχεια απόθεση των υδαρών αποβλήτων με τη μέθοδο των λεπτών στρώσεων (thin-layer managed technique). Κατά τη μέθοδο αυτή, τα υλικά των αρχικών στρώσεων αποτίθενται σε λεπτές στρώσεις, ώστε να ξηραίνονται μέσω της εξάτμισης και στη συνέχεια συμπυκνώνονται. Έτσι δημιουργείται μια συμπυκνωμένη αργιλική μεμβράνη με μικρό συντελεστή διαπερατότητας που συνεπικουρεί τη συνθετική στεγανωτική γεω-μεμβράνη. Επίσης, συχνά μεταξύ της συνθετικής γεω-μεμβράνης και της υπερκείμενης αργιλικής στρώσης παρεμβάλλεται διαπερατή αποστραγγιστική στρώση μέσω της οποίας αποστραγγίζεται το στράγγισμα με σκοπό τη μείωση του υδραυλικού φορτίου στην υποκείμενη συνθετική μεμβράνη και τον περιορισμό των διαφυγών του στραγγίσματος διαμέσου των ατελειών της μεμβράνης.
- (2) Η ευστάθεια των περιμετρικών αναχωμάτων τόσο υπό συνθήκες στατικής φόρτισης όσο και στην περίπτωση σεισμικής επιφόρτισης. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.16, για τη μείωση του κόστους, τα περιμετρικά αναχώματα κατασκευάζονται συχνά επί των υδαρών υλικών των υπολειμμάτων ή ακόμη και με χρήση των ίδιων αυτών των υλικών. Συνεπώς, λόγω της μικρής διατμητικής αντοχής των υλικών και της υψηλής τους υγρασίας, τα προβλήματα της ευστάθειας είναι αυξημένα. Σε περίπτωση σεισμικής επιφόρτισης, υπάρχει ο επιπλέον κίνδυνος της ρευστοποίησης των υλικών που αποτελούν το περιμετρικό ανάχωμα με συνέπεια την αστοχία του. Οι έλεγχοι ευστάθειας που απαιτούνται στις περιπτώσεις αυτές γίνονται με τις συνήθεις μεθόδους ανάλυσης της ευστάθειας πρηνών της Εδαφομηχανικής.
- (3) Το λεπτόκοκκο υλικό που ξηραίνεται μέσω της εξάτμισης μπορεί να παρασυρθεί από τον αέρα με τη μορφή σκόνης και να αποτεθεί σε άλλες περιοχές κατάντη με συνέπεια την επέκταση της ρύπανσης. Τα μέτρα που λαμβάνονται για να αποφευχθεί τέτοια ρύπανση είναι:
 - (α) Η τελική κάλυψη του ταμιευτήρα στις περιοχές όπου έχει συντελεσθεί η πλήρωσή του.

- (β) Η διαχείριση των αποθέσεων στα ενδιάμεσα στάδια της πλήρωσης του ταμιευτήρα, ώστε η επιφάνεια να μην ξηραίνεται πλήρως. Τούτο γίνεται μέσω της μετακίνησης των στομίων εξόδου των σωληνώσεων προσαγωγής των αποβλήτων στον ταμιευτήρα, ώστε η απόθεση να γίνεται περιοδικώς σε όλες τις θέσεις και η επιφάνεια να διατηρείται υγρή.
- (4) Η τελική κάλυψη και η επαναχρησιμοποίηση των χώρων μετά την πλήρωση του αποδέκτη. Η κάλυψη των αποδεκτών αυτών γίνεται με τις ίδιες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αποδεκτών βιομηχανικών αποβλήτων και εξαρτώνται κυρίως από το ρυπαντικό φορτίο των αποβλήτων. Για την επαναχρησιμοποίηση των χώρων, το κυριότερο πρόβλημα είναι οι σημαντικές και χρονικώς εξελισσόμενες υποχωρήσεις εκ συνιζήσεως των αποβλήτων εντός του ταμιευτήρα.

Η βαθμιαία ανύψωση των περιμετρικών αναχωμάτων (tailings dam) ακολουθεί το ρυθμό πλήρωσης του ταμιευτήρα με τα υδαρή απόβλητα. Το Σχήμα 7.16 παρουσιάζει τρεις μεθόδους κατασκευής των περιμετρικών αναχωμάτων:

1. Η προώθηση προς τα ανάντη (upstream construction) που φαίνεται στο άνω μέρος του Σχήματος 7.16. Κυρίως χρησιμοποιείται σε ορυχεία όπου διατίθενται χονδρόκοκκα (αμμοχαλικώδη) υλικά για την κατασκευή των αναχωμάτων, καθώς και σε ξηρά κλίματα όπου η ξήρανση των αποβλήτων μέσω της εξάτμισης γίνεται με ταχείς ρυθμούς. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλότητά της και το μικρό κόστος λόγω του μικρού όγκου των υλικών που πρέπει να συμπυκνωθούν για την κατασκευή του αναχώματος. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:
 - (α) Η ανάγκη χρήσης χονδρόκοκκου υλικού για την κατασκευή των αναχωμάτων. Συνήθως, το ίδιο το υλικό των αποβλήτων του ορυχείου δεν είναι επαρκώς χονδρόκοκκο και συνεπώς απαιτείται η δημιουργία ειδικών δανειοθαλάμων που αυξάνει το κόστος.



Σχήμα 7.16: Μέθοδοι κατασκευής των περιμετρικών αναχωμάτων για τη δημιουργία ταμιευτήρων υδαρών υπολειμμάτων ορυχείων (tailings dams)

- (β) Απαιτεί την επιμελή διαχείριση της διάθεσης των αποβλήτων στον ταμιευτήρα, ώστε το υλικό που βρίσκεται σε επαφή με τα αναχώματα να έχει χαμηλή υδραυλική στάθμη και οι πιέσεις πόρων στην περιοχή του αναχώματος να είναι μικρές. Τούτο μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση συστήματος αποστράγγισης και με την κατάλληλη απόθεση των υλικών (ώστε τα πλέον χονδρόκοκκα να αποτίθενται κοντά στο περιμετρικό ανάχωμα) αλλά και στις περιπτώσεις όπου το έδαφος θεμελίωσης είναι διαπερατό (οπότε η στράγγιση γίνεται μέσω του πυθμένα).
2. Η προώθηση προς τα κατάντη (downstream construction) που φαίνεται στο κάτω μέρος του Σχήματος 7.16. Η μέθοδος αυτή ουσιαστικά απαιτεί την κατασκευή ενός κανονικού φράγματος από συμπυκνωμένο υλικό των αποβλήτων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:
- (α) Επιτρέπει την τοποθέτηση συνθετικής στεγανωτικής μεμβράνης στο ανάντη πρηνές για τον περιορισμό της διήθησης διαμέσου του σώματος του φράγματος. Με τον τρόπο αυτό αφενός μεν περιορίζονται οι διαρροές ρύπων και αφετέρου βελτιώνονται οι συνθήκες ευστάθειας του αναχώματος.
 - (β) Το ύψος του φράγματος μπορεί να αυξάνεται χωρίς σημαντική μείωση της επιφάνειας του ταμιευτήρα (σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο όπου η επιφάνεια του ταμιευτήρα μειώνεται).
 - (γ) Το σύνολο του σώματος του φράγματος συμπυκνώνεται και συνεπώς το ανάχωμα είναι περισσότερο ανθεκτικό έναντι ρευστοποίησης σε περίπτωση σεισμού.
- Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:
- (α) Απαιτείται η κατασκευή ενός αρχικού περιμετρικού αναχώματος μικρού ύψους (starter dike) πριν από την έναρξη της απόθεσης των αποβλήτων. Η κατασκευή αυτού του αναχώματος πρέπει να γίνει με διαφορετικό υλικό από αυτό των αποβλήτων (ανάγκη δανειοθαλάμου).
 - (β) Απαιτεί σημαντικό όγκο υλικού για την κατασκευή του συμπυκνωμένου αναχώματος, και μάλιστα ο όγκος αυτός αυξάνει με την αύξηση του ύψους του αναχώματος. Βεβαίως, για την κατασκευή των επάλληλων στρώσεων του αναχώματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ίδια τα υλικά των αποβλήτων μετά από κατάλληλη ξήρανση.
3. Η κεντρική προώθηση (center-line construction) που φαίνεται στο κεντρικό μέρος του Σχήματος 7.16. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα των παραπάνω μεθόδων και γενικώς είναι προτιμητέα. Βεβαίως, το κόστος κατασκευής του αναχώματος στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερο από το κόστος με τη μέθοδο της προώθησης προς τα ανάντη αλλά μικρότερο από το κόστος με τη μέθοδο της προώθησης προς τα κατάντη.

7.10.3 Υγρά απόβλητα ορυχείων

Τα υγρά απόβλητα των ορυχείων προέρχονται από:

- (1) Το νερό που χρησιμοποιείται για την έκπλυση (rinsing) του μεταλλεύματος μετά το πέρας της διαδικασίας ανακτήσεως του μετάλλου, ώστε να απομακρυνθούν οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία και να μειωθεί το ρυπαντικό φορτίο των υδαρών ή στερεών αποβλήτων (ιλύος).
- (2) Το νερό που αποβάλλεται από τα υδαρή υπολείμματα της εκμετάλλευσης, π.χ. το νερό που αποστραγγίζεται από τη βάση των ταμιευτήρων υδαρών υπολειμμάτων (tailings).
- (3) Οι επιφανειακές απορροές των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων από την επιφάνεια των αποδεκτών των αποβλήτων.

(4) Το νερό που αντλείται για τις ανάγκες ταπείνωσης της στάθμης και αποστράγγισης των ορυχείων.

Η διάθεση των ανωτέρω υγρών αποβλήτων γίνεται με μεθόδους που εξαρτώνται από το ρυπαντικό φορτίο των αποβλήτων. Συνήθως χρησιμοποιούνται μέθοδοι ανάλογες με τις μεθόδους διάθεσης των υγρών βιομηχανικών αποβλήτων (αποθήκευση σε ταμιευτήρες με ειδική στεγάνωση του πυθμένα, όπου το νερό τελικώς εξατμίζεται).

7.11 Βιβλιογραφικές αναφορές

- Barlaz M.A., Ham R.K. and Schaefer D.M. (1989) "Microbial and chemical dynamics during refuse decomposition in a simulated sanitary landfill", *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol 115(6), pp 1088-1102.
- Budhu M., Giese R.F., Campbell G. and Baumgrass L. (1991) "The permeability of soils with organic fluids", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 28(1), pp 140-147.
- Chapuis R.P. (1989) "Soil-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 27(1), pp 647-654.
- Ehrig H.J. (1988) "Water and element balances of landfills", in *Lecture Notes in Earth Sciences* (editor P. Baccini), Springer Verlag, Berlin.
- Fernandez F. and Quingley R.M. (1985) "Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 22(2), pp 205-214.
- Koerner, R.M. (1998) "Designing with Geosynthetics" 4th Edition, Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, NJ, USA.
- Qian, X., R.M. Koerner and D.H. Gray, 2002, *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*, Prentice Hall.
- Street A. (1994) "Landfilling: the difference between Continental European and British Practice", *Geotechnical Engineering, ICE*, Vol 107, pp 41-46.
- Tchobanoglous G., Theisen H. and Eliassen R. (1977) "Solid Wastes", McGraw Hill Inc., N.Y., 334 pages.
- U.S. Department of the Interior (1975) *Engineering and Design Manual, "Coal Refuse Disposal Facilities, Mining Enforcement and Safety Administration"*.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1985) "Compatibility Test for Wastes and Membrane Liners", Method 9090 Washington DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1985) "Report to Congress: Wastes from the extraction and beneficiation of metallic ores, phosphate rock, asbestos, overburden from uranium mining and oil shale", EPA/530-SW-85-033.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1985) "Minimum technology guidance on double liner systems for landfills and surface impoundments: design, construction and operations", EPA/530-SW-84-014.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1986) "Construction Quality Assurance for Hazardous Waste Land Disposal Facilities", EPA/530-SW-86-031, Washington DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1988) "Lining of Waste Containment and Other Impounding Facilities", EPA/600/2-88/052, Matrecon, Washington, DC.

- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1988) "Flexible Membrane Liner Advisory Expert System (FLEX) - Computer Code", Cincinnati, OH, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1989) "Final covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments", EPA/530-SW-89-047, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1990) "Characterization of Municipal Solid Waste in the United States" 1990 Update, EPA/530-SW-90-042, USEPA, Washington, DC, PB 90-215112.