



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ
ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Σύγχρονες τεχνικές στεγανοποίησης χώρων υγειονομικής ταφής
απορριμάτων με την χρήση Γεωσυνθετικών υλικών»**

ΔΟΥΡΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΛΟΥΠΑΣΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ, 2026**

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Δουράκη Αθανάσιου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο Δουράκης Αθανάσιος διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

«Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον επιβλέπον Καθηγητή, κύριο Λουπασάκη Κωνσταντίνο, για την καθοριστική καθοδήγηση, τη διαρκή υποστήριξη και τη γόνιμη συνεργασία της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής. Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στη σύζυγό μου, της οποίας η υπομονή, η κατανόηση και η αδιάκοπη στήριξη υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες για την επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει τις σύγχρονες τεχνικές στεγανοποίησης Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), δίνοντας έμφαση στη χρήση γεωσυνθετικών υλικών καθώς και στην αξιολόγηση της συμβολής τους στην περιβαλλοντική προστασία. Η στεγανοποίηση αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο για την αποτροπή της ρύπανσης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, μέσω του ελέγχου της διακίνησης στραγγισμάτων και ρυπογόνων φορτίων.

Στο πλαίσιο της εργασίας, πραγματοποιείται ανάλυση των βασικών υλικών και συστημάτων στεγανοποίησης, όπως οι γεωμεμβράνες πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE), οι συμπυκνωμένες αργλικές στρώσεις και οι γεωσυνθετικοί αργλικοί φραγμοί (GCLs), καθώς και οι συνδυασμοί αυτών σε σύνθετα συστήματα. Παρουσιάζονται δύο διεθνή παραδείγματα Χ.Υ.Τ.Α., αναδεικνύοντας τη σημασία της προσαρμογής των τεχνικών λύσεων στις τοπικές συνθήκες. Παράλληλα, εξετάζεται η περίπτωση του Χ.Υ.Τ.Α. Αρναίας, με στόχο την αξιολόγηση της εφαρμογής των συστημάτων στεγανοποίησης σε πραγματικές συνθήκες έργου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα σύνθετα συστήματα στεγανοποίησης, τα οποία συνδυάζουν γεωμεμβράνες και αργλικούς φραγμούς ή GCLs, προσφέρουν υψηλό επίπεδο προστασίας και αποτελούν μια βέλτιστη τεχνική λύση.

Συμπερασματικά, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της ορθής επιλογής και εφαρμογής των τεχνικών στεγανοποίησης για τη βιώσιμη και περιβαλλοντικά ασφαλή διαχείριση των στερεών αποβλήτων.

Λέξεις-κλειδιά: Χ.Υ.Τ.Α., στεγανοποίηση, γεωμεμβράνη, GCL, στραγγίσματα, γεωσυνθετικά υλικά

ABSTRACT

This study examines modern landfill sealing techniques for Municipal Solid Waste Landfills (MSW landfills), with emphasis on the use of geosynthetic materials and the evaluation of their contribution to environmental protection. Sealing systems constitute a critical component for preventing the contamination of groundwater and surface water, by controlling the migration of leachate and pollutants.

Within the scope of this study, the main materials and sealing systems are analyzed, including high-density polyethylene (HDPE) geomembranes, compacted clay layers, and geosynthetic clay liners (GCLs), as well as their combination in composite lining systems. In addition, international landfill case studies are presented, highlighting the importance of adapting technical solutions to local conditions. Furthermore, the case study of the Arnaias landfill in Greece is examined, aiming to evaluate the performance of sealing systems under real field conditions.

The results indicate that composite sealing systems, combining geomembranes with clay barriers or GCLs, provide a high level of protection and represent a best available technical solution. Overall, the study highlights the importance of proper selection and implementation of sealing techniques for the sustainable and environmentally safe management of solid waste.

Keywords: Landfill, sealing systems, geomembrane, GCL, leachate, geosynthetics

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	12
1.2 ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ	14
1.3 ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	15
1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ & Χ.Υ.Τ.Α.	17
2.1 ΧΩΡΟΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	18
2.2 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	19
2.2.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία	19
2.2.2 Ελληνική νομοθεσία	20
2.2.3 Τεχνικές προδιαγραφές Χ.Υ.Τ.Α.	22
2.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ	34
3.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΩΝ ΦΡΑΓΜΩΝ	39
3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΩΝ ΦΡΑΓΜΩΝ	46
3.2.1 Αργιλικά υλικά (Clay Layers)	47
3.2.2 Γεωμεμβράνες	50
3.2.3 Γεωσυνθετικά υλικά	53
3.2.4 Μίγμα Φυσικού Εδάφους–Μπεντονίτη	56
3.2.5 Συμπυκνωμένοι συνεκτικοί εδαφικοί φραγμοί	58
3.2.6 Ιπτάμενη Τέφρα ως Υλικό Στεγάνωσης	58
3.2.7 Κριτήρια συγκριτικής αξιολόγησης στοιχείων στεγανωτικών φραγμών	59
3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΕΓΑΝΩΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Χ.Υ.Τ.Α.	63
3.3.1 Εδαφική προετοιμασία	63

3.3.2 Επιτόπια σύνδεση στεγανωτικών μεμβρανών	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΔΙΕΘΝΗ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ	
ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΥΤΑ	69
4.1 ΔΗΜΟΤΙΚΟΣ ΧΥΤΑ ΤΗΣ SIGHIȘOARA ΣΤΗ ΡΟΥΜΑΝΙΑ	69
4.2 ΔΗΜΟΤΙΚΟΣ ΧΥΤΑ ΣΤΟ ΒΕΛΓΙΟ	73
4.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΕΘΝΩΝ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΟΥ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ	77
ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (Χ.Υ.Τ.Α.) ΑΡΝΑΙΑΣ	77
5.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ	78
5.1.1 Δομική διάταξη των στρώσεων στεγανοποίησης.....	78
5.2 ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΦΡΑΓΜΟΣ	82
5.3 ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΜΒΡΑΝΗ	85
5.3.1 Τοποθέτηση γεωμεμβράνης HDPE	86
5.3.2 Συγκόλληση γεωμεμβράνης HDPE	87
5.3.3 Στρώσεις προστασίας γεωμεμβράνης HDPE	88
5.4 ΣΤΡΩΣΗ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση Αναερόβιου Χ.Υ.Τ.Α.	30
Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση Αναερόβιου Χ.Υ.Τ.Α. με καθημερινή επικάλυψη	30
Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση βελτιωμένου αναερόβιου Χ.Υ.Τ.Α.	31
Σχήμα 4. Σχηματική απεικόνιση Ημι-αερόβιου Χ.Υ.Τ.Α. με φυσικό αερισμό και LCS	32
Σχήμα 5. Σχηματική απεικόνιση αερόβιου Χ.Υ.Τ.Α. με αναγκαστικό αερισμό	33
Σχήμα 6. Διαστρωμάτωση στεγανοποιητικών συστημάτων Χ.Υ.Τ.Α.	35
Σχήμα 7. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης στεγανωτικών στρώσεων στον πυθμένα και στα πρανή (κλίση 3:1) της λεκάνης απόθεσης Χ.Υ.Τ.Α.	37
Σχήμα 8. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης στεγανωτικών στρώσεων στον πυθμένα και στα πρανή (κλίση > 3:1) της λεκάνης απόθεσης Χ.Υ.Τ.Α.	38
Σχήμα 9. Σχηματική απεικόνιση στεγανοποιητικών συστημάτων Χ.Υ.Τ.Α.	39
Σχήμα 10. Σχηματική απεικόνιση επιφανειακού στεγανωτικού συστήματος	40
Σχήμα 11. Σχηματική απεικόνιση κατακόρυφου στεγανωτικού συστήματος	40
Σχήμα 12. Σχηματική απεικόνιση συστήματος μονής στεγανοποίησης	41
Σχήμα 13. Σχηματική απεικόνιση συστήματος σύνθετης στεγανοποίησης	43
Σχήμα 14. Σχηματική απεικόνιση συστήματος διπλής στεγανοποίησης	44
Σχήμα 15. Σχηματική απεικόνιση συστήματος συλλογής και ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων σε Χ.Υ.Τ.Α. τύπου βιοαντιδραστήρα	45
Σχήμα 16. Ο δημοτικός χώρος υγειονομικής ταφής της πόλης Sighișoara	70
Σχήμα 17. Συστήματα στεγανοποίησης και αποστράγγισης που εφαρμόστηκαν στον δημοτικό Χ.Υ.Τ.Α. της Sighișoara	71
Σχήμα 18. Περιμετρικό ανάχωμα σε γεωκυψελώδη στρώση του Χ.Υ.Τ.Α. Sighișoara	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Διαστρωμάτωση συστήματος στεγανοποίησης Χώρου Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (Χ.Υ.Τ.Α.)	23
Εικόνα 2. Επαναχρησιμοποίηση κλειστών Χ.Υ.Τ.Α. για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και παραγωγή ηλιακής ενέργειας	28
Εικόνα 3. Αργιλικός και γεωσυνθετικός φραγμός – φύλλα μπετονίτη –γεωμεμβράνη – γεωύφασμα προστασίας μεμβράνης	36
Εικόνα 4. Γεωσυνθετική αποστραγγιστική στρώση κατακόρυφων πρανών	39
Εικόνα 5. Αριστερά: Διαστρωμάτωση τελικής κάλυψης Χ.Υ.Τ.Α. Δεξιά: Γεωδικτυωτό	45
Εικόνα 6. Βασικοί τύποι γεωσυνθετικών φραγμών αργίλου (GCLs)	54
Εικόνα 7. Παγκόσμιες ζώνες λατεριτικών εδαφών	58
Εικόνα 8. Τοποθέτηση της αργιλικής στρώσης	68
Εικόνα 9. Τοποθέτηση μεμβράνης HDPE	68
Εικόνα 10. Γενική άποψη των βασικών στρώσεων κατά την τοποθέτηση γεωυφασμάτων Terralys	74
Εικόνα 11. Διατομή των βασικών κοκκωδών στρώσεων και τοποθέτηση του γεωυφάσματος διαχωρισμού	75
Εικόνα 12. Προετοιμασία υπεδάφους πριν από τη διάστρωση της αργιλικής στρώσης	81
Εικόνα 13. Διάστρωση της αργιλικής στρώσης	83
Εικόνα 14. Συγκόλληση γεωμεμβράνης με χρήση συσκευής διπλής ραφής Leister GEOSTAR G5	87
Εικόνα 15. Τοποθέτηση γεωυφάσματος	90
Εικόνα 16. Διάστρωση άμμου προστασίας	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Παράμετροι και επιτρεπτά όρια αργιλικών υλικών για τη χρήση τους ως στεγανωτική στρώση (liner) σε Χ.Υ.Τ.Α.	48
Πίνακας 2. Ενδεικτικές ιδιότητες μπετονίτη	57
Πίνακας 3. Εναλλακτικές λύσεις στεγανωτικών φραγμών και εκτιμώμενοι ρυθμοί διαρροής	59
Πίνακας 4. Αξιολόγηση συστημάτων στεγανοποίησης	62
Πίνακας 5. Προδιαγραφές καταλληλότητας αργιλικών υλικών	84
Πίνακας 6. Προδιαγραφές καταλληλότητας μπετονίτη	84
Πίνακας 7. Βασικά χαρακτηριστικά γεωμεμβράνης HDPE	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού και η έντονη διαδικασία αστικοποίησης έχουν οδηγήσει σε μια συνεχόμενη και σημαντική αύξηση της παραγωγής αποβλήτων, ιδίως στα αστικά κέντρα. Καθώς οι πόλεις επεκτείνονται με υψηλούς ρυθμούς, οι περιοχές που αρχικά προορίζονταν για την απόθεση απορριμμάτων, οι οποίες βρίσκονταν εκτός των ορίων του αστικού ιστού, πλέον εντάσσονται στον αστικό χώρο, γεγονός που εντείνει τα προβλήματα διαχείρισης των αποβλήτων. Παράλληλα με την αύξηση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ), προκύπτουν ποικίλοι κίνδυνοι για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται η ρύπανση των επιφανειακών υδάτων, η μόλυνση των υπόγειων υδάτων, η δημιουργία δυσάρεστων οσμών, η εκπομπή αερίων θερμοκηπίου, αλλά και η πιθανότητα πρόκλησης πυρκαγιών, αστάθειας των πρανών, απώλειας φυσικής βλάστησης και μόλυνσης του εδάφους.

Η διαχείριση αυτών των ζητημάτων συνιστά μια ουσιαστική πρόκληση για τους φορείς διαχείρισης αποβλήτων, καθώς απαιτείται η εφαρμογή ολοκληρωμένων πολιτικών πρόληψης και ελέγχου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πρόληψη και ο περιορισμός της παραγωγής αποβλήτων υλοποιούνται μέσω κρατικών κατευθυντήριων πολιτικών, νομοθετικών ρυθμίσεων ή βιομηχανικών πρωτοβουλιών, με στόχο τη μείωση του κόστους που σχετίζεται με τη συλλογή, τη μεταφορά, την επεξεργασία και την τελική διάθεση των απορριμμάτων, καθώς και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Επιπλέον, η προληπτική διαχείριση αποβλήτων επιτρέπει τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων, προωθεί την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υλικών, ενώ συμβάλλει στη δημιουργία βιώσιμων και περιβαλλοντικά φιλικών αστικών υποδομών.

Το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) 2020–2030, όπως παρουσιάστηκε από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, συνιστά ένα στρατηγικό πλαίσιο για τη μεταρρύθμιση του συστήματος διαχείρισης αποβλήτων στην Ελλάδα. Το σχέδιο στοχεύει στη μετάβαση προς ένα βιώσιμο, κυκλικό και περιβαλλοντικά υπεύθυνο μοντέλο διαχείρισης απορριμμάτων, σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές οδηγίες και τις διεθνείς δεσμεύσεις της χώρας. Βασικοί στόχοι του ΕΣΔΑ περιλαμβάνουν τη σημαντική μείωση της ταφής αποβλήτων, με στόχο να περιοριστεί στο 10% έως το 2030, την αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης των αστικών αποβλήτων στο 55% το 2025 και στο 60% το 2030, και την ολοκληρωμένη εφαρμογή της χωριστής συλλογής οργανικών αποβλήτων, μέσω της καθιέρωσης του «καφέ κάδου». Παράλληλα, το σχέδιο προβλέπει την πλήρη παύση της ανεξέλεγκτης διάθεσης

απορριμμάτων και την αποκατάσταση παράνομων χωματερών. Το ΕΣΔΑ 2020–2030, με το ολοκληρωμένο αυτό πλαίσιο στρατηγικών στόχων και παρεμβάσεων, επιδιώκει να καταστήσει τη διαχείριση των αποβλήτων στην Ελλάδα αποτελεσματική, βιώσιμη και σύμφωνη με τις διεθνείς περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

Οι χώροι υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) παραμένουν αναπόσπαστο τμήμα των σύγχρονων συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων, παρά την προώθηση της ανακύκλωσης και της ενεργειακής αξιοποίησης. Η ασφαλής λειτουργία τους βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη σωστή στεγανοποίηση και κατασκευή, ώστε να αποτρέπεται η ρύπανση των υπόγειων υδάτων και του εδάφους, καθώς και η απελευθέρωση βλαβερών αερίων στο περιβάλλον. Στο πλαίσιο αυτό, οι καινοτόμες τεχνικές και τα νέα υλικά που αναπτύσσονται για τη στεγανοποίηση των ΧΥΤΑ αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, προσφέροντας λύσεις με χαμηλότερο κόστος, αυξημένη ανθεκτικότητα και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η παρούσα εργασία εξετάζει τις σύγχρονες προσεγγίσεις στη στεγανοποίηση και κατασκευή των ΧΥΤΑ, συγκρίνοντας διεθνείς πρακτικές και παρουσιάζοντας μια μελέτη περίπτωσης, με στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους και την ανάδειξη βέλτιστων εφαρμογών για το ελληνικό πλαίσιο.

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η αποτελεσματική διαχείριση των στερεών αποβλήτων συγκαταλέγεται στις σημαντικότερες προκλήσεις της σύγχρονης κοινωνίας, καθώς συνδέεται άμεσα με τη δημόσια υγεία, την περιβαλλοντική προστασία και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Παρά τις προσπάθειες για ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση και μείωση της παραγωγής απορριμμάτων, ένα σημαντικό ποσοστό τους εξακολουθεί να καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής (Χ.Υ.Τ.Α.). Η λειτουργία αυτών των εγκαταστάσεων απαιτεί αυστηρούς κανόνες σχεδιασμού, κατασκευής και παρακολούθησης, ώστε να αποτρέπεται η ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, η έκλυση επικίνδυνων αερίων και η υποβάθμιση του εδάφους και των οικοσυστημάτων.

Στο πλαίσιο αυτό, η στεγανοποίηση του πυθμένα και των πρανών ενός Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία του. Η επιλογή κατάλληλων υλικών και τεχνικών στεγανοποίησης καθορίζει την ικανότητα του συστήματος να αποτρέπει τη διαρροή στραγγισμάτων στο περιβάλλον και να εξασφαλίζει τη μακροχρόνια σταθερότητα της εγκατάστασης. Παραδοσιακά, για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιούνται υλικά όπως φυσικός άργιλος, γεωμεμβράνες υψηλής πυκνότητας (HDPE), γεωυφάσματα και στρώσεις μπετονίτη. Ωστόσο, οι τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων

ετών έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων υλικών και μεθόδων, οι οποίες προσφέρουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, μειωμένο κόστος εγκατάστασης και βελτιωμένες περιβαλλοντικές επιδόσεις.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση σύγχρονων τεχνικών στεγανοποίησης στη στεγανοποίηση και κατασκευή χώρων υγειονομικής ταφής, μέσα από συγκριτική ανάλυση των χρησιμοποιούμενων υλικών, τεχνικών και μεθοδολογιών. Ειδικότερα, η εργασία επιδιώκει:

- να παρουσιάσει το νομοθετικό πλαίσιο που διέπει τη λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α. στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση,
- να αναλύσει τα υλικά και τις τεχνικές στεγανοποίησης που χρησιμοποιούνται διεθνώς,
- να εξετάσει τη συμβολή νέων τεχνολογιών, όπως οι γεωσυνθετικοί φραγμοί αργίλου (GCLs) και οι σύνθετες γεωμεμβράνες,
- να παρουσιάσει και να συγκρίνει διεθνή παραδείγματα εφαρμογής σύγχρονων συστημάτων στεγανοποίησης,
- και τέλος, να εφαρμόσει τις παραπάνω προσεγγίσεις μέσω μελέτης περίπτωσης ελληνικού Χ.Υ.Τ.Α., με στόχο την εκτίμηση της τεχνικής και οικονομικής βιωσιμότητας των εφαρμοζόμενων λύσεων.

Η σπουδαιότητα της παρούσας εργασίας εντοπίζεται στο γεγονός ότι συνδέει τη θεωρητική γνώση με την πρακτική εφαρμογή, προσφέροντας μια ολιστική προσέγγιση στη σύγχρονη πρακτική της διαχείρισης στερεών αποβλήτων. Μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης διαφορετικών συστημάτων στεγανοποίησης, επιδιώκεται να αναδειχθούν οι βέλτιστες επιλογές που συνδυάζουν περιβαλλοντική ασφάλεια, τεχνική αποτελεσματικότητα και οικονομική αποδοτικότητα. Επιπλέον, η εργασία μπορεί να αποτελέσει εργαλείο λήψης αποφάσεων για μηχανικούς, μελετητές, φορείς διαχείρισης αποβλήτων και δημόσιους οργανισμούς που ασχολούνται με τον σχεδιασμό, την αδειοδότηση και την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α.. Τέλος, η εστίαση σε καινοτόμες προσεγγίσεις ενισχύει τον διάλογο γύρω από την ανάγκη προσαρμογής των τεχνικών προδιαγραφών στις σύγχρονες απαιτήσεις βιωσιμότητας, ενεργειακής απόδοσης και κυκλικής οικονομίας. Η εργασία αυτή δεν περιορίζεται στη σύγκριση υλικών και τεχνικών, αλλά επιδιώκει να συμβάλει στην ανάπτυξη ενός πιο βιώσιμου και περιβαλλοντικά υπεύθυνου μοντέλου διαχείρισης αποβλήτων, σε συμφωνία με τις ευρωπαϊκές πολιτικές και τις σύγχρονες απαιτήσεις της πράσινης μετάβασης.

1.2 ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η παρούσα εργασία αναμένεται να συνεισφέρει ουσιαστικά στην ενίσχυση της επιστημονικής γνώσης και της τεχνικής κατανόησης που αφορά τη στεγανοποίηση και την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α., μέσω της διερεύνησης και συγκριτικής αξιολόγησης καινοτόμων τεχνολογιών, μεθόδων και υλικών. Η συστηματική αυτή ανάλυση στοχεύει στη βελτίωση των υφιστάμενων πρακτικών, με απώτερο σκοπό τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής προστασίας, της βιωσιμότητας των έργων και της βελτιστοποίησης του κόστους κατασκευής και λειτουργίας αυτών.

Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της έρευνας αναμένεται να οδηγήσουν στην αποσαφήνιση των τεχνικών χαρακτηριστικών, των δυνατοτήτων και των περιορισμών των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη στεγανοποίηση της λεκάνης ταφής, όπως η φυσική άργιλος, οι γεωμεμβράνες, τα γεωφάσματα, οι γεωσυνθετικοί αργιλικοί φραγμοί (GCLs) και τα σύνθετα συστήματα στεγανοποίησης. Μέσα από τη συγκριτική ανάλυση αυτών των τεχνολογιών, αναμένεται να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την υδραυλική τους συμπεριφορά, την αντοχή τους σε μηχανικές και χημικές καταπονήσεις, καθώς και τη μακροχρόνια σταθερότητά τους υπό διαφορετικές γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Παράλληλα, προβλέπεται η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου αξιολόγησης, το οποίο θα επιτρέπει την ποσοτική και ποιοτική σύγκριση των τεχνικών στεγανοποίησης με βάση παραμέτρους όπως το οικονομικό κόστος, η τεχνική αποδοτικότητα, η διάρκεια ζωής, οι απαιτήσεις συντήρησης και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του έργου. Με αυτόν τον τρόπο, επιδιώκεται να διαμορφωθεί μια σφαιρική εικόνα που θα υποστηρίξει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων από μηχανικούς, ερευνητές και αρμόδιους φορείς σχεδιασμού και υλοποίησης έργων διαχείρισης αποβλήτων.

Η μελέτη περίπτωσης που θα περιλαμβάνεται στην εργασία έχει ως στόχο να αναδείξει στην πράξη την εφαρμοσιμότητα των προτεινόμενων τεχνικών λύσεων, αξιολογώντας την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητά τους σε πραγματικές συνθήκες έργου. Μέσω της εμπειρικής αυτής προσέγγισης, αναμένεται να εντοπιστούν πλεονεκτήματα, τεχνικές προκλήσεις και πρακτικές παράμετροι που αφορούν την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρηση των καινοτόμων συστημάτων στεγανοποίησης. Η συγκριτική αποτίμηση της απόδοσής τους, τόσο σε τεχνικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο, θα συμβάλει στην αξιολόγηση της συνολικής αποδοτικότητας και στην πρόταση βελτιώσεων που μπορούν να υιοθετηθούν σε μελλοντικά έργα.

Μέσα από τη διερεύνηση των νέων αυτών τεχνολογικών εφαρμογών, η εργασία φιλοδοξεί να τεκμηριώσει τα περιβαλλοντικά και λειτουργικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την αξιοποίησή τους. Ειδικότερα, αναμένεται να αποδειχθεί ότι η εφαρμογή καινοτόμων υλικών στεγανοποίησης δύναται να συμβάλει καθοριστικά στη μείωση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω αποτελεσματικότερης συλλογής και διαχείρισης των αερίων του Χ.Υ.Τ.Α., καθώς και στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που προκαλείται από τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Παράλληλα, εκτιμάται ότι η βελτιστοποίηση των τεχνικών στεγανοποίησης μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των χώρων ταφής, μειώνοντας ταυτόχρονα το συνολικό λειτουργικό κόστος και ενισχύοντας τη βιωσιμότητα του συστήματος διαχείρισης αποβλήτων. Σε στρατηγικό επίπεδο, η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στη διαμόρφωση ενός πιο ολοκληρωμένου πλαισίου πολιτικής και κανονιστικών κατευθύνσεων που αφορούν το σχεδιασμό και την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α. στη χώρα μας. Τα αποτελέσματα μπορούν να λειτουργήσουν ως εργαλείο υποστήριξης για τη λήψη αποφάσεων, τόσο σε τεχνικό όσο και σε θεσμικό επίπεδο, παρέχοντας εμπειριστατωμένες προτάσεις για την επικαιροποίηση των προδιαγραφών στεγανοποίησης, την ενσωμάτωση κριτηρίων βιωσιμότητας και την προώθηση πρακτικών που ευθυγραμμίζονται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της περιβαλλοντικής αειφορίας. Συνολικά, η εργασία αναμένεται να προσφέρει μία συνθετική και επιστημονικά τεκμηριωμένη προσέγγιση που γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ θεωρίας και πρακτικής εφαρμογής, συμβάλλοντας στην εξέλιξη των τεχνολογιών στεγανοποίησης και στην αποτελεσματικότερη προστασία του περιβάλλοντος. Με αυτόν τον τρόπο, φιλοδοξεί να αποτελέσει σημείο αναφοράς για μελλοντικές μελέτες και εφαρμογές στον τομέα της περιβαλλοντικής μηχανικής και της βιώσιμης διαχείρισης στερεών αποβλήτων. Τελικός στόχος είναι η διατύπωση τεκμηριωμένων προτάσεων για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων στεγανοποίησης Χ.Υ.Τ.Α., με βάση τόσο τη διεθνή εμπειρία όσο και τα δεδομένα της ελληνικής πραγματικότητας.

1.3 ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία διακρίνεται για την πρωτοτυπία της, καθώς εστιάζει στη διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση καινοτόμων προσεγγίσεων στη στεγανοποίηση και κατασκευή χώρων υγειονομικής ταφής, συνδυάζοντας τη θεωρητική τεκμηρίωση με την πρακτική εφαρμογή μέσω μελέτης περίπτωσης. Σε αντίθεση με προηγούμενες έρευνες που περιορίζονται κυρίως σε τεχνικές ή περιβαλλοντικές αναλύσεις, η παρούσα μελέτη επιχειρεί

μια ολιστική αξιολόγηση που ενσωματώνει τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Η πρόταση για την ενσωμάτωση εναλλακτικών υλικών στεγανοποίησης, όπως ο μπετονίτης σε ρολό, επιδιώκει να προσφέρει μια πρακτική και βιώσιμη λύση που μπορεί να μειώσει το κόστος και να βελτιώσει την αποδοτικότητα των έργων, συμβάλλοντας έτσι στην εξέλιξη των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων σε εθνικό και διεθνές επίπεδο.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η δομή της παρούσας εργασίας έχει οργανωθεί με τρόπο που να εξασφαλίζει τη σαφή και συστηματική παρουσίαση των επιμέρους θεματικών ενοτήτων, προκειμένου να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στο αντικείμενο μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η εισαγωγή της εργασίας, όπου περιλαμβάνονται ο σκοπός και η σπουδαιότητα της μελέτης, τα προσδοκώμενα αποτελέσματα, η πρωτοτυπία της προσέγγισης και η συνολική δομή του έργου.

Το Κεφάλαιο 2 αναπτύσσει το θεωρητικό υπόβαθρο, εξετάζοντας το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο σχετικά με τη λειτουργία και τη διαχείριση των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), καθώς και τις τεχνικές προδιαγραφές και τις βασικές αρχές σχεδιασμού τους.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στα υλικά και τις τεχνικές στεγανοποίησης που χρησιμοποιούνται διεθνώς, με ιδιαίτερη έμφαση στις σύγχρονες και καινοτόμες προσεγγίσεις, όπως η χρήση γεωσυνθετικών υλικών και εναλλακτικών μεθόδων προστασίας του υπεδάφους και των υδάτων.

Το Κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει τη συγκριτική ανάλυση διεθνών παραδειγμάτων, όπου εξετάζονται δύο χαρακτηριστικά έργα από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, με στόχο την αξιολόγηση των τεχνολογικών και περιβαλλοντικών διαφορών τους.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η μελέτη περίπτωσης (case study), όπου εφαρμόζονται τα θεωρητικά και τεχνικά δεδομένα σε ένα συγκεκριμένο έργο, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα βελτίωσης των παραδοσιακών μεθόδων στεγανοποίησης μέσω καινοτόμων λύσεων, όπως η χρήση μπετονίτη σε ρολό.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις που απορρέουν από την έρευνα, με συνοπτική αποτύπωση των βασικών ευρημάτων και διατύπωση εισηγήσεων για μελλοντικές εφαρμογές και περαιτέρω έρευνα στον τομέα της βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ & Χ.Υ.Τ.Α.

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων, περιλαμβάνει τόσο τον σχεδιασμό των μεθόδων επεξεργασίας και μεταφοράς όσο και των τρόπων διάθεσης αυτών (Yesilnacar και Cetin, 2005). Η τελική διάθεση αποτελεί την τελευταία και πιο κρίσιμη φάση του συστήματος διαχείρισης, καθώς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις. Αποσκοπεί στην οριστική απομάκρυνση των απορριμμάτων, εξασφαλίζοντας παράλληλα την προστασία της δημόσιας υγείας και του φυσικού περιβάλλοντος, αλλά και τη διατήρηση πόρων και ενέργειας (Καρακασίδης, 1999). Οι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν τον τρόπο διάθεσης των απορριμμάτων περιλαμβάνουν την πληθυσμιακή πυκνότητα της περιοχής και το τεχνολογικό επίπεδο της χώρας, το οποίο με την σειρά του καθορίζει τις διαθέσιμες δυνατότητες και υποδομές για την αποτελεσματική διαχείριση των απορριμμάτων (Καρακασίδης, 1999).

Η εδαφική διάθεση αποτέλεσε ιστορικά την πρωταρχική μέθοδο διαχείρισης απορριμμάτων, καθώς επί πολλές δεκαετίες υπήρξε η πλέον διαδεδομένη πρακτική. Στο παρελθόν, η διάθεση αυτή πραγματοποιούνταν χωρίς συγκεκριμένο σχεδιασμό ή περιβαλλοντικές προδιαγραφές, οδηγώντας στη δημιουργία των λεγόμενων Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (Χ.Α.Δ.Α.). Οι Χ.Α.Δ.Α. συνδέθηκαν στενά με την πρόκληση σοβαρών περιβαλλοντικών και υγειονομικών επιπτώσεων, την υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος, τη δημιουργία εστιών ρύπανσης και μόλυνσης, καθώς και με τη δυσκολία αποκατάστασης των περιοχών αυτών, όταν έφταναν στο σημείο κορεσμού (Γεωργιάδης κ.α., 2004). Οι αρνητικές αυτές συνέπειες αποτέλεσαν το έναυσμα για τη λήψη θεσμικών και νομοθετικών πρωτοβουλιών, τόσο σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης όσο και σε εθνικό επίπεδο, με στόχο την κατάργηση της ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων και την προώθηση σύγχρονων, περιβαλλοντικά ορθών πρακτικών διαχείρισης (Ροταμίτου, 2016).

Μετά τη διαπίστωση της ανάγκης για εξέλιξη και βελτίωση των υπαρχουσών μεθόδων εδαφικής διάθεσης αποβλήτων, οι αρμόδιοι τεχνικοί φορείς προχώρησαν στον σχεδιασμό νέων χώρων, με σαφώς καθορισμένες προδιαγραφές, που στόχευαν στην ασφαλή και υγειονομικά ελεγχόμενη ταφή των απορριμμάτων. Οι βασικότερες καινοτομίες που ενσωματώθηκαν σε αυτούς τους νέους χώρους περιλαμβάνουν τη στεγανοποίηση του πυθμένα και των πρανών, τη συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου, καθώς και τη συγκέντρωση και επεξεργασία των στραγγισμάτων. Οι νέες αυτές εγκαταστάσεις, οι οποίες αποτέλεσαν την οργανωμένη εξέλιξη των Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων

(Χ.Α.Δ.Α.), ονομάστηκαν Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) (Ροταμίτου, 2016).

2.1 ΧΩΡΟΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

Ο όρος «υγειονομική ταφή» αναφέρεται σε μια ελεγχόμενη διαδικασία διάθεσης απορριμμάτων σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους, όπου πραγματοποιούνται συγκεκριμένα στάδια όπως η απόρριψη, η διάστρωση, η συμπίεση και η επικάλυψη των απορριμμάτων με στρώματα γαιώδους υλικού (Καρακασίδης, 1999). Πιο συγκεκριμένα, οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) αποτελούν ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις για τη διάθεση των στερεών αποβλήτων, τα οποία θάβονται εντός του εδάφους υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Η στεγανοποίηση του πυθμένα μέσω κατάλληλου στεγανού υλικού (bottom liner) και η καθημερινή κάλυψη με στρώση εδάφους συμβάλλουν στην απομόνωση των απορριμμάτων από το φυσικό περιβάλλον. Κατά τη διαδικασία αυτή λαμβάνονται αυστηρά μέτρα προστασίας των υπόγειων υδάτων από πιθανή ρύπανση που θα μπορούσε να προκληθεί από τη διείσδυση στραγγισμάτων. Η επιλογή της τοποθεσίας, η κατασκευή, η λειτουργία και η συντήρησή τους διέπονται από κανόνες περιβαλλοντικής ασφάλειας και προγράμματα συνεχούς παρακολούθησης. Ως εκ τούτου, σκοπός της κατασκευής τους είναι η διαφύλαξη του περιβάλλοντος και της ατμόσφαιρας από ρυπογόνους παράγοντες που μπορεί να προέρχονται από τα ρεύματα των αποβλήτων. Ωστόσο, η δημιουργία τους απαγορεύεται σε περιοχές με οικολογική ευαισθησία, ενώ σε κάθε εγκατάσταση εφαρμόζονται συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας και της περιβαλλοντικής συμμόρφωσης.

Για την αναγνώριση και συστηματοποίηση των χώρων υγειονομικής ταφής, αναπτύχθηκαν συστήματα ταξινόμησης. Ένα από αυτά βασίζεται στις διαδικασίες αποσύνθεσης που συμβαίνουν εντός του Χ.Υ.Τ.Α. και στον λειτουργικό σκοπό της εγκατάστασης (Idris et al. 2004). Παράλληλα, οι Shimaoka et al. (2000) εισήγαγαν την έννοια του «τύπου χώρου ταφής» με βάση τις διαδικασίες αποσύνθεσης. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις επικεντρώνονται στους χώρους υγειονομικής ταφής. Σύμφωνα με την Αμερικανική Εταιρεία Πολιτικών Μηχανικών (ASCE), οι χώροι υγειονομικής ταφής ορίζονται ως οι χώροι «*διάθεσης απορριμμάτων στο έδαφος με τρόπο που δεν προκαλεί όχληση ή κίνδυνο για τη δημόσια υγεία και ασφάλεια, αξιοποιώντας τις αρχές της μηχανικής για να περιοριστούν τα απορρίμματα στη μικρότερη δυνατή επιφάνεια, να μειωθούν στον ελάχιστο πρακτικό όγκο και να καλυφθούν με στρώση εδάφους στο τέλος κάθε ημερήσιας λειτουργίας ή σε πιο συχνά διαστήματα, όταν απαιτείται*».

2.2 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

Η ευρωπαϊκή πολιτική για τη διαχείριση των απορριμμάτων καθορίζεται από ένα ευρύ θεσμικό πλαίσιο, στο επίκεντρο του οποίου βρίσκεται η Οδηγία 1999/31/ΕΚ του Συμβουλίου της 26ης Απριλίου 1999 «περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων». Η Οδηγία αυτή θέτει ως κύριο στόχο την πρόληψη ή τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων της ταφής απορριμμάτων στο περιβάλλον, μέσω της επιβολής αυστηρών προδιαγραφών σχεδιασμού, λειτουργίας, ελέγχου και μεταπαρακολούθησης των χώρων ταφής. Η εναρμόνιση της ελληνικής νομοθεσίας με το ευρωπαϊκό δίκαιο αποτέλεσε καθοριστικό βήμα για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής και ασφαλούς διαχείρισης των αποβλήτων στη χώρα.

2.2.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία

Οδηγία 1999/31/ΕΚ

Σύμφωνα με την Οδηγία 1999/31/ΕΚ, οι χώροι ταφής ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες: (α) χώρους ταφής επικίνδυνων αποβλήτων, (β) χώρους ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων και (γ) χώρους ταφής αδρανών αποβλήτων. Ωστόσο, στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) δεν γίνονται δεκτά ορισμένα είδη αποβλήτων, προκειμένου να διασφαλίζεται η ασφάλεια, η προστασία του περιβάλλοντος και η αποτελεσματικότητα της διαχείρισης. Συγκεκριμένα, αποκλείονται τα υγρά απόβλητα, τα επικίνδυνα απορρίμματα όπως εκρηκτικά, διαβρωτικά, οξειδωτικά ή εύφλεκτα, καθώς και νοσοκομειακά και μολυσματικά απόβλητα που προέρχονται από ιατρικές ή κτηνιατρικές εγκαταστάσεις, σύμφωνα με τον Εθνικό Κατάλογο Αποβλήτων και το ΕΣΔΕΑ (Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων). Επιπλέον, δεν γίνονται δεκτά ολόκληρα μεταχειρισμένα ελαστικά αυτοκινήτων, εκτός από εκείνα που προορίζονται για χρήση σε κατασκευαστικά έργα ή τεμαχισμένα, με εξαιρέσεις για τα ελαστικά ποδηλάτων και τα μεγάλα ελαστικά άνω των 1.400 mm. Απορρίπτονται επίσης όλα τα απόβλητα που δεν πληρούν τα κριτήρια αποδοχής των Χ.Υ.Τ.Α., καθώς και τα απόβλητα που έχουν συλλεχθεί χωριστά για επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση, εκτός από εκείνα που μετά από επεξεργασία παράγουν τα καλύτερα αποτελέσματα για το περιβάλλον. Τέλος, θεσπίζονται απαιτήσεις για την προστασία των υδάτων και του εδάφους, τον περιορισμό της παραγωγής στραγγισμάτων και βιοαερίου, καθώς και την εφαρμογή συστημάτων παρακολούθησης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός Χ.Υ.Τ.Α. (European Commission, 1999).

Οδηγία 2018/850/ΕΕ

Η Οδηγία 2018/850/ΕΕ, η οποία τροποποιεί την 1999/31/ΕΚ, εισάγει αυστηρότερες απαιτήσεις, θέτοντας στόχους για τη μείωση των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων που οδηγούνται σε ταφή και προωθώντας τη μετάβαση προς την κυκλική οικονομία.

Απόφαση 2003/33/ΕΚ

Η Απόφαση 2003/33/ΕΚ εξειδικεύει τα στάδια ταξινόμησης και αξιολόγησης των αποβλήτων, καθορίζει τις μεθόδους δειγματοληψίας και τα όρια αποδοχής για επικίνδυνα και μη επικίνδυνα απόβλητα.

2.2.2 Ελληνική νομοθεσία*ΚΥΑ 29407/3508/2002*

Η εναρμόνιση της ελληνικής νομοθεσίας με το ευρωπαϊκό δίκαιο αποτέλεσε σημαντικό βήμα για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής και ασφαλούς διαχείρισης των αποβλήτων στη χώρα. Η αρχική προσπάθεια υλοποιήθηκε με την Κοινή Υπουργική Απόφαση 29407/3508/2002 (ΦΕΚ 1572/Β/16.12.2002), η οποία εισήγαγε τα πρώτα αυστηρά μέτρα και όρους για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων. Η απόφαση αυτή εναρμόνισε τη λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α. με τις βασικές αρχές της Οδηγίας 1999/31/ΕΚ, θέτοντας συγκεκριμένα κριτήρια για την επιλογή της θέσης τους, τον σχεδιασμό και την κατασκευή, τη λειτουργία, την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, καθώς και τη διαδικασία κλεισίματος και αποκατάστασης των χώρων υγειονομικής ταφής. Με την εφαρμογή αυτών των κανόνων, επιχειρήθηκε η μείωση των περιβαλλοντικών κινδύνων, όπως η ρύπανση του εδάφους και των υδάτων, η έκλυση αερίων θερμοκηπίου και οι οχλήσεις για τον πληθυσμό, που συνδέονται με την ανεξέλεγκτη διάθεση αποβλήτων.

ΥΑ Η.Π. 4641/232/2006

Με την Υπουργική Απόφαση Η.Π. 4641/232/2006 (ΦΕΚ 168/Β/13.2.2006), καθορίστηκαν ειδικές τεχνικές προδιαγραφές για μικρής κλίμακας Χ.Υ.Τ.Α., οι οποίες απευθύνονταν κυρίως σε απομονωμένες ή νησιωτικές περιοχές. Οι προδιαγραφές αυτές αποσκοπούσαν στην εξασφάλιση της ασφάλειας και της βιωσιμότητας των εγκαταστάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των τοπικών συνθηκών, όπως η δυσκολία πρόσβασης και οι περιορισμένοι χώροι. Μέσω αυτών των ρυθμίσεων, επιχειρήθηκε η εφαρμογή ορθών

πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων ακόμη και σε περιοχές με περιορισμένους πόρους, συμβάλλοντας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην προστασία των τοπικών οικοσυστημάτων.

ΥΑ ΥΠΕΝ/ΔΔΑ/90439/1846/2021 & Νόμος 4819/2021

Το πιο πρόσφατο νομοθετικό πλαίσιο καθορίζεται με την ΥΑ ΥΠΕΝ/ΔΔΑ/90439/1846/2021 (ΦΕΚ 4514/Β/30.9.2021), η οποία ενσωματώνει τις νεότερες ευρωπαϊκές οδηγίες σχετικά με τη διαχείριση αποβλήτων και θέτει σύγχρονες απαιτήσεις για τη λειτουργία, την παρακολούθηση και την αποκατάσταση των Χ.Υ.Τ.Α. Η απόφαση αυτή ενισχύει την περιβαλλοντική προστασία μέσω της υιοθέτησης καινοτόμων τεχνικών διαχείρισης, όπως η συλλογή και επεξεργασία στραγγισμάτων, η αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου και η εφαρμογή συστημάτων ελέγχου των εκλυόμενων αερίων. Παράλληλα, ο Νόμος 4819/2021 ενσωματώνει την Οδηγία 2018/850/ΕΕ και εισάγει τη στρατηγική της κυκλικής οικονομίας, με στόχο τη μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν σε ταφή και την προώθηση της ανακύκλωσης, της επαναχρησιμοποίησης και της ενεργειακής αξιοποίησης των αποβλήτων.

Αδειοδοτήσεις Χ.Υ.Τ.Α.

Η ελληνική νομοθεσία προβλέπει επίσης ότι για κάθε Χ.Υ.Τ.Α. απαιτείται η έκδοση Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) για τον εκάστοτε Χώρο Υγειονομικής Ταφής, σύμφωνα με τις διατάξεις του νόμου 4014/2011 (Α' 209), ενώ μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του έργου, είναι απαραίτητη η έγκριση λειτουργίας του, σύμφωνα με τις προβλέψεις της υπ' αριθμ. ΥΠΕΝ/ΔΠΠΑ/11936/836/2019 κοινής υπουργικής απόφασης, η οποία αφορά στη διαδικασία και τα απαιτούμενα δικαιολογητικά για την εγκατάσταση και τη λειτουργία έργων και δραστηριοτήτων των «Συστημάτων Περιβαλλοντικών Υποδομών» (Β' 436). Συγκεκριμένα, για την έκδοση της ΑΕΠΟ απαιτείται η υποβολή πλήρους φακέλου Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ), ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου και τα μέτρα πρόληψης, μείωσης ή αντιμετώπισής τους (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2021). Η αδειοδότηση και οι διαδικασίες παρακολούθησης εξασφαλίζουν ότι οι χώροι υγειονομικής ταφής πληρούν υψηλά περιβαλλοντικά και τεχνικά πρότυπα, ενώ η υποχρεωτική αποκατάσταση συμβάλλει στην επαναφορά του περιβάλλοντος και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των χώρων για άλλες λειτουργίες, όπως η δημιουργία χώρων πρασίνου ή η αξιοποίηση σε κοινωφελή έργα.

2.2.3 Τεχνικές προδιαγραφές Χ.Υ.Τ.Α.

Σύμφωνα με την ΚΥΑ 29407/3508/2002 και τις σχετικές υπουργικές αποφάσεις, οι Χ.Υ.Τ.Α. πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές για την πρόληψη ρύπανσης και την προστασία του περιβάλλοντος.

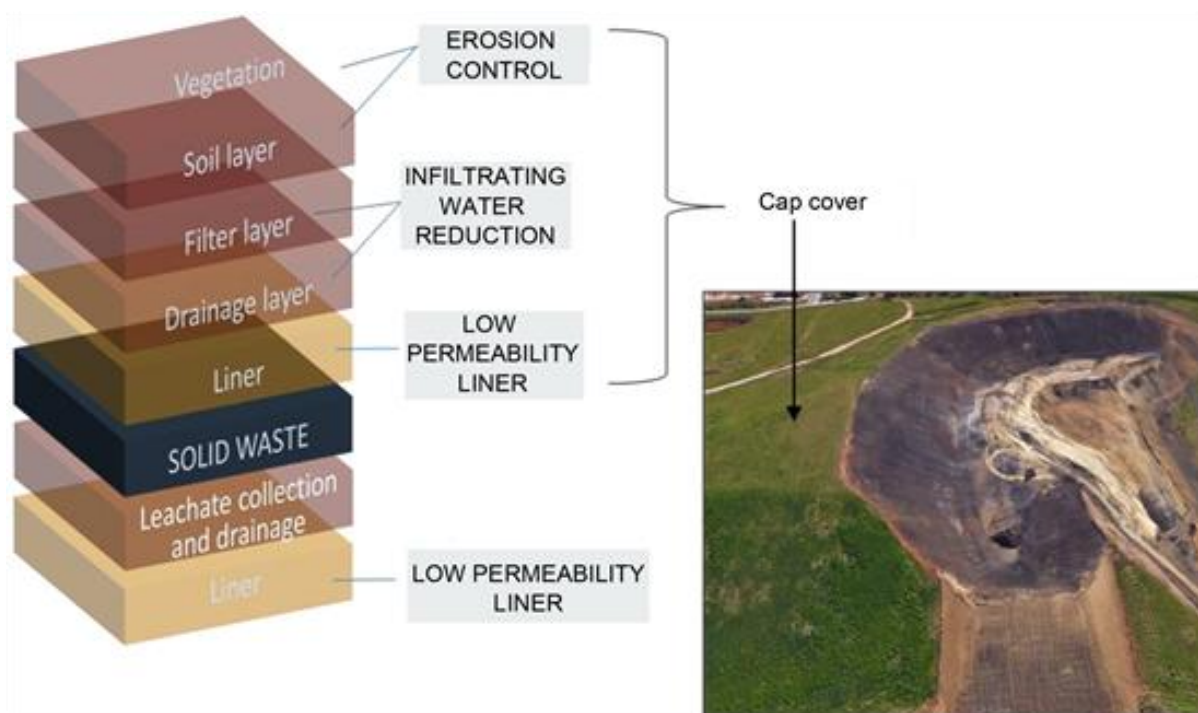
Επιλογή θέσης

Αρχικά, κατά τον σχεδιασμό της θέσης ενός Χ.Υ.Τ.Α., εξετάζονται οι αποστάσεις του από τις κατοικημένες περιοχές, τους χώρους αναψυχής, τα υδατορεύματα, τα στάσιμα επιφανειακά ύδατα, καθώς και από τις γεωργικές ή αστικές ζώνες, προκειμένου να περιοριστούν οι πιθανές οχλήσεις και η ρύπανση. Παράλληλα, αξιολογείται η ύπαρξη υπόγειων ή παράκτιων υδάτων και προστατευόμενων φυσικών περιοχών, ώστε να αποφευχθεί η περιβαλλοντική υποβάθμιση. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν επίσης οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, καθώς και οι φυσικοί κίνδυνοι, όπως πλημμύρες, καθιζήσεις ή κατολισθήσεις, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα του Χ.Υ.Τ.Α. Κατά την επιλογή της θέσης λαμβάνεται υπόψη η ανάγκη προστασίας της φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς της περιοχής, εξασφαλίζοντας ότι η εγκατάσταση δεν θα προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην κοινωνία.

Συστήματα στεγανοποίησης

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του Χ.Υ.Τ.Α. και τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες, λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος και τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν τον έλεγχο της εισροής ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στον όγκο των απορριπτόμενων αποβλήτων και την πρόληψη της εισροής επιφανειακών ή υπόγειων υδάτων στα αποτιθέμενα απόβλητα. Ρυπασμένα ύδατα και στραγγίσματα που προκύπτουν από τη διάσπαση των αποβλήτων, υποβάλλονται σε κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές πριν από την απόρριψή τους στο αποχετευτικό σύστημα ή στο περιβάλλον, καθώς η προστασία του εδάφους και των υδάτων αποτελεί κεντρικό στοιχείο κατά τον σχεδιασμό και την επιλογή της θέσης ενός Χ.Υ.Τ.Α. Η προστασία επιτυγχάνεται μέσω συνδυασμού γεωλογικού φραγμού και στεγανών μεμβρανών: κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του Χ.Υ.Τ.Α. εφαρμόζεται κάτω στεγανή μεμβράνη, ενώ μετά την παύση

λειτουργίας του χρησιμοποιείται άνω στεγανή μεμβράνη σε συνδυασμό με γεωλογικό φραγμό (Εικόνα 1). Το στρώμα γεωλογικού φραγμού καθορίζεται από τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής και πρέπει να παρέχει επαρκή ικανότητα εξασθένησης ώστε να αποτρέπονται πιθανοί κίνδυνοι για το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Ο πυθμένας και τα πρανή του Χ.Υ.Τ.Α. διαμορφώνονται από κατάλληλο γεωλογικό υλικό που πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις υδροπερατότητας και πάχους, ανάλογα με τον τύπο των αποβλήτων: για Χ.Υ.Τ. μη επικίνδυνων αποβλήτων, η υδροπερατότητα πρέπει να είναι $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s και το πάχος ≥ 1 m· για ΧΥΤ επικίνδυνων αποβλήτων, $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s και πάχος ≥ 5 m· και για ΧΥΤ αδρανών αποβλήτων, $K \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/s και πάχος ≥ 1 m. Σε περιπτώσεις όπου το φυσικό στρώμα γεωλογικού φραγμού δεν πληροί τις παραπάνω προδιαγραφές, είναι δυνατή η τεχνητή συμπλήρωσή του και η ενίσχυσή του με μέσα που προσφέρουν ισοδύναμη προστασία, με ελάχιστο πάχος για τους τεχνητούς φραγμούς 0,5 m (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2021).



Εικόνα 1. Διαστρωμάτωση συστήματος στεγανοποίησης Χώρου Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (Χ.Υ.Τ.Α.), που περιλαμβάνει την κάτω στεγανή μεμβράνη (bottom liner), το σύστημα συλλογής στραγγισμάτων και την τελική κάλυψη (cap system) (Πηγή: Zhao et al., 2020).

Επιφανειακή στεγανοποίηση και αποστράγγιση

Πέραν του γεωλογικού φραγμού που προβλέπεται για την προστασία του εδάφους και των υδάτων, απαιτείται η εγκατάσταση συστήματος συλλογής στραγγισμάτων και

στεγανοποίησης του πυθμένα, ώστε να διασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση της συσσώρευσης στραγγισμάτων στον χώρο ταφής. Το σύστημα αυτό πρέπει να περιλαμβάνει τεχνητή μεμβράνη στεγανοποίησης και στρώμα αποστράγγισης πάχους τουλάχιστον 0,5 μέτρων, ανεξάρτητα από το αν ο χώρος προορίζεται για επικίνδυνα ή μη επικίνδυνα απόβλητα (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2021). Επιπλέον, εφόσον η αρμόδια περιβαλλοντική αρχή, κατόπιν αξιολόγησης των ενδεχόμενων κινδύνων, κρίνει ότι είναι αναγκαία η αποτροπή της δημιουργίας στραγγισμάτων, μπορεί να επιβάλει την επιφανειακή στεγανοποίηση του Χ.Υ.Τ.Α. Σε αυτή την περίπτωση, η επιφανειακή στεγανοποίηση περιλαμβάνει συγκεκριμένα τεχνικά στοιχεία: για Χ.Υ.Τ.Α. μη επικίνδυνων αποβλήτων προβλέπεται η ύπαρξη στρώματος απαγωγής αερίων, αδιαπέραστου πετρώματος, στρώματος αποστράγγισης πάχους άνω των 0,5 μέτρων και χωμάτινου καλύμματος πάχους τουλάχιστον 1 μέτρου, χωρίς να απαιτείται τεχνητή μεμβράνη στεγανοποίησης· ενώ για Χ.Υ.Τ.Α. επικίνδυνων αποβλήτων απαιτείται η χρήση τεχνητής μεμβράνης στεγανοποίησης, αδιαπέραστου στρώματος πετρώματος, στρώματος αποστράγγισης πάχους άνω των 0,5 μέτρων και χωμάτινου καλύμματος τουλάχιστον 1 μέτρου, χωρίς να απαιτείται στρώμα απαγωγής αερίων.

Διαχείριση βιοαερίου

Για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, απαιτείται η λήψη κατάλληλων μέτρων ελέγχου της συγκέντρωσης και της μετακίνησης των αερίων που παράγονται εντός των χώρων υγειονομικής ταφής. Σε όλους τους Χ.Υ.Τ.Α. όπου αποτίθενται βιοαποδομήσιμα απόβλητα, τα παραγόμενα αέρια πρέπει να συλλέγονται συστηματικά, να υποβάλλονται σε κατάλληλη επεξεργασία και, εφόσον είναι τεχνικά εφικτό, να αξιοποιούνται ενεργειακά. Στις περιπτώσεις όπου η ενεργειακή αξιοποίηση δεν είναι δυνατή, τα αέρια πρέπει να καίγονται ελεγχόμενα, ώστε να αποτρέπεται η ανεξέλεγκτη εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα και να διασφαλίζεται η προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

Μέτρα προστασίας περιβάλλοντος και δημόσιας υγείας

Για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α., είναι απαραίτητη η λήψη ολοκληρωμένων μέτρων που αποσκοπούν στη μείωση των περιβαλλοντικών οχλήσεων και των κινδύνων για τη δημόσια υγεία και το οικοσύστημα. Συγκεκριμένα, πρέπει να περιορίζονται στο ελάχιστο οι εκπομπές οσμών, σκόνης και αερόφερτων υλικών, καθώς και η ηχορύπανση και η κυκλοφοριακή όχληση από οχήματα. Παράλληλα, απαιτείται ο αποτελεσματικός έλεγχος της παρουσίας πουλιών, εντόμων και τρωκτικών, η αποφυγή

σηματισμού αερολυμάτων και η πρόληψη εκδήλωσης πυρκαγιών. Ο χώρος πρέπει να διαθέτει τις κατάλληλες υποδομές, ώστε να αποτρέπεται η διασπορά ρύπων και απορριμμάτων στους γύρω δρόμους και στην ευρύτερη περιοχή. Η διάταξη και τοποθέτηση των αποβλήτων εντός του Χ.Υ.Τ.Α. πρέπει επίσης να εξασφαλίζει τη σταθερότητα της συνολικής μάζας τους, καθώς και των συναφών τεχνικών κατασκευών, αποτρέποντας φαινόμενα κατολίσθησης ή καθίζησης. Σε περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται τεχνητός γεωλογικός φραγμός, το υπέδαφος πρέπει να είναι επαρκώς σταθερό, ώστε να αποφεύγονται παραμορφώσεις ή βλάβες στη στεγανότητα και στη συνοχή του συστήματος, ενώ για την ασφάλεια του χώρου, ο Χ.Υ.Τ.Α. πρέπει να περιφράσσεται πλήρως, ώστε να εμποδίζεται η ανεξέλεγκτη πρόσβαση.

Ειδικές απαιτήσεις για επικίνδυνα απόβλητα

Όσον αφορά την προσωρινή αποθήκευση μεταλλικού υδραργύρου για χρονικό διάστημα άνω του ενός έτους, ισχύουν ειδικές τεχνικές απαιτήσεις. Ο υδράργυρος πρέπει να αποθηκεύεται ξεχωριστά από άλλα είδη αποβλήτων, σε ειδικά δοχεία τοποθετημένα μέσα σε δεξαμενές συλλογής με κατάλληλη στεγάνωση, χωρίς ρωγμές ή κενά, ώστε να διασφαλίζεται πλήρης αδιαπερατότητα. Ο χώρος αποθήκευσης οφείλει να διαθέτει τεχνητούς ή φυσικούς φραγμούς που αποτρέπουν εκπομπές υδραργύρου στο περιβάλλον, καθώς και επαρκή χωρητικότητα συγκράτησης για την ποσότητα του αποθηκευμένου μετάλλου. Τα δάπεδα πρέπει να είναι επιστρωμένα με ανθεκτικά στεγανοποιητικά υλικά, με κατάλληλη κλίση προς φρεάτιο συλλογής, ενώ ο χώρος οφείλει να διαθέτει και σύστημα πυροπροστασίας. Τέλος, η διάταξη των περιεκτών πρέπει να επιτρέπει την εύκολη και ασφαλή ανάκτησή τους, εξασφαλίζοντας την ορθή διαχείριση και την προστασία του περιβάλλοντος.

Διαδικασία αποδοχής και ελέγχου αποβλήτων

Η διαδικασία αποδοχής αποβλήτων στους Χ.Υ.Τ.Α. καθορίζεται από συγκεκριμένα κριτήρια και προδιαγραφές, όπως ορίζονται στην Απόφαση του Συμβουλίου 2003/33/ΕΚ. Η απόφαση αυτή εξειδικεύει τα στάδια ταξινόμησης και αξιολόγησης των αποβλήτων, καθώς και τις απαιτούμενες μεθόδους δειγματοληψίας και δοκιμών για κάθε κατηγορία Χ.Υ.Τ.Α. Θεσπίζει συγκεκριμένα όρια για τα επικίνδυνα απόβλητα, ώστε να είναι δυνατή η αποδοχή τους σε Χ.Υ.Τ.Α. ή σε εγκαταστάσεις υπόγειας αποθήκευσης, λαμβάνοντας υπόψη τη βραχυπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη εκπλυσιμότητά τους. Η αποδοχή των αποβλήτων βασίζεται στη λεπτομερή γνώση της σύνθεσής τους, της εκπλυσιμότητας, της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους και των γενικών φυσικοχημικών τους χαρακτηριστικών.

Τα κριτήρια αυτά αποσκοπούν στην προστασία του περιβάλλοντος —ιδίως των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, στη διασφάλιση της ακεραιότητας των συστημάτων περιβαλλοντικής προστασίας (όπως οι μεμβράνες στεγάνωσης και τα συστήματα επεξεργασίας στραγγισμάτων), στη διατήρηση των επιθυμητών διεργασιών σταθεροποίησης των αποβλήτων μέσα στο ΧΥΤΑ, καθώς και στη διαφύλαξη της δημόσιας υγείας.

Η διαδικασία ελέγχου και αποδοχής των αποβλήτων στους Χ.Υ.Τ. βασίζεται σε τρία διαδοχικά επίπεδα δοκιμών και χαρακτηρισμού. Στο πρώτο επίπεδο (βασικός χαρακτηρισμός) πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση των αποβλήτων με τυποποιημένες μεθόδους, ώστε να καθοριστούν οι ιδιότητές τους, η συμπεριφορά τους και η εκπλυσιμότητά τους σε βραχυπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. Στο δεύτερο επίπεδο (έλεγχος συμμόρφωσης) γίνονται περιοδικές δοκιμές με απλούστερες μεθόδους, προκειμένου να διαπιστωθεί αν τα απόβλητα συνεχίζουν να πληρούν τους όρους της άδειας ή τα καθορισμένα κριτήρια αποδοχής. Οι έλεγχοι επικεντρώνονται στις πιο κρίσιμες μεταβλητές που είχαν εντοπιστεί κατά τον αρχικό χαρακτηρισμό. Στο τρίτο επίπεδο (επιτόπια επαλήθευση) γίνεται άμεσος έλεγχος, συνήθως οπτικός, κάθε φορτίου αποβλήτων κατά την είσοδό του στον Χ.Υ.Τ.Α., ώστε να επιβεβαιωθεί ότι αντιστοιχεί στα απόβλητα που είχαν εγκριθεί. Κάθε τύπος αποβλήτων πρέπει να έχει υποβληθεί αρχικά σε χαρακτηρισμό πρώτου επιπέδου και να πληροί τα σχετικά κριτήρια για να γίνει αποδεκτός. Στη συνέχεια, απαιτείται τακτικός επανέλεγχος στο δεύτερο επίπεδο και επιτόπια επαλήθευση σε κάθε παράδοση.

Σχετικά με την προσωρινή αποθήκευση μεταλλικού υδραργύρου διάρκειας άνω του ενός έτους ισχύουν ειδικές προδιαγραφές. Ο υδράργυρος πρέπει να έχει καθαρότητα τουλάχιστον 99,9% και να μην περιέχει ουσίες που διαβρώνουν μέταλλα. Οι περιέκτες του πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από ανθρακοχάλυβα ή ανοξείδωτο χάλυβα, να είναι αεροστεγείς και υδατοστεγείς, να έχουν αντοχή στη διάβρωση και στις κρούσεις και να έχουν υποβληθεί επιτυχώς σε δοκιμές στεγανότητας και πτώσης σύμφωνα με τα πρότυπα των Ηνωμένων Εθνών. Η πλήρωσή τους δεν πρέπει να υπερβαίνει το 80% του όγκου τους, ώστε να αποτρέπεται παραμόρφωση ή διαρροή λόγω διαστολής. Μόνο οι περιέκτες που συνοδεύονται από πιστοποιητικό συμμόρφωσης και πληρούν τις προαναφερθείσες προδιαγραφές γίνονται αποδεκτοί. Πριν την αποθήκευση, πραγματοποιείται οπτικός έλεγχος για τυχόν φθορές, διαρροές ή διάβρωση, ενώ κάθε περιέκτης φέρει ανθεκτική σφραγίδα με στοιχεία όπως αριθμό αναγνώρισης, υλικό κατασκευής, βάρος, στοιχεία κατασκευαστή και ημερομηνία κατασκευής, καθώς και πινακίδα με τον αριθμό του πιστοποιητικού.

Παρακολούθηση και μεταπαρακολούθηση ΧΥΤΑ

Η λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α. συνοδεύεται από ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου, το οποίο επεκτείνεται και στη φάση μετά την παύση λειτουργίας της εγκατάστασης. Σκοπός του είναι η διασφάλιση ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη λειτουργία και τη σταδιακή αποσύνθεση των αποβλήτων παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ΚΥΑ 29407/3508/2002. Η παρακολούθηση περιλαμβάνει τη συστηματική δειγματοληψία και ανάλυση στραγγισμάτων, υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, καθώς και τη μέτρηση των εκπομπών βιοαερίου. Παράλληλα, καταγράφονται μεταβολές στην τοπογραφία του χώρου, η σταθερότητα των πρανών και η απόδοση των συστημάτων στεγάνωσης. Η φάση της μεταπαρακολούθησης εκτείνεται για τουλάχιστον τριάντα έτη μετά το κλείσιμο του Χ.Υ.Τ.Α. και αποσκοπεί στη μακροπρόθεσμη προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας, εξασφαλίζοντας ότι τα υπολείμματα της δραστηριότητας δεν προκαλούν δευτερογενείς ρυπάνσεις. Κατόπιν της ολοκλήρωσης της ενεργής φάσης λειτουργίας, οι Χ.Υ.Τ.Α. εισέρχονται στο στάδιο αποκατάστασης, το οποίο περιλαμβάνει τεχνικές και περιβαλλοντικές παρεμβάσεις με σκοπό την επανένταξη του χώρου στο φυσικό και κοινωνικό περιβάλλον. Η αποκατάσταση περιλαμβάνει την κάλυψη της επιφάνειας με αδιαπέραστα στρώματα, τη φύτευση κατάλληλης βλάστησης για τη σταθεροποίηση του εδάφους και τη συνέχιση της διαχείρισης στραγγισμάτων και βιοαερίου.

Αποκατάσταση και επαναχρησιμοποίηση χώρων

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επαναξιοποίηση του χώρου για ήπιες και κοινωφελείς χρήσεις, όπως πάρκα, χώροι αναψυχής ή εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη και στην κοινωνική αποδοχή των έργων διαχείρισης αποβλήτων (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Επαναχρησιμοποίηση κλειστών Χ.Υ.Τ.Α. για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και παραγωγή ηλιακής ενέργειας (Πηγή: Lent, D. (n.d.)).

2.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

Η ταξινόμηση των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων πραγματοποιείται βάσει του λειτουργικού τους σκοπού και των τεχνικών χαρακτηριστικών που διαθέτουν, διακρινόμενη σε τέσσερα κύρια επίπεδα (Malek & Shaaban, 2008):

1. Ελεγχόμενη απόρριψη (Επίπεδο 1): Στο πρώτο επίπεδο περιλαμβάνονται χώροι όπου τα στερεά απορρίμματα καλύπτονται καθημερινά με στρώσεις άμμου, εδάφους ή μικρών λίθων. Η πρακτική αυτή αποσκοπεί στην αποτροπή της εκπομπής δυσάρεστων οσμών, στη μείωση του κινδύνου αυτανάφλεξης και στη βελτίωση των υγειονομικών συνθηκών του χώρου.

2. Υγειονομική ταφή με αναχώματα και ημερήσια κάλυψη εδάφους (Επίπεδο 2): Το δεύτερο επίπεδο παρουσιάζει ομοιότητες με το πρώτο, διαφοροποιείται όμως ως προς την ύπαρξη πρόσθετων τεχνικών υποδομών. Συγκεκριμένα, ενσωματώνει επιφανειακό σύστημα αποστράγγισης για την απομάκρυνση των υγρών αποβλήτων από τη ζώνη ταφής, καθώς και περιμετρικό φράκτη που εξασφαλίζει την προστασία και τον έλεγχο της περιοχής.

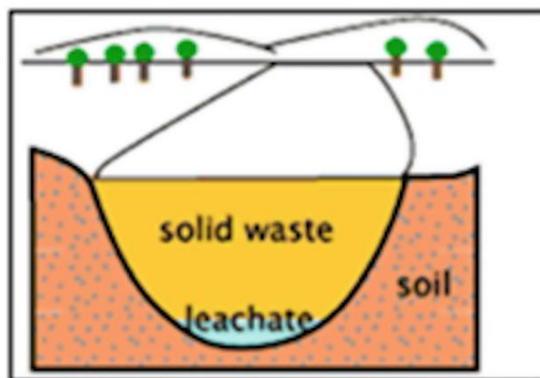
3. Υγειονομική ταφή με σύστημα ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων (Επίπεδο 3): Οι χώροι ταφής του τρίτου επιπέδου διαθέτουν στεγανό, μη διαπερατό υπόστρωμα, το οποίο εμποδίζει τη διείσδυση των στραγγισμάτων στο υπέδαφος και, κατά συνέπεια, τη ρύπανση

των υπόγειων υδάτων. Παράλληλα, εγκαθίσταται δίκτυο σωληνώσεων —σε κατακόρυφη και οριζόντια διάταξη— που επιτρέπει την απομάκρυνση των παραγόμενων αερίων και τη συλλογή των στραγγισμάτων, τα οποία οδηγούνται σε δεξαμενή επεξεργασίας. Εκεί, τα στραγγίσματα αερίζονται και ανακυκλοφορούν στον χώρο ταφής, με στόχο την επιτάχυνση των χημικών και βιολογικών διεργασιών αποδόμησης των αποβλήτων.

4. Υγειονομική ταφή με σύστημα επεξεργασίας στραγγισμάτων (Επίπεδο 4): Το τέταρτο επίπεδο αντιπροσωπεύει την πλέον προηγμένη και ολοκληρωμένη μορφή υγειονομικής ταφής. Οι χώροι αυτής της κατηγορίας διαθέτουν ολοκληρωμένα συστήματα επεξεργασίας στραγγισμάτων, τα οποία επιτρέπουν την κατάλληλη επεξεργασία και απορρύπανση των υγρών αποβλήτων προτού αυτά απορριφθούν στο περιβάλλον, μειώνοντας σημαντικά το οικολογικό αποτύπωμα της εγκατάστασης.

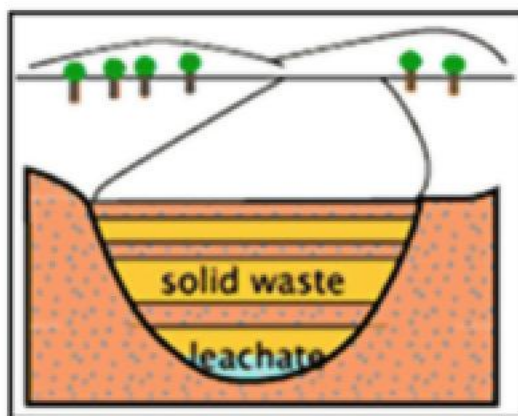
Συνολικά, από την παραπάνω ταξινόμηση προκύπτει ότι η υγειονομική ταφή αποτελεί την προτιμητέα μέθοδο διάθεσης αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ), καθώς συνδυάζει την ασφαλή απομόνωση των αποβλήτων από το περιβάλλον με μηχανισμούς ελέγχου και επεξεργασίας των παραγόμενων στραγγισμάτων και αερίων. Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις Χ.Υ.Τ.Α. δεν περιορίζονται στην απλή κάλυψη των απορριμμάτων με έδαφος, αλλά εφαρμόζουν σύνθετα τεχνικά συστήματα, τα οποία διασφαλίζουν την περιβαλλοντική προστασία και την αειφόρο διαχείριση των απορριμμάτων. Ωστόσο, οι χώροι υγειονομικής ταφής (Χ.Υ.Τ.Α.) μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικούς τύπους βάσει της διαδικασίας αποσύνθεσης των αποβλήτων (*Shimaoka et al., 2003; Sohoo et al., 2022*):.

Αναερόβιοι ΧΥΤΑ: Οι αναερόβιοι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (Χ.Υ.Τ.Α.) αποτελούν οργανωμένες εγκαταστάσεις διάθεσης αποβλήτων, στις οποίες η αποδόμηση πραγματοποιείται χωρίς την εφαρμογή τεχνικών ενίσχυσης των διεργασιών. Παράλληλα, λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα για τη μείωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον και στη δημόσια υγεία, όπως η κατασκευή στεγανού πυθμένα και τελικής επιφανειακής κάλυψης, καθώς και η εγκατάσταση συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας στραγγισμάτων και βιοαερίου (ενεργειακή αξιοποίηση ή καύση) (*Warith, 2003; Tonini et al., 2018*). Αυτός ο τύπος Χ.Υ.Τ.Α. χαρακτηρίζεται από οριζόντιους ή κοιλαδικούς χώρους εκσκαφής, στους οποίους τα στερεά απόβλητα εναποτίθενται και αναμιγνύονται με νερό υπό αναερόβιες συνθήκες, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.



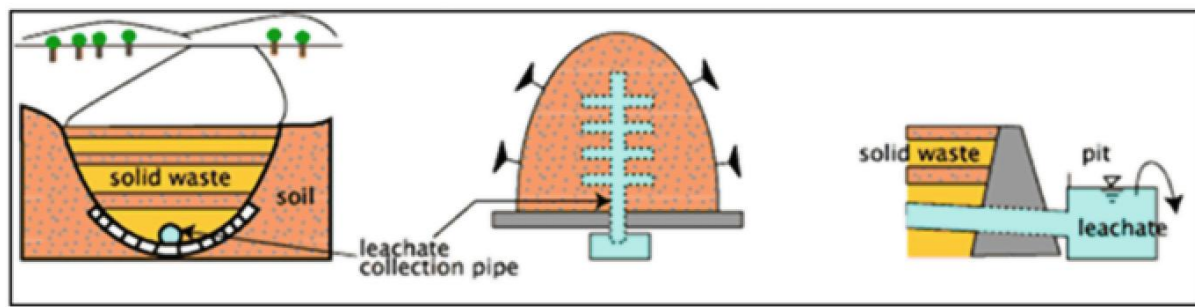
Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση Αναερόβιου Χ.Υ.Τ.Α. (Πηγή: Kamaruddin et al., 2021)

Αναερόβιοι Χ.Υ.Τ.Α. με καθημερινή επικάλυψη: Στους εν λόγω Χ.Υ.Τ.Α., τα απορρίμματα καλύπτονται καθημερινά με κατάλληλα υλικά, όπως άμμο ή χαλίκι, τα οποία διατάσσονται κατά τρόπο διαδοχικό, δημιουργώντας πολυεπίπεδη δομή. Αυτή η πρακτική μειώνει τις οσμές, περιορίζει τον κίνδυνο πυρκαγιών και βελτιώνει τη σταθερότητα της εναπόθεσης (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση Αναερόβιου Χ.Υ.Τ.Α. με καθημερινή επικάλυψη (Πηγή: Kamaruddin et al., 2021).

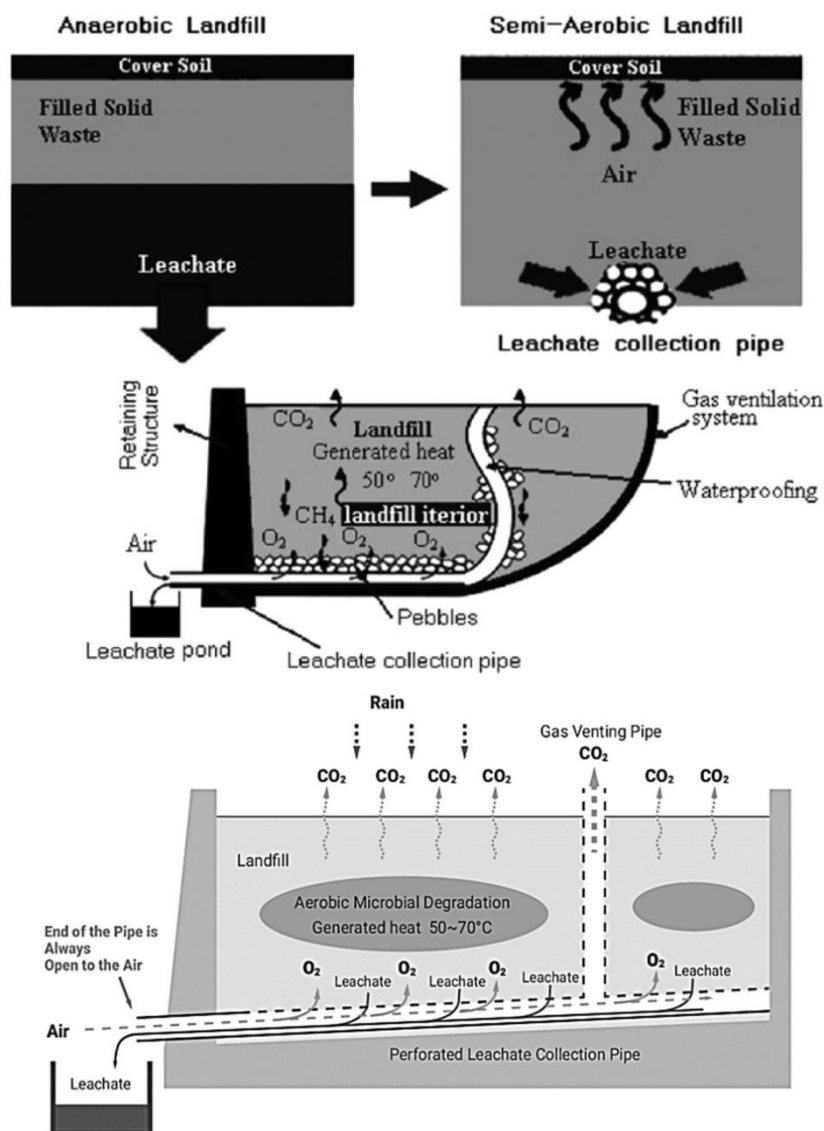
Βελτιωμένοι αναερόβιοι Χ.Υ.Τ.Α.: Αν και βασίζονται στην ίδια αρχή με τους απλούς αναερόβιους Χ.Υ.Τ.Α., οι βελτιωμένοι τύποι διαθέτουν στη βάση τους σύστημα συλλογής στραγγισμάτων (Leachate Collection System – LCS). Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε υγρασία των αποβλήτων είναι μειωμένη σε σχέση με τους κοινούς αναερόβιους Χ.Υ.Τ.Α., γεγονός που ενισχύει τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση βελτιωμένου αναερόβιου Χ.Υ.Τ.Α. (Πηγή: Kamaruddin et al., 2021)

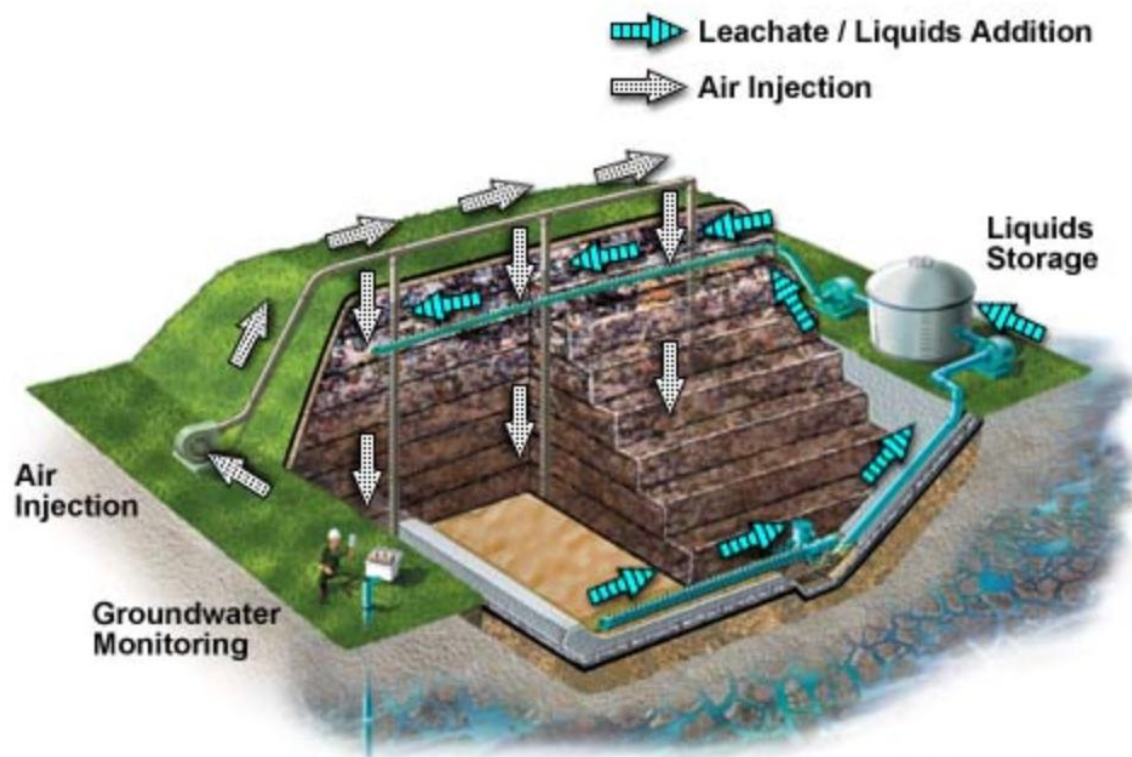
Ημι-αερόβιοι Χ.Υ.Τ.Α. με φυσικό αερισμό και LCS (Leachate Collection System): Η ημι-αερόβια τεχνολογία αποτελεί μία από τις πρώτες μεθόδους αερισμού σε χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων, καθώς αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και είναι ευρέως γνωστή ως “μέθοδος Fukuoka” (Ritzkowski & Stegmann, 2012; Matsufuji et al., 2018). Η λειτουργία των ημι-αερόβιων Χ.Υ.Τ.Α. βασίζεται σε φυσικές διεργασίες αερισμού, οι οποίες επιτρέπουν την επιτάχυνση της σταθεροποίησης των αποβλήτων μέσω της εισαγωγής οξυγόνου στη μάζα τους, χωρίς την ανάγκη σημαντικών πόρων ή πολύπλοκης τεχνολογίας (Matsufuji et al., 2018). Για τον λόγο αυτό, το σύστημα αυτό θεωρείται οικονομικά αποδοτική και βιώσιμη λύση, ιδίως για αναπτυσσόμενες χώρες όπου η διαχείριση αποβλήτων περιορίζεται από οικονομικούς και τεχνικούς παράγοντες (Theng et al., 2005). Στους ημι-αερόβιους Χ.Υ.Τ.Α. παρέχεται οξυγόνο μέσω αγωγών ενσωματωμένων στο σύστημα LCS, το οποίο περιβάλλεται από χαλίκι ή μικρούς λίθους για προστασία. Αναλυτικότερα, η δομή ενός ημι-αερόβιου Χ.Υ.Τ.Α. περιλαμβάνει ένα δίκτυο οριζόντιων διάτρητων σωληνώσεων στον πυθμένα, οι οποίες τοποθετούνται με κατάλληλη κλίση για τη συλλογή των στραγγισμάτων, ενώ κατακόρυφοι διάτρητοι αγωγοί εγκαθίστανται στα σημεία σύνδεσης και στα άκρα του δικτύου για τη διευκόλυνση του αερισμού (Ritzkowski & Stegmann, 2012; Matsufuji et al., 2018). Η κυκλοφορία του αέρα επιτυγχάνεται μέσω φυσικής μεταφοράς (advection), η οποία προκαλείται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της μάζας των αποβλήτων και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις εξώθερμες αντιδράσεις βιοαποδόμησης του οργανικού κλάσματος, οι οποίες μπορούν να αυξήσουν τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του Χ.Υ.Τ.Α. έως και 50–70 °C. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφοροποίηση οδηγεί σε μεταβολές της πυκνότητας των αερίων, δημιουργώντας δυνάμεις άνωσης που ευνοούν την άνοδο των αερίων μέσω της μάζας των αποβλήτων και την απομάκρυνσή τους μέσω των κατακόρυφων αγωγών. Παράλληλα, αναπτύσσεται αρνητική πίεση, η οποία διευκολύνει την είσοδο αέρα στο εσωτερικό του

χώρου μέσω του δικτύου συλλογής στραγγισμάτων (Ritzkowski & Stegmann, 2012; Matsufuji et al., 2018). Υπό αυτές τις συνθήκες, η παρουσία οξυγόνου ενισχύει τη διαδικασία αποδόμησης της οργανικής ύλης, καθιστώντας την πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με τις αναερόβιες συνθήκες και συμβάλλοντας στην ταχύτερη σταθεροποίηση των αποβλήτων και στη βελτίωση των εκπομπών (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Σχηματική απεικόνιση Ημι-αερόβιου Χ.Υ.Τ.Α. με φυσικό αερισμό και LCS (Πηγή: Tashiro, 2011).

Αερόβιοι Χ.Υ.Τ.Α. με αναγκαστικό αερισμό: Σε αυτούς τους Χ.Υ.Τ.Α., η αποσύνθεση των αποβλήτων υποστηρίζεται από αναγκαστική παροχή αέρα ή οξυγόνου μέσω κατάλληλων συλλεκτικών σωλήνων. Σε αντίθεση με τους αναερόβιους Χ.Υ.Τ.Α., το σύστημα διασφαλίζει την ενεργό αερόβια διάσπαση των οργανικών υλικών, αυξάνοντας την ταχύτητα σταθεροποίησης και περιορίζοντας την παραγωγή μεθανίου (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Σχηματική απεικόνιση αερόβιου Χ.Υ.Τ.Α. με αναγκαστικό αερισμό (Πηγή: *U.S. Environmental Protection Agency, n.d.*).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η εκροή ρύπων από τους χώρους υγειονομικής ταφής μπορεί να περιοριστεί σε περιβαλλοντικά αποδεκτά επίπεδα μέσω της εφαρμογής κατάλληλων συστημάτων φραγμού κάτω από τα απορρίμματα, τα οποία περιλαμβάνουν τόσο τη συλλογή στραγγισμάτων όσο και την εγκατάσταση στεγανοποιητικών στρώσεων (liners). Τα στεγανωτικά στρώματα σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με σκοπό να λειτουργούν ως φράγμα μεταξύ των αποβλήτων και του περιβάλλοντος, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη συγκέντρωση και ορθή διαχείριση των παραγόμενων στραγγισμάτων μέσω κατάλληλων συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας (European Commission, 1999).

Στο πλαίσιο αυτό, ο όρος στεγανωτικό στρώμα αναφέρεται σε ένα στρώμα φραγμού που τοποθετείται είτε στον πυθμένα είτε στην επιφάνεια του Χ.Υ.Τ.Α., με σκοπό την αποτροπή της διαφυγής αερίων και την παρεμπόδιση της εισροής υδάτων, γεγονός που θα μπορούσε να αυξήσει την παραγωγή στραγγισμάτων. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των στεγανωτικών στρώσεων περιλαμβάνουν αργιλικά υλικά χαμηλής διαπερατότητας και γεωσυνθετικά υλικά. Αυτά μπορούν να εφαρμοστούν είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό, προκειμένου να εξασφαλίζεται η τήρηση των απαιτούμενων επιδόσεων και των κανονιστικών προδιαγραφών. Η στεγανοποίηση του πυθμένα οφείλει να ανταποκρίνεται στα ακόλουθα κριτήρια:

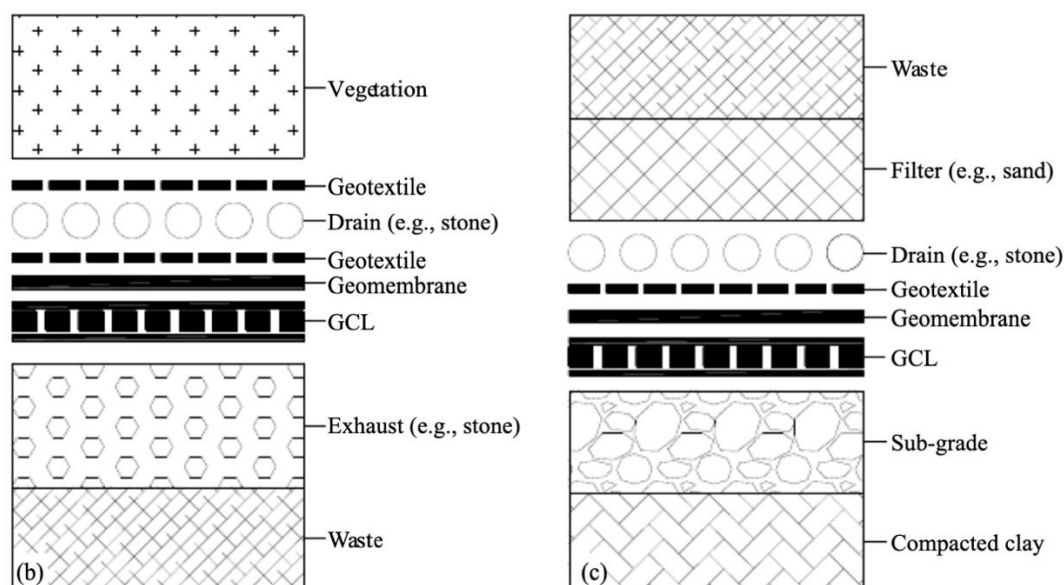
- Να παρουσιάζει αντοχή σε θερμοκρασίες που φτάνουν τουλάχιστον τους 70 °C.
- Να διατηρεί τη λειτουργικότητά της σε ενδεχόμενα φαινόμενα καθίζησης.
- Να εμφανίζει υψηλή ανθεκτικότητα απέναντι σε διεργασίες διάβρωσης.
- Να είναι ανθεκτική σε βιολογικούς παράγοντες, όπως η δράση μικροοργανισμών του εδάφους.
- Να επιτρέπει εύκολη και απλή εγκατάσταση.
- Να διευκολύνει τον έλεγχο τόσο κατά το στάδιο της κατασκευής όσο και κατά τη λειτουργία του χώρου.
- Να καθιστά εφικτή την άμεση και αποτελεσματική αποκατάσταση σε περίπτωση βλάβης.
- Να χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος εφαρμογής.

Ο πυθμένας του Χ.Υ.Τ.Α., όταν καλύπτεται από στεγανωτικά στρώματα, λειτουργεί ως στρώμα φραγμού που εμποδίζει τη διέλευση των στραγγισμάτων και διευκολύνει τη συγκέντρωσή τους για περαιτέρω διαχείριση. Τα στεγανωτικά στρώματα μπορεί να αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα και να ενσωματώνουν επιπρόσθετα συστήματα, όπως

αυτά που σχετίζονται με τη συλλογή και επεξεργασία στραγγισμάτων και την απομάκρυνση παραγόμενων αερίων (Townsend et al., 2015).

Η σημασία της στεγανοποίησης καθίσταται ιδιαίτερα κρίσιμη, δεδομένου ότι τα στραγγίσματα των Χ.Υ.Τ.Α. περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών και ανόργανων ρύπων, βαρέων μετάλλων και τοξικών ενώσεων, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή ρύπανση των υπόγειων υδάτων σε περίπτωση ανεπαρκούς στεγανοποίησης (Christensen et al., 2001). Παράλληλα, η εκπομπή αερίων όπως το μεθάνιο (CH_4) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) μπορεί να συμβάλει στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, εάν δεν υπάρξει αποτελεσματική διαχείριση μέσω συστημάτων συλλογής και ελέγχου (US EPA, 2005). Επιπλέον, η στεγανοποίηση συμβάλλει στη διασφάλιση της μηχανικής σταθερότητας του χώρου ταφής, μειώνοντας τις πιθανότητες καθιζήσεων ή αστοχιών στα πρανή. Μέσω της χρήσης συνδυασμένων συστημάτων στεγάνωσης, που περιλαμβάνουν φυσικά (αργιλικά) και τεχνητά (γεωσυνθετικά) υλικά, διασφαλίζεται η μακροχρόνια αποδοτικότητα του ΧΥΤΑ και η συμμόρφωση με τα ισχύοντα θεσμικά πλαίσια, όπως η Οδηγία 1999/31/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων.

Η λεκάνη απόθεσης ενός Χ.Υ.Τ.Α. στεγανοποιείται τόσο στον πυθμένα όσο και στα πρανή της, μέσω της κατασκευής ειδικών στεγανωτικών στρώσεων που εφαρμόζονται με συγκεκριμένη διάταξη και τεχνικές προδιαγραφές (Σχήμα 6).

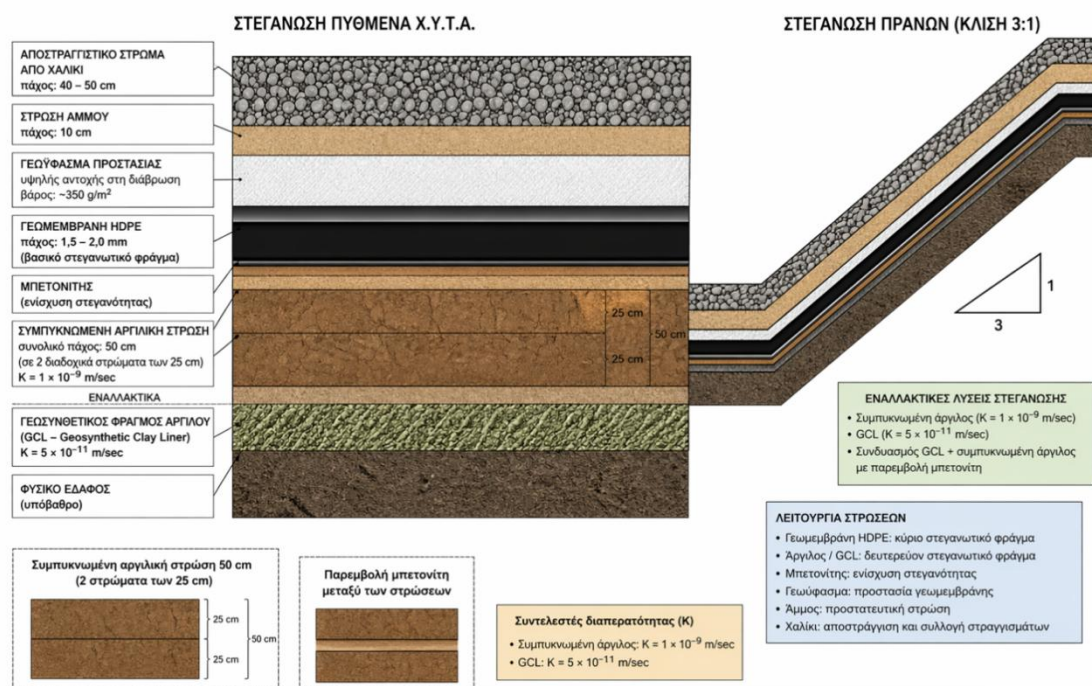


Σχήμα 6. Διαστρωμάτωση στεγανοποιητικών συστημάτων Χ.Υ.Τ.Α.: (b) σύστημα τελικής κάλυψης (cover liner) με φυτική στρώση, αποστράγγιση και γεωσυνθετικά υλικά (γεωμεμβράνη και GCL) και (c) σύστημα στεγανοποίησης πυθμένα (bottom liner) με στρώσεις αποβλήτων, φίλτρου, αποστράγγισης και στεγανωτικών φραγμών. (Πηγή: Kong et al., 2017).

Για πυθμένες και πρανή με κλίση 3:1, εφαρμόζεται αρχικά μία συμπακνωμένη αργιλική στρώση συνολικού πάχους 50 cm, η οποία διαμορφώνεται σε δύο διαδοχικά στρώματα των 25 cm και χαρακτηρίζεται από συντελεστή διαπερατότητας $K = 1 \times 10^{-9}$ m/sec. Εναλλακτικά, στη θέση της αργιλικής στρώσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί γεωσυνθετικός φραγμός αργίλου (GCL – Geosynthetic Clay Liner), με ακόμα χαμηλότερη διαπερατότητα ($K = 5 \times 10^{-11}$ m/sec). Σε αρκετές περιπτώσεις, προτιμάται συνδυασμός των δύο, δηλαδή GCL με συμπακνωμένη άργιλο, ενώ μεταξύ των στρώσεων παρεμβάλλεται μπετονίτης για ενίσχυση της στεγανότητας (Εικόνα 3). Πάνω από το στρώμα αυτό τοποθετείται γεωμεμβράνη πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE), με πάχος 1,5–2,0 mm, η οποία λειτουργεί ως βασικό στεγανωτικό φράγμα. Για την προστασία της γεωμεμβράνης, τοποθετείται γεωφάσμα υψηλής αντοχής στη διάβρωση, βάρους περίπου 350 g/m². Τέλος, επάνω από το προστατευτικό αυτό στρώμα διαμορφώνεται στρώση άμμου πάχους 10 cm, ενώ στην ανώτερη επιφάνεια κατασκευάζεται αποστραγγιστικό στρώμα από χαλίκι, πάχους 40–50 cm, το οποίο επιτρέπει τη συλλογή και απομάκρυνση των στραγγισμάτων (Σχήμα 7).



Εικόνα 3. Αργιλικός και γεωσυνθετικός φραγμός – φύλλα μπετονίτη – γεωμεμβράνη – γεωφάσμα προστασίας μεμβράνης (Πηγή: Κόλλιας, 2004).



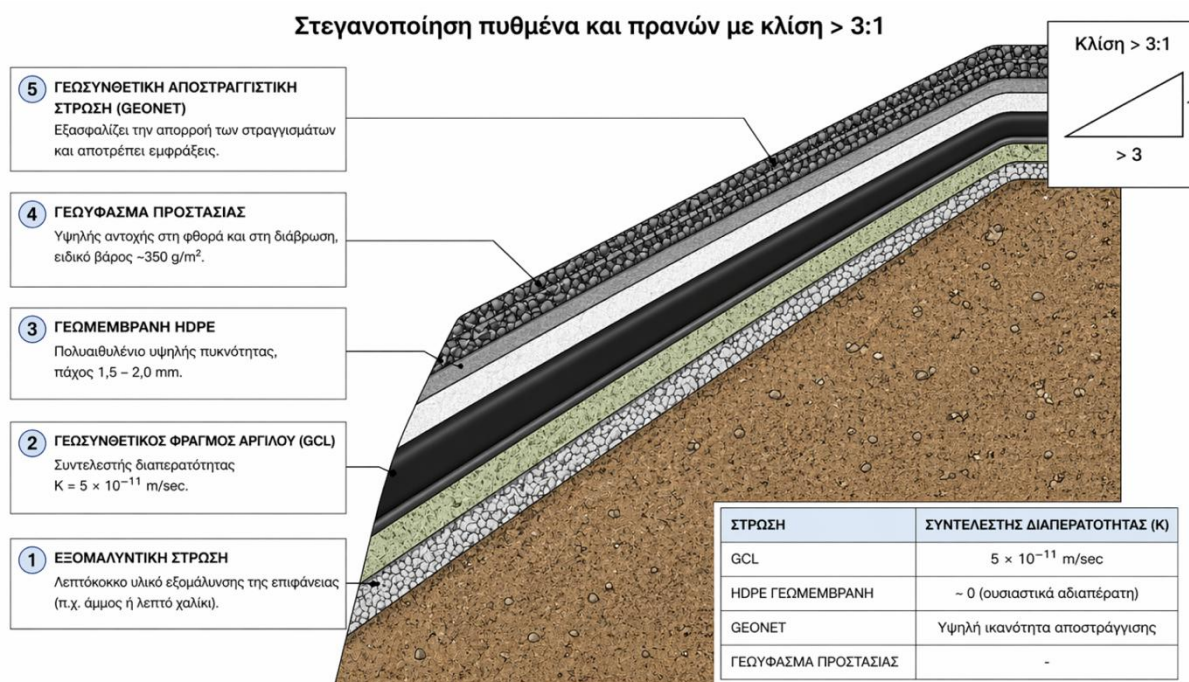
Σχήμα 7. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης στεγανωτικών στρώσεων στον πυθμένα και στα πρανή (κλίση 3:1) της λεκάνης απόθεσης Χ.Υ.Τ.Α., που περιλαμβάνει συμπυκνωμένη αργιλική στρώση ή εναλλακτικά γεωσυνθετικό φραγμό αργίλου (GCL), γεωμεμβράνη HDPE, γεωψάσμα προστασίας, στρώση άμμου και αποστραγγιστικό στρώμα για τη συλλογή των στραγγισμάτων.

Για πυθμένες και πρανή με κλίση μεγαλύτερη από 3:1 (Εικόνα 4), η στεγανοποίηση πραγματοποιείται με τη χρήση γεωσυνθετικού φραγμού αργίλου (GCL), ο οποίος διαθέτει συντελεστή διαπερατότητας $K = 5 \times 10^{-11}$ m/sec. Η εφαρμογή συμπυκνωμένης αργιλικής στρώσης δεν είναι εφικτή σε τόσο μεγάλες κλίσεις, καθώς υπάρχει αυξημένος κίνδυνος ολίσθησης και απώλειας της συνοχής του υλικού. Πάνω από τον γεωσυνθετικό φραγμό τοποθετείται γεωμεμβράνη πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE), με πάχος 1,5–2,0 mm, η οποία εξασφαλίζει υψηλή στεγανότητα, ενώ για την προστασία της γεωμεμβράνης, εφαρμόζεται γεωψάσμα μεγάλης αντοχής στη φθορά και στη διάβρωση, με ειδικό βάρος περίπου 350 g/m² (Σχήμα 8). Η στρώση αποστράγγισης στην περίπτωση αυτή, διαμορφώνεται με γεωσυνθετική αποστραγγιστική στρώση τύπου GEONET, η οποία συμβάλλει στην αποτελεσματική απορροή των στραγγισμάτων και αποτρέπει εμφράξεις στο δίκτυο αποστράγγισης. Κατά τη διαδικασία τοποθέτησης, οι γεωμεμβράνες και τα γεωψάσματα πρέπει να ελέγχονται σχολαστικά για πιθανές ατέλειες, όπως σχισμές, ελαττωματικό πάχος ή κακοτεχνίες στα σημεία συγκόλλησης, ώστε να διασφαλιστεί η ακεραιότητα του στεγανωτικού συστήματος. Επιπλέον, η κατασκευή του τεχνητού γεωλογικού φραγμού δεν πρέπει να πραγματοποιείται υπό βροχοπτώσεις ή σε συνθήκες

ακραίων θερμοκρασιών, καθώς επηρεάζεται η ποιότητα της εφαρμογής. Η τοποθέτηση των μεμβρανών και γεωφασμάτων προτείνεται να γίνεται υπό ήπιες μετεωρολογικές συνθήκες, χωρίς έντονους ανέμους, για την αποφυγή ζημιών ή παραμορφώσεων (Κομίλης, 2012).



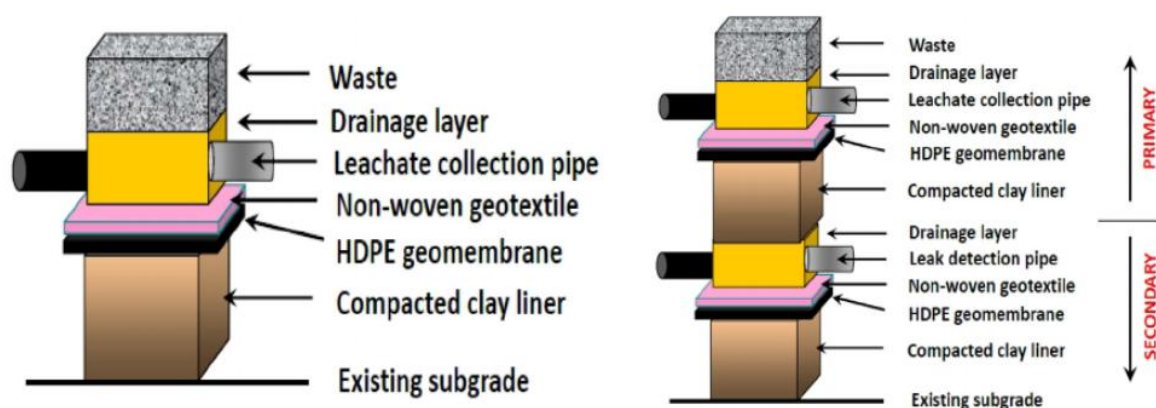
Εικόνα 4. Γεωσυνθετική αποστραγγιστική στρώση κατακόρυφων πρανών (Πηγή: Φουντούλης & Ανδρεαδάκης, 2009).



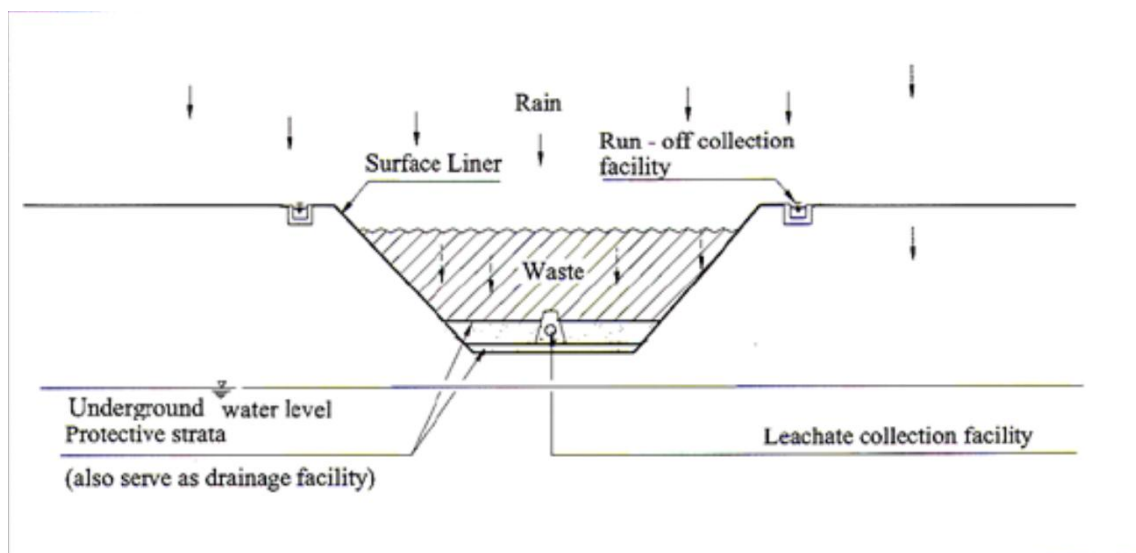
Σχήμα 8. Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης στεγανωτικών στρώσεων στον πυθμένα και στα πρανή (κλίση > 3:1) της λεκάνης απόθεσης Χ.Υ.Τ.Α., με χρήση γεωσυνθετικού φραγμού αργίλου (GCL), γεωμεμβράνης HDPE, γεωφάσματος προστασίας και γεωσυνθετικής αποστραγγιστικής στρώσης τύπου GEONET για την αποτελεσματική απομάκρυνση των στραγγισμάτων.

3.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΩΝ ΦΡΑΓΜΩΝ

Οι στεγανοποιητικοί φραγμοί (liners) ταξινομούνται σε απλούς (simple ή single liners), σύνθετους (composite liners) και διπλούς (double liners) (Σχήμα 9), ανάλογα με τη δομή και τον βαθμό προστασίας που παρέχουν, ενώ παράλληλα τα στεγανωτικά συστήματα ταξινομούνται σε επιφανειακά και κατακόρυφα. Το επιφανειακό στεγανωτικό σύστημα εφαρμόζεται σε χώρους υγειονομικής ταφής ή σε εδάφη που χαρακτηρίζονται από υψηλή υδροπερατότητα (Σχήμα 10). Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται η πλήρης κάλυψη της επιφάνειας του Χ.Υ.Τ.Α. με κατάλληλο στεγανωτικό υλικό, ενώ συνήθως είναι αναγκαία και η κατασκευή έργων αποστράγγισης των υπόγειων υδάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διασφάλιση της σταθερότητας και της λειτουργικότητας του αποστραγγιστικού συστήματος, ώστε να μην επηρεάζεται από μετακινήσεις ή καθιζήσεις των κατασκευών του Χ.Υ.Τ.Α.

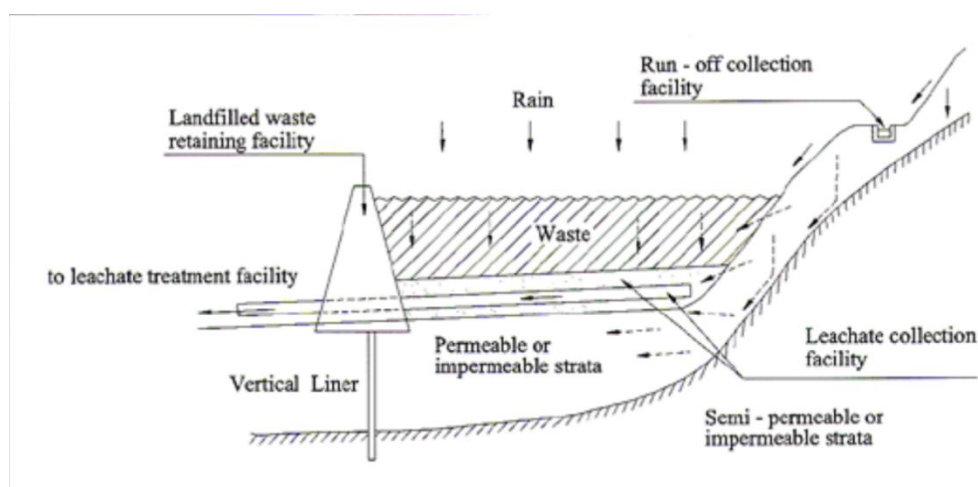


Σχήμα 9. Σχηματική απεικόνιση στεγανοποιητικών συστημάτων Χ.Υ.Τ.Α.: (αριστερά) σύνθετος φραγμός (composite liner) με γεωμεμβράνη και συμπυκνωμένη αργλική στρώση και (δεξιά) διπλός φραγμός (double liner) με πρωτεύον και δευτερεύον σύστημα στεγανοποίησης και ενδιάμεση στρώση ανίχνευσης διαρροών (Πηγή: Onyelowe et al., 2021).



Σχήμα 10. Σχηματική απεικόνιση επιφανειακού στεγανωτικού συστήματος (Πηγή: *National Solid Waste Management Commission (NSWMC) & Japan International Cooperation Agency (JICA), 2010*)

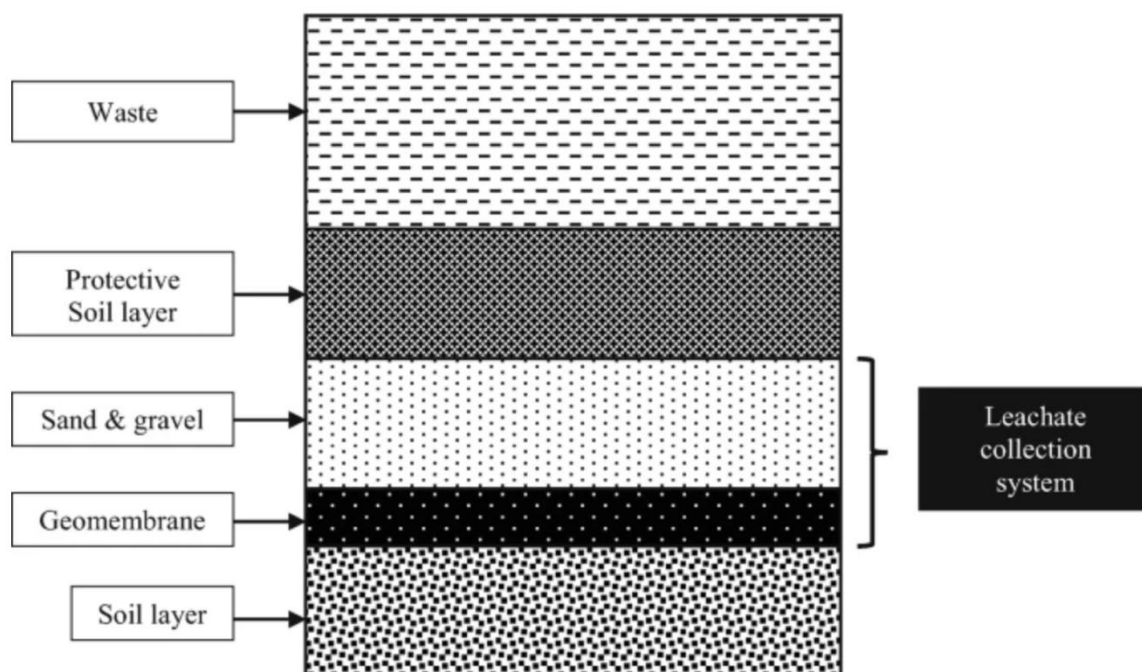
Αντίθετα, το κατακόρυφο στεγανωτικό σύστημα ενδείκνυται σε περιοχές όπου υφίσταται υποκείμενο αδιαπέρατο στρώμα, όπως βραχώδης σχηματισμός ή συμπαγής άργιλος, το οποίο εκτείνεται οριζόντια κάτω από τον Χ.Υ.Τ.Α. (Σχήμα 11). Σε αυτή την περίπτωση, κατασκευάζεται κατακόρυφο ή κεκλιμένο φράγμα, με σκοπό την επιμήκυνση της διαδρομής του στραγγίσματος ή των υπόγειων υδάτων και τον τελικό εγκλωβισμό τους μεταξύ των απορριμματικών στρώσεων και του αδιαπέρατου υποβάθρου. Συχνά, τα έργα αντιστήριξης και η θεμελίωση ενός Χ.Υ.Τ.Α. σε περιοχές κοιλάδας λειτουργούν ταυτόχρονα και ως στεγανωτικό σύστημα, χωρίς να απαιτείται, κατά κανόνα, η κατασκευή συστήματος αποστράγγισης υπόγειων υδάτων.



Σχήμα 11. Σχηματική απεικόνιση κατακόρυφου στεγανωτικού συστήματος (Πηγή: *National Solid Waste Management Commission (NSWMC) & Japan International Cooperation Agency (JICA), 2010*)

Συστήματα Μονής Στεγανοποίησης (Single-Liner Systems)

Το απλό σύστημα στεγανοποίησης αποτελεί την πιο βασική μορφή και συνίσταται από μία μόνο στεγανωτική στρώση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η γεωμεμβράνη ενδέχεται να μην περιλαμβάνεται, όταν ο χώρος ταφής προορίζεται αποκλειστικά για απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (Construction and Demolition Debris – C&DD). Τα απόβλητα αυτά παράγονται κατά τη διάρκεια οικοδομικών ή κατεδαφιστικών εργασιών και περιλαμβάνουν σκυρόδεμα, άσφαλτο, κεραμίδια, ξύλο, τούβλα και γυαλί (Tuomela et al., 2021). Δεδομένου ότι οι χώροι αυτοί δεν προορίζονται για τη διάθεση επικίνδυνων ή υγρών αποβλήτων, όπως χρώματα, πίσσα, αστικά απορρίμματα ή εμποτισμένο ξύλο, το απλό σύστημα στεγανοποίησης θεωρείται επαρκές για την προστασία του εδάφους και των υπόγειων υδάτων. Παράλληλα, η διαχείριση των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων σε αυτού του τύπου τους χώρους είναι οικονομικότερη συγκριτικά με τους χώρους ταφής αστικών στερεών αποβλήτων (MSW), καθώς τα C&DD ΧΥΤΑ διαθέτουν απλούστερη στεγανωτική διάταξη και επομένως παρουσιάζουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης (Hughes et al., 2008).



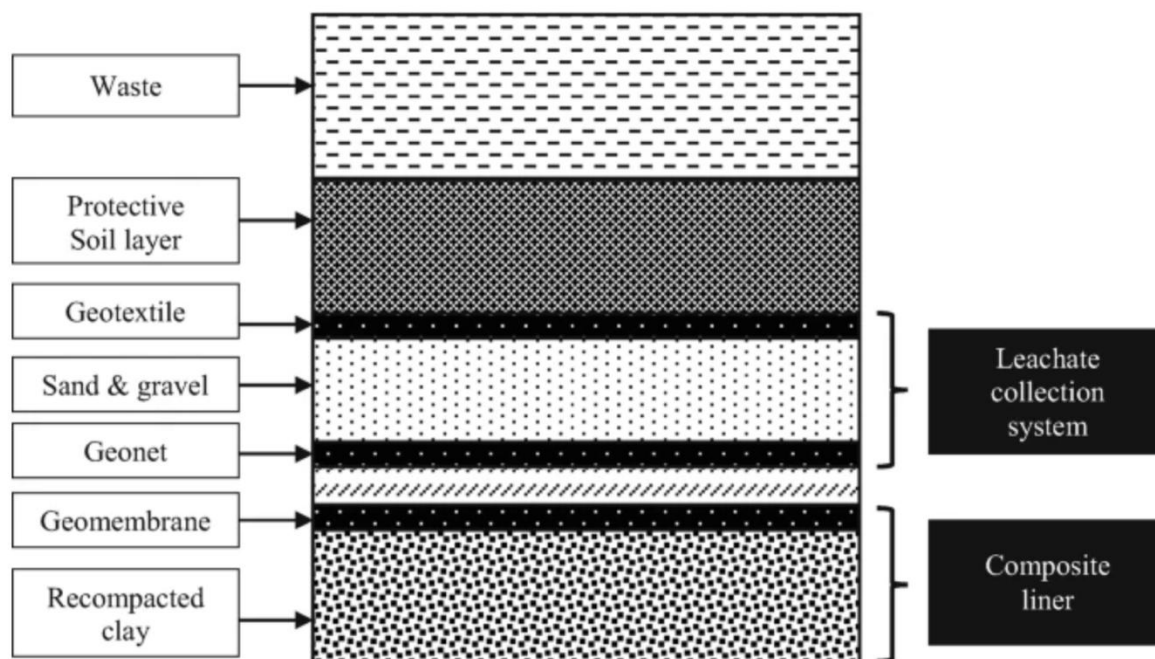
Σχήμα 12. Σχηματική απεικόνιση συστήματος μονής στεγανοποίησης (Πηγή: Hughes et al, 2008)

Συστήματα Σύνθετης Στεγανοποίησης (Composite Liner Systems)

Τα συστήματα σύνθετης στεγανοποίησης αποτελούνται από τον συνδυασμό γεωμεμβράνης (GM) και γεωσυνθετικού αργιλικού φραγμού (GCL), δημιουργώντας ένα

πολυστρωματικό σύστημα υψηλής στεγανότητας (Σχήμα 13). Τα συστήματα αυτά προσφέρουν σημαντικά αυξημένη αποτελεσματικότητα στον περιορισμό της διείσδυσης των στραγγισμάτων προς το υπέδαφος, συγκριτικά με τα απλά αργιλικά ή μονοστρωματικά γεωμεμβρανικά συστήματα, καθώς και εισροής ρύπων στα υπόγεια υδατικά συστήματα, υπό την προϋπόθεση ότι η γεωμεμβράνη παραμένει σε καλή κατάσταση (Hughes, Christy & Heimlich, 2008). Η χρήση του αργιλικού υλικού ως στοιχείου της σύνθετης στεγανοποίησης βασίζεται στην χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητά του. Παρ' όλα αυτά, τα αργιλικά υποστρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, σημαντική ποσότητα αργιλικών ορυκτών (π.χ. ασταθής ιλλίτης και σμεκτίτης) και αντίστοιχα υψηλή πλαστικότητα, θεωρούνται επεκτατικά ορυκτά υλικά, τα οποία παρουσιάζουν τάση για έντονη διόγκωση, συρρίκνωση και ρηγμάτωση (Widomski, Stępniewski & Musz-Pomorska, 2018). Οι συγκεκριμένες αστοχίες στη συμπεκνωμένη αργιλική στρώση μπορεί να εκδηλωθούν τόσο κατά τη λειτουργία όσο και κατά την κατασκευαστική φάση του Χ.Υ.Τ.Α. Επιπλέον, οι διαδικασίες διόγκωσης και συρρίκνωσης αυτής της στρώσης θεωρούνται μη αναστρέψιμες, γεγονός που επηρεάζει τη μακροχρόνια απόδοση του συστήματος στεγανοποίησης.

Η εφαρμογή σύνθετων στεγανοποιητικών συστημάτων είναι υποχρεωτική στους χώρους υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων, οι οποίοι δέχονται απορρίμματα προερχόμενα από οικιακές, εμπορικές και βιομηχανικές πηγές (Lupo, 2010). Σε ορισμένες περιπτώσεις, επιτρέπεται η απόθεση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (C&D), όχι όμως επικίνδυνων αποβλήτων. Η ελάχιστη αποδεκτή προδιαγραφή για τους Χ.Υ.Τ.Α. είναι η ύπαρξη συστήματος σύνθετης στεγανοποίησης, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις οι μελετητές και διαχειριστές επιλέγουν την εγκατάσταση διπλών στεγανοποιητικών συστημάτων, ώστε να εξασφαλίζεται ενισχυμένος έλεγχος διαρροών, αποτελεσματικότερη παρακολούθηση και αυξημένη προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

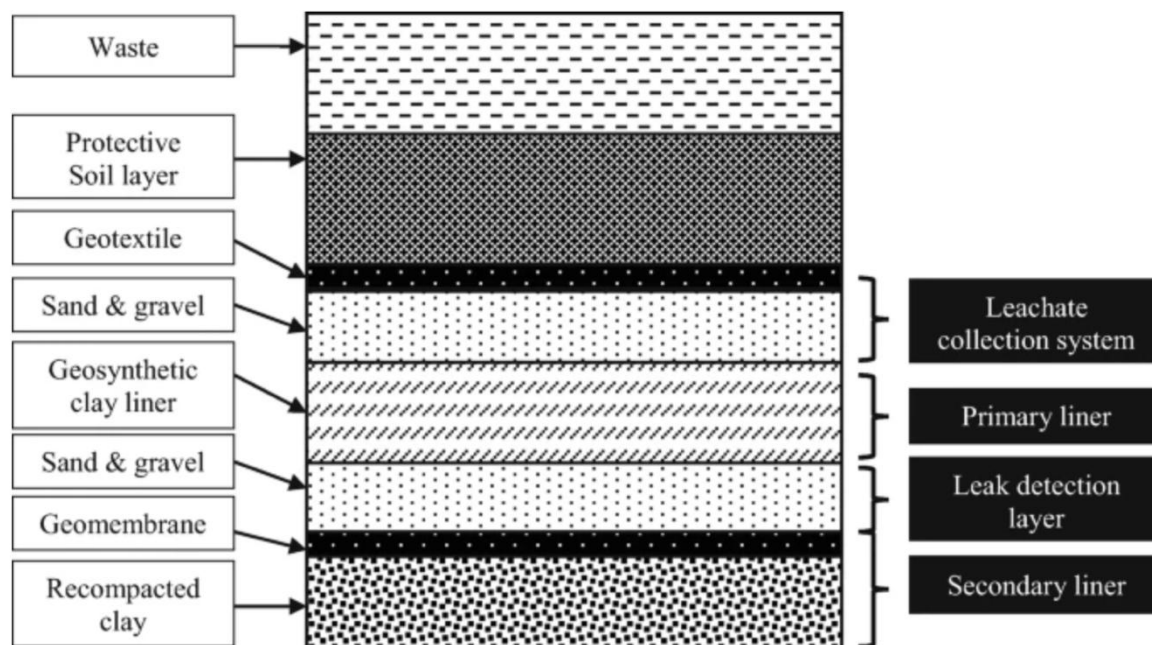


Σχήμα 13. Σχηματική απεικόνιση συστήματος σύνθετης στεγανοποίησης (Πηγή: Widomski et al., 2018)

Συστήματα Διπλής Στεγανοποίησης (Double-Liner Systems)

Τα συστήματα διπλής στεγανοποίησης αποτελούν προηγμένες κατασκευαστικές διατάξεις που περιλαμβάνουν είτε δύο απλές στεγανοποιητικές στρώσεις, είτε δύο σύνθετες, είτε συνδυασμό μίας απλής και ενός σύνθετου συστήματος (Σχήμα 14). Το ανώτερο (πρωτεύον) στεγανοποιητικό σύστημα έχει ως κύρια λειτουργία τη συλλογή και απομάκρυνση των στραγγισμάτων, ενώ το κατώτερο (δευτερεύον) λειτουργεί ως μηχανισμός ανίχνευσης διαρροών και εφεδρική γραμμή προστασίας, εξασφαλίζοντας την αποτροπή ρύπανσης του υπεδάφους και των υπόγειων υδάτων. Η χρήση διπλών στεγανοποιητικών συστημάτων είναι υποχρεωτική σε όλους τους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Επικίνδυνων Αποβλήτων (Χ.Υ.Τ.Ε.Α.) και συχνά εφαρμόζεται και σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Χ.Υ.Τ.Α.), με στόχο την ενίσχυση της περιβαλλοντικής προστασίας και της λειτουργικής ασφάλειας των εγκαταστάσεων (Hughes, Christy & Heimlich, 2008). Οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Επικίνδυνων Αποβλήτων, γνωστοί και ως χώροι ασφαλούς ταφής, προορίζονται για τη διάθεση αποβλήτων που χαρακτηρίζονται ως εύφλεκτα, διαβρωτικά, αντιδραστικά ή τοξικά, καθώς και για εκείνα που έχουν καταταχθεί ως επικίνδυνα από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος. Τα απόβλητα αυτά, λόγω της χημικής τους φύσης, ενδέχεται να προκαλέσουν σοβαρούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και το φυσικό περιβάλλον, εάν δεν τύχουν ορθής διαχείρισης. Προέρχονται κυρίως από βιομηχανικές, εμπορικές και γεωργικές δραστηριότητες. Επιπλέον, τα πολυστρωματικά ή πολυφραγικά συστήματα στεγανοποίησης (multi-barrier systems) εφαρμόζονται συχνά σε

περιπτώσεις όπου διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες στερεών αποβλήτων που πρέπει να παραμείνουν απομονωμένα από το περιβάλλον. Πρόκειται για τα πιο σύνθετα και τεχνικά απαιτητικά συστήματα, καθώς αποτελούνται από πολλαπλά απλά και σύνθετα στρώματα στεγανοποίησης (Lupo, 2010).

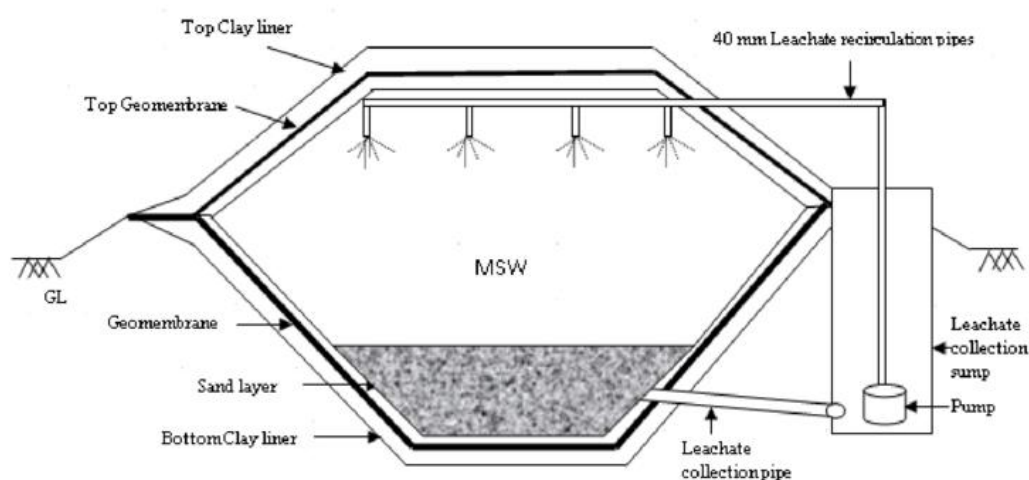


Σχήμα 14. Σχηματική απεικόνιση συστήματος διπλής στεγανοποίησης (Πηγή: Hughes et al., 2008)

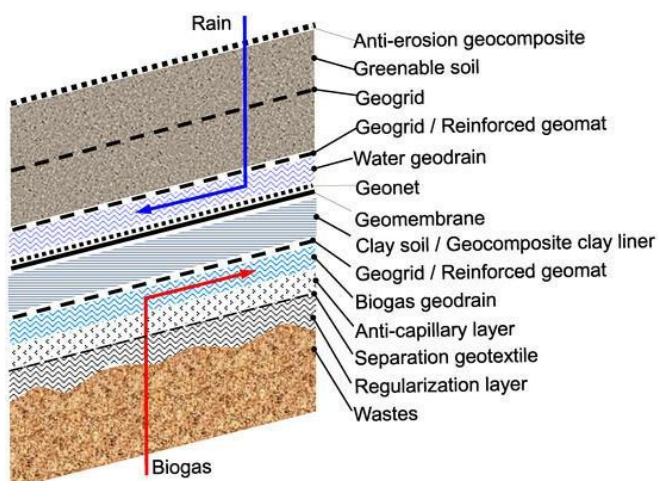
Συστήματα Συλλογής Στραγγισμάτων

Όλα τα συστήματα στεγανοποίησης περιλαμβάνουν ενσωματωμένο σύστημα συλλογής στραγγισμάτων (Σχήμα 15), το οποίο διασφαλίζει την αποτελεσματική απομάκρυνση και διαχείριση των υγρών αποβλήτων που προκύπτουν εντός του χώρου ταφής. Το σύστημα αυτό αποτελείται συνήθως από στρώση αποστράγγισης, η οποία μπορεί να κατασκευάζεται είτε από άμμο και χαλίκι, είτε από γεωσυνθετικό αποστραγγιστικό υλικό (γεωδικτυωτό – geonet), δηλαδή ένα πλαστικό πλέγμα υψηλής αντοχής που επιτρέπει τη ροή των στραγγισμάτων (Εικόνα 5). Στο εσωτερικό της αποστραγγιστικής στρώσης εγκαθίσταται δίκτυο σωληνώσεων συλλογής, μέσω του οποίου τα στραγγίσματα οδηγούνται σε δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης και, στη συνέχεια, σε μονάδες επεξεργασίας για την αποφυγή ρύπανσης του υπεδάφους και των υδάτων. Στα διπλά συστήματα στεγανοποίησης, η ανώτερη αποστραγγιστική στρώση λειτουργεί ως σύστημα συλλογής στραγγισμάτων, ενώ η κατώτερη στρώση επιτελεί τον ρόλο συστήματος ανίχνευσης διαρροών. Η δεύτερη αυτή στρώση διαθέτει ανεξάρτητο δίκτυο σωληνώσεων, το οποίο επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών διαρροών από το πρωτεύον στεγανοποιητικό φράγμα. Η ανίχνευση υγρών σε αυτές τις σωληνώσεις αποτελεί ένδειξη αστοχίας του ανώτερου στρώματος, επιτρέποντας άμεση

επέμβαση και πρόληψη περιβαλλοντικής ρύπανσης. Για την προστασία των στεγανοποιητικών στοιχείων, προστίθεται προστατευτική στρώση, η οποία αποτρέπει τη διάτρηση ή μηχανική φθορά της γεωμεμβράνης από αιχμηρά ή σκληρά αντικείμενα των απορριμμάτων. Παραδοσιακά, η στρώση αυτή αποτελούνταν από έδαφος, άμμο ή χαλίκι, ωστόσο σε σύγχρονες εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται συχνά στρώση μαλακών απορριμμάτων —όπως χαρτί, οργανικά υπολείμματα, τεμαχισμένα ελαστικά και καουτσούκ— η οποία παρέχει επαρκή απορρόφηση φορτίων και πρόσθετη προστασία του συστήματος στεγανοποίησης.



Σχήμα 15. Σχηματική απεικόνιση συστήματος συλλογής και ανακυκλοφορίας στραγγισμάτων σε Χ.Υ.Τ.Α. τύπου βιοαντιδραστήρα, με ενσωματωμένο δίκτυο σωληνώσεων, δεξαμενή συλλογής και αντλία. (Πηγή: Janajreh, 2014)



Εικόνα 5. Αριστερά: ιαστρωμάτωση τελικής κάλυψης Χ.Υ.Τ.Α. που περιλαμβάνει στρώσεις φυτικού εδάφους, αποστράγγισης όμβριων, γεωσυνθετικών υλικών (geonet, geogrid), στεγανοποίησης (γεωμεμβράνη και αργιλικό φραγμό), καθώς και σύστημα συλλογής βιοαερίου (Πηγή: Carrubba, 2024); Δεξιά: Γεωδικτυωτό (geonet) ως γεωσυνθετικό υλικό αποστράγγισης (Πηγή: WANSHENGLI., n.d.)

3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΩΝ ΦΡΑΓΜΩΝ

Ένα σύστημα στεγανοποίησης αποτελεί βασικό στοιχείο των σύγχρονων ΧΥΤΑ, καθώς εξασφαλίζει τον εγκιβωτισμό των αποβλήτων και την απομόνωσή τους από το φυσικό περιβάλλον. Κύριος στόχος των συστημάτων αυτών είναι η προστασία του εδάφους και των υπόγειων υδάτων από ρυπαντικά φορτία που προέρχονται από τον ΧΥΤΑ. Η σημαντικότερη απειλή για τα υπόγεια ύδατα αποτελείται από τα στραγγίσματα, τα οποία δύνανται να μεταναστεύσουν και να προκαλέσουν ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων υδροφορέων, με δυνητικά σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον. Η αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με την περιβαλλοντική υποβάθμιση, τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων από στραγγίσματα απορριμματικών χώρων και ιλύων, καθώς και τη διαρροή επικίνδυνων χημικών ουσιών λόγω ατυχημάτων, έχει εντείνει το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών και περιβαλλοντικά βιώσιμων τεχνικών λύσεων. Στο πλαίσιο αυτό, οι γεωσυνθετικοί αργιλικοί φραγμοί (Geosynthetic Clay Liners – GCLs) έχουν καθιερωθεί ως μια αξιόπιστη, ευέλικτη και τεχνικά αποδεδειγμένη επιλογή για εφαρμογές εγκιβωτισμού αποβλήτων, κυρίως λόγω της ιδιαίτερα χαμηλής υδραυλικής τους αγωγιμότητας (m/s) (Najafi et al., 2012; Feng et al., 2018).

Ωστόσο, η διεθνής βιβλιογραφία περιλαμβάνει πληθώρα πρωτότυπων ερευνητικών μελετών, τεχνικών αναφορών και αναλύσεων περιπτώσεων που εξετάζουν τη χρήση διαφορετικών τύπων εδαφών ως συμπυκνωμένων στεγανωτικών στρώσεων σε ΧΥΤΑ (Yu & El-Zein, 2019; Yong et al., 2018; Kundiri & Osinubi, 2018). Επιπλέον, αρκετές εργασίες επικεντρώνονται στα χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις των συμπυκνωμένων εδαφικών φραγμών (Moraci et al., 2018; Aldaeef & Rayhani, 2015) καθώς και στα πλεονεκτήματα των εδαφικών συστημάτων στεγανοποίησης (Bello, 2015; Manoj, 2015). Τα κατώτερα και ανώτερα στεγανωτικά στρώματα των ΧΥΤΑ κατασκευάζονται συχνά από φυσικά υλικά, όπως οι άργιλοι, και ενισχύονται με πλαστικές ή άλλες συνθετικές μεμβράνες. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών στεγανοποίησης —όπως οι συμπυκνωμένες αργιλικές στρώσεις, οι γεωμεμβράνες, τα γεωδίχτυα και τα γεωφάσματα— παραμένει περιορισμένη σε πολλές χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος (Ozbay, 2015).

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για φιλικές προς το περιβάλλον και βιώσιμες λύσεις έχει ενισχύσει το ερευνητικό ενδιαφέρον για νέα υλικά βελτίωσης εδαφών, όπως βιοαπόβλητα, γεωϋλικά και συνθετικά υλικά (Budihardjo, 2019). Τα υλικά αυτά, πλούσια σε άνθρακα, παράγονται μέσω της πυρόλυσης φυτικών και ζωικών αποβλήτων και

χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα ανεπτυγμένη πορώδη δομή τύπου κηρήθρας (Tomlinson, 2010). Ο γύψος έχει χρησιμοποιηθεί ως σταθεροποιητής εδαφών, συμβάλλοντας στη συγκράτηση θρεπτικών στοιχείων και στη βελτίωση της υδατοϊκανότητας (Yilmaz & Civelekoglu, 2009). Παράλληλα, η ιπτάμενη τέφρα (fly ash – FA), ένα βιομηχανικό απόβλητο με τιμμεντοειδείς ιδιότητες και υψηλή διαθεσιμότητα, έχει αξιοποιηθεί σε γεωπεριβαλλοντικές εφαρμογές. Ο ζεόλιθος, χάρη στην πυκνή και πορώδη δομή του, λειτουργεί ως αποθήκη θρεπτικών στοιχείων που απελευθερώνονται σταδιακά, βελτιώνοντας την υδατοϊκανότητα των φυσικών εδαφών έως και κατά 18–30% (Sarkar & Das, 2019). Τέλος, το γραφένιο, ως αλλότροπο του άνθρακα με δομή κηρήθρας, έχει μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια για τη βελτίωση των ιδιοτήτων εδαφών και δομικών υλικών, παρουσιάζοντας σημαντικές δυνατότητες στην ακινητοποίηση βαρέων μετάλλων, την απορρόπηση εδαφών και την προσρόφηση χημικών ρύπων (Sarkar & Das, 2019).

3.2.1 Αργιλικά υλικά (Clay Layers)

Ο όρος «αργιλικά ορυκτά» χρησιμοποιείται για να περιγράψει ορυκτά με μέγεθος κόκκων μικρότερο από 2μm, ενώ χαρακτηρίζονται από παρουσία νερού στη δομή τους και σύσταση που βασίζεται κυρίως σε φυλλοπυριτικά, τα οποία δομούνται από τη συνένωση τετραεδρικών (τετραεδρικό σύμπλοκο SiO_4^{4-}) και οκταεδρικών φύλλων (οκταεδρικό σύμπλοκο του αργιλίου $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ - γυψίτης ή του μαγνησίου $\text{Mg}(\text{OH})_6^{4-}$ - βρουσίτης) (Hillier, 1978; Jeans, 1998). Συχνά, η ένωση των τετραέδρων ή των οκταέδρων πραγματοποιείται μόνο σε δύο διαστάσεις, οδηγώντας στη δημιουργία επίπεδων πλεγμάτων, γνωστών ως αργιλικά φύλλα, ενώ ανάλογα με το είδος του δομικού στοιχείου, διακρίνονται τρεις βασικοί τύποι αργιλικών φύλλων: τα πυριτικά, τα γυψιτικά και τα βρουσιτικά. Επιπλέον, τα αργιλικά ορυκτά δύναται να περιέχουν διάφορες προσμίξεις, όπως κάλιο (K), νάτριο (Na) και ασβέστιο (Ca) (Bergaya et al., 2006). Στα βασικότερα αργιλικά ορυκτά συγκαταλέγονται ο ιλλίτης (illite), ο καολινίτης (kaolinite) και ο μοντμοριλλονίτης (montmorillonite). Χαρακτηριστική ιδιότητα των αργιλικών υλικών είναι η πλαστικότητα τους, η οποία αυξάνεται με την παρουσία υγρασίας, ενώ μετά από διαδικασία ψησίματος μετατρέπονται σε σκληρά κεραμικά υλικά και μεταβάλλεται το χρώμα τους (Hillier, 1978; Bergaya et al., 2006).

Όταν τα αργιλικά υλικά υποστούν συμπίκνωση υπό τις κατάλληλες συνθήκες υγρασίας, παρουσιάζουν πολύ χαμηλή διαπερατότητα, γεγονός που τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται ως στεγανωτικό στρώμα (liner) σε χώρους Χ.Υ.Τ.Α.. Σύμφωνα με το ισχύον ελληνικό κανονιστικό πλαίσιο και ειδικότερα την τεχνική προδιαγραφή ΕΛΟΤ 1501-

08-05-03-01:2009, κατά την εφαρμογή συμπτυκνωμένων αργιλικών υλικών ως στεγανωτικών στρώσεων στον πυθμένα και στα πρανή σύγχρονων εγκαταστάσεων διάθεσης στερεών αποβλήτων, πρέπει να τηρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Ειδικότερα, ο συντελεστής υδροπερατότητας της συμπτυκνωμένης αργιλικής στρώσης οφείλει, κατά κανόνα, να είναι μικρότερος από 10^{-9} m/s. Για την επίτευξη αυτού του ορίου, η προδιαγραφή καθορίζει συγκεκριμένες απαιτήσεις που αφορούν τα χαρακτηριστικά των αργιλικών υλικών, οι οποίες παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1. Παράμετροι και επιτρεπτά όρια αργιλικών υλικών για τη χρήση τους ως στεγανωτική στρώση (liner) σε Χ.Υ.Τ.Α.

Παράμετροι – Ιδιότητες	Αποδεκτές Τιμές
Όριο υδαρότητας (LL)	LL < 40%, με προτιμώμενο εύρος 25%–30%
Δείκτης πλαστικότητας (PI)	10% < PI < 25%
Ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού (άργιλος, διάμετρος κόκκων < 2 μ m)	> 20% κατά μάζα
Μέγιστη διάσταση χονδρόκοκκου υλικού	32 mm (οι κόκκοι μεγαλύτερου μεγέθους απομακρύνονται πριν τη διάστρωση)
Περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα	< 40% του συνολικού όγκου
Περιεκτικότητα σε οργανικά υλικά	< 5%

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, το αργιλικό υπόστρωμα σχεδιάζεται ώστε να επιτρέπει τη διείσδυση του νερού με ρυθμό μικρότερο από 0,0305m ετησίως, επιδεικνύοντας εξαιρετικά χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα (Hughes et al., 2008). Οφείλει να τονιστεί ότι η υδραυλική αγωγιμότητα, των αργιλικών υλικών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό τόσο από την υγρασία κατά τη φάση της συμπίκνωσης όσο και από την ενέργεια που εφαρμόζεται κατά τη διαδικασία αυτή. Ως εκ τούτου, η αύξηση της ενέργειας συμπίκνωσης οδηγεί σε μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Παράλληλα, παρατηρείται ιδιαίτερα έντονη μείωσή της, της τάξης των 10 έως 100 φορές, όταν η υγρασία συμπίκνωσης αυξηθεί κατά 2–3% σε σχέση με τη βέλτιστη τιμή. Για τον λόγο αυτό, κατά τη χρήση συμπτυκνωμένων αργιλικών υλικών σε Χ.Υ.Τ.Α., η ελληνική νομοθεσία προτείνει η συμπίκνωση να γίνεται σε υγρασία ελαφρώς υψηλότερη από τη βέλτιστη, με αποτέλεσμα ο απαιτούμενος βαθμός συμπίκνωσης να αντιστοιχεί τουλάχιστον στο 95% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας κατά Proctor.

Υπό ιδανικές συνθήκες, ένα στρώμα αργίλου μπορεί να θεωρηθεί επαρκές για τη συγκράτηση των στραγγισμάτων ενός Χ.Υ.Τ.Α.. Ωστόσο, παράγοντες όπως η ανάπτυξη ρωγμών λόγω επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης και απόψυξης, η αφυδάτωση του υλικού, καθώς και η παρουσία συγκεκριμένων χημικών ενώσεων, μπορούν να υποβαθμίσουν

σημαντικά τη στεγανωτική του ικανότητα. Αναλυτικότερα, στους Χ.Υ.Τ.Α., οι αργιλικές στεγανωτικές μεμβράνες στον πυθμένα συχνά εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία πριν από την κάλυψή τους, με αποτέλεσμα να ξηραίνονται και να υπάρχει κίνδυνος ρηγματώσεων. Για την αποφυγή αυτού, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται αργιλικά υψηλής πλαστικότητας, και ο δείκτης πλαστικότητας (PI) θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10% και 25%. Επιπρόσθετα, η διαδικασία συμπίκνωσης των διαδοχικών στρώσεων της αργιλικής μεμβράνης οφείλει να πραγματοποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα, ώστε να αποφεύγεται η παρατεταμένη έκθεσή τους στην ηλιακή ακτινοβολία και η επακόλουθη ξήρανση που οδηγεί στη δημιουργία ρηγματώσεων. Όμοια, η τελική επιφάνεια της συμπτυκνωμένης μεμβράνης θα πρέπει επίσης να καλύπτεται άμεσα, προλαμβάνοντας τη δημιουργία ρηγματώσεων, ενώ η πρώτη στρώση αποβλήτων που τοποθετείται στον αποδέκτη πρέπει να καλύπτει γρήγορα τη μεμβράνη, προστατεύοντάς την από την ηλιακή ακτινοβολία. Αντίστοιχα, σε περιοχές με έντονο ψύχος, η αργιλική στεγανωτική στρώση πρέπει να προστατεύεται και από τον παγετό.

Θεωρητικά, ένα στρώμα άργιλου πάχους περίπου 0,3m αρκεί για τη συγκράτηση των στραγγισμάτων. Ωστόσο, η προσθήκη επιπλέον άργιλου αποσκοπεί στην ενίσχυση της προστασίας του περιβάλλοντος σε περίπτωση μερικής μείωσης της αποδοτικότητας της αργιλικής στρώσης. Η απομείωση της αποδοτικότητας του αργιλικού φραγμού μπορεί να περιοριστεί με την τοποθέτηση της άργιλου σε διαδοχικές στρώσεις πάχους 0,10–0,15m, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της υποκείμενης γεωλογίας, και τη συμπίκνωση κάθε στρώσης μέσω μηχανικού κυλίνδρου βαρέως τύπου (Goren, 2012). Επίσης η αποτελεσματικότητα της αργιλικής στρώσης μειώνεται εάν επιτραπεί να ξεραθεί κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης, καθώς η ξήρανση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, προκαλεί ρωγμές που περιορίζουν την ακεραιότητα του φράγματος.

Τέλος, οι χημικές ουσίες που απαντώνται στο υγρό στράγγισμα ενδέχεται να επιδράσουν αρνητικά στη συμπτυκνωμένη αργιλική στρώση, επιφέροντας αλλοιώσεις στις φυσικοχημικές της ιδιότητες, όπως η αύξηση της υδροπερατότητας ή ακόμη και η σοβαρή διάβρωσή της. Ιδιαίτερα επιβαρυντική δράση ασκούν τα ισχυρά οξέα και οι βάσεις, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν διάλυση των αργιλικών ορυκτών και να μειώσουν σημαντικά τη στεγανωτική αποτελεσματικότητα της μεμβράνης. Ορισμένες όξινες ενώσεις, όπως το υδροφθορικό και το φωσφορικό οξύ, χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα επιθετικές απέναντι στα αργιλικά υλικά.

3.2.2 Γεωμεμβράνες

Οι γεωμεμβράνες, επίσης γνωστές ως ευέλικτα μεμβρανικά στρώματα φραγμού (Flexible Membrane Liners – FML), κατασκευάζονται από πλαστικά πολυμερή, όπως το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), με σκοπό να παρέχουν υψηλή ανθεκτικότητα, χημική αντοχή και αδιαπερατότητα στο νερό (Koerner, 2012). Οι γεωμεμβράνες είναι δυνατόν να παράγονται και ως σύνθετα υλικά, αποτελούμενα από δύο ή περισσότερους πολυμερικούς τύπους που συνδέονται μεταξύ τους, ή να φέρουν ενίσχυση μέσω υφασμάτων ή πλεγμάτων. Παράλληλα, σε ορισμένες περιπτώσεις προστίθενται ειδικά πρόσθετα, όπως πλαστικοποιητές και αιθάλη (carbon black), με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων ή την ενίσχυση της αντοχής του υλικού στη μακροχρόνια γήρανση και στις περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Η πλειονότητα των πολυμερικών υλικών που αξιοποιούνται για την κατασκευή γεωμεμβρανών ανήκει στην κατηγορία των θερμοπλαστικών, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά τις διαδικασίες συγκόλλησης και επιτόπιων επισκευών. Στον τομέα της μηχανικής των Χ.Υ.Τ.Α., οι γεωμεμβράνες από πολυαιθυλένιο αποτελούν την επικρατέστερη επιλογή, καθώς παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή ανθεκτικότητα απέναντι σε μεγάλο εύρος χημικών ουσιών (Rowe, 2005; Koerner, 2012).

Η αντοχή των γεωμεμβρανών μπορεί να ενισχυθεί όταν αυτές παράγονται από πολυμερή με μεγαλύτερο βαθμό κρυσταλλικότητας, υψηλότερο μοριακό βάρος ή αυξημένο πάχος. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, οι συγκεκριμένες ιδιότητες ενδέχεται να περιορίσουν την ευκαμψία του υλικού και να αυξήσουν τον κίνδυνο εμφάνισης ψαθυρής θραύσης. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής, οι γεωμεμβράνες είναι πιθανό να εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες οφείλονται στη θερμότητα που παράγεται από τις βιολογικές διεργασίες αποσύνθεσης των αποβλήτων και μπορούν να φτάσουν τους 40–70 °C. Ως εκ τούτου, κρίνεται απαραίτητη η τεκμηρίωση, μέσω επιστημονικών και τεχνικών δεδομένων, της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων του προτεινόμενου στεγανωτικού υλικού υπό αυξημένες θερμοκρασιακές συνθήκες, τουλάχιστον έως τους 50 °C. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την καταλληλότητα της γεωμεμβράνης για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, συνιστάται η συμβουλή εξειδικευμένου και έμπειρου μηχανικού (Rowe et al., 2003; Sharma & Lewis, 1994).

Τα υγρά και τα αέρια μπορούν να διαχέονται μέσα από τις γεωμεμβράνες σε μοριακή κλίμακα, είτε ως ατμοί είτε ως αέρια, μέσω της διαδικασίας διάχυσης. Ο ρυθμός διαπερατότητας εξαρτάται από το πόσο διαλυτά είναι τα υγρά και από την ικανότητα διάχυσης των μορίων τους μέσα στο υλικό της γεωμεμβράνης. Η ύπαρξη διαφοράς στη

συγκέντρωση μορίων ή στη μερική πίεση ανάμεσα στις δύο πλευρές της μεμβράνης καθορίζει την κατεύθυνση και την ταχύτητα της μεταφοράς. Σε αντίθεση με τα πορώδη υλικά, όπως τα εδάφη και οι άργιλοι, όπου η κύρια κινητήρια δύναμη της ροής είναι το υδραυλικό φορτίο, στις γεωμεμβράνες η διάχυση καθορίζεται από μοριακούς παράγοντες. Η διαπερατότητα των αερίων διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο της γεωμεμβράνης και τη φύση του αερίου. Για παράδειγμα, δοκιμές δείγματος γεωμεμβράνης HDPE σε 23 °C έδειξαν ότι η διαπερατότητα του διοξειδίου του άνθρακα ήταν πέντε φορές μεγαλύτερη από εκείνη του μεθανίου (Dongna et al., 2024). Επιπλέον, μελέτες που προσομοιώνουν στραγγίσματα με μικρές ποσότητες οργανικών ρύπων έδειξαν ότι σημαντικές ποσότητες οργανικών ενώσεων μπορούν να διαπεράσουν τη γεωμεμβράνη λόγω επιλεκτικής διαπερατότητας, ακόμη και όταν οι συγκεντρώσεις τους στα στραγγίσματα είναι πολύ χαμηλές (Giroud, 2016).

Σχετικά με την μηχανική καταπόνηση των γεωμεμβρανών αυτές θα δεχθούν μηχανικές καταπονήσεις κατά τη μεταφορά, την τοποθέτηση και τη διαχείρισή της στον χώρο, καθώς και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Ορισμένες από αυτές τις καταπονήσεις μπορούν να εκτιμηθούν από τον σχεδιασμό του στεγανοποιητικού φραγμού, όπως οι διατάξεις αγκύρωσης, ενώ άλλες μπορεί να προκληθούν από θερμοκρασιακές μεταβολές, οι οποίες προκαλούν διαστολή ή συστολή του υλικού. Η γεωμεμβράνη πρέπει να μπορεί να αντέξει τις φυσικές, χημικές και βιολογικές καταπονήσεις καθ' όλη τη διάρκεια της προγραμματισμένης ζωής της εγκατάστασης, ενώ παράγοντες που επηρεάζουν αυτές τις απαιτήσεις περιλαμβάνουν το ανάγλυφο του εδάφους, τον τύπο και τη μορφή των αποβλήτων, το βάθος των απορριμμάτων, τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό συμπύκνωσης και τις υδρογεωλογικές συνθήκες του χώρου. Ως εκ τούτου, απαιτείται η παροχή ποσοτικών στοιχείων που να τεκμηριώνουν ότι η γεωμεμβράνη μπορεί να αντέξει τις προβλεπόμενες καταπονήσεις και ιδιαίτερη προσοχή οφείλει να δίνεται στις κορυφές κλιμάκων ή σε απότομες αλλαγές κλίσης, όπου μπορεί να χρειαστεί ενίσχυση ή τροποποίηση για τη μείωση της γωνίας και την προστασία της μεμβράνης. Όμοια, η εμφάνιση ρωγμών καταπόνησης μπορεί να περιοριστεί με σωστό σχεδιασμό και προσεκτική εγκατάσταση του υλικού, ενώ για την εκτιμηθεί η ευαισθησία της γεωμεμβράνης στις ρωγμές καταπόνησης, μπορούν να πραγματοποιηθούν ειδικές δοκιμές, όπως η μέτρηση σταθερής τάσης με εγκοπή (notched constant tension load test – D5397).

Λόγω της ποικιλίας των αποβλήτων που μπορεί να περιέχονται σε έναν Χ.Υ.Τ.Α., η χημική καταπόνηση του συστήματος στεγανοποίησης αποτελεί σημαντικό ζήτημα, ιδίως σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Οι συνέπειες της χημικής καταπόνησης μπορεί να περιλαμβάνουν

τη διάβρωση ή φθορά του βασικού πολυμερούς, τον αποπολυμερισμό του υλικού, την απορρόφηση συστατικών των αποβλήτων από τη γεωμεμβράνη και την απώλεια ή εξαγωγή στοιχείων της αρχικής σύνθεσης της μεμβράνης, όπως τα αντιοξειδωτικά, ενώ οι επιπτώσεις αυτές μπορεί να χρειαστούν δεκαετίες για να εμφανιστούν. Η μέθοδος EPA 9090 χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επίδρασης της χημείας των στραγγισμάτων στις φυσικές ιδιότητες των γεωμεμβρανών (U.S. Environmental Protection Agency, 1992; Barrett et al., 1999). Κατά τη δοκιμή, το υλικό του στεγανοποιητικού φραγμού εμβαπτίζεται σε στραγγίσματα για τουλάχιστον 120 ημέρες, τόσο σε θερμοκρασία δωματίου όσο και στους 50°C. Αν προβλέπονται υψηλότερες θερμοκρασίες, η δοκιμή πρέπει να εκτελείται σε αυξημένη θερμοκρασία. Η συμβατότητα του στεγανοποιητικού φραγμού με τα απόβλητα εκτιμάται συγκρίνοντας περιοδικά τις φυσικές ιδιότητες της μεμβράνης πριν και μετά την επαφή της με τα υγρά απόβλητα.

Τέλος, η επαφή μιας γεωμεμβράνης με το έδαφος ή με υγρά μπορεί να την εκθέσει σε βιολογικούς παράγοντες. Τα διαθέσιμα δεδομένα από εργαστηριακές ή πεδικές μελέτες είναι περιορισμένα και δεν παρέχουν σαφείς ενδείξεις ότι η βιολογική δράση έχει προκαλέσει σημαντικές βλάβες ή μείωση της απόδοσης της γεωμεμβράνης, γεγονός που δείχνει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα. Συνήθως, τα πολυμερή υψηλού μοριακού βάρους παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στη βιοαποδόμηση. Ορισμένες πλαστικοποιημένες γεωμεμβράνες έχουν δείξει ευαισθησία σε βιολογική προσβολή λόγω της αποικοδόμησης ορισμένων πλαστικοποιητών και μονομερικών συστατικών. Το ρητινώδες τμήμα της γεωμεμβράνης παραμένει συνήθως ανθεκτικό στα βακτήρια, καθώς δεν παρέχει πηγή άνθρακα για την ανάπτυξή τους, ενώ η ανάπτυξη μυκήτων μπορεί να εμφανιστεί στην επιφάνεια της γεωμεμβράνης χωρίς να επηρεάσει τη δομή του υλικού της. Ωστόσο, η πιθανότητα προσβολής του συστήματος από τρωκτικά ή άλλα ζώα δεν μπορεί να αποκλειστεί, ενώ οι εκσκαφικές δραστηριότητες άλλων ζώων μπορεί να προκαλέσουν ζημιές στη βάση ή στα προστατευτικά στρώματα της γεωμεμβράνης.

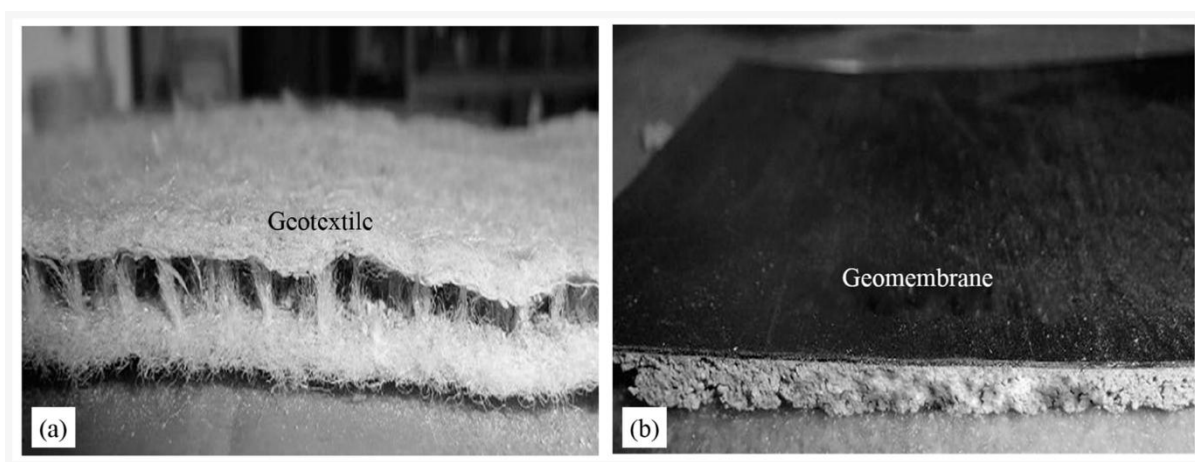
Το HDPE αποτελεί το προτιμώμενο υλικό για Χ.Υ.Τ.Α. αστικών στερεών αποβλήτων, καθώς μειώνει την άμεση επαφή των στερεών αποβλήτων με τα στραγγίσματα και το υπόβαθρο ή την αργλική στρώση, περιορίζοντας έτσι τη μεταφορά των στραγγισμάτων στο περιβάλλον. Παράγεται από ρητίνη πολυαιθυλενίου με μικρές προσμίξεις αιθάλης (carbon black) και αντιοξειδωτικών, ενώ υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι παραγωγής γεωμεμβρανών HDPE: η εξώθηση με επίπεδη χύτευση (Flat Cast Extrusion Process) και η συν-εξώθηση με στρογγυλή μήτρα (Round Die Co-extrusion Process) (Koerner, 1997), όπου και οι δύο τεχνικές επιτρέπουν την παραγωγή είτε λείων είτε υφασμένων γεωμεμβρανών (You, 2002).

Οι μηχανικές ιδιότητες των λείων γεωμεμβρανών και στις δύο μεθόδους είναι περίπου ίδιες. Παρόλα αυτά, οι υφασμένες γεωμεμβράνες παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στις μηχανικές τους επιδόσεις. Επιπλέον, η γεωμεμβράνη HDPE παρέχει υψηλή αντοχή σε χημικές ουσίες, γεγονός που την καθιστά ανθεκτική σε οξέα, αλκάλια και επικίνδυνα στραγγίσματα, ενώ παράλληλα διαθέτει υψηλή εφελκυστική αντοχή και αντοχή σε διάτρηση, επιτρέποντας την αντοχή σε μεγάλα φορτία αποβλήτων. Διατηρεί την ακεραιότητά της ακόμη και μετά από πολυετή έκθεση σε στραγγίσματα και σε στατικές ή δυναμικές καταπονήσεις (Eith & Koerner, 1997), καθώς επίσης διατηρεί τη σταθερότητά της σε υπεριώδη ακτινοβολία και μεταβολές θερμοκρασίας, καθιστώντας την κατάλληλη τόσο για εκτεθειμένες όσο και για ενταφιασμένες εφαρμογές.

3.2.3 Γεωσυνθετικά υλικά

Ένα από τα πλέον διαδεδομένα στοιχεία στους χώρους υγειονομικής ταφής αποτελεί ο γεωσυνθετικός αργιλικός φραγμός (Geosynthetic Clay Liner – GCL), ο οποίος ενσωματώνεται στα συστήματα στεγανοποίησης της βάσης του Χ.Υ.Τ.Α., με κύριο στόχο την απομόνωση των αποβλήτων από το περιβάλλον και την προστασία των υποκείμενων φυσικών αποδεκτών (Feng et al., 2018). Οι γεωσυνθετικοί αργιτικοί φραγμοί χρησιμοποιούνται ευρέως ως υδραυλικοί φραγμοί, λόγω της ιδιαίτερης δομής τους, η οποία περιλαμβάνει στρώση αργίλου μπεντονίτη εγκλωβισμένη ή συνδεδεμένη μεταξύ ενός ή περισσότερων γεωσυνθετικών στρωμάτων. Η συστηματική βιομηχανική τους παραγωγή ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980, αρχικά με την εγκλεισμό νατριούχου μπεντονίτη μεταξύ δύο γεωφασμάτων. Έκτοτε, έχει αναπτυχθεί πληθώρα αντίστοιχων προϊόντων, με στόχο τη βελτίωση των μηχανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων τους, καθώς και την επέκταση του πεδίου εφαρμογών τους (Fox & Stark, 2015). Αποτελείται από ένα σχετικά λεπτό στρώμα επεξεργασμένης αργίλου (συνήθως μπεντονίτης), το οποίο είτε συνδέεται με μια γεωμεμβράνη είτε παρεμβάλλεται μεταξύ δύο φύλλων γεωϋφάσματος. Ο γεωσυνθετικός αργιλικός φραγμός μπεντονίτη (Geocomposite Bentonite) δύναται να κατηγοριοποιηθεί με βάση τα φυσικά του χαρακτηριστικά, όπως ο τύπος του μπεντονίτη (νατριούχος ή ασβεστούχος), το πάχος, το είδος επικάλυψης και η περιεκτικότητα σε υγρασία, καθώς και σύμφωνα με τη δομική του διάταξη. Διακρίνεται ειδικότερα σε μη ενισχυμένους τύπους, όπου ο μπεντονίτης προσκολλάται στο γεωσυνθετικό υλικό μέσω συγκολλητικών μέσων (GM-GCL: geomembrane-supported GCL), και σε ενισχυμένους τύπους, στους οποίους τα επιμέρους στρώματα συνδέονται μεταξύ τους με ραφή (GT-GCL: geotextile-encased GCL)

(Εικόνα 6). Αναλυτικότερα, οι GT-GCL (geotextile-encased GCL) αποτελούνται από δύο γεωυφάσματα, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται λεπτή στρώση μπετονίτη, η οποία συγκρατείται με μηχανικές ή χημικές μεθόδους, όπως βελονισμός, ραφή ή χρήση συγκολλητικών υλικών, ενώ οι GM-GCL (geomembrane-supported GCL) αποτελούνται από συνδυασμό γεωμεμβράνης και στρώσης μπετονίτη, η οποία προσκολλάται σε αυτήν μέσω μη ρυπογόνων συγκολλητικών ουσιών (Estornell & Daniel, 1992). Η διαφοροποίηση αυτή των ιδιοτήτων του υλικού έχει επιτρέψει την ευρεία αξιοποίησή του σε εφαρμογές περιβαλλοντικού ελέγχου, όπως σε χώρους υγειονομικής ταφής, υδατοδεξαμενές και εγκαταστάσεις αποθήκευσης ρυπογόνων ουσιών (Koerner, 2005).



Εικόνα 6. Βασικοί τύποι γεωσυνθετικών φραγμών αργίλου (GCLs): (a) ενσωματωμένοι σε γεωύφασμα (GT-GCL) και (b) υποστηριζόμενοι από γεωμεμβράνη (GM-GCL) (Πηγή Kong *et al.*, 2017).

Οι γεωσυνθετικοί αργιλικοί φραγμοί χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλή διαπερατότητα, της τάξης των 10^{-11} m/s, και αποτελούν μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση έναντι των συμπυκνωμένων αργιλικών φραγμών, προσφέροντας σημαντικά τεχνικά πλεονεκτήματα (Rowe, 2010). Η διαπερατότητα ενός γεωσυνθετικού αργιλικού φραγμού εξαρτάται από την ποιότητα του αργίλου. Ο νατριούχος μπεντονίτης, μια φυσική ένωση σε πυριτικό αργιλικό υλικό που προέρχεται από ηφαιστειακή τέφρα, προσδίδει στον μπεντονίτη τις χαρακτηριστικές του ιδιότητες. Επιπλέον, μπορούν να προστεθούν διάφορα πρόσθετα για να βελτιωθεί η υδραυλική συμπεριφορά του αργίλου, ιδιαίτερα όταν η περιεκτικότητα σε νατριούχο μπεντονίτη είναι χαμηλή. Η υδραυλική απόδοση εξαρτάται επίσης, από την ποσότητα μπεντονίτη ανά μονάδα επιφάνειας και από το πόσο ομοιόμορφα κατανέμεται. Όσο περισσότερος μπεντονίτης χρησιμοποιείται ανά μονάδα επιφάνειας, τόσο χαμηλότερη είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του συστήματος. Αν και η ακριβής ποσότητα μπεντονίτη ανά

μονάδα επιφάνειας ποικίλλει ανά τύπο γεωσυνθετικού αργιλικού φραγμού, οι κατασκευαστές συνήθως εφαρμόζουν περίπου 4,88 kg ανά τετραγωνικό μέτρο. Έτσι, η υδραυλική αγωγιμότητα των περισσότερων προϊόντων γεωσυνθετικού αργιλικού φραγμού κυμαίνεται από περίπου 1×10^{-5} cm/sec έως κάτω από 1×10^{-12} cm/sec.

Η αντοχή σε κοπή και γενικότερα τα μηχανικά χαρακτηριστικά των γεωσυνθετικών αργιλικών φραγμών (GCL) εξαρτώνται από τη διαμόρφωση του συστήματος φραγμού. Η τεχνολογία GCL μπορεί να προσφέρει υψηλή αντοχή σε κοπή, δηλαδή ικανότητα παραλαβής σημαντικών τάσεων χωρίς απώλεια της δομικής συνοχής του υλικού. Ειδικότερα, οι γεωσυνθετικοί αργιτικοί φραγμοί που φέρουν γεωύφασμα και στα οποία ο μπεντονίτης συγκρατείται με ραφή (stitchbonding) παρουσιάζουν αυξημένη εσωτερική αντίσταση σε κοπή στο στρώμα της αργίλου. Ακόμη μεγαλύτερη ακαμψία και μηχανική αντοχή επιτυγχάνεται με τη μέθοδο needle punching, η οποία προϋποθέτει τη χρήση μη υφασμένου γεωϋφάσματος τουλάχιστον στη μία πλευρά του γεωσυνθετικού αργιλικού φραγμού. Οι συγκεκριμένες διαμορφώσεις βελτιώνουν την αντοχή σε τριβή στη διεπιφάνεια με τα γειτονικά στρώματα, γεγονός ιδιαίτερα κρίσιμο για τις κεκλιμένες επιφάνειες των Χ.Υ.Τ.Α.. Ωστόσο, κατά την επιλογή του κατάλληλου συστήματος φραγμού για ΧΥΤΑ, είναι απαραίτητο να αξιολογούνται και πρόσθετες παράμετροι απόδοσης, όπως η ελεύθερη και η περιορισμένη διόγκωση του μπεντονίτη, που σχετίζονται με τη δημιουργία ομοιόμορφου φραγμού, καθώς και ο ρυθμός ερπυσμού (creep), ο οποίος εκφράζει την αντίσταση του συστήματος στη μακροχρόνια παραμόρφωση.

Τέλος, στα πλεονεκτήματα των γεωσυνθετικών αργιλικών φραγμών περιλαμβάνονται η ταχεία και απλή εγκατάσταση, το μικρό πάχος που συμβάλλει στην αύξηση του ωφέλιμου χώρου ταφής, καθώς και η αυξημένη ικανότητα αυτοϊασης. Εντούτοις, η χρήση των γεωσυνθετικών αργιλικών φραγμών παρουσιάζει και περιορισμούς, όπως η ενδεχόμενη αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας λόγω ασυμβατότητας με ορισμένους ρυπαντές, η ευπάθεια στην ξήρανση και ο κίνδυνος διάτρησης κατά ή μετά την εγκατάσταση, εξαιτίας του περιορισμένου πάχους τους. Επιπλέον, απώλειες μπεντονίτη κατά τη φάση της εγκατάστασης μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση του γεωσυνθετικού αργιλικού φραγμού, καθώς η υδραυλική του συμπεριφορά εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα και την ομοιομορφία του μπεντονίτη ανά μονάδα επιφάνειας (Bouazza, 2002).

3.2.4 Μίγμα Φυσικού Εδάφους–Μπεντονίτη

Σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν εύκολα διαθέσιμα εδάφη κατάλληλα για χρήση ως υλικά στεγανοποίησης (liners), η ανάμειξη με μπεντονιτική άργιλο μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα χαρακτηριστικά στεγανότητας με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Ο μπεντονίτης έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως τροποποιητής εδάφους, μέσω της ανάμειξής του με υπάρχοντα εδάφη. Πρόκειται για ένα εμπορικά διαθέσιμο γαιώδες υλικό, βασισμένο σε αργιλικά ορυκτά με υψηλή ικανότητα διόγκωσης σε επαφή με το νερό. Εδάφη με διογκούμενες αργιλικές φάσεις συναντώνται σε πολλές περιοχές παγκοσμίως. Ο εντοπισμός, η εξόρυξη και η εμπορική αξιοποίηση εδαφών με υψηλή περιεκτικότητα σε διογκούμενα αργιλικά ορυκτά σε τοπικό επίπεδο, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες χώρες, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή, εφόσον δεν έχει ήδη πραγματοποιηθεί.

Ο όρος «μπεντονίτης» χρησιμοποιείται για να περιγράψει κάθε άργιλο του οποίου η σύσταση κυριαρχείται από σμεκτιτικά αργιλικά ορυκτά, τα οποία είναι υπεύθυνα για τον καθορισμό των βασικών φυσικών της ιδιοτήτων. Λόγω της ιδιαίτερης χημικής σύστασης και της μικροδομής των αργιλικών του σωματιδίων, ο μπεντονίτης παρουσιάζει υψηλή ικανότητα απορρόφησης νερού, με αποτέλεσμα να μπορεί να αυξάνει τον ξηρό του όγκο έως και δέκα φορές κατά την ενυδάτωση. Για τον λόγο αυτό, ο μπεντονίτης θεωρείται το αργιλικό υλικό με τη μεγαλύτερη ικανότητα διόγκωσης (Πίνακας 2). Η κατηγορία ποιότητας του μπεντονίτη καθορίζεται από την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων της ακατέργαστης μπεντονιτικής αργίλου που χρησιμοποιείται στο μίγμα. Στην αγορά διατίθενται πολλές μορφές μπεντονίτη, οι οποίες κυμαίνονται από χονδρόκοκκα συσσωματώματα έως εξαιρετικά λεπτόκοκκες σκόνες. Σε γενικές γραμμές, η μείωση του μεγέθους των κόκκων οδηγεί σε καλύτερη επικάλυψη του υλικού στεγάνωσης, σε αυξημένη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και σε μεγαλύτερη άμεση ικανότητα διόγκωσης. Το ιδιαίτερα μικρό μέγεθος των κόκκων του μπεντονίτη έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση εξαιρετικά χαμηλής υδροπερατότητας, με τον συντελεστή υδροπερατότητας να είναι συνήθως μικρότερος από 10^{-10} m/s, ενώ το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά δυνατή τη χρήση του μπεντονίτη στην κατασκευή στεγανών στρώσεων ακόμη και περιορισμένου πάχους. Για την επιβεβαίωση της καταλληλότητας ενός προϊόντος μπεντονίτη, απαιτείται η αξιολόγησή του σύμφωνα με συγκεκριμένες παραμέτρους. Σε αυτές περιλαμβάνονται η περιεκτικότητα σε συστατικά πέραν του μοντμοριλλονίτη, το ποσοστό του ίδιου του μοντμοριλλονίτη, η ύπαρξη ή μη πολυμερών ή άλλων προσθετικών ουσιών, καθώς και ο τύπος και η προέλευση του μπεντονίτη, όπως φυσικός νατριούχος, νατριούχος εμπλουτισμένος ή ασβεστιούχος μπεντονίτης. Ως εκ τούτου, οφείλει να διασφαλίζεται ότι ο επιλεγμένος ακατέργαστος

μπεντονίτης πληροί ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις, ώστε να είναι κατάλληλος για χρήση σε περιβάλλοντα Χ.Υ.Τ.Α.. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να αναμιγνύεται ομοιόμορφα με το υλικό υποστήριξης, επιτυγχάνοντας ισόρροπη κατανομή σε όλη τη δομή του μίγματος, και να παρουσιάζει ικανοποιητική πρόσφυση ή συγκράτηση εντός της μήτρας του υποστηρικτικού υλικού. Επιπλέον, πρέπει να ενυδατώνεται με ελεγχόμενο και ομοιόμορφο τρόπο, χωρίς ανομοιογένειες στην κατανομή της υγρασίας. Παράλληλα, είναι απαραίτητο να μην παρουσιάζει χημικές αντιδράσεις με τα συνήθη, αλλά και τα ειδικά κατά θέση, συστατικά των στραγγισμάτων, καθώς και να διατηρεί τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά καθ' όλη τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού του Χ.Υ.Τ.Α.. Τέλος, σε συνδυασμό με το υλικό υποστήριξης, ο μπεντονίτης θα πρέπει να συμβάλλει στη δημιουργία ενός στεγανωτικού στρώματος που να λειτουργεί ως επαρκής βάση για την τοποθέτηση πρόσθετων στοιχείων στεγάνωσης ή αποβλήτων, ενώ ο σχεδιασμός του μίγματος οφείλει να επιτρέπει την ενυδάτωση του μπεντονίτη με καθαρό νερό ανάμειξης, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή διόγκωση και η ελάχιστη υδραυλική αγωγιμότητα.

Πίνακας 2. Ενδεικτικές ιδιότητες μπετονίτη (Πηγή: Γκούσκος, 2000)

Ιδιότητα	Τιμή
Ειδικό βάρος	2,65 g/cm ³
Φυσική υγρασία	10–15%
Κλάσμα <75 μm	85%
Κλάσμα <2 μm	75%
Όριο υδαρότητας	450%
Όριο πλαστικότητας	45%
Δείκτης πλαστικότητας	405%
Ενεργότητα	5,3
Ειδική επιφάνεια	632 m ² /g
Na ⁺	53 meq/100 g
Ca ²⁺	13 meq/100 g
Mg ²⁺	13 meq/100 g
Χαλαζίας	2%
Ανθρακικά	9%
Φαινόμενο ειδικό βάρος	800 g/L
Ικανότητα απορρόφησης νερού	500%
Βαθμός διόγκωσης	≥22 ml/2 g
Οργανικά	0,5%

3.2.5 Συμπυκνωμένοι συνεκτικοί εδαφικοί φραγμοί

Τα λατεριτικά και αργιλικά εδάφη φυσικής προέλευσης αποτελούν τα πλέον διαδεδομένα συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιούνται ως στεγανωτικές στρώσεις σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η καταλληλότητά τους καθορίζεται από πληθώρα παραμέτρων, με σημαντικότερες την κοκκομετρική κατανομή, το είδος των αργιλικών ορυκτών και τις ιδιότητες διαπερατότητας. Από γεωγραφική άποψη, τα εδάφη αυτά εντοπίζονται κυρίως σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές, οι οποίες συγκροτούν τις λεγόμενες λατεριτικές ζώνες του πλανήτη (Εικόνα 7). Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί εκτενείς μελέτες σχετικά με τα χαρακτηριστικά λατεριτικών εδαφών της νοτιοδυτικής Νιγηρίας, η οποία αποτελεί τμήμα των εν λόγω ζωνών (Ige, 2007· Ige, 2010· Ige et al., 2011).



Εικόνα 7. Παγκόσμιες ζώνες λατεριτικών εδαφών (Πηγή: Olusegun Omoniyi Ige (2013) *Note on liners for containment of Leachate in sanitary landfills to enhance sustainable environment. International Journal of Development and Sustainability. Volume 2 Number: Pages 380-389*).

Τα βασικά γεωτεχνικά κριτήρια που πρέπει να πληρούν τα λατεριτικά εδάφη προκειμένου να θεωρηθούν κατάλληλα για εφαρμογή ως στεγανωτικές στρώσεις και η καταλληλότητα των υλικών αυτών διαφοροποιείται σημαντικά από περιοχή σε περιοχή, καθώς επηρεάζεται από τοπικούς παράγοντες, όπως οι κλιματικές συνθήκες, η χημική σύσταση και άλλες ειδικές περιβαλλοντικές παράμετροι.

3.2.6 Ιπτάμενη Τέφρα ως Υλικό Στεγάνωσης

Σημαντικό μέρος της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στην καύση άνθρακα, μια διαδικασία που οδηγεί στη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων τέφρας κάθε χρόνο. Η ιπτάμενη τέφρα αποτελείται από πολύ λεπτόκοκκα και ελαφρά σωματίδια που

μεταφέρονται με τα καυσαέρια και συνήθως διαχειρίζεται σε ξηρή μορφή, είτε για τελική διάθεση είτε για περαιτέρω αξιοποίηση. Η ξηρή αποθήκευσή της συμβάλλει στη διατήρηση των ποζολανικών της ιδιοτήτων.

Εδάφη που έχουν σταθεροποιηθεί με ιπτάμενη τέφρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά στεγάνωσης σε εγκαταστάσεις διάθεσης ιπτάμενης τέφρας ή ιλύος από συστήματα καθαρισμού καυσαερίων, σε λιμνοδεξαμενές μη επικίνδυνων αποβλήτων, όπως δεξαμενές αποθήκευσης κοπριάς, σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να γίνει είτε ως αυτοτελές σύστημα είτε σε συνδυασμό με γεωμεμβράνες. Ωστόσο, η διερεύνηση της καταλληλότητας της ιπτάμενης τέφρας για τις παραπάνω χρήσεις απαιτεί λεπτομερή γνώση της διαπερατότητας των υλικών που προορίζονται να λειτουργήσουν ως φραγμοί, ενώ η γνώση αυτή αποκτάται μέσω εργαστηριακών δοκιμών, όπως η κοκκομετρική ταξινόμηση, η συμπίκνωση, η μηχανική αντοχή, η υδραυλική αγωγιμότητα και η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. Παρά τάντα, επειδή η αποτελεσματική λειτουργία του στεγανωτικού συστήματος είναι καθοριστική για τη συνολική απόδοση ενός Χ.Υ.Τ.Α. ως προς τη συγκράτηση των ρύπων, τα μεμονωμένα συστήματα συμπτκνωμένης αργίλου ή οι απλές γεωμεμβράνες χρησιμοποιούνται πλέον περιορισμένα. Αντ' αυτών, προτιμώνται σύνθετα συστήματα στεγάνωσης που συνδυάζουν γεωμεμβράνη και αργιλικό υλικό, όπου τα σύνθετα αυτά συστήματα μπορεί να είναι απλής ή ενισχυμένης κατασκευής.

3.2.7 Κριτήρια συγκριτικής αξιολόγησης στοιχείων στεγανωτικών φραγμών

Μερικές από τις πλέον συχνά εφαρμοζόμενες λύσεις στεγανοποίησης παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3 που ακολουθεί. Ταυτόχρονα, παρατίθενται ενδεικτικές τιμές ρυθμών διαρροής για κάθε κατηγορία στεγανωτικού συστήματος, οι οποίες προκύπτουν από συνδυασμό θεωρητικών υπολογισμών και πραγματικών δεδομένων λειτουργίας χώρων υγειονομικής ταφής.

Πίνακας 3. Εναλλακτικές λύσεις στεγανωτικών φραγμών και εκτιμώμενοι ρυθμοί διαρροής (Πηγή: *Comparing Liner Types With GCL- ABG Geosynthetic*, <https://www.abg-geosynthetics.com/technical/landfill/comparing-liner-types-with-gcl/> Accessed on: 24/04/2026)

Τύπος στεγανοποίησης	Περιγραφή	Εκτιμώμενη διαρροή (λιτ./ha/ημέρα) ⁽¹⁾
----------------------	-----------	---

Τύπος στεγανοποίησης	Περιγραφή	Εκτιμώμενη διαρροή (λιτ./ha/ημέρα) ⁽¹⁾
Απουσία στεγανωτικού φραγμού	Μόνο προετοιμασμένο υπόβαθρο, με υδατοπερατότητα 1×10^{-6} m/s και εκτιμώμενο πάχος υδροφόρου στρώματος περίπου 3 m	950,000
Στεγανωτική στρώση συμπακνωμένης αργίλου (CCL – Compacted Clay Liner)	Αργιλικό υλικό με διαπερατότητα 1×10^{-9} m/s και πάχος 0,6 m	1,300
Γεωμεμβράνη (Geomembrane)	HDPE 1,6 mm τοποθετημένο πάνω σε έδαφος με υδατοπερατότητα 1×10^{-6} m/s — Με εκτιμώμενη πυκνότητα 1–10 οπών ανά στρέμμα ⁽³⁾	100–1,000 ⁽²⁾
Γεωσυνθετικός αργιλικός φραγμός (Geosynthetic Clay Liner – GCL)	Νατριούχος μπετονίτης ενσωματωμένος μεταξύ δύο γεωυφασμάτων	860
GCL με ενσωματωμένη μεμβράνη (membrane-laminated GCL)	GCL με προσκολλημένη λεπτή HDPE μεμβράνη	8.6 ⁽⁴⁾
Σύνθετος στεγανωτικός φραγμός (Geomembrane πάνω σε GCL)	Γεωμεμβράνη τοποθετημένη απευθείας πάνω σε GCL	0–4

Σημειώσεις:

1. Οι ρυθμοί διαρροής δίνονται σε λίτρα ανά εκτάριο ανά ημέρα (l/ha/day) και έχουν υπολογιστεί με την υπόθεση ότι κάθε στρώση στεγανοποίησης δέχεται υδραυλικό φορτίο 0,3 m.
2. Οι τιμές διαρροής προκύπτουν με βάση τη μέθοδο που πρότειναν οι Bonaparte και συν., (1989).
3. Ο πραγματικός αριθμός και το μέγεθος των τυχόν οπών εξαρτάται από την ποιότητα της εγκατάστασης (Guglielmetti et al., 1997).
4. Η αναφερόμενη τιμή αντιστοιχεί στο 1% της υπολογιζόμενης διαρροής των 860 lphd για τα τυπικά GCLs με γεώφασμα και υδατοπερατότητα 1×10^{-11} m/s. Η μείωση κατά 100 φορές οφείλεται στη συνιστώσα της γεωμεμβράνης του GCL, η οποία περιορίζει περαιτέρω τη διαρροή.

Τα στοιχεία του Πίνακα 3 υπογραμμίζουν ορισμένες βασικές παρατηρήσεις σχετικά με τα συστήματα στεγανοποίησης. Αρχικά, όλες οι στρώσεις στεγανωτικού φραγμού μειώνουν σημαντικά τη διαρροή σε σύγκριση με την περίπτωση απουσίας οποιουδήποτε συστήματος

στεγανοποίησης, γεγονός που καθιστά την ύπαρξη ενός λειτουργικού στεγανωτικού φραγμού, καθοριστικό στοιχείο στον σχεδιασμό ενός συστήματος συγκράτησης αποβλήτων (Othman et al., 1996). Επιπλέον, οι χαμηλότερες τιμές διαρροής επιτυγχάνονται με τη χρήση σύνθετων συστημάτων, τα οποία συνδυάζουν γεωμεμβράνη και αργιλική στρώση, προσφέροντας έτσι την υψηλότερη δυνατή απόδοση. Αντίθετα, οποιοδήποτε μεμονωμένο σύστημα, όπως μόνο γεωμεμβράνη ή μόνο αργίλος, δεν αποδίδει το ίδιο αποτελεσματικά (Othman et al., 1996). Η συνεργιστική δράση των δύο στοιχείων, γεωμεμβράνης και αργιλικής στρώσης, αποδεικνύεται καθοριστική για την επίτευξη των χαμηλότερων δυνατών τιμών διαρροής.

Η επιλογή ενός στεγανωτικού συστήματος δεν καθορίζεται μόνο από την ικανότητά του να περιορίζει τη διαρροή, αλλά και από άλλες κρίσιμες παραμέτρους (Guglielmetti et al., 1997). Για να επιλεγεί το πλέον κατάλληλο σύστημα, πρώτα πρέπει να αξιολογηθούν βασικά θέματα σχεδιασμού, όπως η σταθερότητα των πρανών, η χημική συμβατότητα των υλικών, η προετοιμασία του εδάφους και άλλες συνθήκες του χώρου. Εάν κάποια από τα αρχικά εξεταζόμενα συστήματα αποκλειστεί από αυτήν την αξιολόγηση, η τελική απόφαση πρέπει να βασίζεται σε συνδυασμό τριών βασικών κριτηρίων: την απαιτούμενη δυνατότητα συγκράτησης των αποβλήτων, την ευκολία εγκατάστασης, τις απαιτήσεις ελέγχου και διασφάλισης ποιότητας και το κόστος. Οι τρεις αυτοί παράγοντες είναι καθοριστικοί για την συνολική απόδοση του συστήματος.

Ιδανικά, το σύστημα θα πρέπει να είναι απλό στην εγκατάσταση, ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί από προσωπικό με περιορισμένη εμπειρία με μικρή εκπαίδευση και χαμηλή πιθανότητα σφάλματος. Σε αυτήν την κατηγορία, οι γεωαργιλικές στρώσεις (GCLs) είναι σαφώς οι πιο εύκολες στην εφαρμογή. Αντίθετα, οι συμπυκνωμένες αργιλικές στρώσεις απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό, ειδικό εξοπλισμό και αυστηρή παρακολούθηση τόσο των υλικών όσο και της διαδικασίας διάστρωσης, ενώ η διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών υγρασίας του εδάφους είναι κρίσιμη. Οι γεωμεμβράνες απαιτούν επίσης έμπειρο προσωπικό και είναι δαπανηρές και χρονοβόρες, ιδιαίτερα όταν η εγκατάσταση γίνεται σε μικρές φάσεις.

Η ένταση και η αυστηρότητα των διαδικασιών ελέγχου και διασφάλισης ποιότητας εξαρτώνται από την πολυπλοκότητα του συστήματος και τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να ελέγχονται για την επίτευξη των προδιαγραφών σχεδιασμού (Peggs, 1993). Οι GCLs παράγονται εργοστασιακά και παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις σε σύγκριση με τα φυσικά εδάφη, ενώ οι γεωμεμβράνες είναι επιρρεπείς σε προβλήματα, όπως η εσφαλμένη συγκόλληση των φύλλων ή η τυχαία διάτρηση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη διαρροή χωρίς αυστηρό πρόγραμμα CQA. Η αυτοσυγκολλητική και η ικανότητα

αυτοσφράγισης των GCLs μειώνει σημαντικά τα προβλήματα που σχετίζονται με τον ποιοτικό έλεγχο (Tedder, 1997). Τέλος, το κόστος πρέπει να είναι ανάλογο της απόδοσης. Τα συνθετικά GCLs με επικάλυψη μεμβράνης προσφέρουν εξαιρετική σχέση κόστους/απόδοσης, συνδυάζοντας την αδιαπερατότητα μιας γεωμεμβράνης με τις ιδιότητες στεγανοποίησης ενός GCL (Πίνακας 4).

Πίνακας 4. Αξιολόγηση συστημάτων στεγανοποίησης - Βαθμοί από 1 = χειρότερο/πιο δύσκολο έως 5 = καλύτερο/πιο εύκολο (Πήγη: *Comparing Liner Types With GCL- ABG Geosynthetic*, <https://www.abg-geosynthetics.com/technical/landfill/comparing-liner-types-with-gcl/> Accessed on: 24/04/2026)

Τύπος στεγανοποίησης	Ικανότητα συγκράτησης ⁽¹⁾	Δυσκολία εγκατάστασης	Δοκιμές QA/QC	Κόστος εγκατάστασης	Σύνθετος Δείκτης Απόδοσης ⁽²⁾
Συμπυκνωμένη Αργιλική Στρώση (CCL)	2	1	2	2 – 5 ⁽³⁾	1,85 – 2,75
Γεωμεμβράνη (Geomembrane) ⁽⁴⁾	3 – 4	2	1	3	2,55 – 2,95
Γεωσυνθετικός Αργιλικός Φραγμός (GCL)	3	4	5	4	3,77
GCL προδιαμορφωμένος	4	5	4	4	4,15
Σύνθετο σύστημα (Geomembrane / GCL)	5	1	2	1	2,75

Σημειώσεις:

1. Τα δεδομένα βασίζονται σε αυτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.
2. Οι Σύνθετοι Δείκτες Απόδοσης (Composite Performance Factors) υπολογίζονται ως σταθμισμένοι μέσοι όροι με τις εξής βαρύτητες: Ικανότητα συγκράτησης = 40%, Εγκατάσταση = 15%, Απαιτήσεις ελέγχου και διασφάλισης ποιότητας - QA/QC = 15% και Κόστος = 30%.

3. Το κόστος εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα αργιλικών υλικών. Παράλληλα, τα γεωσυνθετικά υλικά μπορεί να έχουν υψηλότερο κόστος από την άργιλο, αλλά η αύξηση του διαθέσιμου όγκου (air space) προσθέτει αξία στον Χ.Υ.Τ.Α., ενώ στην παρούσα ανάλυση δεν εξετάζονται ζητήματα σχετιζόμενα με τον αέρα.

4. Η γεωμεμβράνη θεωρείται πάχους 60 mil (1,5 mm) HDPE.

Ο Πίνακας 4 αποτελεί γενική επισκόπηση βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την επιλογή συστημάτων στεγανοποίησης και δεν προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως οδηγία σχεδιασμού. Παρέχει, ωστόσο, ενδιαφέροντα αποτελέσματα όταν η απόδοση αξιολογείται σε σχέση με την ευκολία εγκατάστασης και το κόστος. Στην ανάλυση αυτή, οι λύσεις βασισμένες σε GCL και GCL με μεμβράνη παρουσιάζουν τους υψηλότερους δείκτες απόδοσης λόγω των καλύτερων βαθμολογιών σε πρόσθετους παράγοντες αξιολόγησης. Αυτή η συστηματική αξιολόγηση μπορεί να επαναληφθεί με χρήση ειδικών για το κάθε έργο βαρών, αν για παράδειγμα η σημασία του κόστους διαφέρει από αυτή που υποθέτουμε εδώ. Συμπερασματικά, η επιλογή του «καλύτερου» στεγανωτικού συστήματος για ένα έργο συγκράτησης αποβλήτων δεν εξαρτάται μόνο από την ικανότητα συγκράτησης. Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η ευκολία εγκατάστασης, ο έλεγχος και η διασφάλιση ποιότητας (QA/QC) και το κόστος πριν τη λήψη απόφασης.

3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΕΓΑΝΩΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Χ.Υ.Τ.Α.

3.3.1 Εδαφική προετοιμασία

Για την εξασφάλιση της ομαλής, ασφαλούς και λειτουργικά αποδοτικής αξιοποίησης του χώρου, κρίνεται αναγκαία η κατάλληλη προετοιμασία και διαμόρφωση του υποβάθρου, με στόχο τη διαμόρφωση ήπιων και ελεγχόμενων κλίσεων. Η επιλογή αυτή συμβάλλει τόσο στη διευκόλυνση της κίνησης εντός του χώρου όσο και στην ενίσχυση της ασφάλειας κατά την εκτέλεση των έργων υποδομής.

Πριν από την εγκατάσταση των συστημάτων στεγανοποίησης του ΧΥΤΑ/Υ, προηγείται η κατάλληλη προετοιμασία της τελικής επιφάνειας που προκύπτει από τις αναγκαίες χωματουργικές παρεμβάσεις. Η διαμόρφωση του υποβάθρου επιδιώκει (Σκορδίλης, 2001):

- Τη δημιουργία σταθερής και κατάλληλης βάσης για την τοποθέτηση του τεχνητού γεωλογικού φραγμού, ώστε να διασφαλίζεται πλήρης και ομοιόμορφη επαφή μεταξύ της υποκείμενης επιφάνειας και της συμπτυκνωμένης αργιλικής στρώσης, καθώς και η συνοχή όλων των στεγανοποιητικών διαστρώσεων.

- Την αποφυγή διαφορικών καθιζήσεων, οι οποίες ενδέχεται να οδηγήσουν σε ρηγματώσεις και αστοχίες του τεχνητού γεωλογικού φραγμού.
- Τη διατήρηση της προβλεπόμενης ωφέλιμης χωρητικότητας της εγκατάστασης.
- Τη διαμόρφωση των απαιτούμενων γενικών και τοπικών κλίσεων για την ορθή εγκατάσταση και αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος συλλογής στραγγισμάτων.
- Την ενίσχυση της προστασίας έναντι της κατακόρυφης διήθησης ρυπογόνων φορτίων προς τα κατώτερα στρώματα.

Για την τοποθέτηση της αργιλικής στρώσης που λειτουργεί ως τεχνητός γεωλογικός φραγμός, απαιτείται η προσεκτική διαμόρφωση του πυθμένα της λεκάνης του Χ.Υ.Τ.Α./Υ, τόσο ως προς τις γεωμετρικές κλίσεις όσο και ως προς την ποιότητα και ομαλότητα της επιφάνειας. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιείται αρχικά απομάκρυνση της επιφανειακής φυτικής γης σε όλη την περιοχή που πρόκειται να στεγανοποιηθεί. Η εκσκαφή εκτελείται σε επαρκές βάθος, ώστε να διασφαλίζεται η πλήρης εξάλειψη ριζικών συστημάτων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν δυσμενώς την ακεραιότητα του στεγανοποιητικού συστήματος.

Πριν από την εκσκαφή της φυτικής στρώσης, προηγείται καθαρισμός της επιφάνειας από ακατάλληλα ή ξένα υλικά, όπως μπάζα, λίθους, βραχώδεις εξάρσεις, δένδρα, θάμνους και λοιπή βλάστηση. Η απομάκρυνση της επιφανειακής εδαφικής στρώσης πραγματοποιείται σε βάθος περίπου 30 cm σε ολόκληρη την προς στεγανοποίηση έκταση. Σε θέσεις όπου παρατηρείται ή εκτιμάται ότι τα ριζικά συστήματα εκτείνονται σε μεγαλύτερο βάθος, η εκσκαφή επεκτείνεται αντίστοιχα, ώστε να αφαιρεθούν πλήρως οι ρίζες. Εάν το φαινόμενο καταλαμβάνει σημαντική επιφάνεια, εφαρμόζεται κατάλληλη χημική καταστολή της βλάστησης, προκειμένου να αποτραπεί μελλοντική αναβλάστηση που ενδέχεται να προκαλέσει τοπικές φθορές στη στεγανοποίηση. Το επιφανειακό έδαφος που απομακρύνεται συλλέγεται, μεταφέρεται και αποθηκεύεται με οργανωμένο τρόπο, ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο, εφόσον πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές, είτε ως υλικό ενδιάμεσης επικάλυψης απορριμμάτων είτε ως υλικό τελικής κάλυψης και αποκατάστασης των κυττάρων του Χ.Υ.Τ.Α./Υ.

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών γενικής εκσκαφής και διαμόρφωσης της λεκάνης διάθεσης, σύμφωνα με τις προβλεπόμενες γεωμετρικές παραμέτρους της μελέτης (κλίσεις πυθμένα και πρανών), ακολουθεί η φάση τεχνικής προετοιμασίας της στρώσης έδρασης. Η φάση αυτή αποτελεί κρίσιμο στάδιο της κατασκευής, καθώς η γεωτεχνική ποιότητα της

υπόβασης επηρεάζει άμεσα τη λειτουργικότητα και τη μακροχρόνια συμπεριφορά του συστήματος στεγανοποίησης.

Η προετοιμασία της υπόβασης περιλαμβάνει:

- τον ακριβή υψομετρικό έλεγχο και την αποκατάσταση των τελικών στάθμων,
- τη διαμόρφωση των απαιτούμενων γενικών και τοπικών κλίσεων,
- την εξάλειψη επιφανειακών ανωμαλιών,
- και τη μηχανική συμπίκνωση του εδαφικού υλικού.

Ο απαιτούμενος βαθμός συμπίκνωσης καθορίζεται σε ποσοστό $\geq 95\%$ της μέγιστης ξηρής πυκνότητας, όπως αυτή προσδιορίζεται μέσω της τροποποιημένης δοκιμής Proctor (Modified Proctor). Η απαίτηση αυτή εφαρμόζεται τόσο στον πυθμένα όσο και στα πρανή της λεκάνης, με στόχο την εξασφάλιση ομοιόμορφης φέρουσας ικανότητας και τον περιορισμό μελλοντικών διαφορικών καθιζήσεων.

Ιδιαίτερη μέριμνα λαμβάνεται κατά τη συμπίκνωση των πρανών, όπου χρησιμοποιούνται κατάλληλα μηχανικά μέσα που επιτρέπουν ελεγχόμενη και επαναλαμβανόμενη διέλευση επί της επιφάνειας, έως την επίτευξη του προβλεπόμενου βαθμού πυκνότητας σε κάθε επιμέρους ζώνη εργασίας.

Η τελική επιφάνεια έδρασης απαιτείται να είναι συνεχής, ομαλή και απαλλαγμένη από χαλαρά ή οργανικά υλικά. Η επάρκεια της συμπίκνωσης τεκμηριώνεται με επιτόπιους ελέγχους πυκνότητας, οι οποίοι εκτελούνται σε τακτική χωρική διάταξη (ενδεικτικά ανά κάναβο 50×50 m), με εφαρμογή της μεθόδου κώνου άμμου ή άλλης ισοδύναμης μεθόδου ελέγχου.

Η στρώση έδρασης εκτείνεται σε ολόκληρη την επιφάνεια που πρόκειται να στεγανοποιηθεί και διαμορφώνεται είτε:

1. με διάστρωση κατάλληλου εδαφικού υλικού και συμπίκνωσή του σε ελάχιστο συμπιεσμένο πάχος 0,20 m άνωθεν του επιπέδου εκσκαφής,
2. με αναμόχλευση και επανασυμπύκνωση του υφιστάμενου εδαφικού σχηματισμού, εφόσον αυτός πληροί τα απαιτούμενα γεωτεχνικά κριτήρια, ώστε να επιτευχθεί ισοδύναμη ανώτερη συμπιεσμένη στρώση πάχους τουλάχιστον 0,20 m.

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά και οι διαδικασίες κατασκευής συμμορφώνονται με τις ισχύουσες Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές και το σχετικό κανονιστικό πλαίσιο.

3.3.2 Επιτόπια σύνδεση στεγανωτικών μεμβρανών

Με την παραλαβή της γεωμεμβράνης στο εργοτάξιο διενεργείται οπτικός και ποιοτικός έλεγχος, προκειμένου να διαπιστωθεί η ακεραιότητα του υλικού. Η μεμβράνη πρέπει να παρουσιάζει ομοιομορφία και να είναι απαλλαγμένη από επιφανειακές ατέλειες, όπως σχισίματα, διατρήσεις, φυσαλίδες, μικρορηγματώσεις ή άλλες ασυνέχειες που ενδέχεται να επηρεάσουν τη στεγανωτική της απόδοση.

Η εγκατάσταση εκτελείται από εξειδικευμένο συνεργείο, με τρόπο ώστε να διατηρείται η επιφάνεια λεία και χωρίς πτυχώσεις μετά την ολοκλήρωση των συγκολλήσεων. Ιδανικά, η διάστρωση πραγματοποιείται άμεσα μετά την παραλαβή. Σε περίπτωση καθυστέρησης (π.χ. λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών), οι ρόλοι αποθηκεύονται σε προστατευμένο χώρο, με μέριμνα έναντι υπερϊώδους ακτινοβολίας και βιολογικών παραγόντων (όπως τρωκτικά).

Πριν από την τοποθέτηση της γεωμεμβράνης προηγείται έλεγχος της συμπίκνωσης και της γεωμετρικής ακρίβειας του αργιλικού υποστρώματος. Η διάστρωση της μεμβράνης ακολουθεί άμεσα την ολοκλήρωση της αργιλικής στρώσης, ώστε να περιορίζεται ο κίνδυνος διάβρωσης ή δημιουργίας αυλακώσεων λόγω βροχόπτωσης (Εικόνα 8).

Η μεταφορά πραγματοποιείται σε τυποποιημένους ρόλους, οι οποίοι εκφορτώνονται με κατάλληλο ανυψωτικό εξοπλισμό (π.χ. γερανοβραχίονα ή εκσκαφέα). Η ανάρτηση και μετακίνηση γίνεται αποκλειστικά με ιμάντες, ενώ απαγορεύεται η χρήση συρματόσχοινων ή αλυσίδων. Δεν επιτρέπεται η κυκλοφορία μηχανημάτων επί της μεμβράνης πριν την τοποθέτηση της προβλεπόμενης προστατευτικής στρώσης.

Η επένδυση της λεκάνης δεν περιορίζεται σε λωρίδες σταθερού πλάτους, αλλά απαιτεί και ειδικά διαμορφωμένα τεμάχια (π.χ. τραπεζοειδή ή τριγωνικά), ώστε να προσαρμόζεται στη γεωμετρία του έργου. Για τον λόγο αυτό εκπονείται σχέδιο κοπής και διάταξης, στο οποίο κάθε τεμάχιο αριθμείται και διαστασιολογείται πριν τη συγκόλληση.

Η ανάπτυξη των ρόλων πραγματοποιείται από τη στέψη προς τον πυθμένα, με στόχο την αποφυγή δημιουργίας πτυχώσεων που ενδέχεται να προκαλέσουν συγκέντρωση τάσεων. Η εκτύλιξη επιτυγχάνεται είτε μέσω μηχανικού βαρούλκου είτε με ελεγχόμενη κίνηση λόγω βαρύτητας. Κατά τη διάρκεια των εργασιών λαμβάνονται μέτρα προσωρινής επιφόρτισης των φύλλων για την αποτροπή μετακίνησης από τον άνεμο. Οι εργασίες εκτελούνται κατά προτίμηση υπό συνθήκες άπνοιας.

Συνιστάται η άμεση κάλυψη της γεωμεμβράνης με προστατευτική στρώση μετά την ολοκλήρωση της τοποθέτησης.

Η σύνδεση των επιμέρους φύλλων πραγματοποιείται με θερμοκόλληση διπλής ραφής, μέθοδο κατάλληλη για γραμμικές ενώσεις μεγάλου μήκους. Χρησιμοποιείται

αυτοκινούμενος εξοπλισμός με ελεγχόμενη θερμοκρασία και πίεση, ο οποίος επιτρέπει την ταυτόχρονη τήξη και συμπίεση των επικαλυπτόμενων άκρων. Μεταξύ των δύο ραφών διαμορφώνεται ελεγχόμενο διάκενο (περίπου 5 mm), ώστε να καθίσταται δυνατός ο ποιοτικός έλεγχος της συγκόλλησης.

Η θερμοκρασία συγκόλλησης κυμαίνεται ενδεικτικά μεταξύ 300–400°C, ανάλογα με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για μικρού μήκους ενώσεις, γωνίες ή σημεία λεπτομερειών εφαρμόζεται μέθοδος extrusion welding, κατόπιν κατάλληλης προετοιμασίας των επιφανειών (τρόχισμα και προθέρμανση).

Πριν από την έναρξη των εργασιών, καθώς και σε καθημερινή βάση, πραγματοποιούνται δοκιμαστικές συγκολλήσεις για τη ρύθμιση του εξοπλισμού. Επαναληπτικές δοκιμές απαιτούνται σε περίπτωση μεταβολής θερμοκρασίας ή υγρασίας. Τα στοιχεία κάθε δοκιμής καταγράφονται, με αναφορά στον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό.

Ο έλεγχος των ραφών διενεργείται παράλληλα με την πρόοδο των εργασιών και όχι εκ των υστέρων. Οι επιφάνειες σύνδεσης πρέπει να είναι καθαρές και χωρίς μηχανικές φθορές. Οι ελεύθερες ακμές εκτός ζώνης συγκόλλησης δεν αποκόπτονται.

Τυχόν τοπικές βλάβες αποκαθίστανται άμεσα με επικάλυψη τεμαχίου γεωμεμβράνης επαρκούς πλάτους (τουλάχιστον 0,20 m). Στις περιπτώσεις επισκευών ή δύσκολων σημείων εφαρμόζεται θερμική συγκόλληση με προσθήκη υλικού ίδιας πρώτης ύλης.

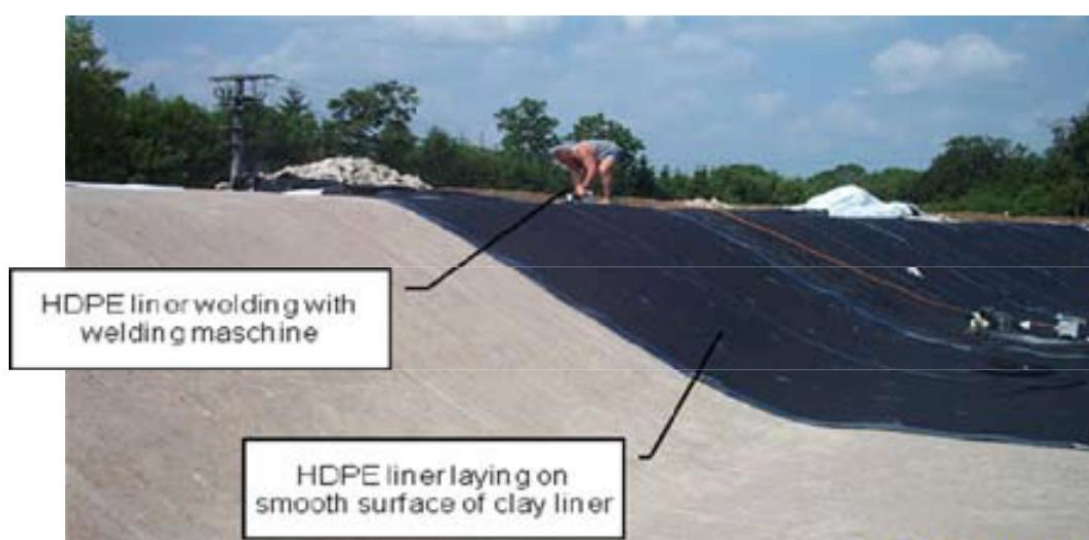
Οι συσκευές συγκόλλησης πρέπει να επιτρέπουν ρύθμιση θερμοκρασίας και πίεσης, προσαρμοσμένη στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Δεν επιτρέπεται συγκόλληση υπό βροχόπτωση ή εκτός του επιτρεπόμενου θερμοκρασιακού εύρους που καθορίζει ο κατασκευαστής (ενδεικτικά 10–25°C ως βέλτιστο πεδίο). Απαγορεύεται η χρήση φλόγας ή εύφλεκτων αερίων.

Σε περιπτώσεις σύνδεσης γεωμεμβράνης με αγωγούς HDPE, εφαρμόζεται θερμική συγκόλληση με προσθήκη υλικού και χρήση ενδιάμεσων τεμαχίων που αγκυρώνονται μηχανικά στον σωλήνα.

Όταν απαιτείται επαφή με στοιχεία σκυροδέματος (π.χ. φρεάτια), τοποθετούνται κατά τη φάση σκυροδέτησης ειδικά τεμάχια HDPE στον ξυλότυπο, ώστε να εξασφαλίζεται μεταγενέστερη θερμική συγκόλληση της μεμβράνης με ασφαλή τρόπο (Εικόνα 9).



Εικόνα 8. Τοποθέτηση της αργλικής στρώσης (Πηγή: *National Solid Waste Management Commission (NSWMC) & Japan International Cooperation Agency (JICA), 2010*).



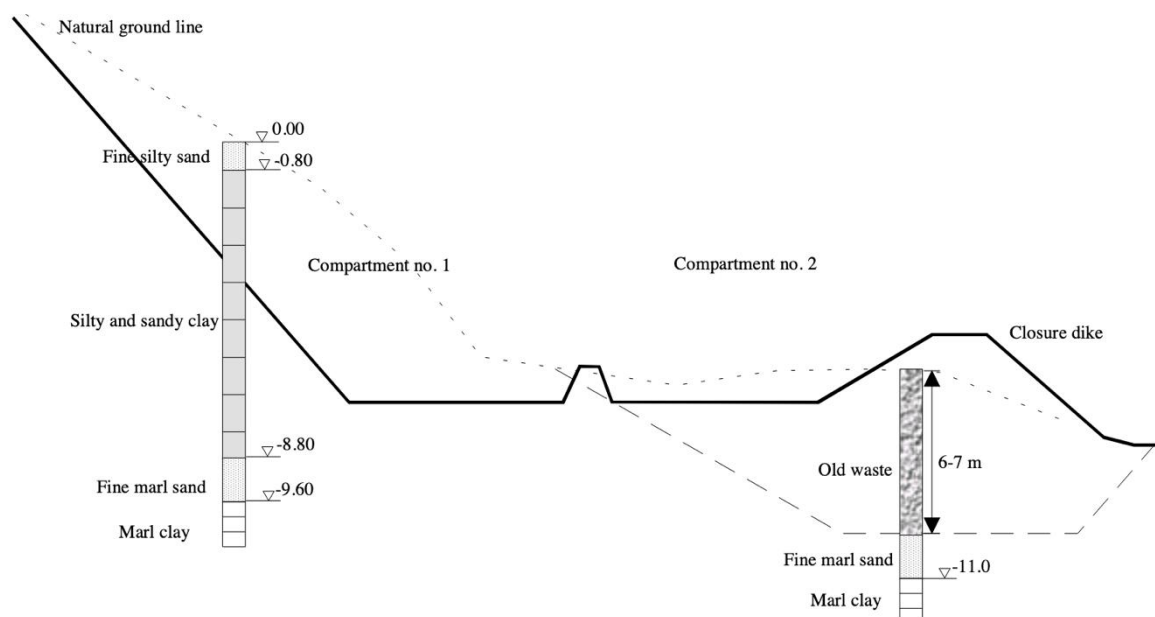
Εικόνα 9. Τοποθέτηση μεμβράνης HDPE (Πηγή: *National Solid Waste Management Commission (NSWMC) & Japan International Cooperation Agency (JICA), 2010*).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΔΙΕΘΝΗ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΥΤΑ

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει επιλεγμένα διεθνή παραδείγματα σχεδιασμού και στεγανοποίησης Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), με στόχο την αξιολόγηση των τεχνολογικών και περιβαλλοντικών διαφορών μεταξύ διαφόρων γεωγραφικών περιοχών. Η ανάλυση επικεντρώνεται σε έργα που εφαρμόζουν σύγχρονες και καινοτόμες τεχνικές στεγανοποίησης, όπως η χρήση γεωσυνθετικών υλικών, ενισχυμένων αργιλικών φραγμάτων και συστημάτων αποστράγγισης, προκειμένου να καταδειχθεί η αποτελεσματικότητα αυτών των λύσεων σε διαφορετικά εδαφικά και περιβαλλοντικά πλαίσια. Η συγκριτική προσέγγιση επιτρέπει την ανάδειξη βέλτιστων πρακτικών και την εξαγωγή συμπερασμάτων που μπορούν να αξιοποιηθούν σε μελλοντικά έργα Χ.Υ.Τ.Α.

4.1 ΔΗΜΟΤΙΚΟΣ ΧΥΤΑ ΤΗΣ SIGHIȘOARA ΣΤΗ ΡΟΥΜΑΝΙΑ

Η πόλη της Sighișoara, η οποία βρίσκεται στην κεντρική περιοχή της Τρανσυλβανίας, αριθμεί περίπου 40.000 κατοίκους. Μέχρι το 1998, η διάθεση των απορριμμάτων πραγματοποιούνταν σε έναν ανεξέλεγκτο χώρο απόθεσης έκτασης περίπου 3,8 ha (38.000 m²), ο οποίος βρισκόταν σε απόσταση περίπου 1,5 km από τον αστικό ιστό, σε εγκαταλελειμμένη παλαιά κοίτη του ποταμού Târnava Mare. Η απόθεση απορριμμάτων στον χώρο αυτό διήρκεσε περίπου 15–16 χρόνια, με το πάχος των απορριμματικών στρώσεων να κυμαίνεται από 3 έως 8 μέτρα. Λαμβάνοντας υπόψη τους τοπικούς περιορισμούς, επιλέχθηκε ως καταλληλότερη λύση η επέκταση και η υπερύψωση του υφιστάμενου απορριμματικού όγκου, με στόχο την εξασφάλιση της λειτουργίας του χώρου για τουλάχιστον δύο ακόμη δεκαετίες (Σχήμα 16).



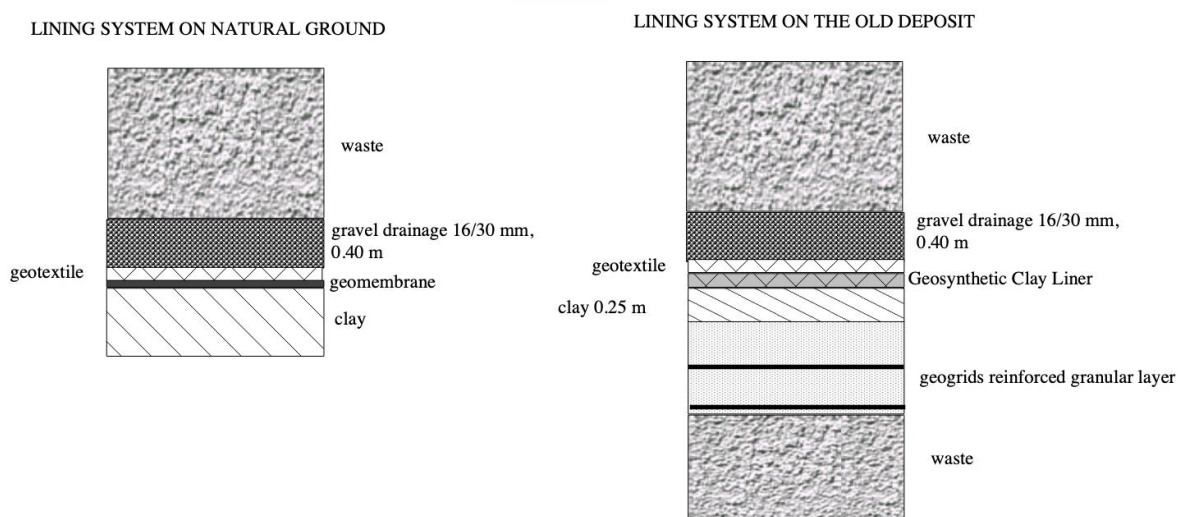
Σχήμα 16. Ο δημοτικός χώρος υγειονομικής ταφής της πόλης Sighisoara (Πηγή: Feodorov et al., 2000).

Ο νέος χώρος υγειονομικής ταφής, ο οποίος βρίσκεται σήμερα σε λειτουργία, καταλαμβάνει συνολική επιφάνεια περίπου 60.000 m². Από την έκταση αυτή, τα 17.000 m² αποτελούν επέκταση του παλαιού χώρου απόθεσης, ενώ τα υπόλοιπα 43.000 m² αναπτύχθηκαν σε φυσικό έδαφος. Η συνολική χωρητικότητα του Χ.Υ.Τ.Α. εκτιμάται σε περίπου 232.000 m³. Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής χαρακτηρίζεται από στρώμα λεπτόκοκκης ιλυώδους άμμου πάχους 0,8–1,0 m, το οποίο ακολουθείται από στρώμα ιλυωδών αμμωδών αργίλων πάχους περίπου 8 m. Κάτω από αυτό εντοπίζεται ένα λεπτό στρώμα μαργαϊκής άμμου, στο οποίο βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας, ενώ σε βάθος μεγαλύτερο των 9,60 m απαντάται στρώμα μαργαϊκής αργίλου.

Για την κατασκευή του συστήματος στεγανοποίησης του πυθμένα εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές τεχνικές λύσεις, ανάλογα με την περιοχή κατασκευής: μία για το τμήμα του Χ.Υ.Τ.Α. που αναπτύχθηκε σε φυσικό έδαφος και μία για το τμήμα που κατασκευάστηκε επάνω στον παλαιό χώρο απόθεσης (Σχήμα 17). Στην περιοχή που θεμελιώθηκε σε φυσικό έδαφος εγκαταστάθηκε γεωμεμβράνη πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) πάχους 1,5 mm επάνω στο φυσικό αργιλικό υπόστρωμα, το οποίο λειτουργεί ως φυσικό φράγμα στεγανοποίησης. Πάνω από τη γεωμεμβράνη τοποθετήθηκε προστατευτικό μη υφαντό γεώφασμα βάρους 1500 g/m², ενώ ακολούθησε στρώση αποστράγγισης από χαλίκι κοκκομετρίας 16/30 mm και πάχους 50 cm. Αντίθετα, στην περιοχή που αναπτύχθηκε επάνω στον παλαιό χώρο απόθεσης, κρίθηκε απαραίτητη η ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του υποστρώματος. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ενισχυμένη κοκκώδης στρώση με την τοποθέτηση δύο στρώσεων γεωπλεγμάτων (geogrids). Πάνω από τη στρώση αυτή

διαμορφώθηκε συμπυκνωμένο αργιλικό στρώμα πάχους περίπου 25 cm, το οποίο καλύφθηκε από γεωσυνθετικό αργιλικό φράγμα (Geosynthetic Clay Liner – GCL), αποτελούμενο από γεωμεμβράνη HDPE και στρώση μπεντονίτη. Το γεωσυνθετικό αργιλικό φράγμα τοποθετήθηκε με την πλευρά του μπεντονίτη προς το έδαφος, ενώ η γεωμεμβράνη του προστατεύθηκε από πιθανές μηχανικές καταπονήσεις και διάτρηση με τη χρήση παχέος μη υφαντού γεωφάσματος υψηλού βάρους (Feodorov et al., 2000).

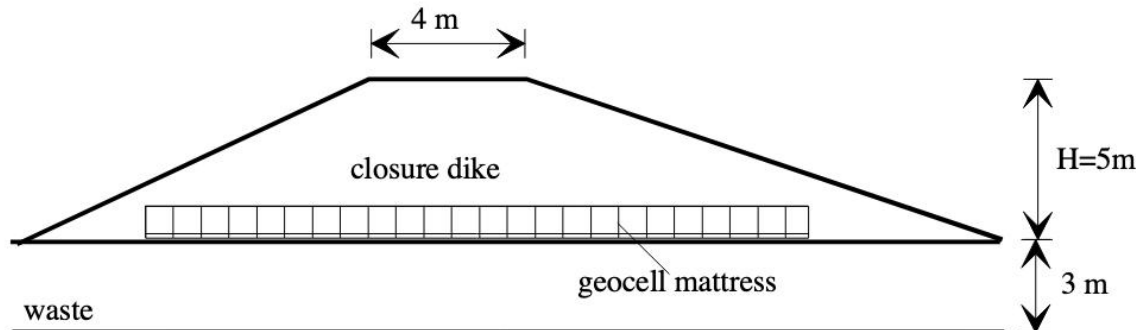
Η αργιλική στρώση πάχους 25 cm τοποθετήθηκε με σκοπό να αποτραπεί η διείσδυση και μεταφορά του μπεντονίτη του συστήματος GCL προς την ενισχυμένη κοκκώδη στρώση. Η αποστραγγιστική στρώση αποτελείται από στρογγυλεμένο χαλίκι κοκκομετρίας 16/30 mm με πάχος 40 cm, καθώς και από σωληνώσεις HDPE, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή και τη μεταφορά των στραγγισμάτων προς τη γειτονική δεξαμενή αποθήκευσης. Οι παραπάνω τεχνικές λύσεις προέκυψαν κατόπιν συγκριτικής αξιολόγησης μεταξύ συστήματος συμπυκνωμένου αργιλικού φράγματος (compacted clay liner) και συστήματος στεγανοποίησης με γεωμεμβράνη (geomembrane liner). Η χρήση της επιτόπιας αργίλου δεν μπορούσε να ικανοποιήσει τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές, γεγονός που οδήγησε στην επιλογή της εναλλακτικής λύσης (Manea et al., 1998).



Σχήμα 17. Συστήματα στεγανοποίησης και αποστράγγισης που εφαρμόστηκαν στον δημοτικό Χ.Υ.Τ.Α. της Sighișoara (Πηγή: Feodorov et al., 2000).

Η περιοχή του παλαιού χώρου απόθεσης παρουσίαζε υψηλή συμπίεστικότητα σε βάθος περίπου 4 m, λόγω της σχετικά πρόσφατης απόθεσης των απορριμμάτων, με αποτέλεσμα η φέρουσα ικανότητα του εδάφους να μην επαρκεί για την υποστήριξη του περιμετρικού

αναχώματος. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος εφαρμόστηκε η κατασκευή στρώσης γεωκυψελών (geocell mattress) με γεωπλέγματα (geogrids) (Σχήμα 18).



Σχήμα 18. Περιμετρικό ανάχωμα σε γεωκυψελώδη στρώση του Χ.Υ.Τ.Α. Sighișoara (Πηγή: Feodorov et al., 2000).

Οι συμβατικές λύσεις, όπως η αφαίρεση των υπαρχόντων απορριμμάτων και αντικατάστασή τους με κατάλληλο υλικό, ή ο σταδιακός χρόνος εκτέλεσης για την επίτευξη φυσικής συμπίκνωσης των απορριμμάτων, κρίθηκαν μη πρακτικές και οικονομικά ασύμφορες.

Η λύση της στρώσης γεωκυψελών προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα:

- Δημιουργεί μια σταθερή πλατφόρμα, διασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή των πιέσεων στο έδαφος.
- Δεν απαιτούνται εκσκαφές ή προπαρασκευαστικές εργασίες.
- Εξοικονομούνται οι πρόσθετες δαπάνες που σχετίζονται με προσωρινή κατάληψη του χώρου.
- Η εγκατάσταση μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμη και υπό βροχή ή χαμηλές θερμοκρασίες.
- Η εκτέλεση είναι ταχύτερη σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους.
- Δεν απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ή τεχνολογία.
- Η άμεση τοποθέτηση των γεωκυψελών πάνω στα υπάρχοντα απορρίμματα επιτρέπει καλό αερισμό του παραγόμενου βιοαερίου.

Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελεί την πρώτη εγκατάσταση στρώσης γεωκυψελών στη Ρουμανία και έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην πρακτική λειτουργία του Χ.Υ.Τ.Α.

4.2 ΔΗΜΟΤΙΚΟΣ ΧΥΤΑ ΣΤΟ ΒΕΛΓΙΟ

Ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων που βρίσκεται νότια των Βρυξελλών στο Βέλγιο αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σύγχρονου σχεδιασμού με εκτεταμένη χρήση γεωσυνθετικών υλικών (Εικόνα 10). Ο χώρος ταφής αφορά απόβλητα μη επικίνδυνου χαρακτήρα με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη και κατασκευάστηκε μέσω εκσκαφής σε βάθος περίπου 35 m εντός αμμώδους γεωλογικού σχηματισμού. Η παρουσία εκτεταμένου στρώματος άμμου (Brussels Sand) αποτέλεσε σημαντική γεωτεχνική πρόκληση, καθώς υπήρχε αυξημένος κίνδυνος μεταφοράς ρύπων προς τον υπόγειο υδροφόρο. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός του έργου επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός ιδιαίτερα αξιόπιστου συστήματος στεγανοποίησης, το οποίο διασφαλίζει την πλήρη απομόνωση των αποβλήτων από το περιβάλλον. Η κατασκευή βασίστηκε σε προηγούμενη εμπειρία από αντίστοιχες εγκαταστάσεις, οι οποίες είχαν ήδη λειτουργήσει για χρονικό διάστημα άνω των δέκα ετών υπό παρόμοιες συνθήκες. Η μακροχρόνια παρακολούθηση των εγκαταστάσεων αυτών, μέσω ανάλυσης των στραγγισμάτων και μετρήσεων με πιεζόμετρα, έδειξε ότι δεν παρατηρήθηκαν διαρροές, γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα των εφαρμοζόμενων τεχνικών στεγανοποίησης (Meerleer et al., 2000).

Η διατομή των βασικών στρώσεων του συστήματος στεγανοποίησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 11. Ο πυθμένας του χώρου υγειονομικής ταφής διαμορφώνεται σε στάθμη περίπου 1 m υψηλότερη από τον υδροφόρο ορίζοντα, προκειμένου να περιοριστεί ο κίνδυνος άμεσης υδραυλικής επικοινωνίας. Στη βάση της κατασκευής τοποθετήθηκε αρχικά στρώση χαλικιού κοκκομετρίας 20–32 mm, η οποία εδράζεται σε γεώφασμα (a) με σκοπό την αποτροπή της διείσδυσης του χαλικιού προς το υποκείμενο έδαφος. Επάνω από τη στρώση αυτή εγκαταστάθηκε δεύτερο γεώφασμα διαχωρισμού (b), ενώ ακολούθως διαμορφώθηκε στρώση συμπυκνωμένης αργίλου πάχους 600 mm (Εικόνα 11). Η εν λόγω διάταξη, με τη στρώση χαλικιού εγκιβωτισμένη μεταξύ δύο γεωφασμάτων (a και b), εξασφαλίζει αφενός τη δημιουργία σταθερής και ομοιόμορφης βάσης, διευκολύνοντας τη συμπίκνωση της υπερκείμενης αργίλου, και αφετέρου λειτουργεί ως τριχοειδές φράγμα, περιορίζοντας τη μεταφορά υγρασίας και λεπτόκοκκων σωματιδίων από το υπέδαφος. Το γεώφασμα (b), με χαρακτηριστικό άνοιγμα πόρων O90 μικρότερο των 50 μm , συμβάλλει στην αποτροπή της καθοδικής μετακίνησης των λεπτόκοκκων σωματιδίων της αργίλου και στην αποφυγή απόφραξης της αποστραγγιστικής στρώσης. Πάνω από την αργιλική στρώση τοποθετήθηκε γεωμεμβράνη HDPE πάχους 2 mm, με λεία επιφάνεια και στις δύο όψεις, η οποία αποτελεί το κύριο στεγανωτικό στοιχείο του συστήματος. Η σύνδεση των φύλλων πραγματοποιήθηκε

με τη μέθοδο με θερμοκόλληση διπλής ραφής (hot wedge double welding), ενώ η ποιότητα και η στεγανότητα των ραφών ελέγχθηκαν με δοκιμές πίεσης αέρα, ηλεκτρικού σύρματος ή θαλάμου κενού, ανάλογα με τις συνθήκες εφαρμογής (Meerleer et al., 2000).

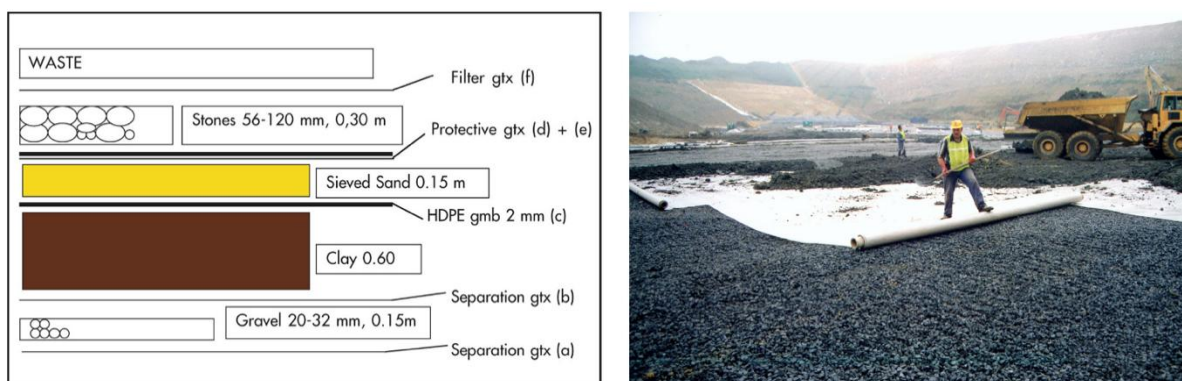


Εικόνα 10. Γενική άποψη των βασικών στρώσεων κατά την τοποθέτηση γεωφασμάτων Terralys (Πηγή: Meerleer et al., 2000).

Για την προστασία της γεωμεμβράνης από μηχανικές καταπονήσεις, τοποθετήθηκε στρώση κοσκινισμένης άμμου πάχους 150 mm, σε συνδυασμό με δύο γεωφάσματα: ένα μη υφαντό γεωφάσμα βάρους 300 g/m² (d) και ένα υφαντό γεωφάσμα υψηλής αντοχής (e), με εφελκυστική αντοχή 60 kN/m (Εικόνα 11). Πριν από την τελική επιλογή των υλικών, πραγματοποιήθηκε ειδική δοκιμή κυλίνδρου, κατά την οποία προσομοιώθηκε φορτίο απορριμμάτων ύψους 50 m επί του συστήματος γεωφασμάτων, της άμμου και της γεωμεμβράνης, σύμφωνα με το πρότυπο prEN 00189055 («Protection Efficiency»). Τα αποτελέσματα της δοκιμής κατέδειξαν ότι ο συνδυασμός υφαντού και μη υφαντού γεωφάσματος, σε συνδυασμό με τη στρώση άμμου, παρέχει αποτελεσματική προστασία της γεωμεμβράνης, διασφαλίζοντας τη μακροχρόνια ακεραιότητα και λειτουργικότητα του συστήματος στεγανοποίησης. Για μελλοντικές εφαρμογές, προτάθηκε η αντικατάσταση του συνδυασμού στρώσης άμμου και γεωφασμάτων από ένα ενιαίο γεωφάσμα υψηλής αντοχής. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς, εκτός από την αύξηση του διαθέσιμου όγκου για την απόθεση απορριμμάτων, συμβάλλει και στη μείωση της υδραυλικής κλίσης που αναπτύσσεται επί της γεωμεμβράνης και του αποστραγγιστικού συστήματος κατά περίπου 150 mm.

Ακολούθως, διαμορφώθηκε στρώση λίθων κοκκομετρίας 56–120 mm, επί της οποίας τοποθετήθηκε υφαντό γεωφάσμα (f), με χαρακτηριστικό άνοιγμα πόρων O90 της τάξης των 300 μm (Εικόνα 11). Ο ρόλος του γεωφάσματος είναι η αποτροπή της διείσδυσης λεπτόκοκκων σωματιδίων εντός της λιθώδους στρώσης κατά τη φάση πλήρωσης του ΧΥΤΑ.

Οι χρησιμοποιούμενοι λίθοι διαθέτουν υψηλή μηχανική αντοχή και είναι ικανοί να παραλάβουν φορτία απορριμμάτων ύψους έως και 50 m χωρίς να υφίστανται θραύση. Επιπλέον, δεν πραγματοποιήθηκε η χρήση υλικών που περιέχουν κιμωλία ή γενικότερα ασβεστολιθικών συστατικών επιρρεπών σε αποσάθρωση, καθώς η επαφή τους με στραγγίσματα χαμηλού pH κατά τα προχωρημένα στάδια λειτουργίας του ΧΥΤΑ ενδέχεται να οδηγήσει σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους (Meerleer et al., 2000).



Εικόνα 11. Διατομή των βασικών κοκκωδών στρώσεων και τοποθέτηση του γεωφάσματος διαχωρισμού (Πηγή: Meerleer et al., 2000).

Τα στραγγίσματα που παράγονται από τον απορριμματικό όγκο απομακρύνονται με τη δράση της βαρύτητας μέσω αποστραγγιστικής στρώσης πάχους 300 mm και συλλέγονται σε κεντρικό σημείο. Στη συνέχεια, αντλούνται προς ειδικά διαμορφωμένη μονάδα επεξεργασίας εντός της εγκατάστασης. Πριν από την τελική διάθεσή τους στον ποταμό Hain, τα επεξεργασμένα στραγγίσματα συμμορφώνονται με τα ισχύοντα περιβαλλοντικά πρότυπα της περιφέρειας της Βαλλονίας (Meerleer et al., 2000).

4.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΕΘΝΩΝ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Η συγκριτική ανάλυση των δύο παραπάνω διεθνών παραδειγμάτων, του δημοτικού Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων της Sighișoara στη Ρουμανία και του σύγχρονου Χ.Υ.Τ.Α. νότια των Βρυξελλών στο Βέλγιο, αναδεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες σχετίζονται τόσο με τον σχεδιασμό όσο και με τις εφαρμοζόμενες τεχνικές στεγανοποίησης. Οφείλει να τονιστεί ότι οι τεχνικές στεγανοποίησης σχετίζονται άμεσα με τις εκάστοτε τοπικές γεωλογικές συνθήκες, το επίπεδο τεχνολογικής ανάπτυξης καθώς και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Αρχικά, όσον αφορά τις γεωλογικές-γεωτεχνικές συνθήκες, ο Χ.Υ.Τ.Α. της Sighișoara αναπτύχθηκε σε ορισμένο βαθμό επάνω σε προϋπάρχοντα απορριμματικό όγκο, γεγονός το οποίο δημιούργησε προβλήματα μειωμένης φέρουσας

ικανότητας του εδάφους και αυξημένης συμπίεστότητας. Αντίθετα, στην περίπτωση του Χ.Υ.Τ.Α. του Βελγίου, το κύριο πρόβλημα σχετίζεται με την παρουσία εκτεταμένου αμμώδους σχηματισμού (Brussels Sand), ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλή διαπερατότητα και ως εκ τούτου αυξημένο κίνδυνο ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα. Συνεπώς, στην περίπτωση του πρώτου έργου δόθηκε προτεραιοποιήθηκε η ενίσχυση της μηχανικής σταθερότητας του υποστρώματος, ενώ στο δεύτερο έργο δόθηκε έμφαση στη διασφάλιση της ακεραιότητας του συστήματος στεγανοποίησης έναντι των πιθανών υδραυλικών διαρροών.

Σχετικά με τα συστήματα στεγανοποίησης, και στις δύο περιπτώσεις εφαρμόζονται σύνθετα συστήματα που συνδυάζουν τόσο φυσικά όσο και γεωσυνθετικά υλικά. Ωστόσο, στον Χ.Υ.Τ.Α. της Sighișoara παρατηρείται διαφοροποίηση του σχεδιασμού ανάλογα με το υπόβαθρο, με χρήση φυσικού αργιλικού φράγματος σε συνδυασμό με την γεωμεμβράνη HDPE στο φυσικό έδαφος, και εφαρμογή γεωσυνθετικού αργιλικού φράγματος (GCL) επάνω από τον παλαιό χώρο απόθεσης (Geosynthetic Clay Liner: HDPE & μπεντονίτης). Αντίθετα, στον Χ.Υ.Τ.Α. του Βελγίου πραγματοποιήθηκε μια περισσότερο εξελιγμένη και ομοιόμορφη πολυστρωματική διάταξη, η οποία περιλαμβάνει στρώσεις γεωφασμάτων, συμπυκνωμένης αργίλου και γεωμεμβράνης HDPE αυξημένου πάχους (2 mm). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκτεταμένη χρήση γεωσυνθετικών υλικών στο έργο του Βελγίου, όπου αυτά επιτελούν πολλαπλές λειτουργίες, όπως στεγανοποίηση (geotextile a & b; Εικόνα 20), προστασία (sand & geotextiles), διαχωρισμό (HDPE) και αποστράγγιση. Αντιθέτως, στην περίπτωση της Sighișoara, μολονότι γίνεται χρήση γεωσυνθετικών, η έμφαση δίνεται περισσότερο στη συνδυασμένη λειτουργία των φυσικών υλικών (αργίλου) και των βασικών γεωσυνθετικών στοιχείων. Συνοψίζοντας, η συγκριτική ανάλυση καθιστά σαφές ότι, παρότι και τα δύο έργα επιτυγχάνουν την ασφαλή διάθεση απορριμμάτων και την προστασία του περιβάλλοντος, διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς το επίπεδο τεχνολογικής εφαρμογής και την πολυπλοκότητα των συστημάτων στεγανοποίησης. Η χρήση γεωσυνθετικών υλικών αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για τη βελτίωση της απόδοσης των Χ.Υ.Τ.Α., ιδιαίτερα σε περιπτώσεις δυσμενών γεωλογικών συνθηκών, ενώ η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής λύσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα τοπικά δεδομένα και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΟΥ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (Χ.Υ.Τ.Α.) ΑΡΝΑΙΑΣ

Στον Δήμο Αριστοτέλη (Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας) έχει κατασκευαστεί και λειτουργεί Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), καθώς και τα συνοδά έργα υποδομής, σύμφωνα με το ισχύον εθνικό νομοθετικό πλαίσιο. Αναλυτικότερα, ο εν λόγω Χ.Υ.Τ.Α. χωροθετείται στη θέση «Κόνιαρη 1», η οποία υπάγεται διοικητικά στην Δημοτική Ενότητα Αρναίας. Η συνολική έκταση του χώρου ανέρχεται σε περίπου 334 στρέμματα, εκ των οποίων περίπου 56 στρέμματα αποτελούν τη διαμορφωμένη λεκάνη του χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Ο χώρος έχει τη δυνατότητα να δεχθεί περίπου 795.000 m³ απορριμμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των υλικών επικάλυψης.

Γεωλογικά, η ευρύτερη περιοχή εντάσσεται στην Περιοδοπική μάζα και συγκροτείται από λιθολογικούς σχηματισμούς που ανήκουν στις ενότητες των Σερβομακεδονικών και του Βερτίσκου. Το γεωλογικό υπόβαθρο στη θέση του έργου αποτελείται από τον γρανίτη της Αρναίας, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως διμαρμαρυγιακός και βιοτιτικός, με σύσταση που κυμαίνεται από λευκοκρατική έως απλιτική. Παρουσιάζει σχιστότητα με κλίση προς τα νοτιοδυτικά και περιλαμβάνει χαλαζιακές φλέβες πάχους έως 20 cm. Κατά τόπους εμφανίζεται έντονα αποσαθρωμένος και διαβρωμένος, με μανδύα αποσάθρωσης πάχους έως 3 m, ο οποίος αποτελείται κυρίως από λεπτόκοκκη έως μεσόκοκκη άμμο. Οι κλίσεις των πρηνών στην περιοχή δεν είναι έντονες, καθώς κυμαίνονται περίπου μεταξύ 3,5% και 17%, γεγονός που τα καθιστά σταθερά και ασφαλή έναντι φαινομένων ολίσθησης. Επιπλέον, το γεωλογικό υπόβαθρο χαρακτηρίζεται συνολικά ως ημιπερατό έως πρακτικά αδιαπέραστο, ιδιαίτερα στα τμήματα όπου δεν έχει επηρεαστεί από τεκτονικές διεργασίες ή αποσάθρωση, ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας εκτιμάται ότι βρίσκεται σε σχετικά μεγάλο βάθος. Η συγκεκριμένη θέση εντάσσεται σε υδρολογική λεκάνη ρέματος τρίτης τάξης, η οποία λειτουργεί ως κλειστό υδρολογικό σύστημα, διευκολύνοντας τον έλεγχο και την απομόνωσή της, ενώ η λεκάνη αυτή αποστραγγίζεται μέσω του ρέματος Περάσματα, του οποίου η κύρια κοίτη βρίσκεται σε απόσταση περίπου 2,8 km από τη θέση του Χ.Υ.Τ.Α. και καταλήγει στη λίμνη Βόλβη, που αποτελεί τον τελικό αποδέκτη, σε απόσταση άνω των 12 km. Από σεισμοτεκτονική άποψη, η περιοχή κατατάσσεται σε ζώνη μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας (Ζώνη II), όπως και το σύνολο της Δημοτικής Ενότητας Αρναίας (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

5.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το σύστημα στεγανοποίησης συμμορφώθηκε πλήρως με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο (Κ.Υ.Α.114218/97, ΦΕΚ 1016/Β/17.11.97 και Κ.Υ.Α. Η.Π. 29407/3508/2002, ΦΕΚ 1572/Β/16.12.02), καθώς και με τους εγκεκριμένους περιβαλλοντικούς όρους. Ο σχεδιασμός του συστήματος στεγανοποίησης του πυθμένα και των πρανών του Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) της Δημοτικής Ενότητας Αρναίας είχε ως κύριο στόχο να ελαχιστοποιείται, έως και να μηδενίζεται πρακτικά, η διαφυγή στραγγισμάτων, καθώς και η διαρροή ή μετακίνηση βιοαερίου από τη βάση και τα πλευρικά τοιχώματα του χώρου, καθώς επίσης να εξασφαλίζεται η αποτελεσματική συλλογή τόσο των στραγγισμάτων όσο και του παραγόμενου βιοαερίου, διασφαλίζοντας την ορθή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

Με βάση τα προαναφερθέντα στοιχεία, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με το σύστημα στεγανοποίησης του Χ.Υ.Τ.Α. της 4ης Διαχειριστικής Ενότητας Χαλκιδικής. Συγκεκριμένα, απαιτήθηκε η εφαρμογή σύνθετου συστήματος στεγανοποίησης σε όλη την έκταση του χώρου, τόσο στον πυθμένα όσο και στα πρανή της λεκάνης, όπου η κατώτερη στρώση στεγανοποίησης θα αποτελούνταν από τεχνητό γεωλογικό φραγμό, ο οποίος θα διαμορφωνόταν από αργιλικό υλικό με ελάχιστο πάχος 0,5 m, ενώ η ανώτερη στρώση θα περιλάμβανε συνθετική γεωμεμβράνη ελάχιστου πάχους 2,0 mm, η οποία θα συνέβαλε καθοριστικά στη διασφάλιση της στεγανότητας του συστήματος. Για πρανή με κλίση ίση ή ηπιότερη του 1:3 (υ:ο), θα εφαρμοζόταν υποχρεωτικά η χρήση φυσικών υλικών, όπως τεχνητός γεωλογικός φραγμός πάχους τουλάχιστον 50 cm και αποστραγγιστική στρώση αντίστοιχου πάχους, σύμφωνα με τις προβλεπόμενες προδιαγραφές, χωρίς να επιτρέπεται η αντικατάστασή τους από γεωσυνθετικά υλικά. Επιπλέον, όσον αφορά τη διαπερατότητα του τεχνητού γεωλογικού φραγμού, διαπιστώθηκε ότι, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας και τα δεδομένα της μελέτης, ο φραγμός που θα τοποθετούνταν θα ήταν ισοδύναμος με συμπακνωμένη αργιλική στρώση πάχους τουλάχιστον 1 m και συντελεστή υδροπερατότητας $K < 1,0 \times 10^{-9}$ m/s .

5.1.1 Δομική διάταξη των στρώσεων στεγανοποίησης

Πριν από την εγκατάσταση των συστημάτων στεγανοποίησης του Χ.Υ.Τ.Α., κρίθηκε απαραίτητη η κατάλληλη διαμόρφωση της επιφάνειας που προέκυψε μετά τις εργασίες εκσκαφής, με σκοπό την προετοιμασία της επιφάνειας έδρασης του τεχνητού γεωλογικού φραγμού, καθώς και η διαμόρφωση των κατάλληλων κλίσεων και η ενίσχυση της

προστασίας έναντι της κατακόρυφης μετακίνησης ρύπων. Ο πυθμένας της λεκάνης διαμορφώθηκε τόσο ως προς τις απαιτούμενες κλίσεις όσο και ως προς την ποιότητα της επιφανειακής του στρώσης. Οι παραπάνω εργασίες υλοποιήθηκαν με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, όπως προωθητές γαιών, ισοπεδωτές γαιών και συμπιεστές. Επιπλέον, κατά τη διαμόρφωση της λεκάνης, αποφεύχθηκε η δημιουργία απότομων πρανών, προς αποφυγή της δημιουργίας προβλημάτων τόσο στην κατασκευή και ευστάθεια του τεχνητού γεωλογικού φραγμού όσο και στην τοποθέτηση και αγκύρωση των γεωμεμβρανών και γεωφασμάτων (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η αφαίρεση της επιφανειακής φυτικής γης σε όλη την έκταση που επρόκειτο να στεγανοποιηθεί, σε τέτοιο βαθμό ώστε να διασφαλιστεί ότι στο υπόβαθρο δεν παρέμεναν υπολείμματα ριζικού συστήματος, τα οποία θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα του συστήματος στεγανοποίησης. Πριν από την απομάκρυνση της φυτικής στρώσης, προηγήθηκε ο καθαρισμός της επιφάνειας από άχρηστα υλικά και βλάστηση, και στη συνέχεια αφαιρέθηκε επιφανειακό στρώμα εδάφους πάχους τουλάχιστον 30 cm σε όλη την προς στεγανοποίηση περιοχή. Στις θέσεις όπου διαπιστώθηκε ή υπήρξε ένδειξη παρουσίας ριζικών συστημάτων σε μεγαλύτερο βάθος, πραγματοποιήθηκε πρόσθετη τοπική εκσκαφή για την πλήρη απομάκρυνσή τους, ώστε να αποτραπεί η μελλοντική ανάπτυξη φυτών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν φθορές στο σύστημα στεγανοποίησης. Η αφαιρεθείσα φυτική γη, εφόσον κρίθηκε κατάλληλη, συλλέχθηκε, μεταφέρθηκε και αποθηκεύτηκε με τρόπο που επέτρεπε τη μελλοντική επαναχρησιμοποίησή της, είτε ως υλικό επικάλυψης των απορριμμάτων είτε ως υλικό τελικής αποκατάστασης των κυττάρων και του χώρου υγειονομικής ταφής (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

Κατόπιν της ολοκλήρωσης των απαραίτητων χωματουργικών εργασιών (εκσκαφές και επιχώσεις), που πραγματοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση της λεκάνης του Χ.Υ.Τ.Α. σύμφωνα με τον σχεδιασμό (κλίσεις πρανών, πυθμένας κ.λπ.), ακολούθησε η προετοιμασία της υπόβασης, η οποία αποτέλεσε κρίσιμο στάδιο για την επιτυχή τοποθέτηση του τεχνητού γεωλογικού φραγμού και των υπόλοιπων στρώσεων στεγανοποίησης και αποστράγγισης. Η προετοιμασία αυτή περιλάμβανε τη λεπτομερή διαμόρφωση της επιφάνειας της υπόβασης, τόσο ως προς την επιπεδότητα όσο και ως προς τις απαιτούμενες γενικές και ειδικές κλίσεις, καθώς και τη συμπίκνωσή της. Η συμπίκνωση επιτεύχθηκε σε βαθμό τουλάχιστον 95% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας κατά Proctor (τροποποιημένη δοκιμή), τόσο στον πυθμένα όσο και στα πρανή της λεκάνης. Η τελική επιφάνεια της υπόβασης διαμορφώθηκε λεία, ομαλή και επαρκώς συμπτυκνωμένη, ενώ οι έλεγχοι συμπίκνωσης πραγματοποιήθηκαν κατ’

ελάχιστον σε κάναβο 50×50 m, με τη μέθοδο κώνου άμμου. Η στρώση της υπόβασης κάλυψε ολόκληρη την επιφάνεια προς στεγανοποίηση και κατασκευάστηκε είτε από κατάλληλα γαιώδη υλικά, συμπυκνωμένου πάχους τουλάχιστον 20 cm πάνω από το επίπεδο της αρχικής εκσκαφής. Τέλος, για τα τεχνικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων υλικών εφαρμόστηκαν οι προβλέψεις των ισχυουσών Ελληνικών Τεχνικών Προδιαγραφών (ΕΤΕΠ), όπως αυτές καθορίζονται στο ΦΕΚ Β 2221/30-07-2012 (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-05-03-02).

Η κατασκευή του τεχνητού γεωλογικού φραγμού, ο οποίος τοποθετήθηκε τόσο στον πυθμένα όσο και στα πρηνή της λεκάνης του Χ.Υ.Τ.Α., επάνω στην προδιαμορφωμένη στρώση υπόβασης, περιελάμβανε την ομοιογενή, λεία και απαλλαγμένη από αδρομερή υλικά, με μέγιστη διάσταση κόκκων έως 32 mm, διαμόρφωσή του. Οι κλίσεις της στρώσης διαμορφώθηκαν κατάλληλα, με ελάχιστη εγκάρσια κλίση της τάξης του 3% και κατά μήκος κλίση τουλάχιστον 1%, προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή αποστράγγιση, ενώ το συνολικό πάχος του τεχνητού γεωλογικού φραγμού καθορίστηκε κατ' ελάχιστο σε 50 cm, και η διαπερατότητα του ικανοποιούσε την απαίτηση $k = 5 \times 10^{-10}$ m/s. Η διάστρωση πραγματοποιήθηκε σε διαδοχικές στρώσεις, οι οποίες επίσης συμπυκνώθηκαν έως ο βαθμός συμπίκνωσης να είναι τουλάχιστον $DPr = 95\%$ (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

Επί του τεχνητού γεωλογικού φραγμού τοποθετήθηκε γεωμεμβράνη από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), ελάχιστου πάχους 2,0 mm, με τραχεία επιφάνεια και στις δύο πλευρές, προκειμένου να αυξηθεί η τριβή μεταξύ της μεμβράνης και των γειτονικών στρώσεων, ενισχύοντας κατά τον τρόπο αυτό τη συνολική ευστάθεια του συστήματος (Εικόνα 12). Ακολούθως, τοποθετήθηκε γεώφασμα προστασίας επάνω από τη γεωμεμβράνη. Ο συνδυασμός της γεωμεμβράνης με τον τεχνητό γεωλογικό φραγμό συνέθεσε ένα σύστημα σύνθετης στεγάνωσης, το οποίο διασφάλισε την αποτελεσματική απομόνωση του υποβάθρου καθ' όλη τη διάρκεια παραγωγής στραγγισμάτων. Για την προστασία της γεωμεμβράνης από πιθανές μηχανικές φθορές λόγω επαφής με τα χονδρόκοκκα υλικά της αποστραγγιστικής στρώσης, εφαρμόστηκε επικάλυψη με γεώφασμα από πολυπροπυλένιο (PP), συνεχούς νήματος, μη υφαντού τύπου (nonwoven), με επιφανειακή πυκνότητα 600 g/m^2 . Επάνω από το προστατευτικό γεώφασμα διαστρώθηκε στρώση άμμου πάχους 10 cm, η οποία αποτελούνταν από καθαρή άμμο, κατάλληλης κοκκομετρικής διαβάθμισης (μέγιστη διάμετρος κόκκου 8 mm) και χαμηλής περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3).



Εικόνα 12. Προετοιμασία υπεδάφους πριν από τη διάστρωση της αργιλικής στρώσης.

Η συλλογή και η απομάκρυνση των στραγγισμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω της κατασκευής αποστραγγιστικής στρώσης (με υδροπερατότητα, μεγαλύτερη από 1×10^{-3} m/s), εντός της οποίας εγκαταστάθηκε το δίκτυο αγωγών συλλογής. Οι αγωγοί τοποθετήθηκαν εντός στρώσης καθαρού χαλικιού κοκκομετρικής διαβάθμισης 16/32, το οποίο πληρούσε τις προδιαγραφές του προτύπου DIN 52144. Το συνολικό πάχος της αποστραγγιστικής στρώσης καθορίστηκε κατ' ελάχιστο σε 0,50 m, σε συμφωνία με την ισχύουσα νομοθεσία (ΚΥΑ 114218/1997 και Η.Π. 29407/3508). Για την αποτροπή της διείσδυσης λεπτόκοκκων απορριμματικών υλικών εντός της αποστραγγιστικής στρώσης από χαλίκι, τοποθετήθηκε επάνω από αυτή γεωφάσμα διαχωρισμού από πολυπροπυλένιο (PP), συνεχούς νήματος (CF), μη υφαντού τύπου (nonwoven), με επιφανειακή πυκνότητα 200 g/m². Παράλληλα, τα γεωσυνθετικά στοιχεία του συστήματος στεγανοποίησης αγκυρώθηκαν σε ειδικά διαμορφωμένη περιμετρική τάφρο διαστάσεων 0,60 × 0,90 m, η οποία κατασκευάστηκε στην περιμετρική ζώνη του έργου, στον πυθμένα των πρανών, καθώς και στη στέψη του εσωτερικού αναχώματος της λεκάνης. Τέλος, η αγκύρωση των γεωσυνθετικών στοιχείων του συστήματος στεγανοποίησης πραγματοποιήθηκε μέσω ειδικά διαμορφωμένης τάφρου διαστάσεων 1,00 × 0,80 m, η οποία κατασκευάστηκε στην περιμετρική ζώνη του χώρου, καθώς και σε ενδεχόμενους αναβαθμούς της λεκάνης και στο μετωπικό ανάχωμα (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

5.2 ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΦΡΑΓΜΟΣ

Ο τεχνητός γεωλογικός φραγμός κατασκευάστηκε με ελάχιστο πάχος 50 cm, υπερκαλύπτοντας τις απαιτήσεις της ισχύουσας νομοθεσίας. Η διάστρωση του πραγματοποιήθηκε σε δύο διαδοχικές στρώσεις συμπτυκνωμένου πάχους 25 cm έκαστη. Τα υλικά κατασκευής ήταν αργιλοαμμώδη. Η συμπίκνωση του υλικού πραγματοποιήθηκε τόσο στον πυθμένα όσο και στα πρηνή της λεκάνης, ακολουθώντας τις προβλεπόμενες κλίσεις, με επαναλαμβανόμενες διελεύσεις συμπτυκνωτήρα. Ως επαρκής αριθμός διελεύσεων των συμπτυκνωτών θεωρήθηκε εκείνος κατά τον οποίο η επιφάνεια της στρώσης δεν παρουσίαζε εμφανείς υποχωρήσεις. Η τελική επιφάνεια διαμορφώθηκε λεία και χωρίς ρωγμές ή ανωμαλίες. Για τη βελτιστοποίηση της συμπίκνωσης, η υγρασία του υλικού ρυθμίστηκε σε επίπεδα κατά 2–3% υψηλότερα από τη βέλτιστη (Wopt), ενώ επιτεύχθηκε βαθμός συμπίκνωσης τουλάχιστον 95% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας κατά Proctor. Το τελικό συμπτυκνωμένο στρώμα είχε πάχος 50 cm, συντελεστή διαπερατότητας $k = 5 \times 10^{-10}$ m/s, πυκνότητα Proctor $\geq 95\%$ και ελεγχόμενη υγρασία. Το μέγιστο επιτρεπτό μέγεθος κόκκου του υλικού ορίστηκε στα 32 mm. Σε περιπτώσεις μεγαλύτερων συσσωματωμάτων εφαρμόστηκε θραύση και κοσκίνιση, ώστε να αποφευχθεί η αύξηση της υδροπερατότητας του φραγμού (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

Ο τρόπος κατασκευής του τεχνητού γεωλογικού φραγμού καθορίστηκε βάσει των αποτελεσμάτων δοκιμαστικού επιχώματος (διαστάσεων $30 \times 30 \times 0,5$ m), το οποίο διαμορφώθηκε πριν την έναρξη των κύριων εργασιών και είχε, όπου αξιολογήθηκαν ο κατάλληλος συνδυασμός μηχανημάτων, η μέθοδος εφαρμογής, ο βαθμός συμπίκνωσης και ο συντελεστής υδροπερατότητας, υπό πραγματικές συνθήκες. Η διάστρωση στον πυθμένα και στα πρηνή πραγματοποιήθηκε σε στρώσεις παράλληλες προς τον πυθμένα, ώστε να εξασφαλίζεται η αποτελεσματική λειτουργία των μηχανημάτων και η ομοιόμορφη συμπίκνωση (Εικόνα 13). Η κατασκευή του φραγμού πραγματοποιήθηκε σε διαδοχικές στρώσεις, με την πρώτη να διαστρώνεται πάνω στη στρώση υπόβασης και να συμπτυκνώνεται σε τελικό πάχος 25 cm, η δεύτερη στρώση ήταν αντίστοιχου πάχους με την πρώτη. Στην τελική επιφάνεια του φραγμού εφαρμόστηκε αρχικά προσωρινή στρώση συμπιεσμένου πάχους 15 cm, η οποία στη συνέχεια αφαιρέθηκε, διαμορφώνοντας τελικό πάχος φραγμού (50 cm).



Εικόνα 13. Διάστρωση της αργιλικής στρώσης.

Η επιφάνεια της στεγανοποιητικής στρώσης διαμορφώθηκε ούτως ώστε να είναι ομοιογενής και ομαλή, χωρίς σημαντικές ανωμαλίες, ενώ οι αποκλίσεις της δεν υπερέβαιναν τα ± 5 cm, όπως ελέγχθηκαν με 4-μετρο κανόνα (πήχη). Η συμπίκνωση του υλικού πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες υγρασίας ελαφρώς αυξημένης (κατά 2–3%) σε σχέση με τη βέλτιστη υγρασία, σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή Proctor, ενώ ως επαρκής αριθμός διελεύσεων των συμπτυκνωτών θεωρήθηκε εκείνος κατά τον οποίο η επιφάνεια της στρώσης δεν παρουσίαζε περαιτέρω καθίζηση μεγαλύτερη του 1,0 cm. Κατά τη διάρκεια των εργασιών δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην διαταραχθεί η υποκείμενη στρώση υπόβασης. Οι εργασίες κατασκευής της αργιλικής στεγανοποιητικής στρώσης διακόπτονταν όταν επικρατούσαν δυσμενείς καιρικές συνθήκες, όπως έντονες βροχοπτώσεις ή παγετός, καθώς και σε περιπτώσεις που υπήρχε κίνδυνος δημιουργίας ρηγματώσεων, αποπλύσεων ή ασυνεχειών στο υλικό. Επιπλέον, ο προγραμματισμός των εργασιών έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η παρατεταμένη έκθεση της συμπτυκνωμένης επιφάνειας στην ηλιακή ακτινοβολία. Μέχρι την επικάλυψή της, η επιφάνεια διαβρεχόταν περιοδικά, προκειμένου να αποτραπεί η εμφάνιση ρηγματώσεων (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

Η επίτευξη της απαιτούμενης τιμής υδροπερατότητας του τεχνητού γεωλογικού φραγμού μπορούσε να επιτευχθεί είτε αποκλειστικά με τη χρήση κατάλληλων αργιλικών υλικών από επιλεγμένο δανειοθάλαμο είτε με συνδυασμένη χρήση μπεντονίτη (δεν κατέστη αναγκαία

στη συγκεκριμένη περίπτωση), καθώς ο μπεντονίτης, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του, συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση, δηλαδή στη μείωση, του συντελεστή υδροπερατότητας του φραγμού, όταν αναμιγνύεται με τα αργιλικά υλικά σε μικρά ποσοστά της τάξης του 1–5%. Οι απαιτήσεις καταλληλότητας του αργιλικού υλικού καθώς και του μπετονίτη, σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία, καθορίστηκαν ως εξής (Πίνακας 5 & Πίνακας 6):

Πίνακας 5. Προδιαγραφές καταλληλότητας αργιλικών υλικών.

Ιδιότητα	Απαιτούμενες Τιμές
Σημείο υδαρότητας (LL)	$20\% \leq LL \leq 40\%$, κατά προτίμηση 25–30%
Δείκτης πλαστικότητας (PI)	$10\% < PI < 25\%$
Περιεκτικότητα σε άργιλο (ΠΑ)	ΠΑ > 15%, κατά προτίμηση 18–25%
Ποσοστό λεπτόκοκκων (<2 μm)	>20%
Δραστικότητα (PI των κόκκων <2 μm)	>0,30
Περιεκτικότητα σε χαλίκι	$\leq 10\%$ για κόκκους <16 mm, 0% για >16 mm
Μέγιστη διάσταση σβώλου	32 mm (αν υπάρχουν μεγαλύτεροι σβώλοι, απαιτείται μηχανική θραύση πριν τη συμύκνωση)
Οργανικό υλικό (κατά βάρος)	<5%
Ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3 , κατά βάρος)	<20%
Συντελεστής υδροπερατότητας (σύμφωνα με δοκιμή Proctor)	$k \leq 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$

Πίνακας 6. Προδιαγραφές καταλληλότητας μπεντονίτη.

Ιδιότητα	Μονάδα	Τιμή
Υγρασία	%	10-12
Ειδικό βάρος	g/cm^3	2,65
Φαινόμενο ειδικό βάρος	g/l	800
Ανάλυση λεπτότητας (ξηρή κοσκίνιση)		
- Διερχόμενο από 100 Mesh	% min	8%
- Διερχόμενο από 200 Mesh	% min	5%

Ιδιότητα	Μονάδα	Τιμή
Απορρόφηση κυανού μεθυλενίου	mg/g	360 ± 30
Ιοντοεναλλακτική ικανότητα	meq/100 g	80 ± 10
Ικανότητα απορρόφησης νερού (Enslin-Neff, 24h, DIN 18132)	%	500
Βαθμός Διογκώσεως (Swelling Index, min m 1/2g)	—	22
Όριο υδαρότητας (Liquid Limit, DIN 18122)	%	450
Όριο πλαστικότητας (Plastic Limit, DIN 18122)	%	45
Δείκτης πλαστικότητας (Plasticity Index)	%	405

5.3 ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΜΒΡΑΝΗ

Για τη δημιουργία ενός αξιόπιστου στεγανού υποβάθρου στον χώρο του ΧΥΤΑ και την ενίσχυση της συνολικής περιβαλλοντικής προστασίας, προβλέφθηκε, παράλληλα με τον τεχνητό γεωλογικό φραγμό, η τοποθέτηση συνθετικής γεωμεμβράνης από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE). Η μεμβράνη στεγανοποίησης όφειλε να πληροί συγκεκριμένες τεχνικές προδιαγραφές, όπως αυτές καθορίζονται από τα ισχύοντα πρότυπα (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-05-03-04), προκειμένου να διασφαλίζεται η απαιτούμενη αντοχή, λειτουργικότητα και μακροχρόνια απόδοσή της στο σύστημα στεγανοποίησης του ΧΥΤΑ. Η χρησιμοποιούμενη γεωμεμβράνη, ελάχιστου πάχους 2,0 mm και τραχεία, κάλυπτε τις απαιτήσεις που παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 7:

Πίνακας 7. Βασικά χαρακτηριστικά γεωμεμβράνης HDPE.

Ιδιότητα	Μέθοδος	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Εφελκυστική αντοχή στη θραύση	EN ISO 527-1	>26	N/mm ²
Εφελκυστική αντοχή στη διαρροή	EN ISO 527-1	>15	N/mm ²
Επιμήκυνση στη θραύση	EN ISO 527-1	>700	%
Επιμήκυνση στη διαρροή	EN ISO 527-1	>15	%
Αντοχή σε σχίσσιμο	EN ISO 527-1	>130	N/mm ²
Αντοχή σε διάτρηση	EN ISO 527-1	>300	N/mm ²
Αντοχή σε στατική διάτρηση (CBR)	EN ISO 12236	>5000	N

Ιδιότητα	Μέθοδος	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Πολυαξονική επιμήκυνση σε θραύση	EN ISO 527-1	>15	%

Η γεωμεμβράνη παραδόθηκε στο έργο σε ρόλους, ενώ οι διαστάσεις αυτής ήταν 150 m σε μήκος και πλάτος μεγαλύτερο από 5 m. Οι ρολοί μεμβράνης που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο είχαν προέλθει από εργοστάσιο πιστοποιημένης παραγωγής σύμφωνα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN ISO 9001, φέρνοντας τη σήμανση CE σύμφωνα με την Οδηγία 93/68/EE και συνοδεύονταν από 50ετή εγγύηση ποιότητας. Τα χαρακτηριστικά των υλικών που εγκαταστάθηκαν περιλάμβαναν:

- Αμελητέα υδροπερατότητα
- Αντοχή σε φυσική καταπόνηση
- Αντοχή σε χημική προσβολή
- Αντοχή σε βιολογική προσβολή
- Αντοχή σε χρονική γήρανση άνω των 50 ετών
- Ευκολία διαχείρισης (μεταφορά, προσκόμιση στον τόπο του έργου)
- Ευκολία διάστρωσης
- Ευκολία και αξιοπιστία στα σημεία των ενώσεων
- Ευκολία στον έλεγχο αξιοπιστίας
- Αντίσταση στις ρίζες και στα τρωκτικά

Όλα τα παραπάνω εξασφάλισαν τη σωστή εφαρμογή και μακροχρόνια λειτουργικότητα της γεωμεμβράνης στο σύστημα στεγανοποίησης.

5.3.1 Τοποθέτηση γεωμεμβράνης HDPE

Η τοποθέτηση των φύλλων της γεωμεμβράνης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια μηχανήματος που ξετύλιγε τα ρολά, υπό κατάλληλες καιρικές συνθήκες, με θερμοκρασία περιβάλλοντος μεταξύ +5°C και +35°C. Κατά τη διάστρωση, διασφαλίστηκε η επικάλυψη των γειτονικών φύλλων, ακολουθώντας την κλίση του πυθμένα της λεκάνης. Κατόπιν της διάστρωσης, η γεωμεμβράνη καλύφθηκε αμέσως για να προστατευτεί από την υπεριώδη ακτινοβολία, τον άνεμο και τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, ενώ για την αποφυγή ολίσθησης κατά μήκος των πρανών υπό το βάρος της μεμβράνης, της υπερκείμενης αποστραγγιστικής στρώσης και των απορριμμάτων, η μεμβράνη αγκυρώθηκε στη στέψη των πρανών σε ειδικές τάφρους αγκύρωσης, όπου στερεώθηκαν και τα υπόλοιπα γεωσυνθετικά του συστήματος στεγανοποίησης. Στις περιπτώσεις όπου κατά την τοποθέτηση, σε ορισμένα

φύλλα γεωμεμβράνης είχε εγκλωβιστεί αέρας μεταξύ της μεμβράνης και του υποκείμενου αργιλικού φραγμού, διανοίχθηκαν οπές περίπου 5 cm σε κάθε φύλλο στα υψηλότερα σημεία των πρανών, οι οποίες καλύφθηκαν προσωρινά από άλλο τεμάχιο μεμβράνης για να μην εισέρχεται νερό και σε τελικό στάδιο καλύφθηκαν με συγκόλληση δια της μεθόδου της εξέλασης (extrusion welding).

5.3.2 Συγκόλληση γεωμεμβράνης HDPE

Η συγκόλληση των φύλλων της γεωμεμβράνης πραγματοποιήθηκε μέσω ειδικού μηχανήματος, το οποίο ένωσε τη μεμβράνη με δύο παράλληλες ραφές αφήνοντας ενδιάμεσο κενό, στο οποίο εφαρμόστηκε αέρας για τον έλεγχο τυχόν διαρροών (θερμοκόλληση διπλής ραφής). Η συγκεκριμένη μέθοδος κρίθηκε κατάλληλη για συνδέσεις μεγάλου μήκους και εκτελούνταν με αυτοκινούμενο εξοπλισμό, εξοπλισμένο με κεφαλή αυτόγενούς συγκόλλησης και κυλίνδρους συμπίεσης της ζώνης σύνδεσης των μεμβρανών. Με την ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας, τα επικαλυπτόμενα φύλλα της μεμβράνης τήκονταν τοπικά και ταυτόχρονα συμπίεζονταν μεταξύ τους, ενώ η αλληλοεπικάλυψη των μεμβρανών εξασφάλιζε τη δυνατότητα διενέργειας ελέγχων εφελκυστικής αντοχής και αποκόλλησης (Εικόνα 14).



Εικόνα 14. Συγκόλληση γεωμεμβράνης με χρήση συσκευής διπλής ραφής Leister GEOSTAR G5.

Η θερμοκρασία επαφής των προς συγκόλληση μεμβρανών κυμαινόταν από 300 έως 400°C, ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες κατά τη φάση συγκόλλησης. Στη

ζώνη σύνδεσης και μεταξύ των δύο ραφών δημιουργούνται κατάλληλο διάκενο πλάτους 5 mm για τον ποιοτικό έλεγχο της συγκόλλησης. Στις περιοχές όπου οι ραφές ήταν ευθύγραμμες και μεγάλου μήκους, χρησιμοποιούνταν αυτοκινούμενος εξοπλισμός θερμοκόλλησης με ελεγχόμενη θερμοκρασία και πίεση. Για ραφές μικρού μήκους, γωνίες, λεπτομέρειες και επισκευές, η συγκόλληση γινόταν μετά από κατάλληλη προετοιμασία των επιφανειών (τρόχισμα και προθέρμανση), με εφαρμογή ρευστού συγκολλητικού υλικού (θερμαινόμενο υλικό σε ράβδους – κορδόνι συγκόλλησης). Οφείλει να τονιστεί ότι πριν από την έναρξη και κατά τη διάρκεια των εργασιών συγκόλλησης πραγματοποιούνταν καθημερινά δοκιμαστικές συγκολλήσεις, ώστε να καθίσταται δυνατή η ρύθμιση του εξοπλισμού. Δοκιμές εκτελούνταν επίσης σε περίπτωση σημαντικών μεταβολών των καιρικών συνθηκών, όπως υγρασία και θερμοκρασία (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

Οι περιοχές σύνδεσης με θερμοκόλληση διατηρούνταν καθαρές και απαλλαγμένες από τραυματισμούς ή ατέλειες, ενώ οι ελεύθερες άκρες των μεμβρανών εκτός της ζώνης συγκόλλησης δεν αποκόπτονταν. Τυχόν φθορές της μεμβράνης αποκαθίσταντο άμεσα με επικόλληση ταινίας πλάτους τουλάχιστον 20 cm. Στις επισκευές, καθώς και σε απολήξεις και δυσπρόσιτα σημεία, εφαρμοζόταν θερμική συγκόλληση με προσθήκη συγκολλητικού υλικού ίδιας πρώτης ύλης με τη μεμβράνη (μέθοδος extrusion welding). Στις περιπτώσεις επισκευών, το πλάτος επικάλυψης των προς συγκόλληση φύλλων ήταν τουλάχιστον 10 cm. Οι χρησιμοποιούμενες συσκευές συγκόλλησης παρείχαν δυνατότητα ρύθμισης και ελέγχου των παραμέτρων συγκόλλησης, όπως θερμοκρασία και επιφανειακή πίεση, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Όπου απαιτούνταν σύνδεση μεμβράνης HDPE με αγωγό HDPE, εφαρμόζονταν θερμοκόλληση με συγκολλητικό υλικό σε μορφή ρευστού κορδονιού, με ταυτόχρονη χρήση τεμαχίων μεμβράνης που στερεώνονταν στον σωλήνα με σφιγκτήρες. Η μέθοδος θερμοκόλλησης με ρευστό κορδόνι εφαρμόστηκε και σε κάθε απαιτούμενη επισκευή. (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

5.3.3 Στρώσεις προστασίας γεωμεμβράνης HDPE

Σε όλη την έκταση της λεκάνης, πάνω από τη γεωμεμβράνη τοποθετήθηκε γεωφάσμα και ακολούθως στρώση άμμου, πάχους 0,10 m, για την προστασία αυτής από αιχμηρά αντικείμενα κατά την κατασκευή, καθώς και από το αμμοχάλικο της ζώνης αποστράγγισης, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν φθορές ή διάτρηση. Παράλληλα, το γεωφάσμα ενίσχυσε την ευστάθεια της κατασκευής, βελτίωσε τη διατμητική αντοχή, συνέβαλε στην πρόληψη διαφορικών καθιζήσεων και υποστήριξε την αποστραγγιστική ικανότητα της

υπερκείμενης στρώσης. Το γεωφάσμα που χρησιμοποιήθηκε είχε κατ' ελάχιστο τα εξής χαρακτηριστικά:

- Βάρος = 600 g/m² κατά EN ISO 9864
- Εφελκυστική αντοχή (για θερμοκολλήματα) (kN/m): 15 με μέγιστη απόκλιση: 10% κατά ΕΛΟΤ EN ISO 10319
- Εφελκυστική αντοχή (για βελονωτά) (kN/m): 12 με μέγιστη απόκλιση: 10% κατά ΕΛΟΤ EN ISO 10319
- Επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο (%): Κατά μήκος (MD): 100 & Κατά πλάτος (CD): 40 με μέγιστη απόκλιση: 30% κατά ΕΛΟΤ EN ISO 10319
- Αντοχή σε στατική διάτρηση (CBR test) (N): 2000 με μέγιστη απόκλιση: 10% κατά ΕΛΟΤ EN ISO 12236
- Δυναμική διάτρηση (πτώση κώνου) (mm): 25 με μέγιστη απόκλιση: 15% κατά ΕΛΟΤ EN ISO 13433
- Χαρακτηριστικό μέγεθος πόρων O₉₀ (μm): 100 με μέγιστη απόκλιση: 30% κατά ΕΛΟΤ EN ISO 12956
- Διαμήκης διαπερατότητα (m²/s): 5×10^{-6} με μέγιστη απόκλιση: 30% κατά ΕΛΟΤ EN ISO 12958
- Εγκάρσια διαπερατότητα [l/(m²·s)]: 90 με μέγιστη απόκλιση: 30% κατά ΕΛΟΤ EN ISO 11058

Η διάστρωση των φύλλων του γεωφάσματος εκτελέστηκε με προσοχή επάνω στη γεωμεμβράνη, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία αναδιπλώσεων (Εικόνα 15). Σε όλες τις επιφάνειες εφαρμόστηκε θερμοσυγκόλληση των λωρίδων του γεωφάσματος. Σημειώνεται ότι όταν το γεωφάσμα παρουσιάζει παραμένουσα αντοχή, μετά από δοκιμές αντοχής σε περιβαλλοντικούς παράγοντες (ΕΛΟΤ EN 12224), τουλάχιστον ίση με το 20% της ονομαστικής αντοχής, ο επιτρεπόμενος χρόνος έκθεσης στο ύπαιθρο (σε υπεριώδη ακτινοβολία UV) μπορεί να φτάσει έως και τον έναν μήνα (παραμένουσα αντοχή 80%).



Εικόνα 15. Τοποθέτηση γεωφάσματος.

Η άνω στρώση προστασίας της γεωμεμβράνης κατασκευάστηκε με τη διάστρωση άμμου πάνω από το γεώφασμα προστασίας, σε όλα τα σημεία, ώστε να εξασφαλιστεί πλήρης κάλυψή του (Εικόνα 16). Η στρώση αυτή είχε πάχος 0,10 m και αποτελούνταν από υλικό χαμηλής περιεκτικότητας σε CaCO_3 , με διάμετρο κόκκων μικρότερη ή ίση των 8 mm. Κατά τη διάστρωση της άμμου αποτίθεντο αρχικά μικρές ποσότητες υλικού, σχηματίζοντας στρώση επαρκούς πάχους στα σημεία της στεγανοποιημένης επιφάνειας. Στη συνέχεια, η διάστρωση προχωρούσε σταδιακά, με τρόπο ώστε τα μηχανήματα να κινούνταν πάντοτε πάνω σε ήδη διαστρωμένο υλικό, αποφεύγοντας την άμεση επαφή με τα υποκείμενα στρώματα. Σε περιπτώσεις όπου προκαλούνταν φθορά στη γεωμεμβράνη ή στο γεώφασμα, εφαρμόζονταν οι προβλεπόμενες διαδικασίες αποκατάστασης, σύμφωνα με τις σχετικές προδιαγραφές για τα γεωσυνθετικά υλικά. Η εγγύς περιοχή εκατέρωθεν του πρωτεύοντος δικτύου συλλογής στραγγισμάτων δεν καλύφθηκε με άμμο, προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανότητα έμφραξης των αγωγών (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).



Εικόνα 16. Διάστρωση άμμου προστασίας.

5.4 ΣΤΡΩΣΗ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ

Πάνω από την ανώτερη στρώση προστασίας της μεμβράνης κατασκευάστηκε η στρώση αποστράγγισης, πάχους 0,5 m και υδροπερατότητας K τουλάχιστον 1×10^{-3} m/s. Η στρώση αποτελούνταν από χαλίκι, το οποίο ήταν καθαρό από λεπτόκοκκα υλικά. Το στραγγιστικό φίλτρο είχε μέγεθος κόκκων 16–32 mm και παρουσίαζε ανθεκτικότητα σε προσβολή από στραγγίσματα και στις αναπτυσσόμενες πιέσεις, χωρίς οργανικές ουσίες και με το μικρότερο δυνατό ποσοστό ανθρακικών. Σκοπός της στρώσης αποστράγγισης ήταν η συλλογή και η απομάκρυνση των στραγγισμάτων προς το σύστημα στραγγιστηρίων, η ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής τους εντός του Χ.Υ.Τ.Α., καθώς και η μείωση του ύψους των στραγγισμάτων πάνω από τη στρώση στεγανοποίησης.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού αποστράγγισης και η διαδοχή των στρώσεων διαφορετικής διαβάθμισης διαμορφώθηκαν κατά τρόπο ώστε να αποφεύγεται τόσο η επιχωμάτωση/έμφραξη της αποστραγγιστικής στρώσης και των οπών των αγωγών, όσο και η είσοδος κόκκων στους αγωγούς αποστράγγισης. Παράλληλα, εξασφαλίστηκε ότι οι κόκκοι δεν προκαλούσαν φθορές στη μεμβράνη λόγω αιχμηρών ακμών, ενώ αποφεύχθηκε και η απόφραξη της στρώσης από στερεά υπολείμματα των στραγγισμάτων. Η κατασκευή της

αποστραγγιστικής στρώσης πραγματοποιήθηκε με τρόπο ώστε να μην προκληθούν βλάβες ή παραμορφώσεις/μετατοπίσεις στο σύστημα στεγανοποίησης και στη στρώση προστασίας της μεμβράνης, ενώ για τις τεχνικές προδιαγραφές των υλικών και τις εργασίες κατασκευής τηρήθηκαν όσα προβλέπονταν στις Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-08-03-02-00). Για τη συλλογή των στραγγισμάτων τοποθετήθηκε στον πυθμένα της λεκάνης, εντός της στρώσης αποστράγγισης, δίκτυο συλλεκτήριων αγωγών, μέσω των οποίων τα στραγγίσματα οδηγούνταν με βαρύτητα προς το χαμηλότερο σημείο της λεκάνης και στη συνέχεια κατευθύνονταν προς την εγκατάσταση επεξεργασίας στραγγισμάτων (Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A., 2013).

Τέλος, σε όλη την έκταση του Χ.Υ.Τ.Α. τοποθετήθηκε, πάνω από την χαλικώδη στρώση αποστράγγισης, γεώφασμα διαχωρισμού, με σκοπό την αποφυγή έμφραξης της αποστραγγιστικής στρώσης καθώς και των αγωγών αποστράγγισης από λεπτόκοκκα υλικά ή απορρίμματα. Το γεώφασμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν από πολυπροπυλένιο (PP), συνεχούς νήματος (CF), μη υφαντό, με ειδικό βάρος 200 g/m², ενώ η τοποθέτησή του πραγματοποιήθηκε σταδιακά και παράλληλα με τη διάστρωση των απορριμμάτων στη λεκάνη απόθεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη διερεύνηση των σύγχρονων τεχνικών στεγανοποίησης Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.), με έμφαση στη χρήση γεωσυνθετικών υλικών και στη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογικών προσεγγίσεων. Η στεγανοποίηση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την περιβαλλοντικά ασφαλή λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α., καθώς διασφαλίζει την αποτροπή διαρροής στραγγισμάτων και την προστασία των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. Η εξέλιξη των τεχνικών στεγανοποίησης έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση σύνθετων συστημάτων, τα οποία συνδυάζουν φυσικά υλικά, όπως η άργιλος, με γεωσυνθετικά στοιχεία, όπως οι γεωμεμβράνες και οι γεωσυνθετικοί αργιλικοί φραγμοί (GCLs), προσφέροντας αυξημένη στεγανότητα και ανθεκτικότητα. Αναλυτικότερα, οι γεωμεμβράνες πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) αποτελούν το βασικό στεγανωτικό στοιχείο των σύγχρονων Χ.Υ.Τ.Α., λόγω της πολύ χαμηλής υδροπερατότητας και της υψηλής χημικής αντοχής τους, ενώ οι συμπτυκνωμένες αργιλικές στρώσεις λειτουργούν ως φυσικός γεωλογικός φραγμός, των οποίων η αποτελεσματικότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του υλικού και τον βαθμό συμπίκνωσης. Οι γεωσυνθετικοί αργιλικοί φραγμοί (GCLs) παρουσιάζουν ευκολία εγκατάστασης και πολύ χαμηλή διαπερατότητα λόγω μικρότερου πάχους, ενώ τα σύνθετα συστήματα στεγανοποίησης (composite liners), συνδυάζουν γεωμεμβράνη και αργιλικό φραγμό, προσφέροντας υψηλότερο επίπεδο προστασίας και ως εκ τούτου αποτελώντας τη βέλτιστη πρακτική σε σύγχρονες εγκαταστάσεις.

Η ανάλυση των διεθνών παραδειγμάτων ανέδειξε τη σημασία της προσαρμογής των τεχνικών λύσεων στις τοπικές γεωλογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Στην περίπτωση του Χ.Υ.Τ.Α. της Sighisoara στη Ρουμανία, η κατασκευή πραγματοποιήθηκε εν μέρει πάνω σε προϋπάρχοντα απορριμματικό όγκο, γεγονός που οδήγησε στην ανάγκη ενίσχυσης της φέρουσας ικανότητας του υποστρώματος. Ως εκ τούτου, η χρήση γεωσυνθετικών υλικών σε συνδυασμό με φυσικά υλικά επέτρεψε την αποτελεσματική αντιμετώπιση των γεωτεχνικών προβλημάτων. Αντίθετα, στον Χ.Υ.Τ.Α. του Βελγίου, η κύρια πρόκληση σχετιζόταν με την υψηλή διαπερατότητα του αμμώδους γεωλογικού σχηματισμού. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε ένα ιδιαίτερα εξελιγμένο πολυστρωματικό σύστημα στεγανοποίησης, με εκτεταμένη χρήση γεωφασμάτων, γεωμεμβρανών και αργιλικών στρώσεων. Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο περιπτώσεων ανέδειξε την μη ύπαρξη μίας ενιαίας βέλτιστης λύσης στεγανοποίησης, αλλά την επιλογή του κατάλληλου συστήματος, το οποίο εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες του έργου. Η μελέτη του Χ.Υ.Τ.Α. Αρναίας κατέδειξε την εφαρμογή

ενός σύγχρονου και ολοκληρωμένου συστήματος στεγανοποίησης, το οποίο συμμορφώνεται πλήρως με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο. Η κατασκευή περιλάμβανε τη χρήση τεχνητού γεωλογικού φραγμού από συμπυκνωμένη άργιλο, σε συνδυασμό με γεωμεμβράνη HDPE, γεωύφασμα προστασίας και αποστραγγιστική στρώση, εξασφαλίζοντας υψηλό επίπεδο στεγανότητας και αποτελεσματική συλλογή στραγγισμάτων. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη σωστή προετοιμασία της υπόβασης, στην ποιότητα κατασκευής των στρώσεων και στην εφαρμογή ελέγχων κατά τη διάρκεια των εργασιών.

Συνοψίζοντας, διαπιστώνεται ότι η στεγανοποίηση αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία των Χ.Υ.Τ.Α. Τα γεωσυνθετικά υλικά έχουν καθιερωθεί ως βασικά στοιχεία των σύγχρονων συστημάτων, ενώ τα σύνθετα συστήματα (γεωμεμβράνη σε συνδυασμό με αργιλικό φραγμό ή γεωσυνθετικό αργιλικό φραγμό – GCL) παρέχουν το υψηλότερο επίπεδο προστασίας έναντι διαρροών. Με βάση τα συμπεράσματα της εργασίας, προτείνεται η ευρύτερη αξιοποίηση γεωσυνθετικών αργιλικών φραγμών (GCLs), ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η φυσική άργιλος δεν πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές, καθώς και η ενίσχυση των διαδικασιών ποιοτικού ελέγχου κατά την κατασκευή των συστημάτων στεγανοποίησης. Επιπλέον, κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω έρευνα σχετικά με τη μακροχρόνια συμπεριφορά των γεωσυνθετικών υλικών υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση κριτηρίων βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής απόδοσης στον σχεδιασμό των Χ.Υ.Τ.Α.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσσες Πηγές

Aldaef AA, Rayhani MT (2015). “Hydraulic performance of compacted clay liners under simulated daily thermal cycles,”. J Environ Manag 162:171–178

Barrett, W. M., Jr, Stessel, R. I., & Fetterly, F. A., 3rd (1999). Evaluation of Chemical Compatibility Testing of Geomembranes Using the Comprehensive Test System and EPA Method 9090. Journal of the Air & Waste Management Association (1995), 49(9), 1027–1038.

Bello A., (2015). “Acceptable zone for reddish brown tropical soil as liner material,”. Pac J Sci Technol 16(1):21–32.

Bergaya, F., Theng, B. K. G., & Lagaly, G. (2006). Handbook of clay science. Elsevier.

Bonaparte, R., Giroud, J.P., and B.A. Gross (1989) “Rates of Leakage Through Landfill Liners,” Geosynthetics '89 Conference Proceedings, Industrial Fabrics Association International (IFAI), St. Paul, Minnesota, pp. 18-29.

Bouazza, A. (2002). Review Article: Geosynthetic Clay Liners, Geotextiles and Geomembranes, 20, 3-17, 2002.

Budihardjo, M. A., F. I. Muhammad, A. R. Rizaldianto, E. Sutrisno, and I. W. Wardhana. (2019) “Stability performance of the mixture of bentonite and zeolite as landfill liner.” E3S Web Conf. 125: 07012.

Carrubba, P. (2024). Laboratory Evaluation of Geosynthetic Interface Friction under Low Stress. Polymers, 16(17), 2519.

Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Bjerg, P.L., Jensen, D.L., Christensen, J.B., et al. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes: Field observations and reactive transport modeling. Environmental Science & Technology, 35(4), 436-449.

Dongna Zhang, Houbu Li, Nan Ding, Zhao Zhang, Xiaodong Shao (2024); Transport Behavior of Pure and Mixed Gas through Thermoplastic-Lined Pipes Materials. *J. Test. Eval.*; 52 (4): 2503–2514

Eith AW, Koerner GR (1997) Assessment of HDPE geomembrane performance in a municipal waste landfill double liner system after eight years of service. *Geotext Geomembr* 15(4–6):277–287

Estornell, P.; Daniel, D.E. (1992) Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners. *J. Geotech. Eng.*, 118, 1592–1606.

European Commission (1999). *Council Directive 1999/31/EC on the landfill of waste*. Official Journal of the European Communities.

Feng, S.-J.; Chang, J.J. & Chen, H.X. (2018). Seismic analysis of landfill considering the effect of GM-GCL interface within liner. *Soil Dynamics and Earthquake Eng*, 107, 152–163.

Feodorov et al., (2000) Use of geosynthetics in landfills. Case studies from Romania. *EuroGeo 2*; Bologna Italy, Volume 2

Fox, P. J. & Stark, T. D. (2015). State-of-the-art report: GCL shear strength and its measurement–ten-year update. *Geosynthetics Int*, 22(1), 3-47.

Giroud, Jeanpierre. (2016). Leakage Control using Geomembrane Liners. *Soils and Rocks*. 39. 213-235.

Goren S (2012) Design parameters and possible soil deformation in landfill areas. *Int J Mod Res Eng Technol* 43(3)

Guglielmetti, J.I., Sprague, C.J., and M.J. Coyle (1997) “Geomembrane Installation and Construction Survivability,” *Industrial Fabrics Association International (IFAI)*, St. Paul, Minnesota, *Geosynthetics ‘97 Conference Proceedings*, pp. 235-254.

Hillier, Stephen. (1978). Clay mineralogy. In book: *Sedimentology*; pp. 223-228

Hughes KL, Christy AD, Heimlich JE (2008) Landfill types and liner systems. *Extension Fact Sheet*, pp 1–4

Idris A, Inanc B, Hassan MN (2004) Overview of waste disposal and landfills/dumps in Asian countries. *J Mater Cycles Waste Manag* 6(2):104–110

Janajreh, Isam. (2014). Co-firing of enteromorpha prolifera algae and rtc coal in a down draft gasifier: material characterization and flow simulation. *Journal of Solid Waste Technology and Management*. 41.

Jeans, C. V. (1998). MOORE, D. M. & REYNOLDS, R. C., Jr. 1997. *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*, 2nd ed. xviii + 378 pp. Oxford, New York: Oxford University Press.

Koerner R. M. (1997), *Designing with Geosynthetics* (4th edition), Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Koerner, R. M. (2005). *Designing with Geosynthetics*, 5th Ed, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ

Koerner, R.M. (2012) *Designing with Geosynthetics*. 6th Edition, Xlibris Publishing Co., New York.

Kong, D.-J., Wu, H.-N., Chai, J.-C., & Arulrajah, A. (2017). State-Of-The-Art Review of Geosynthetic Clay Liners. *Sustainability*, 9(11), 2110.

Kundiri AM, Osinubi KJ “ Reliability evaluation of two compacted tropical soils for use in municipal solid waste containment application,” In: *The international congress on environmental geotechnics*. Springer, Singapore, pp 544–554, 2018.

Lent, D. (n.d). Solar energy generates revenue from closed landfills. Tetra Tech. <https://www.tetrattech.com/insights/solar-energy-generates-revenue-from-closed-landfills/>
(Accessed on: 24/04/2026)

Lupo, J.F. (2010) Liner system design for heap leach pads. *Geotext. Geomembr.*, 28, 163–173.

Malek, M. I. A., & Shaaban, M. G. (2008). Landfill: Common method and practices of solid wastes disposal in Malaysia. In Proceedings of the International Solid Waste Association (ISWA) Conference, Singapore.

Manea, S., Feodorov, V., Sofrone, D.1998. Limitations of clay for landfill applications, Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisbon, Portugal, September 7 – 11, 1998

Manoj K, Soni (2015) “A study on the technique to improve desiccation cracks,” . Int J Res Adv Eng Technol 1(3):24–26.

Meerleer et al., (2000) A case history of geosynthetics used for the Biffa Landfill site, south of Brussels, Belgium. EuroGeo 2; Bologna Italy; Volume 2

Moraci N, Busana S, Cortellazzo G, Favaretti M, Mandaglio MC, Schepis M (2018) “Design and construction of a compacted clayliner in cover system of a municipal solid waste (MSW) landfill using nonstandard procedures,”. Can Geotech J 55(8):1182–1192

Najafi F, Chegenizadeh A, Nikraz H “A review on GCL performance in geotechnical engineering.” Int J Biol Ecol Environ Sci 1(3):104–107, 2012.

Onyelowe, Engr Professor Kennedy & Obianyo, Ifeyinwa & Onwualu, Peter & Onyia, Michael & Chizirim, Chima. (2021). Morphology and mineralogy of rice husk ash treated soil for green and sustainable landfill liner construction. Cleaner Materials. 1. 1-12.

Othman, M.A., Bonaparte, R., and B.A. Gross (1996) “Preliminary Results of Study of Composite Liner Field Performance,” Proceedings of the 10th GRI Conference, Geosynthetic Research Institute, Drexel University, Philadelphia, PA, pp. 110-137.

Ozbay, I. (2015) “Evaluation of municipal solid waste management practices for an industrialized city,”. Pol. J. Environ. Stud., 24, 637–644.

Peggs, I.D. (1993) “Practical Geoelectric Leak Surveys With Hand-Held, Remote and Water Lance Probes,” Industrial Fabrics Association International (IFAI), St. Paul, Minnesota, Geosynthetics ‘93 Conference Proceedings, pp. 1523-1532.

Rowe, R. K. (2010). Long-term performance of contaminant barrier systems. *Géotechnique*, 55(9), 631-678.

Rowe, Ronald & Sangam, Henri & Lake, Craig. (2003). Evaluation of an HDPE geomembrane after 14 years as a leachate lagoon liner. *Canadian Geotechnical Journal*. 40. pp. 536-550.

Sarkar, J. & D. K. Das. (2019) “Enhanced strength in novel nanocomposites prepared by reinforcing graphene in red soil and fly ash bricks.” *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 26: 1322–1328

Sharma, H. D., & Lewis, S. P. (1994). Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: Design and evaluation. John Wiley & Sons Inc., New York

Shimaoka T, Matsufuji Y, Hanashima M (2000) Characteristic and mechanism of semi-aerobic landfill on stabilization of solid waste. In: First intercontinental landfill research symposia.

Sohoo, I., Ritzkowski, M., Sultan, M., Farooq, M., & Kuchta, K. (2022). Conceptualization of Bioreactor Landfill Approach for Sustainable Waste Management in Karachi, Pakistan. *Sustainability*, 14(6), 3364.

Tashiro, T. (2011, September 20–22) The “Fukuoka Method”: Semi-Aerobic Landfill Technology. In Proceedings of the IRBC Conference, Metro Vancouver, BC, Canada,; Available online: http://www.metrovancouver.org/2011IRBC/Program/IRBCDocs/IRBCFactsheet_FukuokaMethodWasteMgmt_Fukuoka.pdf. (Accessed on: 24/04/2026)

Tedder, R.B (1997) “Evaluating the Performance of Florida Double-Lined Landfills,” Industrial Fabrics Association International (IFAI), St. Paul, Minnesota, Geosynthetics ‘97 Conference Proceedings, pp. 425-438.

Tomlinson, T. (2010). “Highlighting progress on biochar research, projects, and technology: Third international biochar conference: IBI 2010; Rio de Janeiro, Brazil, 12–15 September 2010.” *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 91 (46): 432–432

Tonini, D.; Manfredi, S.; Bakas, I.; Kai-Sørensen Brogaard, L.; Damgaard, A. (2018) Life Cycle Assessment of Landfilling. In Solid Waste Landfilling; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands,; pp. 955–972.

Tuomela, A., Ronkanen, A.-K., Rossi, P. M., Rauhala, A., Haapasalo, H., & Kujala, K. (2021). Using Geomembrane Liners to Reduce Seepage through the Base of Tailings Ponds—A Review and a Framework for Design Guidelines. *Geosciences*, 11(2), 93.

U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). *Bioreactor landfills*. Available online: <https://www.epa.gov/landfills/bioreactor-landfills> (Accessed on: 24/04/2026)

US EPA (2005) Landfill Gas Emissions Model (LandGem) Version 3.02 User's Guide. United States Environmental Protection Agency, EPA-600/R-05/047.

U.S. Environmental Protection Agency. (1992). Available online: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9090a.pdf> (Accessed on: 24/04/2026)

WANSHENGLI. (n.d.). 200m composite geonet drainage layer network geosynthetics for solid waste project reinforcement. Available online: <https://www.geosynthetic-fabric.com/sale-36228997-200m-composite-geonet-drainage-layer-network-geosynthetics-for-solid-waste-project-reinforcement.html> (Accessed on: 24/04/2026)

Warith, M.A. (2003) Solid waste management: New trends in landfill design. *Emirates J. Eng. Res.*, 8, 61–70.

Widomski MK, Stępniewski W, Musz-Pomorska A (2018) Clays of different plasticity as materials for landfill liners in rural systems of sustainable waste management. *Sustainability* 10(7):7–10

Yesilnacar, M., Cetin, H., 2005. Site selection for hazardous wastes: A case study from the GAP area, Turkey. *Engineering Geology* 81, 371–388.

Yilmaz, I., and B. Civelekoglu. (2009) “Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils.” *Appl. Clay Sci.* 44 (1–2): 166–172.

Yong LL, Emmanuel E, Purwani R, Anggraini V “Geotechnical assessment of Malaysian residual soils for utilization as clay liners in engineered landfills,”. Int J GEOMATE 16(58):20–25, 2019.

You G. (2002) Polyethylene Geomembrane Liners in Containment Applications, Proceedings of Symposium of Ground Improvement and Geosynthetics, Bangkok, Thailand, 12-13 December 2002, pp 98-114.

Yu B, El-Zein A “Experimental investigation of the effect of airgaps in preventing desiccation of bentonite in geosynthetic clay liners exposed to high temperatures,”. Geotext Geomembr 47(2):142–153, 2019.

Zhao, R., Anderson, N., & Sun, J. (2020). Geophysical investigation of a solid waste disposal site using integrated electrical resistivity tomography and multichannel analyses of surface waves methods. Journal of Geoscience and Environment Protection, 8(3).

Ελληνόγλωσσες Πηγές

Γεωργιάδης, Θ., Καλλέργης, Γ., Φερεντίνος, Γ., Ρεμουντάκη, Ε., Ζιώμας, Ι., Ιγνατιάδου, Α., Παπαθεοδώρου, Γ., Καμπεζίδης, Χ., Κομνίτσας, Χ., Σκορδίλης, Α., 2004. Φυσικό περιβάλλον και ρύπανση. Τόμος Δ' «Διάθεση αποβλήτων και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον». Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Γκούσκος, Ζ. (2000). Διαχείριση διασταλλαγμάτων από χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Καρακασίδης, Ν., 1999. Συσκευασία και Περιβάλλον, 2nd ed. ΙΩΝ.

Κοινή Υπουργική Απόφαση 29407/3508/2002. (2002). Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων. Φύλλο Εφημερίδας της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Β' 1572/19.12.2002.

Κοινοπραξία Μηχανική Περιβάλλοντος Α.Ε. – THALIS E.S. S.A. (2013). Μελέτη εφαρμογής έργου ΧΥΤΑ/Υ Αρναίας. Σε συνεργασία με HYDROMENT Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. και Καραγεωργίου Ευστράτιος. Δήμος Αριστοτέλη.

Κομίλης Δ., (2012): Κριτήρια Χωρόθετησης ΧΥΤΑ, Εκδόσεις ΔΠΘ, Ξάνθη 2012.

Σκορδύλης Αδαμάντιος (2001) ‘Ελεγχόμενη Εναπόθεση Στερεών μη Επικίνδυνων Αποβλήτων’, ΙΩΝ

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2021). Αριθμ. ΥΠΕΝ/ΔΔΑ/90439/1846: Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων σε εναρμόνιση με τις διατάξεις της οδηγίας 99/31/ΕΚ του Συμβουλίου της 26ης Απριλίου 1999, όπως τροποποιήθηκε με την οδηγία (ΕΕ) 2018/850 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 30ής Μαΐου 2018. ΦΕΚ 4514/Β/30.9.2021.

Φουντούλης Ι., Ανδρεαδάκης Μ., (2009): ΧΥΤΑ – ΧΥΤΥ, Χωροθέτηση, Κριτήρια Επιλογής Θέσεων και Συγκριτική Αξιολόγηση, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Αθήνα.